

# Енергосберегающие технологии

УДК 669.787:621.783.22.007.4

**Карп И.Н., Зайвый А.Н., Марцевой Е.П., Пьяных К.Е.***Институт газа НАН Украины, Киев*

## Использование кислорода и обогащенного кислородом воздуха в нагревательных печах, колодцах, стендах разогрева сталеразливочных ковшей

Замена воздуха кислородом на 500–900 °С повышает температуру горения газовых топлив, в 3,5 раза уменьшает объем продуктов сгорания и количество уносимого ими тепла при одинаковой температуре на выходе из печи и почти в 2 раза повышает излучательную способность факела. Эти свойства газокислородного пламени создают предпосылки для широкого применения кислорода в процессах сжигания топлив в нагревательных печах и устройствах. Технологии Flameless Oxy-fuel и Diluted Oxygen Combustion устраняют опасность перегрева и пережога металла и кладки. Примеры применения кислорода в процессах нагрева металла в печах за рубежом подтверждают поразительные результаты: увеличение производительности печей, снижение удельного расхода топлива, снижение образования окалины, снижение вредных выбросов при определенных условиях сжигания, упрощение конструкции и эксплуатации печи, возможность отказа от рекуператоров и регенераторов, возможность отказа от эксплуатации одной из печей, высокую маневренность производства.

**Ключевые слова:** кислород, нагревательные печи и устройства, экономия топлива, производительность печи, снижение образования оксидов азота, снижение потерь с окалиной.

Заміна повітря киснем на 500–900 °С підвищує температуру горіння газових палив, у 3,5 рази зменшує обсяг продуктів згорання та кількість тепла, що виноситься ними з печі при однаковій температурі на виході з печі та майже у 2 рази підвищує випромінювальну здатність факелу. Ці властивості газокисневого полум'я створюють передумови для широкого застосування кисню у процесах спалювання палив у нагрівальних печах та пристроях. Технології Flameless Oxy-fuel та Diluted Oxygen Combustion усувають небезпеку перегріву та перепаалу металу та футерівки. Приклади використання кисню у процесах нагрівання металу у печах за кордоном підтверджують вражаючі результати: збільшення продуктивності печей, зниження питомих витрат палива, зниження утворення окалини, зниження шкідливих викидів при певних умовах спалювання, спрощення конструкції та експлуатації печі, можливість відмовлення від рекуператорів та регенераторів, можливість відмовлення від експлуатації однієї з печей, високу маневреність виробництва.

**Ключові слова:** кисень, нагрівальні печі та пристрої, економія палива, продуктивність печі, зниження утворення оксидів азоту, зниження витрат з окалиною.

В последние годы повышение эффективности нагрева металла в методических и камерных печах, нагревательных колодцах, а также эффективного использования топлива на стендах разогрева сталеразливочных ковшей связывают в основном с двумя технологиями: 1) с использованием кислорода в качестве окислителя; 2) с высокотемпературным подогревом воздуха за счет глубокой утилизации теплоты уходящих газов вследствие применения регенеративных горелок [1]. В какой-то мере эти технологии можно рассматривать как конкурирующие, каждая из них имеет и преимущества, и недостатки. В статье [1] отмечается, что выбор той или иной технологии зависит от конкретных обстоятельств для каждого объекта, против чего возразить трудно.

В черной металлургии Украины и стран СНГ кислород в нагревательных печах и устройствах не применяется. По литературным данным, технологии использования кислорода получили широкое распространение в США, Швеции, Германии, Франции, Южной Корее, где его широко используют при нагреве металла в печах и других технологических объектах. На 2009 г. в черной металлургии в мире на кислороде работало 120 печей [2]. Приводимые в публикациях результаты использования кислорода в качестве окислителя поразительны: удельные расходы топлива на нагрев металла составляют часто около 37 кг у.т./т металла и даже 32 кг у.т./т, выбросы оксидов азота снижаются в несколько раз, уменьшается угар металла [2–5].

Газокислородное отопление получило распространение и в стекловарении. По сведениям из Института газовой технологии (Чикаго), в США практически не осталось традиционных регенеративных стекловаренных печей, все работают на кислороде. Основным побудительным аргументом в этом случае явилось снижение выбросов оксидов азота с уходящими дымовыми газами.

Эффективность применения кислорода в качестве окислителя при сжигании газов определяется по сути одним фактором — исключением балластного азота из участия в процессе сжигания топлив. Как следствие, физические основы эффективности применения кислорода включают такие параметры: высокая температура горения; высокая концентрация тепловой мощности в единице объема факела; небольшой по сравнению с горением с воздухом объем продуктов сгорания топлива, следовательно, меньший вынос тепла с уходящими газами при одинаковой температуре; турбулизация потока продуктов горения, что увеличивает теплоотдачу конвекцией; увеличение теплового потока к металлу (кладке) вследствие повышения концентрации в продуктах горения излучающих трех-

**Таблица 1. Пределы воспламенения газов, %**

Газы	С воздухом	В кислороде
Бутан	1,9/8,5	1,8/49
Оксид углерода	12,5/74,2	15,5/94
Водород	4,0/74,2	4,0/94
Метан	5,3/14	5,1/61
Пропан	2,2/9,5	2,3/55

*Примечание.* В числителе — нижний, в знаменателе — верхний предел.

атомных газов; рекомбинация диссоциированных продуктов сгорания на нагреваемой поверхности с передачей ей значительной части скрытой теплоты рекомбинации в технологиях прямого нагрева металла газокислородным пламенем.

Физические и технологические аспекты использования кислорода частично рассмотрены в [6]. Температура зажигания метана, водорода и оксида углерода в смесях с кислородом на 76, 12 и 21 °С ниже, чем в смесях с воздухом, и составляет соответственно 556, 560 и 588 °С. Скорость распространения пламени водорода в смеси с кислородом в 4,2 раза и метана в 10,0 раз выше по сравнению со смесями с воздухом и составляет 11,75 и 3,95 м/с. Пределы воспламенения газов в смесях с воздухом и кислородом приведены в табл.1 [6]. Пределы воспламенения СО в кислороде существенно отличаются от таковых для других газов, что объясняется каталитическим влиянием паров воды на горение СО.

Значения скоростей распространения пламени и пределов воспламенения газов с кислородом могут представлять интерес в случае их сжигания в виде предварительно подготовленных смесей. В подавляющем большинстве случаев сжигание газов с кислородом осуществляется в диффузионной области.

