

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»  
Российская академия естественных наук

**ВЕСТНИК  
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ  
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

Отделение металлургии

*Сборник научных трудов*

*Издается с 1994 г. ежегодно*

Выпуск 40

Москва  
Новокузнецк  
2018

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

В 387

**В 387 Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии:** Сборник научных трудов. Вып. 40 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянец (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2018 – 178 с., ил.

Издание сборника статей, подготовленных авторскими коллективами, возглавляемыми действительными членами и членами-корреспондентами РАЕН, других профессиональных академий, профессорами вузов России. Представлены работы по различным направлениям исследований в области металлургии черных и цветных металлов и сплавов, порошковой металлургии и композиционных материалов, физики металлов и металловедения, экономики и управления на предприятиях.

Сборник реферируется в РЖ Металлургия.

Электронная версия сборника представлена на сайте <http://www.sibsiu.ru> в разделе «Научные издания»

Ил. 57, табл. 16, библиогр. назв. 244.

*Редакционная коллегия:* Аренс В.Ж., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, вице-президент РАЕН, г. Москва; Райков Ю.Н., д.т.н., д.ч. РАЕН, председатель горно-металлургической секции РАЕН, ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянец М.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Галевский Г.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Буторина И.В., д.т.н., проф., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; Волокитин Г.Г., д.т.н., проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск; Медведев А.С., д.т.н., проф., д.ч. МАН ВШ, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Максимов А.А., д.т.н., проф., г. Новокузнецк; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., ИрНИТУ, г. Иркутск; Руднева В.В., д.т.н., проф. (отв. секретарь), СибГИУ, г. Новокузнецк; Спиринов Н.А., д.т.н., проф., д.ч. АИН, УрФУ, г. Екатеринбург; Черепанов А.Н., д.ф.-м.н., проф., член РНК ТММ, ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск; Юрьев А.Б., д.т.н., проф., АО «Евраз – ЗСМК», г. Новокузнецк.

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

© Сибирский государственный индустриальный университет, 2018

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ И РУКОВОДИТЕЛЯХ  
АВТОРСКИХ КОЛЛЕКТИВОВ

- Галевский Г.В. д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ,  
г. Новокузнецк
- Деев В.Б. д-р техн. наук, проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва
- Исмагилов З.Р. д-р хим. наук, проф., чл.-кор. РАН, ФИЦ УУХ СО  
РАН, г. Кемерово
- Козырев Н.А. д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РАЕН, СибГИУ,  
г. Новокузнецк
- Немчинова Н.В. д-р техн. наук, проф., ИрНИТУ, г. Иркутск
- Руднева В.В. д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
- Соколов А.К. д-р техн. наук, проф., ИГЭУ, г. Иваново
- Темлянцев М.В. д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ,  
г. Новокузнецк
- Феоктистов А.В. д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
- Шур Е.А. д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», г. Москва

## Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	7
<i>А.М. Достаева, Д.У. Смагулов, Н.В. Немчинова</i>	
Исследование фазовых превращений в системе Al-Zr-Fe-Si.....	8
<i>И.Н. Кель, В.И. Жучков</i>	
Эффективное применение борсодержащих материалов в современных металлургических технологиях.....	15
<i>А.В. Настюшкина, Е.А. Шевченко, А.А. Шевченко</i>	
Анализ технологии дефосфорации стали в условиях АО «Уральская сталь».....	22
<i>С.Н. Анучкин</i>	
Взаимодействие наночастиц ZrO <sub>2</sub> с расплавом никель-олово.....	25
<i>В.Б. Деев, А.И. Куценко, Е.С. Прусов, С.В. Сметанюк, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева, А.А. Сокорев</i>	
Определение доли твердой фазы по данным компьютерного термического анализа процесса кристаллизации расплава.....	34
<i>Г.Е. Левшин</i>	
Многовариантный подход к расчету параметров магнитопроводов индукционных тигельных печей.....	40
<i>О.В. Кузнецова, М.В. Темлянец, Е.Н. Темлянцева</i>	
К вопросу об учете неравномерности перемещения заготовок при математическом моделировании процессов нагрева металла в методических печах.....	49
<i>С.А. Кондрашов, Э.М. Голубчик, Т.Ю. Мартынова</i>	
Новая технология производства холоднокатанного металла в условиях стана 2500.....	53
<i>Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Р.Е. Крюков</i>	
Совершенствование технологии электроконтактной сварки и термообработки железнодорожных рельсов.....	63
ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	69
<i>А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, И.В. Ноздрин</i>	
Физико-химическая аттестация железосодержащего техногенного сырья.....	70
<i>А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Н.М. Кулагин, В.В. Васильев, Г.Н. Черновский</i>	
Природные твердые углеродистые материалы в современной металлургии: виды, свойства, применение.....	78

