

производства кокса и стали может быть получено более 1,3 млрд. м³/год синтез-газа, что соответствует возможности и высокой рентабельности катализа высокооктанового синтетического жидкого топлива с объемом продаж до 2,6 млрд. руб./год.

Выводы. Рассмотрена технологическая схема получения синтез-газа для производства синтетического жидкого топлива с использованием вторичных энергетических ресурсов металлургического предприятия, в частности, конвертерного и коксового газов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юрьев А.Б., Школлер М.Б., Протопопов Е.В., Ганзер Л.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 4. С. 37 – 40.
2. Ярошенко Ю.Г. // Металлургическая теплотехника. 2011. Вып. 3 (18). С. 164 – 176.
3. Лисин В.С. Стратегические ориентиры экономического развития черной металлургии в современных условиях. – М.: Экономика, 2005. – 404 с.
4. Лякишев Н.П., Николаев А.В. // Металлы. 2001. № 5. С. 8 – 18.
5. Шевелев Л.Н. Мировая черная металлургия 1950 – 2000 гг. – М.: Машиностроение, 1999. – 216 с.

6. Николаев А.В. // Сталь. 1993. № 11. С. 14 – 18.
7. Гнездилов Е.А., Жуков А.В., Яковлев А.Д. // Фундаментальные исследования. 2007. № 12. С. 342 – 344.
8. Ионе К.Г. Полифункциональный катализ на цеолитах. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. – 271 с.
9. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов. – М.: Мир, 2003. – 528 с.
10. Использование конвертерного газа в качестве топлива. ЭСКО // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». 2005. № 12. Режим доступа: <http://esco-ecosys.narod.ru/journal/journal48.htm>
11. Назаров В.Г. // Кокс и химия. 2011. № 3. С. 54 – 56.
12. Стефаненко В.Т. // Кокс и химия. 2011. № 3. С. 62 – 65.
13. Ахметов С.А., Ишмиряев М.Х., Кауфман А.А. Технология переработки нефти, газа и твердых горючих ископаемых. – С-Пб.: Недра, 2009. – 832 с.
14. Швидкий В.С., Ладыгичев М.С. Очистка газов. Справочник. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 450 с.
15. Хейфец Л.И., Зеленко В.П., Павлов Ю.В. Элементы теории процессов адсорбционного разделения газовых смесей. – М.: изд. МГУ им. Ломоносова, 2004. – 68 с.
16. Баранов Д.А., Кутепов А.М. Процессы и аппараты. – М.: Академа, 2004. – 304 с.

© 2012 г. А.Б. Юрьев, М.Б. Школлер,
Е.В. Протопопов, Л.А. Ганзер
Поступила 31 августа 2012 г.

УДК 621.331+621.771

**В.И. Мурко, А.А. Уманский, В.И. Карпенко, В.И. Федяев,
Н.А. Чернышева**

Сибирский государственный индустриальный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧАХ*

В связи с имеющейся тенденцией к росту цен на традиционные энергоносители и в дальнейшем к их возрастающему дефициту в настоящее время все большую остроту приобретает проблема использования альтернативных источников получения энергии. Одним из перспективных направлений повышения энергоэффективности является применение новых видов топлива, в частности водоугольного топлива (ВУТ). Это представляет собой дисперсную систему, состоящую из тонкоизмельченного угля (59 – 70 %), воды (20 – 40 %) и реагента-пластификатора (1 %). В зависимости от марки исходного угля состав и теплофизические характеристики такого топлива могут различаться в довольно широких пределах. Теплофизические характеристики ВУТ следующие: температура воспламенения 450 – 650 °С;

температура горения 950 – 1050 °С; низшая теплота сгорания 3000 – 4800 ккал/кг.

В настоящее время в России существует положительный опыт перевода котельных агрегатов с традиционных видов топлив (угля, мазута, газообразного топлива) на водоугольное топлива [1 – 3]. Имеющиеся практические данные позволяют говорить о существенном улучшении технико-экономических и экологических показателей при таком переводе:

– стоимость 1 т условного топлива снижается в 1,5 – 5,0 раз;

– эксплуатационные затраты при хранении, транспортировке и сжигании уменьшаются на 20 – 30 %;

– себестоимость вырабатываемой тепловой энергии снижается в 1,3 – 5,0 раз;

– вредные (пыль, оксиды азота, диоксид серы) выбросы в атмосферу уменьшаются в 1,5 – 3,5 раза.

Несмотря на перечисленные очевидные преимущества ВУТ, область его применения в России на сегодняшний день ограничена только котельными установками. Между тем в странах азиатского региона (например, Ки-

* Материалы статьи подготовлены в процессе реализации проекта в рамках частно-государственного партнерства в сфере реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства при финансовой поддержке правительства Российской Федерации «Разработка технологии и создание пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса, работающего на отходах углеобогащения» (шифр 2010-218-02-174).

