

О ВОЗМОЖНОСТИ ЗАМЕНЫ КОКСОВОЙ ПАРАДИГМЫ

С. Р. ИСЛАМОВ, С. Г. СТЕПАНОВ*

В современных экономических условиях первоочередной задачей является радикальное снижение себестоимости производства чугуна. По мнению авторов, единственным эффективным решением этой задачи является отказ от использования классического кокса. В качестве альтернативы рассмотрена возможность вовлечения в металлургию нового углеродистого восстановителя — термококса, который производят из низкосольных бурых углей Канско-Ачинского бассейна с нулевыми выбросами в окружающую среду. Этот продукт принципиально отличается от кокса по трем основным показателям: он многократно дешевле кокса, имеет на порядок более высокую реакционную способность и является мелкозернистым. В статье приведены краткое описание технологии когенерационного производства термококса на базе типовых котлов для сжигания угля, ее технико-экономические показатели и физико-химические свойства термококса. В брикетированном виде термококк является эффективным заменителем углеродистой шихты в классической электрометаллургии — в производстве ферросплавов, кремния и т. п. Стратегическое направление использования мелкозернистого термококса, по мнению авторов, — технология прямого восстановления железорудного концентрата. Именно в этой сфере оказываются востребованными все специфические свойства нового восстановителя. В качестве примера в статье представлены укрупненные технико-экономические показатели крупномасштабного производства гранулированного чугуна с использованием термококса, которые демонстрируют радикальное снижение себестоимости металлургической продукции.

Ключевые слова: снижение себестоимости чугуна, бурогоольный кокс, термококк, прямое восстановление железа, восстановитель, технология.

Проблемы и перспективы черной металлургии

Проблемы черной металлургии, безусловно, связаны с мировым экономическим кризисом, однако в значительной мере они обусловлены исчерпанием потенциала существующего технологического уклада, что проявляется в повышенных издержках и, как следствие, низкой доходности капитала.

В перспективе на ближайшие десятилетия определяющим требованием становится радикальное уменьшение себестоимости производства стали. Здесь необходимо сделать акцент на слове «радикальное». Эту задачу невозможно решить «заморозкой» тарифов естественных монополий, снижением курса рубля или какими-то другими методами протекционистской политики, на которые надеются многие российские производители. Любые временные облегчающие меры создают иллюзию разрешения глобальной проблемы, и в этом их опасность. Ощутимый и долгосрочный эффект можно получить только путем внедрения инновационных тех-

нологических решений. Альтернативы нет. В ходе конкурентной борьбы останутся только компании с малыми издержками, остальные обречены сначала войти в список 20 % простаивающих предприятий, а затем — обанкротиться.

В структуре себестоимости производства чугуна основополагающими статьями являются затраты на металлошихту и кокс. Очевидно, что любые производные от железной руды будут только дорожать. Это обусловлено объективной тенденцией к снижению качества руды, ростом затрат, связанных с переносом добычи в удаленные регионы, а также постоянным повышением транспортных тарифов. Точно так же обстоит дело с коксующимися углями и, соответственно, с коксовой продукцией. Следовательно, в рамках классического сценария развития черной металлургии цивилизация обречена на неограниченное удорожание главного конструкционного материала — стали. А если называть вещи своими именами, это означает, что цивилизация движется в экономический тупик. В таких условиях, как показывает история промышленности, монотонная траектория развития неизбежно претерпевает бифуркационный перелом, который выражается в смене лидирующей технологической концепции. У экономической системы просто нет другого выбора для выживания. Принимая 100%-ную вероятность осуществления этого события, зададимся вопросом: что может быть изменено в технологии восстановления железной руды?