<i>А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Н.М. Кулагин, В.В. Васильев, Г.Н. Черновский</i>	
Искусственные твердые углеродистые материалы в современной металлургии.....	89
<b>ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>98</b>
<i>А.А. Иванов, Т.Н. Осколкова</i>	
Вакуумная термическая обработка стали 30ХГСА.....	99
<i>Е.С. Прусов, Д.А. Ткач, В.Б. Деев, Е.М. Рахуба</i>	
Количественный анализ структуры композиционных сплавов с применением программы ImageJ .....	106
<i>В.А. Кузнецов, Р.А. Шевченко, А.А. Усольцев, Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков</i>	
Методика определения электрического сопротивления рельсовой стали....	111
<i>Е.А. Шур, В.Н. Цвигун, Р.С. Койнов</i>	
Модели образования фрактографических рельефов на усталостных трещинах.....	118
<b>ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ..</b>	<b>136</b>
<i>А.В. Феоктистов, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева, С.В. Морин, О.В. Гордеева</i>	
Применение подходов проектного менеджмента при производстве рельсовой продукции на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» .....	137
<i>Л.Б. Павлович, З.Р.Исмагилов, К.А. Дятлова</i>	
Оценка каталитических свойств отвального силикомарганцевого шлака Кузбасса.....	139
<i>А.К. Соколов</i>	
Повышение эффективности энергосбережения при эксплуатации многозонных проходных печей.....	147
<i>А.И. Куценко, Е.Г. Лашкова</i>	
Корпоративная идентификация бизнеса как составляющая стратегического репутационного развития организации .....	154
<b>ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ.....</b>	<b>169</b>
<i>Ю.К. Осипов, О.В. Матехина</i>	
Архитектурное проектирование как образовательный процесс.....	170
<b>К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ.....</b>	<b>176</b>

УДК 66.094.2

*А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Н.М. Кулагин, В.В. Васильев,  
Г.Н. Черновский*

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный  
университет», г. Новокузнецк, Россия

## ПРИРОДНЫЕ ТВЕРДЫЕ УГЛЕРОДИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СОВРЕМЕННОЙ МЕТАЛЛУРГИИ : ВИДЫ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ

Рассмотрены виды, свойства и применение в современной металлургии природных твердых углеродистых материалов: бурых и каменных углей, антрацитов, шунгитовых пород.

Types, properties and application in modern metallurgy of natural solid carbonaceous materials are considered: brown and stone coals, anthracites, shungitovy breeds.

В современной металлургии твердые углеродистые материалы применяются, главным образом, в качестве компонентов технологических шихт различного назначения (восстановители, топливо), электродов, футеровок, защитных покрытий. Классификация твердых природных и искусственных углеродистых материалов, применяемых или опробованных в составах технологических шихт в металлургии и электротермии неорганических веществ, представлена в виде схемы на рисунке 1.

Целью настоящей работы является рассмотрение видов, свойств и анализ применения в современной металлургии природных твердых углеродистых материалов (бурых и каменных углей, антрацитов, шунгитовых пород) и выявление доминирующих тенденций, характерных для отечественного и мирового рынков этих материалов.

### *Бурые угли.*

Уголь – это осадочная порода, твердое горючее ископаемое, образующееся в результате разложения в течение длительного времени растительных остатков без доступа кислорода при высоких температуре и давлении. Бурые угли (марка Б) – это весьма разнообразные по составу и свойствам угли, характеризующиеся низким значением величин показателя отражения витринита ( $R_o < 0,6 \%$ ) и высшей теплотой сгорания, пересчитанной на влажное беззольное состояние ( $Q_s^{af} < 24$  МДж/кг) [1, 2]. Высокая влагоемкость и коллоидная структура бурых углей обуславливает слабую устойчивость их к выветриванию. Это является одним из главных, легко наблюдаемых внешних признаков, отличающих бурые угли от каменных и антрацитов. Угли марки Б в ГОСТ 25543-88 подразделены на три

технологические группы – 1Б, 2Б, 3Б. Угли этих групп весьма существенно различаются по влагоемкости, элементному составу и внешним петрографическим признакам. Выделенные группы приблизительно соответствуют следующим трем типам углефикации ряда: угли бурые землистые, бурые плотные матовые и бурые плотные блестящие. Органическая часть бурого угля состоит в основном из углерода (62-76 %). Содержание водорода в ней значительно (4,5-7,6 %). Влажность бурых углей очень высокая: 8-75 %. Зольность колеблется от 3 до 45 %.

Прогнозные ресурсы бурых углей в России составляют 1319,8 млрд. т (29,7 % от ресурсов углей всех видов), разведанные запасы по категориям А + В + С<sub>1</sub> – 103,11 млрд. т (51,4 % от запасов углей всех видов) [1].

Имеется технологический опыт по использованию бурых углей в металлургии и электротермии неорганических материалов, описанный в работах [3-16].