Рассчитанная по программе «Терра» зависимость температуры горения от содержания

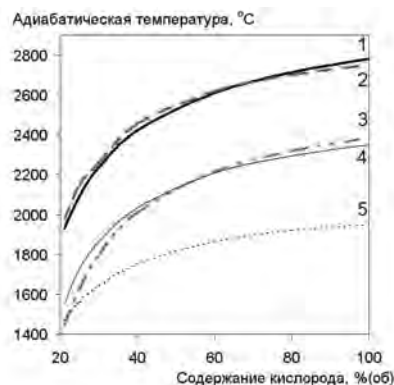


Рис.1. Зависимость температуры горения газов от содержания кислорода в окислителе при  $\alpha = 1,0$ : 1 — природный газ; 2 — коксовый газ; 3 — коксодоменная смесь (2200 ккал/м<sup>3</sup>); 4 — природно-доменная смесь газов (2700 ккал/м<sup>3</sup>); 5 — доменный газ.

кислорода в окислителе для наиболее распространенных в металлургии газовых топлив приведена на рис.1. Видно, что основной подъем температуры горения происходит до концентрации кислорода 50 %, а при более высоких концентрациях рост температуры замедляется вследствие увеличения расхода теплоты на диссоциацию продуктов горения. Температура горения, например, природного газа при таком обогащении такая же, какую можно было бы достичь при подогреве воздуха до 1450 °С, что практически нереально.

Выгода от повышения температуры горения в кислороде очевидна — это возрастание теплового потока от пламени пропорционально температуре в степени 3,5. Однако, высокие температуры среды могут быть не только благом, но при неправильном использовании кислорода привести к местным перегревам и разрушениям кладки печей и пережогу металла. Опасность перегрева и пережога металла и футеровки долгое время была одной из главных причин, почему кислород не применялся в нагревательных печах и устройствах как окислитель при горении топлив, хотя в мартеновском производстве он использовался для интенсификации горения с 1960-х гг.

Другим сдерживающим применением кислорода технологическим фактором была опасность увеличения с дымовыми газами выбросов токсичных оксидов азота. В работе [7] приведены термодинамически равновесные концентрации NO в продуктах сгорания природного газа с кислородом. Показано, что при содержании кислорода в окислителе 98 %, адиабатической температуре горения немного выше 2800 °С и  $\alpha = 1,0$  содержание NO составляет 0,2 % (об.), а при содержании кислорода 40 % — более 1 % (об.), что в несколько раз превышает нормативные требования.

Обе эти опасности устраняются при использовании технологий, получивших название FLOX (Flameless Oxy-fuel — беспламенное газокислородное сжигание), или DOC (Diluted Oxygen Combustion — сжигание с кислородом при разбавлении). Они идентичны и представляют собой не беспламенное сжигание, а сжигание в пламени, которое становится невидимым при температурах выше 850 °С. Топливо и кислород подаются с высокими скоростями истечения из сопел газокислородных горелок, так что сжигание происходит в пламени, оторванном от среза горелки. На участке отрыва в струю инжектируются продукты сгорания из печного пространства, отдавшие тепло металлу и кладке. Благодаря разбавлению газокислородного пламени более холодными продуктами горения температура факела снижается и в некоторых слу-

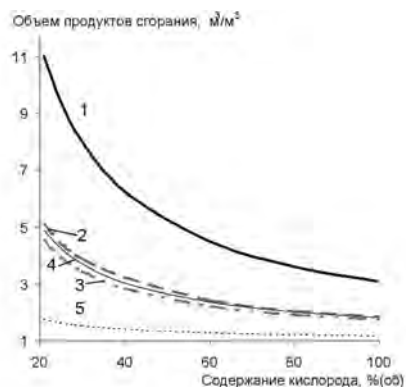


Рис.2. Объем продуктов сгорания газовых топлив в зависимости от содержания кислорода в окислителе при  $\alpha = 1,0$ . Обозначение как на рис.1.

чаях может быть ниже, чем при сжигании с воздухом. Одновременно снижается и концентрация оксидов азота.

Одним из факторов, наиболее заметно влияющих на повышение эффективности использования топлив при их сжигании с кислородом, является уменьшение объема продуктов сгорания по сравнению со сжиганием с воздухом. Во сколько раз уменьшается объем продуктов сгорания, во столько раз повышается эффективность использования топлива (при одинаковой температуре уходящих газов при сжигании с неподогретым воздухом).

Снижение объема продуктов сгорания при сжигании наиболее часто применяемых в металлургии газов приведено на рис.2. Видно, что для рассмотренных газовых топлив объем дымовых газов снижается приблизительно в 3,5 раза. Однако, это не означает, что расход топлива обязательно уменьшится во столько же раз, так как на практике температуры уходящих газов газокислородного пламени по условиям теплообмена могут все же быть несколько выше, чем газозвудушных.

Увеличение теплового потока от топливно-кислородного пламени к нагреваемому металлу, то есть интенсификация нагрева металла происходит вследствие увеличения излучательной способности факела от увеличения концентрации в нем трехатомных газов. Как отмечалось, современные технологии сжигания газов с кислородом реализуются при одинаковой температуре газозвудушного и газокислородного пламени, следовательно, интенсификация нагрева излучением возможна только за счет увеличения излучательной способности факела. Как следует из формулы Стефана — Больцмана, тепловой поток возрастает пропорционально первой степени излучательной способности пламени. На рис.3 приведены значения степени

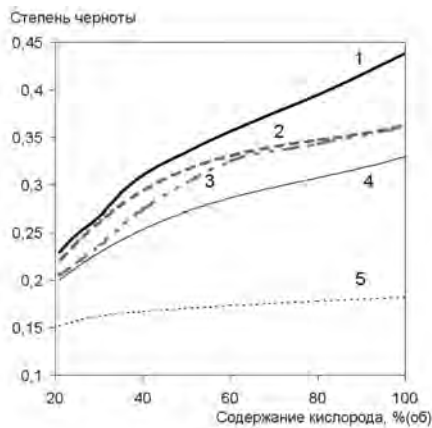


Рис.3. Степень черноты продуктов сгорания газовых топлив с кислородом и обогащенным воздухом при 1200 °С. Обозначение как на рис.1.

черноты пламени при сжигании газовых топлив с кислородом или с обогащенным воздухом.