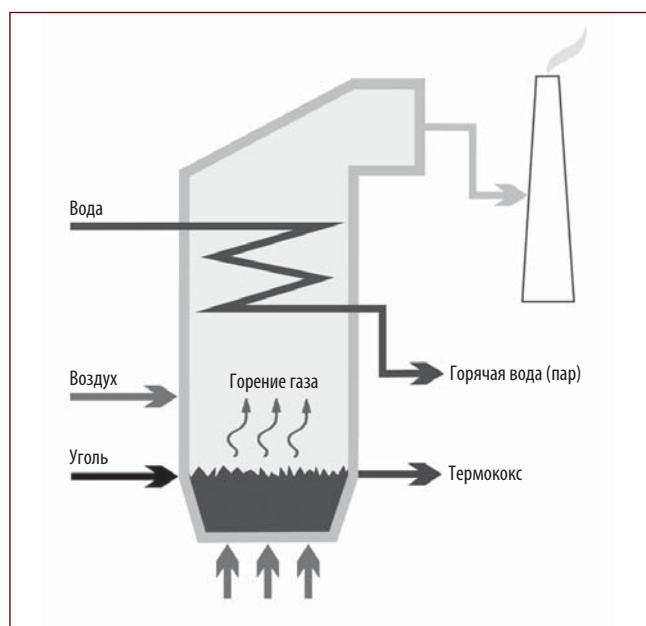
* Докт. техн. наук С. Р. Исламов, генеральный директор; докт. техн. наук С. Г. Степанов, технический директор, Энерготехнологическая компания «Термококк», Красноярск, Россия; islamov@termokoks.ru

подавляющая часть металлургических производств работает на кусковом низкорезакционном коксе. С самых общих позиций указанные свойства кокса не имеют ни экономического, ни технологического обоснования. Согласно основам физической химии гетерогенных процессов, для максимизации скорости восстановления оксидов железа необходимо использовать высокорезакционный тонкодисперсный углеродистый восстановитель. Как это ни парадоксально, но в течение целого столетия металлургии удавалось развиваться, игнорируя фундаментальные принципы гетерогенной химии.

Таким образом, объективно черной металлургии необходим углеродистый восстановитель, который обладает следующими основными свойствами: высокой реакционной способностью; большой удельной поверхностью; дешевизной.

Технология ТЕРМОКОКС®

Сформулированным ранее требованиям к углеродистому восстановителю в полной мере отвечает среднетемпературный кокс (термококс), который получают из бурого угля в виде мелкозернистого материала (0–5 мм), и он имеет в 20 раз более высокую реакционную способность по сравнению с классическим коксом при содержании фиксированного углерода до 85 %. Себестоимость его производства находится примерно на уровне рыночной цены 2 т бурого угля и не превышает 1200–1400 руб/т. Основу технологии изготовления термококса составляет частичная газификация углей с высоким содержанием летучих веществ [1]. Оптимальным сырьем



Принципиальная схема котельного агрегата для параллельного производства кокса и тепловой энергии

являются дешевые бурые угли Канско-Ачинского бассейна с низким содержанием золы ($A^d = 5\div6\%$) и серы ($S^d = 0,15\%$), добываемые открытым способом, промышленные запасы которых составляют сотни миллиардов тонн. Однако по технологии ТЕРМОКОКС можно перерабатывать и молодые каменные угли марок Д и Г ($V^{daf} > 35\div40\%$). Более того, возможно использование углей с повышенной зольностью, поскольку технология обеспечивает параллельное гравитационное обогащение продукции.

Частичную газификацию угля осуществляют в типовых энергетических котлах, подвергнутых специальной модификации путем встраивания в существующие габариты котла подтопка-реактора с кипящим слоем (рисунок). При этом модифицированный котел сохраняет паспортную тепловую мощность. В котле сжигают преимущественно продукты газификации угля, а вместо золошлаковых отходов производят второй ценный продукт — бурый угольный кокс.

Безусловно, вместо производства пара тепловую энергию продуктов газификации можно использовать для других целей: отопления восстановительных печей, сушки концентратов после обогащения, агломерации, спекания и обжига самых разнообразных материалов, используемых в металлургическом производстве.