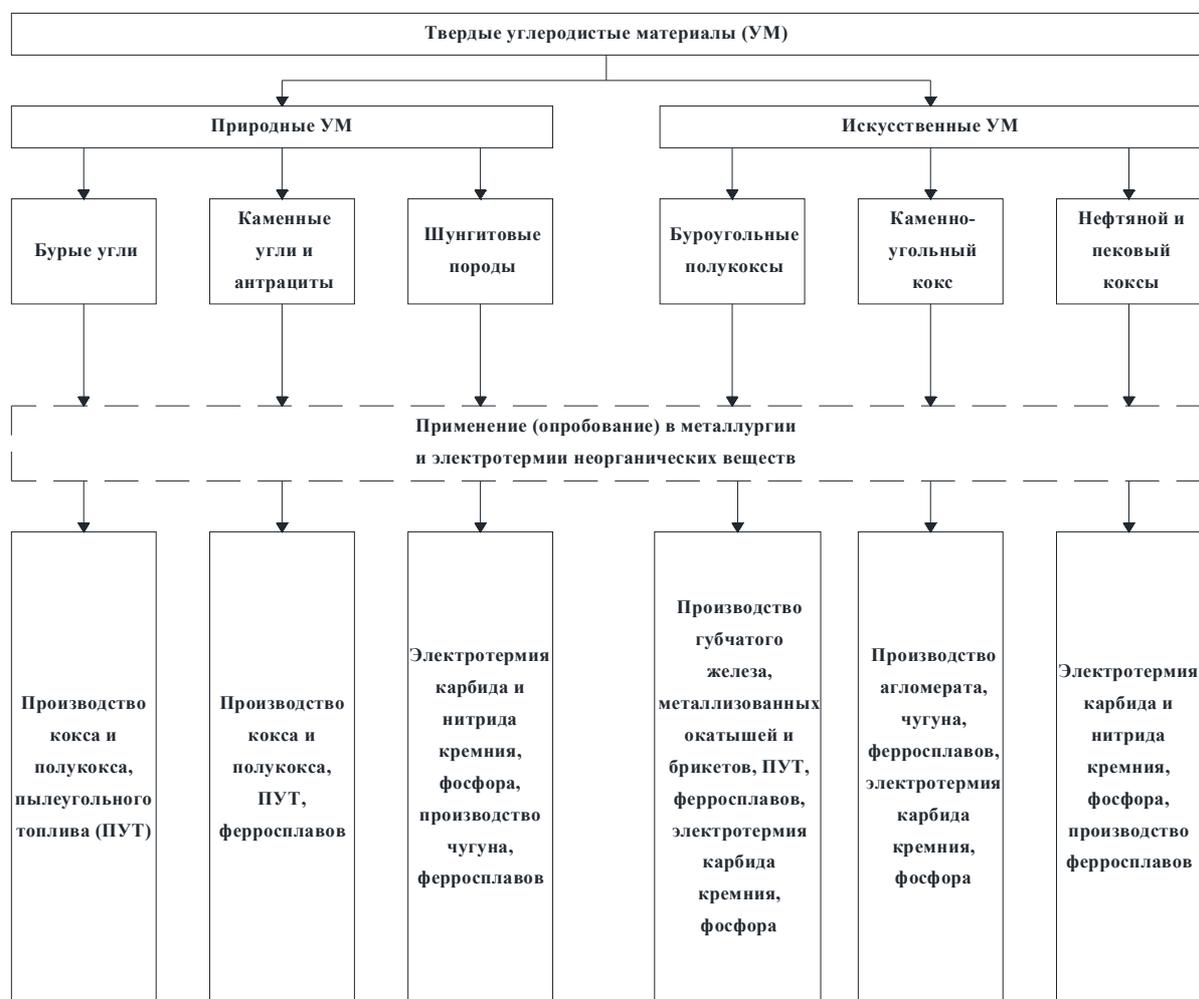


Рисунок 1 – Классификация и применение в металлургии и электротермии неорганических веществ твердых природных и искусственных углеродистых материалов

При производстве 45 %-ного ферросилиция применяли челябинский бурый уголь в соотношении с коксом 3:4 [3, 4]. При этом удельный расход электроэнергии возрос на 3 %. Исследования, проведенные ОАО «Кузнецкий центр ВУХИН» (КЦ ВУХИН), показали, что добавка бурого угля Канско-Ачинского бассейна (КАБ) к коксовому орешку для выплавки ферросилиция может составлять не более 15-20 %. При этом реакционная способность и удельное электросопротивление смеси будут значительно повышенными, а выход летучих веществ не превысит 5-8 % с минимальным выходом смолистых продуктов при нагревании.