Количество чистого кислорода и воздуха в зависимости от процентного содержания кислорода в обогащенном воздухе  $A$  находят по формулам [8],  $\text{м}^3/\text{м}^3$  газа:

$$V_{O_2} = \frac{21}{79} \cdot \frac{A - 21}{A} L_0 \alpha;$$

$$V_a = \frac{21}{79} \cdot \frac{100 - A}{A} L_0 \alpha.$$

Совокупность свойств газокислородного пламени позволяет получить такие преимущества по сравнению с традиционной технологией сжигания: увеличение производительности печи, снижение удельного расхода топлива, снижение образования окалины, снижение вредных выбросов при определенных условиях сжигания, упрощение конструкции и эксплуатации печи, возможность отказа от рекуператоров и регенераторов, возможность отказа от эксплуатации одной из печей, высокая маневренность производства. Экономия топлива от применения кислорода в качестве окислителя, по оценкам [6], показана на рис.4.

К этим оценкам следует относиться критически. Реально экономия топлива может изме-



Рис.4. Экономия топлива при его сжигании с кислородом или обогащенным воздухом.

няться в зависимости от конкретных условий в пределах от нескольких процентов до нескольких раз.

Как отмечалось выше, кислород в качестве окислителя не применялся в нагревательных печах и устройствах вследствие его высокой стоимости, отсутствия приемлемой технологии применения, опасности перегрева и пережога металла и кладки, а также экологических ограничений. В настоящее время применение кислорода в нагревательных устройствах стало возможным потому, что значительно усовершенствовалась технология его производства (табл.2) [6].

Реально на некоторых заводах Украины энергозатраты составляют  $0,42 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$  кислорода. Короткоцикловую адсорбцию или мембранное разделение воздуха применяют для небольших объемов производства ( $300\text{--}5000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и невысокой чистоты кислорода. Энергозатраты могут быть те же, что и по криогенной технологии.

Разработаны технологии применения кислорода в нагревательных печах, в том числе низкотемпературных (отжига, нормализации, отпуска), обеспечивающие отсутствие пережога и выполнение требований по выбросам в атмосферу: FLOX и DOC. Технологии разработаны фирмами Linde и Praxair (поставщиками оборудования по производству кислорода) совместно с металлургическими предприятиями. Технологии сходны несмотря на разные названия и основаны на отрыве факела от сопла горелки и его разбавлении более холодными продуктами

Таблица 2. Способы получения кислорода

Способ получения кислорода	Типичный объем производства, тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$	Чистота по кислороду, %	Давление поставки, бар	Расход энергии, кВт·ч/1000 $\text{м}^3$	Примечание
Криогенные установки	35–1400	70–99,5	0,2–17,5	330–360	Низкая стоимость для больших объемов производства Возможно использование побочных продуктов
Доставка в жидком виде	0–35,0	99,5	17,5	1000–1150	Требуются емкости и испарители
Короткоцикловая адсорбция	7,0–70,0	80–95	0,2–1,4	330–860	В основном экономически предпочтительнее при малых объемах производства по сравнению с криогеникой
Мембранная технология	0,7–10,5	28–35	0,07	500–860	Очень простой процесс. Ограниченная чистота кислорода

сгорания, что схематически изображено на рис.5 [2] (см. цветную вкладку).

Далее приведены примеры применения кислорода в нагревательных печах различной мощности и назначения за рубежом. В публикуемых данных содержится достаточно для практического использования сведений и рекомендаций относительно конструкций газокислородных горелок в зависимости от типа печи и технологических особенностей нагрева, мест их установки, режимных параметрах, требований к системам контроля и автоматики. Важно то, что выработка технических решений, доводка и освоение оборудования и технологий во всех случаях производилась совместно специалистами компаний — производителей кислородного оборудования (Linde, Praxair), и металлургических предприятий. Упор в публикациях делается на результатах внедрения газокислородных технологий.

Завод Ovako, Hofors Works (Швеция) [2] производит высококачественные углеродистые и малолегированные стали и изделия из них: прутки, полосу, катанку, трубы, ободы, заготовки для шарикоподшипников, деталей тяжелых автомобилей и изделий общего назначения. Производство проката на всех предприятиях компании 780 тыс. т/год. В работе [2] описывается 13-летний опыт использования кислорода в нагревательных печах. В 1994 г. завод начал испытания по применению кислорода в нагревательных колодцах, на кислород были переведены 4 ячейки (рис.6).

В качестве подрядчика была выбрана компания Linde как имевшая опыт применения кислорода в технологиях нагрева, включая шарикоподшипниковые стали. В 1990 г. эта компания впервые применила кислород в нагревательных печах шарикоподшипниковой стали компании «Timken Co., S.W.Canton, Ohio, USA», достигнув при этом таких результатов: снижение удельного расхода топлива на 63 % и эмиссии вредных веществ с уходящими газами на 74 %, уменьшения времени нагрева от 5 до 2,5–3 ч.

Задачи, поставленные предприятием Ovako, Hofors Works, заключались в следующем: недопустимость снижения качества стали, в особенности подшипниковой и конструкционных марок; увеличение объема производства, главное, гибкости производства в соответствии с потребностями рынка; снижение затрат на топливо, эксплуатационных расходов на поддержание оборудования и затрат на управление выбросами; решение амбициозных задач, связанных с уменьшением эмиссии  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$  в связи с увеличением в Швеции налогов на топливо как источник выбросов.

В настоящее время на этом предприятии на кислороде работают 48 ячеек нагревательных колодцев и две кольцевых нагревательных печи. Удельный расход топлива на кольцевых печах 32,3 кг у.т./т стали при нагреве заготовок до 1107–1257 °С. Газокислородная техника отопления осваивалась последовательно: вначале использовали традиционную технологию (conventional Oxy-fuel), применяли ступенчатое сжигание, затем переходили на 100 %-е использование кислорода (all Oxy-fuel, flameless Oxy-fuel). В 2006 г. на Ovako на all Oxy-fuel были переведены последние 8 ячеек колодцев и удалены газовоздушные горелки и рекуператоры. Был достигнут более равномерный нагрев заготовок и снижены выбросы  $\text{NO}_x$ .