Экономические показатели. В процессе частичной газификации примерно 4 т бурого угля ($Q_i^f \sim 4\text{--}16$ МДж/кг) производится 1 т кокса ($Q_i^f \sim 29\text{--}30$ МДж/кг) и 27–30 МДж высокотемпературного горючего газа. Если использовать эту технологию в энергетике, то за счет параллельного производства кокса и тепловой энергии удельные капитальные затраты в расчете на 1 МДж суммарно изготавливаемой продукции радикально меньше, а экономическая эффективность производства в несколько раз выше, чем в проектах классической теплоэнергетики. В этом случае все операционные затраты производства компенсируются продажей тепловой энергии, так что себестоимость термококса определяется в основном стоимостью сырьевой составляющей — немногим более 2 т угля на 1 т кокса. Так, например, по результатам ТЭО модификации Красноярской ТЭЦ-3 себестоимость производства термококса составила 1360 руб/т (без НДС) при расчетной цене угля 505 руб/т. Как следствие, срок окупаемости инвестиций в модификацию действующей котельной (ТЭЦ) составляет 2–3 года.

Экологические показатели. Поскольку в котле сжигается преимущественно газовое топливо с незначительной примесью термококса (унос из кипящего слоя), достигается значительное снижение контролируемых выбросов в атмосферу (пыль, оксид углерода, оксиды азота и др.) по сравнению с традиционными угольными котлами. Технология, по сути,

не имеет золошлаковых отходов, поскольку содержащаяся в угле зола переходит в коксовый продукт. Таким образом, экологические показатели котельного агрегата на угольном топливе приближаются к соответствующим показателям котла на газовом топливе. Поскольку продукты сгорания расходуют на производство тепловой энергии, второй продукт — термококк производят с нулевыми выбросами в окружающую среду.

Опытно-промышленная апробация технологии производства термококка

В части конструкторско-аппаратурных решений технология ТЕРМОКОКС® в значительной мере базируется на многолетнем опыте эксплуатации котлов с кипящим слоем. И этот фактор обеспечивает надежность работы котлов в энерготехнологическом исполнении. В рамках пилотного проекта в 2007 г. была выполнена модификация котла КВТС-20 в г. Шарыпово, Красноярский край (заказчик — ОАО «СУЭК»). Успешно работающий до настоящего времени энерготехнологический котел сохранил паспортную производительность по горячей воде и параллельно с его помощью производят до 3 т/ч зернистого термококка.

Естественно, что термококк можно изготавливать и на угольной электростанции как третий продукт (тригенерация). В настоящее время эту схему реализуют на ТЭЦ-2 г. Улан-Батора путем модификации энергетических котлов БКЗ-75 (<http://youtu.be/x1hJvvFfAN8>). Целью проекта является производство 210 тыс. т/год брикетированного бездымного бытового топлива на основе буроугольного кокса.

Перспективы использования термококка в металлургии

Очевидно, что масштабы использования нового углеродистого продукта будут определяться его основными потребительскими свойствами. В качестве примера приведем характеристики термококка, изготовленного из бурого угля Березовского месторождения: $W_t = 1 \div 5 \%$; $A^d = 8 \div 9 \%$; $V^{daf} = 7 \div 8 \%$; $C_{fix} = 82 \div 85 \%$; $S^d < 0,2 \%$; $C^{daf} = 90 \div 94 \%$; $\rho_{насып} = 500 \text{ кг/м}^3$; $Q_i^r = 29 \div 30 \text{ МДж/кг}$; реакционная способность по $CO_2 = 8,0 \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с})$; $HGI = 68,5$; удельное электросопротивление $= 1,37 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

На данном этапе можно выделить два главных направления использования буроугольного кокса: как технологического специализированного топлива и как углеродистого восстановителя в металлургии.

Технологическое топливо

На сегодняшний день на рынке технологического топлива существует определенный дефицит углей