Удовлетворительные результаты использования бурого угля Березовского месторождения КАБ получили на ОАО «РУСАЛ Братск» (БрАЗ) и ОАО «РУСАЛ-ИркАЗ» (ИркАЗ) при выплавке кристаллического кремния [3, 5, 6]. На БрАЗе бурый уголь был заменен древесный уголь в восстановительной смеси в сочетании с ленинск-кузнецким полукоксом или углем марки Д. Промышленными испытаниями установлена эффективность его использования при снижении расхода древесного угля до 180-200 кг/т кремния (или без него) и увеличении доли нефтяного кокса (до 600 кг/т). В целом, технологические показатели выплавки кремния не ухудшаются. На ИркАЗе при работе на шихте с использованием бурого угля в количестве 356 кг/т сплава расход древесного угля уменьшился на 5 %, каменного угля на 34 %, древесной щепы на 5,7 % и технологической энергии на 4,5 %; увеличился расход нефтяного кокса на 28,2 %. Как отрицательный фактор отмечено ухудшение качества выплавляемого кремния за счет увеличения в нем кальция в 1,6-2 раза (до 0,6 %). Это связано с составом золы березовского угля, содержащего до 40-50 % CaO. На содержание других примесей в кремнии замена каменного угля бурый влияния не оказала. В работе [7] также предложено использовать в качестве углеродистого восстановителя для выплавки кремния бурые угли КАБ.

В КЦ ВУХИН проведены исследования по использованию бурого угля Майкюбенского бассейна (Казахстан) при выплавке ферросилиция марок ФС45, ФС65 и ФС75 на АО «Аксуский завод ферросплавов» (АЗФ) [3, 4, 6]. Исследования показали невозможность самостоятельного использования бурого угля в технологии ферросплавного производства. Была определена его оптимальная добавка к применяемому коксу. При выплавке ФС75 в открытой печи мощностью 16,5 МВ·А с использованием до 37 % бурого угля взамен кокса производительность печи возросла на 3,4 %, удельный расход электроэнергии сократился на 1,6 %, состав шлака не изменился. Вместе с тем, содержание алюминия в сплаве увеличилось с 1,85 до 2,22 %. Повышенный выход летучих веществ угля не повлиял на газовый режим работы печи. Наблюдался равномерный выход летучих веществ, отсутствие свищей и спекшихся участков на колошнике. При выплавке ферросилиция марок ФС45 и ФС65 в печах закрытого типа РКЗ-63И1 частично заменяли кокс бурый уголь (в среднем 30 % от навески по

углероду). Стабильная работа печей наблюдалась только при содержании угля в шихте не более 50 кг. Отмечено снижение расхода кокса на 15-29 % и увеличение содержания алюминия в сплаве на 0,4-0,5 %.

Известен положительный опыт применения брикетов из бурого угля (зольность на сухую массу  $A^d$  10,9 %, выход летучих веществ на сухую беззольную массу  $V^{daf}$  50,5 %, содержание твердого углерода  $C_{fix}$  25,7 %) при выплавке 50 %-ного силикохрома на печи мощностью 16,5 МВ·А [3, 4].

Таким образом, промышленный опыт производства ферросплавов показал реальную возможность использования бурого угля в качестве углеродистого восстановителя. Вместе с тем, при выборе бурого угля следует учитывать его специфические свойства в части минерального состава, склонности к окислению, пониженной механической и термической прочности. Во всех случаях необходимо детальное изучение его физико-химических свойств [3, 6, 8].

Бурый уголь также опробован в ряде процессов черной металлургии [9-16]. Так, известно использование бурого угля в качестве пылеугольного топлива (ПУТ) для вдувания в горн доменной печи в составе смеси, состоящей из 20 % бурого угля и 80 % антрацита [9]. Был достигнут расход ПУТ до 212 кг/т чугуна.

Бурый уголь может использоваться в качестве восстановителя в процессах металлизации железорудного концентрата и оксиджелезосодержащих отходов [10-16]. В работе [10] приведены результаты опытов применения бурого угля при металлизации магнетитового железорудного концентрата Тамиринского месторождения (Монголия) с содержанием железа общего ( $Fe_{общ.}$ ) 63,4 %, серы (S) 0,006 %, полученного методом мокрой магнитной сепарации. В качестве восстановителя использовался бурый уголь Шарынгольского месторождения (Монголия). В работе [11] приведены результаты исследования возможности применения бурых углей Казахстана для металлизации железорудного сырья (ЖРС) и железосодержащих отходов (ЖСО). Наибольший практический интерес представляют бурые угли Майкюбенского бассейна, а также угли Приозерного месторождения. В работах [12-16] приведены результаты расчетов и исследований металлизации железорудных материалов в трубчатой вращающейся печи и конвейерной печи бурыми углями различных месторождений.