тая) водоугольные суспензии, в том числе ВУТ, широко используются в качестве топлива на нагревательных печах сталепрокатных и металлургических заводов [4]. Поэтому перевод нагревательных и термических печей отечественных металлургических и машиностроительных заводов на водоугольное топливо, безусловно, является перспективным направлением с точки зрения энергосбережения и уменьшения вредного воздействия на окружающую среду.

Исходя из опыта использования ВУТ в котельных агрегатах можно спрогнозировать, что использование такого топлива в нагревательных и термических печах будет иметь следующие негативные последствия:

- возникнет необходимость удаления из рабочего пространства печи значительного количества золы, образующейся при сгорании водоугольного топлива;

- за счет наличия на поверхности металла золы снизится скорость его нагрева, так как зола будет выступать в роли теплоизолятора;

- возможно плотное прилипание окалины к основному металлу за счет появления в ее составе легкоплавких соединений, источником которых является зола от сгорания ВУТ; при отсутствии устройств для механического сбива окалины или в случае их недостаточной мощности окалина будет закатываться в заготовку в процессе ее деформации в прокатных клетях, тем самым вызывая появление поверхностных дефектов (рябизны и др.);

- повышение содержания паров воды в печной атмосфере может привести к росту угара и обезуглероживания стали, снижению качества металла.

С целью исследования состава и свойств окалины при использовании для нагрева и термической обработки стали ВУТ проведена серия экспериментов на стендовой установке (рис. 1), предназначенной для изучения процессов приготовления, транспортировки, хранения и сжигания водоугольного топлива, полученного из различных видов исходного сырья: угля, угольных шламов различных марок и зольности.

В ходе проведения экспериментов в холодную топку установки помещали стальные образцы, которые подвергали нагреву. В качестве топлива для нагрева использовали ВУТ, приготовленный из угля марки ССш шахты «Тырганская». Элементный состав рассматриваемого топлива следующий: 86,3 % С; 5,0 % Н₂; 2,2 % N₂; 6,2 % O₂. Характеристики сырья для приготовления ВУТ следующие: влажность 18,0 %; зольность 22,0 %; выход летучих соединений 16,2 %; содержание серы 0,4 %; теплота сгорания 5030 ккал/кг.

Для проведения исследований использовали образцы из стали марки Ст45 шестигранного сечения с размерами сторон 42 мм, длиной 395 мм. Определение температуры металла по ходу нагрева производили с помощью хромель-алюмелевых термопар, которые помещали в предварительно подготовленные отверстия в образцах. С целью уменьшения погрешности иссле-



Рис. 1. Общий вид стендовой установки для сжигания ВУТ

ований температуру каждого образца фиксировали одновременно тремя термопарами, показания которых при обработке результатов усредняли. Следует отметить, что расхождение показаний термопар не превышало 20 °С.

Нагрев стальных образцов производили по двум режимам, отличающихся температурой T нагрева и продолжительностью τ выдержки образцов при высокой температуре (рис. 2). Температурно-временные характеристики первого режима соответствовали условиям нагрева стали в печах для термообработки. Максимальная температура образца при использовании рассматриваемого режима нагрева составила 838 °С, об-

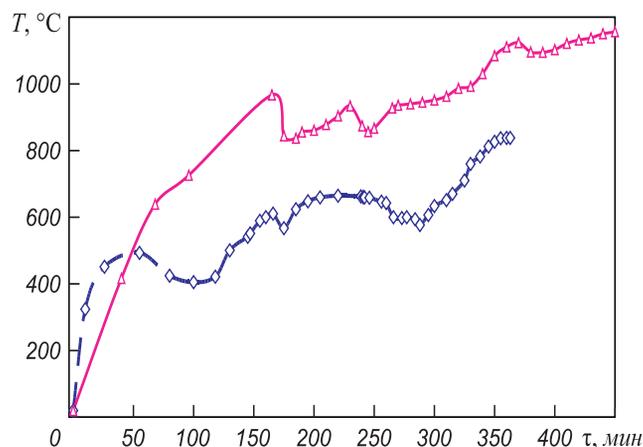


Рис. 2. Режимы нагрева стальных образцов: \diamond – первый режим нагрева; \triangle – второй режим нагрева

щая продолжительность нагрева – 6 ч. Второй режим (максимальная температура образца составила 1172 °С, продолжительность нагрева – 7 ч 40 мин) моделировал температурные условия при нагреве заготовок под прокатку.

Визуальный осмотр образцов, подвергнутых нагреву по вышеприведенным режимам, позволил выявить следующие отличия. На поверхности образца, нагретого по первому режиму, поверхность слоя образовавшейся окалины имелся слой золы неравномерной толщины (рис. 3). При этом зола легко удалялась с поверхности окалины, а окалина легко отделялась от поверхности основного металла.

На образце, нагретом по второму режиму, окалина имела более плотную структуру и отделялась от металла крупными кусками. При этом зола оказывалась достаточно плотно приваренной к окалине (рис. 4, а).