высокого качества с пониженным содержанием летучих веществ (марки Т и СС). Угли этих марок используют для обжига руд и нерудных материалов, цементного клинкера, для спекания глинозема и т. п., заметная часть углей идет на экспорт. В то же время крупные угледобывающие компании имеют избыточные мощности по добыче бурого угля, а поставщики каменного угля марок Д и ДГ ежегодно производят миллионы тонн невостребованных отсеков. За рубежом проблемы такого рода уже давно разрешают путем приготовления смесового угольного топлива, однако для этой цели требуется высококалорийный компонент, роль которого с успехом может выполнять термококк. При смешении с влажным углем сухой термококк за счет высокой адсорбционной активности обеспечивает усреднение влажности по смеси. Так, например, близких к оптимуму (для цементной промышленности) показателей достигают при смешении примерно 40 % бурого угля Березовского месторождения и 60 % полученного из него термококка. Смесовое топливо имеет следующие характеристики: $W^t = 13 \div 15 \%$; $A^d = 8 \div 10 \%$; $V^d = 17 \div 20 \%$; $Q_i^r \sim 24 \text{ МДж/кг}$. Аналогичным образом можно использовать и отсеки углей марок Д, ДГ. Их зольность снижают в процессе переработки в кипящем слое за счет одновременного гравитационного обогащения. После стадии дозирования и смешения компонентов окончательную гомогенизацию смеси осуществляют в процессе пылеприготовления топлива перед подачей в горелку.

В традиционной металлургии высокорекреационный термококк с теплотой сгорания 29–30 МДж/кг — идеальное топливо для вдувания в горн доменной печи (технология PCI) [2]. Успешные промышленные испытания с использованием буроугольного полукокка (существенно пониженного качества по сравнению с термококсом) были проведены еще в 1971 г. на Западно-Сибирском металлургическом комбинате в доменной печи объемом 2000 м³ [3]. Исходя из аналогии с низколетучими каменными углями, часто возникает вопрос о воспламеняемости буроугольного кокса. Температура самовозгорания частиц термококка (фракция < 1 мм) на воздухе в условиях термостата составляет 260–270 °С. Еще в 1980-х годах в Энергетическом институте им. Г. М. Кржижановского было показано, что время выгорания пылевой частицы буроугольного кокса короче, чем аналогичной по размеру частицы исходного бурого угля.

Углеродистый восстановитель формованный

Используемые в настоящее время металлургические технологии в основном ориентированы на использование классического кускового кокса. Основные отличительные характеристики этого материала: высокая холодная и горячая прочность;

низкая реакционная способность. В порядке компромисса с действующей металлургией буроугольный кокс можно брикетировать (экструдировать) с получением формованного продукта любого размера. Если прочностные требования можно удовлетворить путем подбора оптимального связующего, то реакционная способность формованного термококса снижается незначительно. Исходя из этого, сфера использования такого продукта ограничена главным образом электрометаллургией и в первую очередь производством ферросплавов, хотя имеются данные о положительном эффекте повышения реакционной способности доменного кокса [4]. Выводы этой работы, конечно, дискуссионные, но, тем не менее, специалисты Новокузнецкого ВУХИНа также считают возможным введение в доменный процесс до 30 % формованного термококса.

К настоящему времени накоплен достаточный опыт изготовления из термококса брикетов с высокой холодной и горячей прочностью, продолжается совершенствование качества продукции путем тестирования опытно-промышленных партий брикетов на заводах по производству ферросплавов и поликристаллического кремния. Для последнего применения обеспечивают пониженное содержание железа в брикете за счет предварительной магнитной сепарации термококса.

Однако стратегическую перспективу мы связываем с использованием мелкозернистого термококса в технологиях прямого восстановления железной руды (DRI).

Углеродистый восстановитель мелкозернистый

Стадия формования исходного мелкозернистого термококса является избыточной как с общих позиций физической химии пирометаллургии, так и с экономической точки зрения: затраты на этот передел составляют 2–2,5 тыс. руб/т и сильно зависят от выбора связующего материала. Наибольший интерес представляет непосредственное использование мелкозернистого углеродистого восстановителя, имеющего высокую реакционную способность.

Если рассматривать жидкофазные процессы восстановления железной руды, то перспективу имеет прямое вдувание пылевидного термококса в расплав руды через погружные фурмы по аналогии с технологией корпорации Outotec (Финляндия).