Несмотря на некоторый положительный опыт, бурые угли в исходном состоянии редко применяются в металлургии и электротермии неорганических веществ по целому ряду причин. Во-первых, зачастую металлургические предприятия располагаются на значительном удалении от буругольных месторождений, а транспортировка бурого угля на расстояние свыше 300 км экономически и технологически нецелесообразна (высокая влажность, пыление, опасность самовозгорания и т.д.) [17]. Во-вторых, исходный бурый уголь имеет высокие влажность (27-38 %) и выход летучих веществ (45-48 %) [18]. Такие показатели влажности и выхода летучих ве-

ществ зачастую не соответствуют требованиям, предъявляемым к углеродистым восстановителям для металлургических процессов. В частности, при нагреве из исходного бурого угля начинают выделяться летучие вещества, содержащие большое количество смолистых веществ, которые затрудняют ход процесса и могут привести к выходу из строя газоочистки. В-третьих, бурый уголь имеет пониженную механическую и термическую прочность, что может привести к увеличению выхода мелких классов и соответственно – ухудшению газопроницаемости шихты при использовании в печах шахтного типа [3].

#### *Каменные угли и антрациты.*

К каменным относятся угли со средним показателем отражения витринита ( $R_o = 0,4-2,59$  %) и высшей теплотой сгорания, пересчитанной на влажное беззольное состояние ( $Q_s^{af} \geq 24$  МДж/кг) [1, 2]. В России основные угольные бассейны имеют каменноугольный и пермский возраст. Существенно меньшее значение имеют бассейны и месторождения юрского и мелового возраста. В отложениях палеоген-неогенового возраста каменные угли известны только в районах Северо-Востока и о. Сахалин. Одной из наиболее важных технологических характеристик каменных углей является их обогатимость, т.е. возможность получения из них концентратных фракций, лишенных включений сопутствующих углю пород как в свободном состоянии, так и в виде углеродных сростков. Каменный уголь классифицируется на 15 марок: длиннопламенный (Д), длиннопламенный газовый (ДГ), газовый (Г), газовый жирный отощенный (ГЖО), газовый жирный (ГЖ), жирный (Ж), коксовый жирный (КЖ), коксовый (К), коксовый отощенный (КО), коксовый слабоспекающийся низкометаморфизованный (КСН), коксовый слабоспекающийся (КС), отощенный спекающийся (ОС), тощий спекающийся (ТС), слабоспекающийся (СС) и тощий (Т). Органическая часть каменного угля состоит в основном из углерода (74-92 %). Содержание водорода в ней довольно значительно (3,2-6,2 %). Влажность каменных углей 1,0-10,5 %. Зольность колеблется от 2 до 53 %.

К антрацитам (А) относятся угли наиболее высоких стадий метаморфизма, вне зависимости от других характеристик, с показателем отражения витринита  $R_o > 2,59$  %. При выходе летучих веществ  $V^{daf} < 8$  % к антрацитам относят также угли с показателем отражения витринита от 2,20 до 2,59 % включительно [1]. Типичные антрациты отличаются от каменных углей металлическим блеском, плотным сложением, более низкой частотой эндогенных трещин и высокой прочностью. Органическая часть антрацитов состоит в основном из углерода (93-97 %). Содержание водорода в ней невелико (1,0-2,5 %). Влажность свежедобытых антрацитов не превышает 5-9 %. Зольность колеблется от 4 до 26 %.

Прогнозные ресурсы каменных углей и антрацитов в России составляют 3130,9 млрд. т (70,3 % от ресурсов углей всех видов), разведанные

запасы по категориям А + В + С<sub>1</sub> – 97,47 млрд. т (48,6 % от запасов углей всех видов) [1].

Каменные угли и антрациты значительно чаще, чем бурые угли, применяются в металлургии и электротермии неорганических веществ [6, 9, 12-16, 19, 27]. Это обусловлено большим соответствием их свойств требованиям данных производств. Так, имеется опыт использования газовых углей в качестве углеродистого восстановителя для интенсификации процесса дефосфорации флотационного марганцевого концентрата [6]. При обжиге в кольцевой печи карбонатные марганцевые концентраты смешивали со слабоспекающимся газовым углем в соотношении 1:(0,7-1,5). Полученную смесь уплотняли при давлении прессования 650-750 кг/см<sup>2</sup>. Обжиг полученных брикетов вели при 720-940 °С. Отмечалось повышение скорости удаления фосфора в этих условиях.

Восстановительную смесь для выплавки ферросплавов углетермическим восстановлением получали из каменного угля марки Т Краснобродского разреза Кузбасса и металлургического коксика [6]. Угль класса 42-60 мм добавляли с целью уменьшения реакционной способности смеси, а также содержания серы в сплаве. Соотношение компонентов в восстановительной смеси было следующим, %: уголь марки Т 46-75, коксовый орешек 25-54. Восстановительную смесь опробовали при выплавке углеродистого феррохрома в промышленной печи мощностью 14 МВ·А. Применение данной смеси позволило снизить содержание серы в металле на 5,4-23,2 %, увеличить производительность электропечи, снизить удельные расходы электроэнергии и хромовой руды.