Время нагрева слитков в колодцах при переходе на 100 %-й кислород сократилось с 6 до 2,1 ч; полное время нагрева с учетом выдержки уменьшилось с 9,0 до 5,1 ч (рис.7). Выбросы  $\text{NO}_x$  контролировались также Королевским технологическим институтом и были ниже уровня, обусловленного шведскими нормативами: менее 0,232 lb/mmBtu (421 г/млн ккал, а в принятых в Украине единицах 330 мг/м<sup>3</sup> продуктов сгорания, или 165 млн<sup>-1</sup>) для газовых топлив.

Попытки использовать кислород в нагревательных колодцах предпринимались и в СССР, в частности, на Орско-Халиловском металлургическом комбинате [8]. Кислородные установки были смонтированы на четырех группах колодцев обжимного цеха. Расход кислорода в период подъема температуры составлял 450–500 м<sup>3</sup>/ч, в период выдержки кислород отключался. Было установлено, что применение кислорода тем более эффективно, чем ниже температура посадки слитков. При нагреве слитков горячего посада период подъема температуры сокращался на 1 ч 38 мин, общее время нагрева — на 1 ч, скорость роста температуры в период подъема увеличивалась на 36,3 °С. Производительность колодца увеличивалась на 3,6 т/ч, при этом удельный расход топлива уменьшался на 1,4 кг/т стали. Удельный расход кислорода составлял 11–13 м<sup>3</sup>/т стали. При нагреве слитков холодного посада продолжительность периода подъема температуры уменьшалась на 5 ч, общее время нагрева — на 2,1 ч.

В среднем производительность колодцев повышалась на 10–15 %, удельный расход топлива снижался на 3–5 %, угар металла уменьшался на 16–19 %. Сравнение этих результатов с приведенными по заводу Ovako показывает, что технология «all Oxy-fuel» дает более высокие результаты.

В среднем на Ovako производительность печей увеличилась на 30–50 %, расход топлива



Рис.5. Схема пламени по технологии FLOX.



Рис.6. Общий вид нагревательного колодца, работающего на кислороде, на заводе Ovako, Hofors Works (Швеция).

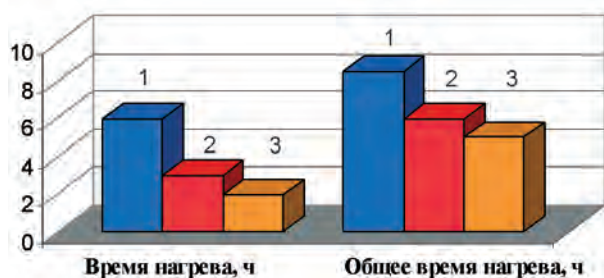


Рис.7. Время нагрева слитков в нагревательных колодцах на заводе Ovako в зависимости от способа их отопления при сжигании топлива: 1 — с воздухом; 2 — с кислородом (факельное сжигание); 3 — с кислородом (беспламенное горение).



Рис.8. Установка «форсировочной» газокислородной горелки мощностью 1,7 млн ккал/ч рядом с газозвушной мощностью 0,428 ккал/ч.

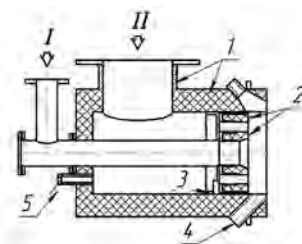
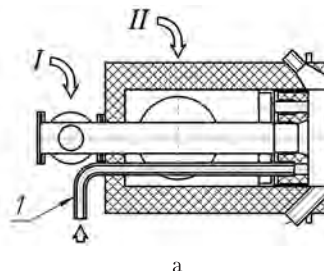


Рис.9. Горелка типа «Bloom»: 1 — огнеупоры; 2 — футерованный огнеупором распределительный диск; 3 — центрирующая вставка; 4 — отверстие для наблюдения и розжига; 5 — смотровое окно. I — газ; II — воздух.



а

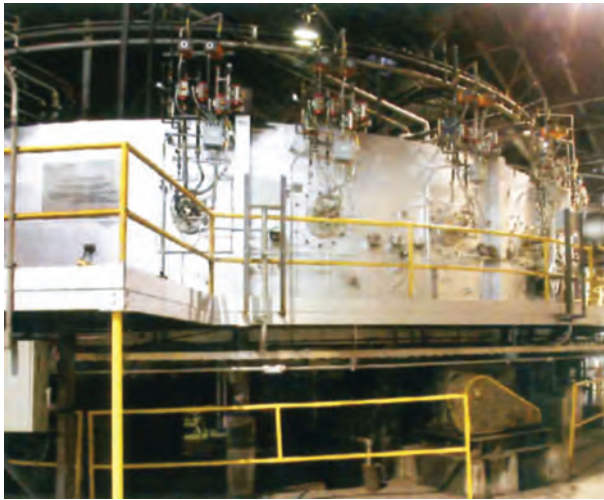


б

Рис.10. Установка кислородной трубки в горелке типа «Bloom» без нарушения брони и кладки: а — схема монтажа трубки подачи кислорода; б — действующая горелка с подачей кислорода; I — газ; II — воздух; III — кислород; 1 — трубопровод подачи кислорода.



а



б

Рис.12. Внешний вид кольцевой печи до (а) и после (б) реконструкции.



Рис.15. Разогрев 60-тонного ковша газокислородной горелкой на заводе Ovako, Hofors Works.

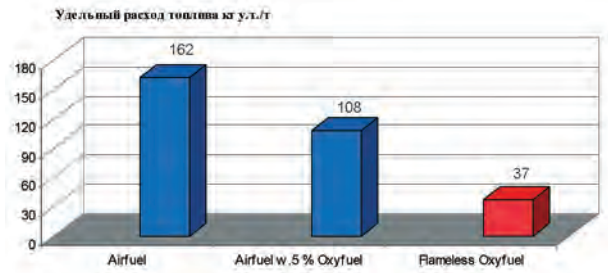


Рис.13. Снижение удельного расхода топлива на нагрев трубной заготовки в кольцевой печи в зависимости от вида отопления.

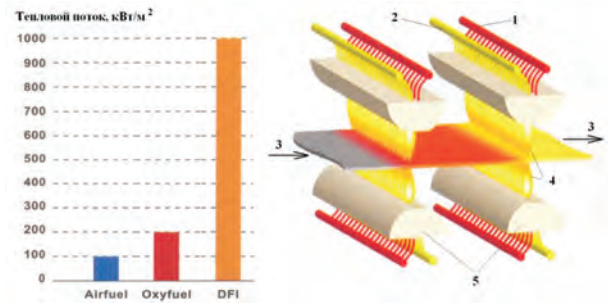


Рис.16. Тепловой поток при прямом нагреве металла газокислородным пламенем (слева), технологическая схема установки прямого нагрева штрипса (справа): 1 – природный газ; 2 – кислород; 3 – штрипс; 4 – пламя; 5 – блок горелок.