Большие надежды возложены на технологии прямого восстановления железной руды. Использование природного газа в качестве сырья для приготовления газового восстановителя (например, технология Midrex) ограничено доступностью этого вида сырья и его ценой. Все возрастающую популярность приобретает использование в качестве восстановителя энергетических углей. Наиболее известны следующие разработки: технология Corex (Siemens VAI); технология Finex (Siemens VAI совместно с Posco); технология ITmk3 (KOBEL Steel). Однако уголь, несмотря на относительную дешевизну, в отличие от кокса, далеко не самая лучшая его замена. Здесь не будем обсуждать технологические причины такого заключения, поскольку они хорошо известны специалистам.

Продемонстрируем на количественном уровне экономический эффект от использования термококса в технологии прямого восстановления железа. В качестве примера будет использована технология производства гранулированного чугуна MTRCI (российский аналог технологии ITmk3). В частности отметим, что по результатам тестирования термококса в 2010 г. компания Hares Engineering дала положительное заключение о его использовании в технологии ITmk3. Выбор данной технологии обусловлен в первую очередь тем, что в нашем распоряжении имеются исчерпывающие технико-экономические данные именно по производству гранулированного чугуна.

Технологию MTRCI развивает иркутская компания ИТЭМ. Кроме собственных решений по конструкторскому оформлению технологий, защищенных патентами, вместо природного газа для отопления вращающейся печи авторы предложили использовать газ, полученный путем газификации угля. В 2012 г. специалисты этой компании также успешно протестировали термококсы, изготовленный из бурого угля Березовского месторождения и отметили положительные характеристики этого восстановителя по сравнению со свойствами каменного угля: в первую очередь, высокое содержание фиксированного углерода, высокую реакционную способность и относительную дешевизну единицы углерода.

Положительным фактором технологии производства гранулированного чугуна является пониженное требование к содержанию вредных примесей в ЖРК, при которых, тем не менее, обеспечивается высокое качество гранулированного чугуна. В табл. 1 приведен примерный баланс производства из концентрата Ковдорского ГОКа (ОАО «ЕвроХим») с содержанием Fe = 64,9 % и термококса из березовского бурого угля.

Металлический продукт имеет содержание железа не менее 95 % и 3–3,2 % углерода.

Таблица 1.
Примерный баланс технологии производства гранулированного чугуна

Исходная шихта, %			Выход, %		
ЖРК	Термококсы	Флюсы	Чугун	Шлак	Газы
67,6	20,2	12,2	44,5	22,2	33,3

Экономика производства гранулированного чугуна на основе термококса

В 2014 г. совместно с компанией ИТЭМ было выполнено ТЭО строительства промышленного предприятия по производству 1 млн т/год гранулированного чугуна с вариантами размещения в трех регионах России. В качестве сырья был использован ЖРК Ковдорского ГОКа и мелкозернистый термококс, который предполагалось производить на типовой угольной ТЭЦ после ее незначительной модификации. Отопление восстановительной печи осуществляется генераторным газом, полученным в результате газификации угля. Удельные капитальные затраты на строительство завода в зависимости от места привязки составляют 8–9 тыс. руб. (с учетом НДС) на 1 т гранулированного чугуна. Здесь для сравнения следует отметить, что, по данным Kobe Steel, удельные капитальные затраты в известный проект Hoyt Lakes, Миннесота (США) мощностью 0,5 млн т/год составили порядка 470 долл. США на 1 т чугуна, т. е. почти в 2 раза больше. К сожалению, мы не имеем доступа к проектно-сметной документации данного проекта, чтобы выявить причины столь значительного расхождения в инвестиционных затратах. В то же время упомянутое ранее технико-экономическое обоснование было выполнено в полном соответствии с действующими в нашей стране нормами проектирования и строительства объектов такого рода.

Далее представлена структура себестоимости целевого продукта (табл. 2).

Как следует из этой таблицы, в общей структуре себестоимости затраты на кокс составляют 673 руб/т (~18–20 долл. США/т), т. е. не более 9 %. С учетом расхода угля на производство генераторного газа общие затраты на кокс и топливо составляют 12 %.

Безусловно, представленные результаты являются предпроектной экономической оценкой, однако даже на качественном уровне они убедительно демонстрируют факт радикального снижения себестоимости чугуна, которое в принципе недостижимо в условиях доменного производства на базе классического кокса.