В работе [6] описан опыт использования карбовосстановителя, составленного из углей марки Т Краснобродского разреза Кузбасса (марка ТСШ), рядовых углей Листвянского разреза Кузбасса (марка ТР) и отсевов антрацита Горловского бассейна (марка АСШ). К преимуществам карбовосстановителя по сравнению с заменяемым им коксовым орешком относят: повышенную (в 2 раза) реакционную способность; более высокое (на 6 порядков) электросопротивление; меньшее (в 2,5 раза) содержание серы; повышенное содержание в золе оксидов кремния и железа (соответственно в 2,5 и 1,5 раза). Указанные особенности свойств карбовосстановителя и состава его минеральной части обеспечили в промышленных условиях выплавки высокоуглеродистого феррохрома возможность замены им до 20 % коксового орешка. При этом снизилась себестоимость 1 т сплава и содержание в нем серы. Интересен тот факт, что пористость использованного восстановителя была в ~ 2 раза меньше, чем у заменяемого им коксового орешка (соответственно 21,4 и 44,2 %) и чем требуемая норма пористости углеродистых восстановителей ( $\geq 40$  %).

В работе [19] обоснована возможность приготовления смеси из угля марки Т, полукокса и коксового орешка для улучшения качества восстановителя в ферросплавном производстве. Восстановитель смешивают с же-

лезной стружкой, кварцитом или, в зависимости от сорта сплава, с хромовой рудой; в карбидном производстве – с известью, а при получении фосфора – с фосфоритом. Также в данной работе сделан вывод о невозможности работы печей на одном тощем угле при получении кремнистых сплавов.

Опыт использования угля марки Д Шубаркольского разреза (Казахстан) при производстве ферросиликохрома (ФСХ) в условиях ОАО «Серовский завод ферросплавов» (СЗФ) приведен в работе [20]. Испытания были проведены на печи с мощностью трансформатора 22 МВ·А. На первом этапе уголь марки Д подавали на печь после дробления его на щековой дробилке в смеси с ленинск-кузнецким полукоксом и коксовым орешком мокрого тушения. При этом образовывалось большое количество мелочи класса  $\leq 10$  мм (до 25-35 %), что приводило к уменьшению газопроницаемости и спеканию колошника. После подачи угля без дробления работа колошника заметно улучшилась. При этом наблюдалась более высокая посадка электродов; колошник работал по всему периметру ровно, местные перегревы и свищи отсутствовали полностью; улучшились показатели работы печи: производительность увеличилась на 3,4 %, удельный расход кварцита снизился на 5 %, восстановителя (в пересчете на углерод) – на 3,8 %, электроэнергии – на 3 %, возросло извлечение кремния.

Исследования и промышленные испытания, проведенные ОАО «ВУХИН» (ВУХИН) и КЦ ВУХИН совместно с другими специализированными организациями и заводами, показали [20], что наиболее подходящими из тощих углей для использования в качестве углеродистых восстановителей в электротермических производствах являются угли марки Т Краснобродского и Красногорского разрезов Кузбасса. Данные угли были испытаны на четырех заводах: при выплавке ферросилиция марок ФС25, ФС45, ФС75 (ОАО «Кузнецкие ферросплавы» (КЗФ), ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат» (ЧЭМК)), силикомарганца (ЧЭМК), углеродистого феррохрома (СЗФ, АЗФ). В производстве ферросилиция и силикомарганца использование тощего угля в шихте ограничено 15-30% (по углероду) при обязательном участии в шихте активного восстановителя (древесной щепы, полукокса). В шлаковых процессах производства углеродистого феррохрома на открытых печах можно увеличить содержание тощих углей до 50-70 %, а в закрытых печах уменьшить до 30 %. В производстве карбида кальция тощий уголь может быть использован в смеси с коксом до 30-50 %. В производстве фосфора показана возможность использования тощего угля при полной замене им кокса с сохранением технико-экономических показателей (ТЭП).

В цехе кремния БрАЗа используют смесь восстановителей, состоящую из древесного угля, нефтяного кокса, древесной щепы, отходов электродного производства и каменного угля (марок Д или Т) [21].

КЦ ВУХИН и КЗФ предлагают использовать в производстве ферросплавов угли марки СС Кузбасса [21, 22]. Промышленные испытания с ис-

пользованием данных углей проведены на КЗФ при выплавке ферросилиция марок ФС70Э, ФС70, ФС75 в открытых печах мощностью 20 и 29 МВ·А с заменой до 30-40 % (по углероду) коксового орешка углем. Максимальная производительность, минимальный расход электроэнергии и высокий коэффициент извлечения кремния были достигнуты на вариантах шихтовки «кокс–уголь–щепа». В целом по предприятию при использовании угля марки СС удалось снизить удельный расход электроэнергии на 8 %, производительность печей повысить на 5,5 %, достигнуть замены 30 % (по углероду) коксового орешка углем.