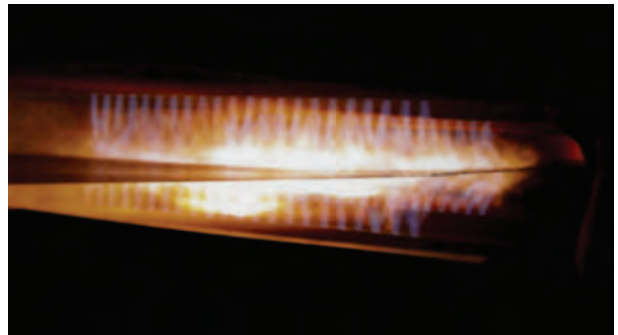


Рис.17. Вид внутри камеры подогрева штрипса прямым газокислородным пламенем до 200 °С на заводе TKS в Finnentrop.

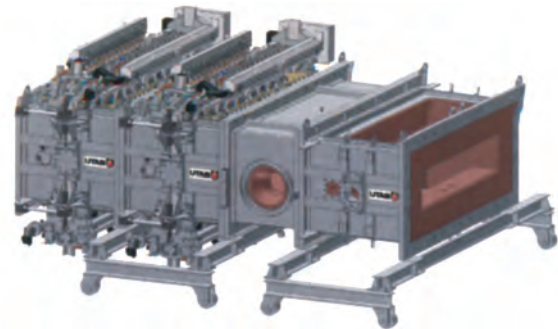


Рис.18. Общий вид установки DFI Оxy-fuel на заводе TKS в Bruckhausen.

снижен на 30–45 % и, как отмечалось, снижены выбросы оксидов азота.

При размещении горелок и выработке тепловых режимов в [2] рекомендуется анализировать температурные профили по длине печи. Утверждается, что, как правило, по разным причинам в печах не используется максимальная установленная проектная тепловая мощность. Считается возможным уменьшить тепловую мощность системы (подсистемы), например, от 10 mmBtu (2,5 млн ккал) при газовоздушном отоплении до 6,7 mmBtu (1,675 млн ккал) при переходе на газокислородное отопление и установить горелки меньшего размера, чтобы эксплуатировать их в режимах, наиболее близких к номинальным. Для оптимизации сжигания при невозможности снижения тепловой нагрузки следует достигать установленных температур в зонах печи по системе «вкл./выкл.».

Определение зон нагрева и размещение горелок зависят от типа печи, особенностей ее проекта и эксплуатации. В рассматриваемой работе фирма Linde опирается на свой опыт переоборудования на газокислородное отопление более 110 печей. В частности, размещение газокислородных горелок облегчается по сравнению с громоздкими газовоздушными горелками благодаря их компактности и небольшому весу. Так, водоохлаждаемая газокислородная горелка по типу Flameless Oxy-fuel с вмонтированным ультрафиолетовым сенсором и контролем пламени мощностью 2,14 млн ккал/ч (эквивалентно 260 м<sup>3</sup>/ч природного газа) имеет диаметр 108 мм и весит от 8,8 до 17,6 кг в зависимости от толщины кладки (рис.8).

При переходе на 100 %-е газокислородное отопление необходимо подкорректировать систему контроля и автоматики. Важно правильно установить термодары во избежание перегрева металла, а также контроля температуры уходящих газов во избежание, хотя и не используемых, но имеющихся рекуператоров. Вследствие значительного уменьшения объема продуктов сгорания при переходе на технологию «all Oxy-fuel» для более точного регулирования давления рекомендуется оборудовать печь отдельными дымоотводящими каналами и датчиками давления, пригодными для измерения давления со значениями менее 10 Па.

Значительный интерес представляет переход на частичное использование кислородного сжигания шестизонной толкательной печи № 2 для нагрева слябов перед горячей прокаткой листа 84" на заводе Arcelor Mittal Steel-Indiana Harbor Works, США [3]. В связи с высокой стоимостью природного газа руководство завода приняло решение о рассмотрении возможности использования в технологии DOC применения

кислорода в нагревательных печах, разработанной фирмой Praxair Inc., и снижении таким образом удельных расходов топлива. Как отмечалось, технологии Flameless и DOC сходны. Некоторое различие в том, что по технологии DOC потоки газа и кислорода разнесены на большее расстояние. Реакционная зона и зона смешения разделены так, чтобы предотвратить прямое перемешивание и горение не разбавленных продуктами сгорания кислорода и газа, избежав таким образом существенного повышения температуры пламени.

Технология DOC была взята за основу перевода печи на частичное использование кислорода в связи с успешным ее применением в нагревательных печах в 1990-е гг. В 2005 г. на кислород была переведена первая нижняя зона печи № 3. В 2007 г. Arcelor Mittal и Praxair пришли к соглашению перевести на кислород также печь № 2. Как и в предыдущем случае, завод поставил целью снижение эксплуатационных расходов без отрицательного влияния на выбросы и управление печью. Кроме того, заводом были поставлены условия о минимальных изменениях в конструкции кладки или еще лучше без таковых, минимальных затрат на реконструкцию, а также возможности безболезненно возврата к газовоздушному отоплению.

Печи завода сооружены в 1968 г. Проектная производительность печи № 2 — 315 т/ч, фактически типичная средняя — 175 т/ч (55,5 %).

Две верхних и две нижних зоны нагрева работают на горячем воздухе (450 °С), а томительные зоны на холодном. Установленная проектная тепловая мощность 196·10<sup>6</sup> ккал/ч. На кислород были переведены все 8 горелок первой зоны нагрева как самой напряженной. Тепловая мощность газокислородных горелок 36,5·10<sup>6</sup> ккал/ч, или 18,6 % установленной тепловой мощности. Выполнение условия о минимальных изменениях кладки и возможности возврата к газовоздушному отоплению облегчалось тем, что печь оборудована горелками типа «Bloom» (цветок) (рис.9), что позволило установить кислородные трубки без нарушения брони и футеровки.

Горелки типа «Bloom» более эффективны по сравнению с распространенными в СНГ горелками ДНБ (труба в трубе), так как они обеспечивают лучшее смешение топлива с воздухом. Газовая трубка устанавливалась по центру горелки, а кислородная в одно из отверстий воздушной перегородки. Внешний вид горелки с установленной кислородной трубкой показан на рис.10.