Дополнительный экономический эффект может быть достигнут за счет замены блока газификации угля блоком производства термококса, в котором в результате частичной газификации угля также можно покупать генераторный газ и использовать его для отопления восстановительной печи. В экономическом плане это позволит исключить затраты на уголь для производства отопительного газа (позиция 5 в табл. 2). Капитальные затраты на сооружение блока газификации угля и блока его карбонизации (частичной газификации угля) примерно сопоставимы.

Таблица 2.
Структура себестоимости производства гранулированного чугуна

Позиция	Затраты	Количество на 1 т чугуна	Руб/т чугуна	%
1	ЖРК Ковдорского ГОКа с доставкой, т	1,55	5317	65,9
2	Буроугольный кокс МК-1, т		673	8,3
3	Другие шихтовые материалы, т	0,28	298	3,7
4	Электроэнергия, кВт·ч	185	262	3,3
5	Уголь 2БР на газификацию, т	0,8	300	3,7
6	Общепроизводственные расходы		143	1,8
7	Фонд оплаты труда		299	3,7
8	Амортизационные отчисления		633	7,8
9	Другие и неучтенные расходы		143	1,8
10	Себестоимость без учета НДС		8069	100

Заключение

Наиболее значимого результата в снижении себестоимости стали можно добиться путем замещения дорогостоящего кускового кокса и внедрения новых технологических процессов прямого восстановления железа. Одним из возможных решений этой проблемы является использование технологии ТЕРМОКОКС, позволяющей получать высокорекреакционный средне-температурный кокс (термококс) с низким содержанием золы и вредных примесей из дешевых канско-ачинских бурых углей.

Библиографический список

1. Исламов С. Р. Энерготехнологическая переработка углей. — Красноярск: Поликор, 2010. — 224 с.
2. Исламов С. Р., Ярошевский С. Л., Кузин А. В., Афанасьева З. К. Использование буроугольного кокса в качестве пылеугольного топлива в доменной плавке. — Донецк: УНИТЕХ, 2008. — 68 с.
3. Школлер М. Б. Полукоксование каменных и бурых углей. — Новокузнецк: Инженерная академия России. Кузбасский филиал, 2001. — 232 с.
4. Лялюк В. П., Тараканов А. К., Кассим Д. А. Влияние реакционной способности кокса на технико-экономические показатели доменной плавки // Кокс и химия. 2011. № 2. С. 16–22.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ON THE POSSIBILITY OF REPLACEMENT OF THE COKE PARADIGM

Islamov S. R.¹, Dr. Eng., Gen. Director

Stepanov S. G.¹, Dr. Eng., Techn. Director

¹ "Termokoks" Energy Technological Company (Krasnoyarsk, Russia)

E-mail: islamov@termokoks.ru
stepanov@termokoks.ru

In today's economic environment the need for a radical reduction in the cost of pig iron comes to the forefront of the most important problems to be solved. According to the authors, the only effective solution of this problem is to abandon the use of classic coke. Alternatively, they consider the possibility of involving in metallurgy the new carbonaceous reductant — thermocoke, which is producing from low-ash lignite of Kansk-Achinsk Basin with zero emissions into the environment. This product differs principally from the coke in three basic indicators: thermocoke is cheaper by many times than coke, it has an order of magnitude with higher reactivity and it is a grained material. The article gives a brief description of the technology of cogeneration production of thermocoke on the basis of standard coal-fired boilers, its technical and economic parameters and physico-chemical properties of the thermocoke are displayed. In briquetted form, thermocoke is an effective substitute of carbonaceous materials in classical electrometallurgy - in the production of ferro-alloys, silicon, etc. Strategic direction of the use of fine-grained thermocoke, according to the authors, is the technology of direct reduction of iron ore concentrate. This area is characterized by strong demand of all specific properties

of the new reducing agent. As an example, the article presents the aggregated technical and economic performance of large-scale production of iron nuggets using thermocoke; it demonstrates radical production cost reduction of metallurgical products.

Keywords: cost reducing, pig iron, lignite coke, thermocoke, direct reduction of iron, carbonaceous reductant, grained material, coal-fired boilers, concentrate.