Причиной приваривания золы от сгорания ВУТ к окалине, очевидно, явились содержащиеся в золе в достаточно больших количествах легкоплавкие оксиды калия и натрия, температура плавления которых составляет 740 и 1132 °С соответственно. Химический состав золы от сгорания ВУТ следующий: 65,5 % SiO₂; 19,60 % Al₂O₃; 2,30 % Fe₂O₃; 8,30 % CaO; 2,80 % K₂O; 2,50 % MgO; 0,50 % Na₂O; 0,60 % TiO₂; 1,40 % P₂O₅; 0,01 % MnO.

Проведенный рентгеноспектральный анализ, представленный ниже, химического состава окалины также показал наличие в ее составе оксидов натрия и калия, хотя и меньшей концентрации, чем в золе от сгорания ВУТ. Тот факт, что окалина легко отделялась от основ-

ного металла, свидетельствует о концентрации легкоплавких оксидов только в приповерхностном ее слое. Химический состав окалины следующий: 91,50 % оксиды железа; 0,637 % MnO; 0,342 % CaO; 5,040 % SiO₂; 1,380 Al₂O₃; 0,192 % MgO; 0,268 % Na₂O; 0,117 % K₂O; 0,033 % TiO₂; 0,040 % C; 0,072 % S; 0,049 % P₂O₅; 0,330 % прочие.

Таким образом, видно, что способность золы отделяться от окалины зависит от температурно-временных параметров нагрева: при температуре (до 840 °С) нагрева, соответствующей режимам термообработки стали, зола легко отделяется от окалины, а при повышенных температурах, соответствующих температурам нагрева стальных заготовок под прокатку (до 1170 °С), зола плотно спекается с окалиной.

Как было отмечено выше, в процессе нагрева в печах с использованием ВУТ возможен непосредственный контакт золы с металлом. Для моделирования указанной ситуации проведена серия экспериментов по нагреву образцов высокоуглеродистой стали (содержание углерода составляет 0,8 %) с предварительно нанесенной на их поверхность золой (использовали зола, полученную при проведении вышеописанных экспериментов состава согласно вышепредставленным данным). Образцы нагревали по трем режимам: до температур 1200, 1250 и 1300 °С соответственно и выдержкой при указанных температурах в течение 1 ч. При нагреве до температуры 1200 °С приваривания золы к металлу не зафиксировано (рис. 5, а). Повышение температуры нагрева до 1250 °С привело к оплавлению золы, следствием чего явилось прилипа-



Рис. 3. Образец после нагрева по первому режиму



Рис. 4. Окалина после нагрева по второму режиму: а и б – вид образца снаружи и внутри соответственно



Рис. 5. Вид образцов с предварительно нанесенной на поверхность золой после нагрева до температуры 1200 °С (а), 1250 °С (б) и 1300 °С (в)

ние золы к поверхности стального образца (рис. 5, б). Нагрев стального образца до 1300 °С привел к практически полному переходу золы в жидкую фазу и нарушению защитных свойств окалины. Оплавление продуктов взаимодействия окалины и золы привело к значительному росту угара стали, возникновению явления «катастрофического» окисления [5]. Общий вид образца, нагретого до температуры 1300 °С (рис. 5, в) свидетельствует, что после нагрева произошло значительное уменьшение размеров образца, а также значительное снижение качества его поверхности.

Таким образом, можно констатировать, что в случае контакта золы от сгорания ВУТ с поверхностью заготовок ухудшение качества их поверхности происходит при достижении температур нагрева свыше 1250 °С, а при температуре нагрева свыше 1300 °С возможно оплавление продуктов взаимодействия золы и окалины.

Выводы. При нагреве стальных образцов с использованием в качестве топлива ВУТ установлено, что несмотря на наличие в образовавшейся окалине легкоплавких оксидов нагрев до температуры 1170 °С не ухудшает отделение окалины от поверхности металла и не сказывается на качестве поверхности металла. В ходе экспериментов, моделирующих ситуацию не-

посредственного контакта золы от сгорания ВУТ с поверхностью металла, установлено, что при достижении температур нагрева свыше 1250 °С происходит ухудшение качества поверхности металла, а при температуре нагрева свыше 1300 °С возможно оплавление продуктов взаимодействия золы и окалины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мурко В.И., Федяев В.И., Карпенко В.И. и др. // Уголь Кузбасса. 2010. № 4. С. 102 – 103.
2. Мурко В.И., Федяев В.И., Бровченко С.А. и др. – В кн.: Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности. Сборник трудов международной научно-практической конференции. – Кемерово, 2003. С. 13 – 17.
3. Мурко В.И., Ивушкин А.А., Венгер К.Г. и др. // Уголь. 2010. № 12. С. 67 – 68.
4. Long G., Zhuong V., Shang L. // «Proceeding of Second International Symposium on Coal Technology» – Beijing P.R., China. 1999. P. 458 – 464.
5. Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.

© 2012 г. В.И. Мурко, А.А. Уманский, В.И. Карпенко, В.И. Федяев, Н.А. Чернышева
Поступила 4 мая 2012 г.