Промышленные плавки кремния с использованием угля марки СС Новосергиевского разреза Кузбасса крупностью 13-25 мм проводили в цехе кремния БрАЗа на печах мощностью 25 МВ·А [21]. Печи работали достаточно стабильно, металл выходил равномерно. Устойчивая работа печей во время опытов способствовала тому, что все печи работали заметно лучше, чем до и после опытов.

В работе [22] указывается возможность использования угля марки Г в технологии электротермического получения силикоалюминия.

В качестве восстановителя при выплавке силикокальция и карбида кремния возможно применение антрацита [23].

Каменные угли и антрациты также широко применяются в различных процессах черной металлургии. Так, известен способ использования каменных углей и антрацитов в качестве ПУТ для вдувания в горн доменной печи. В работе [9] для приготовления ПУТ использовали смесь высоколетучих битуминозных углей с антрацитом, удельный расход ПУТ при этом составил 200 кг/т чугуна. В работе [24] приведен опыт использования антрацита в качестве сырья для изготовления ПУТ.

В процессе агломерации возможна замена коксовой мелочи антрацитовым штыбом [23, 24]. Антрацит также может использоваться в производстве окатышей [24].

Каменный уголь может применяться в качестве восстановителя в процессах металлизации железорудного сырья и железосодержащих отходов. В работе [11] приведены исследования возможности применения каменных углей марки Д Казахстана для металлизации ЖРС и ЖСО. По результатам исследований наибольший практический интерес представляют уголь марки Д Шубаркольского месторождения. Также не исключается использование углей месторождения Каражыра.

В работе [25] описан опыт применения каменных углей в процессе Redsmelt в качестве восстановителя для получения губчатого железа из ЖРС и ЖСО. Сущность процесса заключается в изготовлении сырых окатышей из ЖРС, ЖСО, каменного угля (или другого восстановителя), связи и воды, и дальнейшем восстановлении окатышей до губчатого железа в печи с вращающимся подом (RHF).

Каменный уголь применяется в процессе жидкофазного восстановления Finex (фирма «POSCO», Южная Корея) [26] в качестве ПУТ, вдуваемого через фурмы в печь в количестве до 250 кг/т чугуна, а также в качестве сырья для генерации восстановительного газа (450-500 кг/т чугуна). Общий расход угля – 700-750 кг/т чугуна.

Каменный некоксующийся уголь применяется в качестве восстановителя для получения губчатого железа из руды во вращающейся печи по технологии FASTMET [27], разработанный фирмами «Kobe Steel Ltd.» (Япония) и «Midrex Technologies Inc» (США). Развитие этой технологии привело к созданию в 1996 г. процесса производства во вращающейся печи передельного чугуна высшего качества из окатышей или брикетов на основе ЖРС и угля (процесс ITmk3).

Фирмой «JFE Steel» (Япония) были проведены исследования процесса Hi-QIP [27]. Отличительной особенностью этого процесса производства высококачественного гранулированного («галечного») железа в печи с вращающимся подом является восстановление смеси ЖРС, угля и флюса на слое угля на поде печи. При нагреве до 1723-1773 К происходит восстановление, плавление с получением отделенных от шлака металлических гранул.

В работах [12-16] приведены результаты расчетов и исследований металлизации железорудных материалов в трубчатой вращающейся печи с помощью каменных углей и антрацитов различных месторождений.

#### *Шунгитовые породы.*

Шунгиты – это осадочные образования, имеющие в своем составе шунгитовое вещество – особую разновидность природной смеси аморфного углерода и силикатных материалов – преимущественно кварца, щелочных алюмосиликатов (слюды, серицита) и железистых силикатов (хлорита). Наибольшее распространение имеют минерализованные шунгиты – шунгитовые породы, которые представляют собой природную смесь высокодисперсного кремнезема и углерода. Единственные в мире месторождения шунгитовых пород находятся в Карелии, ресурсы оцениваются в 250 млрд. т [28, 29].

Применение шунгитовых пород возможно в следующих металлургических процессах: получение карбида и нитрида кремния; производство литейного чугуна; производство ферросплавов; выплавка кобальта, никеля, фосфора [28, 29].

Так, промышленное использование шунгитов в выплавке литейного чугуна осуществляется на ОАО «Тулачермет», ОАО «Косогорский металлургический завод» (КМЗ) [28]. Установлено, что коэффициент замены кокса шунгитом составляет в среднем 1 т/т. Доля кремния шунгита, переходящего в чугун, составляет 88,5 %.

Наиболее перспективными для вовлечения в производство ферросплавов, прежде всего ферросилиция, являются шунгитовые породы с вы-

сококремнистой основой групп IIА и IIIА. Породы с повышенным содержанием глинозема могут быть использованы для производства кремнистых сплавов с алюминием и марганцем. Шунгиты были испытаны при выплавке 45 и 75 %-ного ферросилиция, товарного силикомарганца и ферросиликоалюминия. Расчеты [28] показывают, что при выплавке ферросилиция можно полностью заменять коксик и значительную часть кварцита шунгитом, а при выплавке силикомарганца полностью заменять кварцит и 50-60 % металлургического коксика.