До температуры 760 °С, превышающей температуру автотермического зажигания, зона ра-



ботала на воздушном сжигании, после чего можно было более безопасно переходить на газокислородное сжигание. Данное условие избыточно, что подтверждается переоборудованием печей, стенов разогрева ковшей с полным удалением воздушных вентиляторов и воздухопроводов на кислородное сжигание. При наличии кислорода нет препятствий для газокислородно-го разогрева зоны.

Первоначально на печи № 2 были установлены такие же горелки, как и в нижней зоне нагрева печи № 3: с одним газовым и одним кислородным соплом. При этом желаемые результаты в начальном периоде не были достигнуты. CFD-моделирование показало, что пламя было слишком длинным и стягивалось к центру зоны, к выходу в рекуперативное пространство, отчего температура боковых стен зоны была ниже требуемой, а температура свода в центре зоны превышала необходимые значения.

Поскольку термопары были установлены в боковых стенах зоны, для достижения заданных температур приходилось форсировать подачу топлива в зону. Замена односопловых газокислородных горелок на многосопловые привела к повышению температуры боковых стен, выравниванию температур по ширине зоны и, в итоге, к снижению расхода топлива.

Результаты применения кислорода в первой верхней сварочной зоне многозонной нагревательной печи: 1) снижение удельного расхода топлива на 0,26 мВт/т (9,2 кг у.т./т, в эквиваленте 7,9 м<sup>3</sup> природного газа на получение 1 т стали); 2) расход кислорода 0,026 кг/т стали, или 18,2 м<sup>3</sup>/т стали; 3) снижение выбросов NO<sub>x</sub> на 25 %; 4) экономический эффект составляет 1,33 долл./т стали.

В условиях Украины стоимость природного газа составляет 600 долл./1000 м<sup>3</sup>, кислорода — 150 долл./1000 м<sup>3</sup>. Если бы такие результаты были достигнуты в Украине, то экономия на газе составляла бы 4,74 долл./т стали, затраты на кислород — 2,73 долл./т стали, прибыль — 2,01 долл./т стали.

На печи производительностью 70 т/ч при 6500 рабочих часов в году экономия составила бы 914550 долл., или более 7 млн грн. Прямой срок окупаемости такой реконструкции составил бы менее одного года.

На заводе Arcelor Mittal Shelby-Tubular Products (Ohio, USA) на газокислородное отопление были переоборудованы две кольцевых печи нагрева трубной заготовки 6,5 дюйма [4]. В 2005 г. перевели одну печь на работу с 5 %-м обогащением воздуха кислородом, при этом расход топлива был снижен на 29 %.

Печь работала на холодном воздухе; часть энергии уходящих газов использовалась в кот-

ле-утилизаторе для производства технологического пара. Для увеличения производства бешовных труб, снижения удельного расхода топлива с одновременным увеличением размера заготовок на 100 %-е использование кислорода в 2007 г. была переоборудована вторая печь. В качестве партнера проекта была приглашена фирма Linde, имевшая к тому времени опыт перевода двух кольцевых нагревательных печей завода Ovako, Hofors Works на кислород по технологии FLOX. Для ознакомления с работой печей на кислороде на заводе Ovako в Швецию были откомандированы специалисты Arcelor Mittal Shelby-Tubular Products.

Продолжительность выполнения всего проекта составила 4 мес, простой на ремонт и реконструкцию — 16 дней. В результате производительность печи увеличена на 25 %, удельный расход топлива снижен на 50 % по сравнению с работой на обогащенном воздухе или на 65 % по сравнению с работой на холодном необогащенном воздухе, улучшилась равномерность нагрева заготовки по длине, на 50 % уменьшилось образование окалины, на 76 % уменьшился выброс NO<sub>x</sub>, срок окупаемости проекта составил 24 мес. Можно предположить, что срок окупаемости определен с учетом целевого строительства кислородных установок, поскольку завод относится к предприятиям неполного металлургического цикла и, по-видимому, не имеет характерных для заводов полного цикла мощных кислородных установок.

По предложению Linde существующие топливно-воздушные горелки общей мощностью 27,25 млн ккал/ч (в эквиваленте 3050 тыс. м<sup>3</sup>/ч природного газа) были заменены керамическими самоохлаждаемыми газокислородными горелками общей мощностью 15,15 млн ккал (в эквиваленте 1700 м<sup>3</sup>/ч природного газа), установленными в тех же гнездах. Количество зон нагрева было увеличено от 4 до 5 с соответствующим контролем температуры (рис.11).

Улучшен контроль давления в печи: удалены два дымоотвода из трех и установлен «активный» регулятор давления; упрощена схема печи — удалены воздухоохлаждаемые перегородки внутри рабочего пространства и воздушные вентиляторы.

В работе [4] также отмечается значительное улучшение условий работы операторов. Удаление вентиляторов, громоздких воздушных коробов и двух дымоотводов (рис.12) существенно снизило уровень шума. Понижилась температура кожуха, уменьшился износ огнеупоров и объем ремонтных работ; выбивание газов из разгрузочного окна не ослепляет оператора.

При переходе на кислород удельный расход топлива уменьшился со 162 на холодном

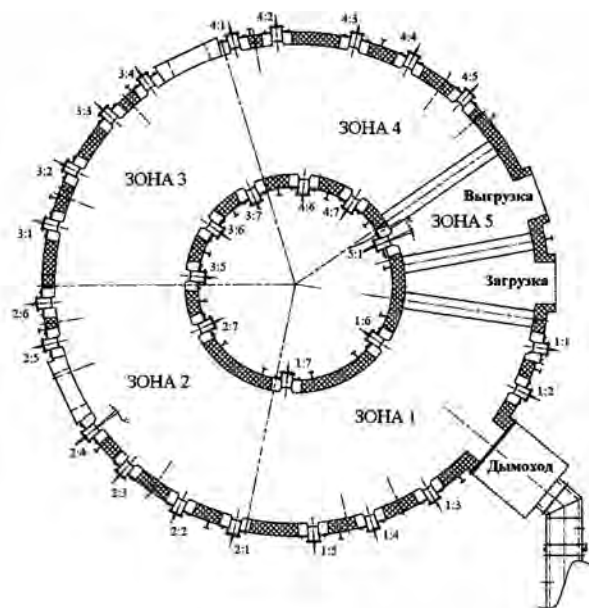


Рис.11. Схема кольцевой нагревательной печи после реконструкции — перевода на 100 %-е использование кислорода в качестве окислителя.

воздухе до 37 кг у.т./т стали (рис.13), а эмиссия NO<sub>x</sub> уменьшилась на 76 % (рис.14).

В статье [4] указаны заводы, на которых в полном объеме применяется технология FLOX: Outokumpu — 15 агрегатов, в том числе печь с шагающими балками (завод в Dederforce); 2 печи с цепным приводом мощностью 16 и 40 МВт (завод в Nyby), где достигнуто увеличение производительности печей и снижение удельных расходов топлива на 40–50 %; заводы Ascometal, Uddenholm Tooling, Scana, где на кислород переведена одна зона многозонной печи, производительность которой увеличена от 300 до 320 т/ч, а также описанные выше заводы Arcelor Mittal и Ovako.

В связи с расширением в Украине конвертерного производства стали возрастает актуальность обеспечения сталеплавильного производства стендами для сушки и разогрева сталераз-

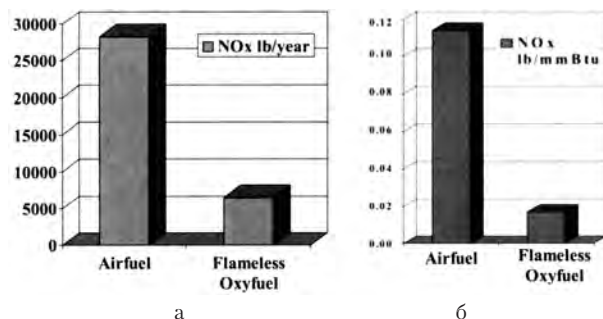


Рис.14. Уменьшение выбросов NO<sub>x</sub> на кольцевой печи при работе на кислороде в годовом (а) и удельном (б) исчислении.

ливочных ковшей и обеспечения их необходимой производительности.

С этой точки зрения представляет интерес применение за рубежом газокислородного разогрева ковшей. На рис.15 показан общий вид стенда разогрева на заводе Ovako, Hofors Works. Технология Oxy-fuel позволила сократить на 20 мин время разогрева ковша, на 15 °С понизить температуру стали на выпуске из электропечи, уменьшить расход природного газа почти на 50 % — до 125 нм<sup>3</sup>/ч (при среднем годовом расходе 83 нм<sup>3</sup>/ч). На время публикации статьи на разных заводах работало 15 установок разогрева.

К разработчикам стендов иногда предъявляют противоречивые требования: обеспечить высокотемпературный скоростной и одновременно глубокий прогрев футеровки ковша. При скоростном нагреве температуру внутренней поверхности футеровки при применении кислорода можно поднять до заданной (обычно 1100–1200 °С) достаточно быстро, однако глубокий прогрев требует времени. Определить оптимальные условия разогрева и предложить производственный технологический регламент разогрева можно с использованием математической модели теплового состояния футеровки, разработанной в Институте газа НАН Украины [10]. Адекватность модели неоднократно подтверждена прямыми измерениями в производственных условиях на ковшах малой и большой (250 т) емкости. Основной эффект высокотемпературного разогрева ковшей заключается в возможности снижения температуры стали на выпуске из конвертера или электропечи, как в приведенном выше примере, что обеспечивает экономию электроэнергии или кислорода, исключает переокисление металла при продувке, что дает возможность уменьшить расход раскислителей и время внепечной обработки стали.

На некоторых заводах применяют технологии прямого нагрева штрипса газокислородным пламенем на линиях его предварительной очистки и отжига при подогреве до 200 °С и выше перед алюминированием или цинкованием [5]. Название технологии — DFI Oxy-fuel (REBOX DFI — Direct Flame Impingement), то есть прямое соударение газокислородного пламени с металлом. Технология используется на заводах Outokumpu Nyby Works (Швеция), Thyssen Krupp's Works в Finntrop и Bruckhausen (Германия), а также POSCO, Pohand (Южная Корея). По сравнению с традиционным газокислородным сжиганием технология REBOX DFI Oxy-fuel более эффективна: тепловой поток увеличивается в 10 раз — до 1000 кВт/м<sup>2</sup> (рис.16), термический КПД достигает 80 %.

Установки REBOX DFI имеют термический КПД около 80 %, что обеспечивает снижение удельного расхода газа. Производительность линий обработки штрипса увеличивается на 30 %. Предварительный подогрев штрипса газокислородным факелом не создает проблем с окислением поверхности даже при ее нагреве до 300 °С. На линиях металлопокрытий любая тонкая окисная пленка на поверхности штрипса восстанавливается в последующей восстановительной зоне. Не исключается также возможность влиять на образование окисной пленки управлением стехиометрией при сжигании.

На заводе Outokumpu Nyby Works (Швеция) по технологии DFI Oxy-fuel перевели на 100 %-е кислородное сжигание линию непрерывного отжига штрипса из нержавеющей стали. Характеристики установки: длина 2 м на входе линии; четыре ряда горелок; установленная мощность 4 МВт; 120 газокислородных горелок. В результате производительность линии увеличилась на 50 % — от 23 до 35 т/ч, снижен расход топлива.

В 2007 г. фирма Linde установила свою систему REBOX DFI на линии гальванизации и алюминирования завода Thyssen Krupp Steel's (TKS) в Bruckhausen, Германия. Ранее такая система была установлена на линии гальванизации на заводе TKS в Finnentrop. В результате производительность линии увеличилась от 82 до 102 т/ч, то есть на 30 %; расход природного газа уменьшен на 5 %. На заводе Finnentrop осуществляется нанесение цинкового покрытия на горячий или холодный штрипс шириной 650–1550 мм и толщиной 0,30–3,25 мм. До установки REBOX DFI на линии имелась секция предварительной электролитической и щеточной очистки. Полная длина печи 130 м, в том числе 48-метровая зона предварительного подогрева. Полная установленная мощность печи 22 МВт, из них 17,5 МВт в зоне предварительного подогрева, работающей на природном газе и подогретом до 450 °С воздухе, и 4 МВт в зоне восстановления, оснащенной излучающими трубами. Максимальная скорость движения штрипса была 180 м/мин, что соответствовало производительности 82 т/ч. Кроме увеличения производительности, система DFI Oxy-fuel позволила очищать поверхность от ненужных частиц, включений, мазута, масел от прокатного стана и подготовить ее к качественной гальванической обработке. Установка 3-метровой секции DFI Oxy-fuel эквивалентна увеличению длины печи на 10 м. Для ее размещения была удалена рекуперативная секция на входе печи. Время реконструкции заняло 12 дней, из которых 4 дня заняла установка секции DFI Oxy-

fuel. На рис.17 показан вид изнутри камеры подогрева штрипса.

Результаты, достигнутые ранее в Finnentrop, были повторены в Bruckhausen: производительность линии возросла от 70 до 90 т/ч.

Установка DFI Oxy-fuel длиной 3,0 м, мощностью 5 МВт, 120 горелок, позволила подогреть штрипс перед алюминированием до нужной температуры. Горелки были установлены в двух секциях, еще две секции были оставлены для возможности увеличения производства (рис.18). Установка DFI Oxy-fuel позволила также обеспечить более качественную очистку штрипса, чем 25-метровая линия предварительной электролитической и щеточной очистки, которая была удалена.

При переходе на частичное или полное использование кислорода в нагревательных печах и устройствах необходимо решить такие задачи:

- а) принять принципиальное технологическое решение: либо использование традиционных технологий (Conventional Oxy-fuel) с сохранением воздушного тракта, либо переход на 100 %-е использование кислорода по технологиям Flameless Oxy-fuel, DOC или DFI Oxy-fuel;
- б) выбрать способ ввода кислорода: непрерывную подачу при частичном использовании, например, в одной или двух зонах многозонной печи, или по системе «on/off» с целью периодического форсирования тепловой нагрузки;
- в) внести изменения в общую тепловую мощность печи и график тепловой нагрузки по зонам;
- г) выбрать конструктивные параметры горелок, их технические характеристики, наличие охлаждения;
- д) откорректировать системы контроля и автоматики, в том числе вызванные изменением объема продуктов горения, а также правильно определить места установки термопар;
- е) оценить экономичность процесса с учетом стоимости топлива и кислорода.

### Выводы

Высокие температуры горения топлив с кислородом и обогащенным кислородом воздухом, высокая концентрация тепловой мощности в единице объема факела и его излучательная способность, значительно меньший по сравнению со сжиганием топлив с воздухом объем продуктов сгорания создают физические предпосылки для применения кислорода в нагревательных печах и устройствах.

Разработанные фирмами Linde и Praxair технологии сжигания кислорода пламенем с невидимым и растворенным печными газами поз-

волили устранить опасность перегрева и пережога металла и кладки и образования сверхнормативного количества оксидов азота.

Многочисленные примеры использования кислорода в качестве окислителя при горении топлив в нагревательных колодцах, кольцевых и методических печах, стендах разогрева сталеразливочных ковшей за рубежом подтверждают экономическую эффективность его применения.

Интерес представляет также технология прямого нагрева металла газокислородным факелом.

### Список литературы

1. Kaufman J.S., Marino J. Regenerative Burners or Oxy-Fuel Burners for Your Furnace Upgrade? // *Ind. Heat.* — 2011. — № 6. — P. 41–43.
2. Fredriksson P., Claesson E., Vesterberg P. et al. Ovako, Hofors Works — 13 Years' Experience of Using Oxy-fuel for Steel Reheating: Background, Solutions and Results // *Iron&Steel Technol.* — 2008. — Vol. 5, № 5. — P. 323–328.
3. Lantz V., Hassenzhl D., Lugnet A. et al. 25 % Increased Reheating Throughput and 50 % reduced Fuel Consumption by Flameless Oxy-fuel at Arcelor Mittal Shelby — Tubular Products // *Ibid.* — 2009. — Vol. 6, № 9. — P. 29–36.
4. Black E., Erfurth F., Kitko G. et al. Installation of a 145-MMBtu/Hour Oxyfuel Firing System on the No.2 Reheat Furnace at Arcelor Mittal's 84-Inch Hot Strip Mill // *Ibid.* — 2010. — Vol. 7, № 5. — P. 278–283.
5. Heiler H.-J., Hogner W., von Scheele J. 30 % Increased Capacity of Metal Coating Lines at Thyssen Krupp Steel // *Ibid.* — P. 305–310.
6. *North American Combustion Handbook.* — Cleveland, Oh. : North American Mfg. Co., 1997. — P. 457.
7. Карп И.Н., Сорока Б.С., Дашевский Л.Н., Семернина С.Д. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах (состав и термодинамические свойства) : Справ. — Киев : Техника, 1967. — 381 с.
8. Справочник конструктора печей прокатного производства / Под ред. В.М.Тымчака. — М. : Металлургия, 1970. — Т. 1. — 575 с.
9. Зырянов В.В., Мулько Г.Н., Жданова Л.Е. и др. Применение кислорода в нагревательных колодцах с центральной горелкой // *Сталь.* — 1986. — № 1. — С. 97–98.
10. Зайвый А.Н., Смородский И.В. Математическое моделирование теплофизических процессов в футеровке сталеразливочного ковша // *Экотехнологии и ресурсосбережение.* — 2007. — № 3. — С. 68–74.

Поступила в редакцию 28.03.12

**Karp I.N., Zayvy A.N., Martsevov E.P., Pyanykh K.E.**

*The Gas Institute of NASU, Kiev*

## Use of Oxygen and Enriched Air in Heating Furnaces, Soaking Pits and Stands of Steel Casting Ladles Heating

Substitution of air by oxygen arises temperature of gaseous fuels combustion at 500–900 °C, decreases combustion products volume at 3,5 times and as consequence heat losses, almost in 2 times increases flame radiation. These properties of gas oxygen flames create a basis for wide use of oxygen for combustion processes in heating furnaces and devices. Flameless Oxyfuel and Diluted Oxygen Combustion technologies eliminate possibilities of metal and lining overheating. The examples of oxygen use in heating processes abroad, described in this paper, confirms extraordinary results — increasing furnaces output, specific fuel consumption, scale formation and nitric oxides decreasing, furnace construction and operation simplify, possibilities of refuse of recuperators or regenerators, stopping one of furnaces, high production flexibility. The tasks, which must be decided for advantages of oxygen use realizing, are listed.

**Key words:** oxygen, heating furnaces and devices, fuel saving, furnace output, nitric oxide and scale formation decreasing.

Received March 28, 2012