Имеется большой опыт применения шунгитов в производстве карбида и нитрида кремния [28, 29]. Так, с использованием шунгитов получают нитевидные кристаллы карбида кремния длиной до 1,5 мкм. В токе азота и аммиака при температуре 1000-1500 °С получили нитрид кремния с размером частиц менее 1 мкм. В агрегате типа «вертикальная шахта» получили непрерывным способом металлургический карбид кремния из углеродвысокозольных пород при температурах 1873-2323 К. Из шунгита с содержанием 30 % углерода в результате термообработки при температурах 1600-1800 °С получали до 100 % карбидной фазы. В вакуумной печи при нагреве до 1600-1800 °С со скоростью 200-300 град/ч при давлении 0,25-1,3 кПа и выдержке 1-2 ч получали карбид кремния из шунгитовых пород.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России : в 2 т. Т. 1. Состояние, динамика, развитие / Н. Н. Балмасов [и др.] ; под ред. А. Е. Евтушенко, Ю. Н. Малышева. – М. : Издательство Московского государственного горного университета, 1999. – 648 с.
2. Глущенко, И. М. Теоретические основы технологии горючих ископаемых : учеб. для вузов / И. М. Глущенко. – М. : Металлургия, 1990. – 296 с.
3. Исследование бурого угля Майкюбенского бассейна как углеродистого восстановителя при выплавке ферросплавов / В. М. Страхов [и др.] // Кокс и химия. – 1998. – № 9. – С. 17–21.
4. Мизин, В. Г. Углеродистые восстановители для ферросплавов / В. Г. Мизин, Г. В. Серов. – М. : Металлургия, 1976. – 272 с. : ил.
5. Буроугольный полукокс. Возможности его использования как топлива в агломерации железных руд / В. М. Страхов [и др.] // Кокс и химия. – 2007. – № 8. – С. 20–26.
6. Формирование заданных свойств углеродистого восстановителя для электротермических процессов (Обзор) / М. Л. Улановский [и др.] // Кокс и химия. – 2000. – № 4. – С. 14–20.
7. Зельберг, Б. И. Шихта для электротермического производства кремния / Б. И. Зельберг, А. Е. Черных, К. С. Елкин. – Челябинск : Металл, 1994. – 320 с.

8. Анализ качества и перспективы использования малозольных углеродистых восстановителей для электротермического производства технического кремния / В. М. Страхов [и др.] // Кокс и химия. – 2012. – № 5. – С. 18–21.

9. Дроздник, И. Д. Использование пылеугольного топлива при выплавке чугуна и стали в доменном и недоменных процессах (Обзор) / И. Д. Дроздник, Ю. С. Кафтан, Ю. Б. Должанская // Кокс и химия. – 2002. – № 2. – С. 32–39.

10. Десульфурация при восстановлении железорудных концентратов углем / А. М. Амдур // Кокс и химия. – 2013. – № 3. – С. 2–6.

11. Комплексное исследование углей Казахстана как углеродистого сырья для прямого восстановления железа / А. И. Едильбаев // Кокс и химия. – 2013. – № 9. – С. 20–27.

12. Кудрявцев, В. С. Использование некоксующихся углей в черной металлургии / В. С. Кудрявцев, С.А. Пчелкин. – М. : Металлургия, 1981. – 168 с.

13. Юсфин, Ю. С. Новые процессы получения металла (металлургия железа) : учеб. для вузов / Ю. С. Юсфин, А. А. Гиммельфарб, Н. Ф. Пашков. – М. : Металлургия, 1994. – 320 с.

14. Кудрявцев, В. С. Металлизированные окатыши / В. С. Кудрявцев, С. А. Пчелкин. – М. : Металлургия, 1974. – 136 с.

15. Юсфин, Ю. С. Обжиг железорудных окатышей / Ю. С. Юсфин, Т. Н. Базилевич. – М. : Металлургия, 1973. – 272 с.

16. Теория металлизации железорудного сырья / Ю. С. Юсфин [и др.]. – М. : Металлургия, 1982. – 256 с.

17. Исламов, С. Р. Переработка низкосортных углей в высококалорийное топливо / С. Р. Исламов // Уголь. – 2012. – № 3. – С. 64–66.

18. Угли СССР : справочник / И. А. Ульянов [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1975. – 308 с.

19. Нефедов, П. Я. О требованиях к качеству углеродистых восстановителей для процессов рудной электротермии / П. Я. Нефедов // Кокс и химия. – 2000. – № 8. – С. 24–32.

20. Страхов, В. М. Альтернативные углеродистые восстановители для ферросплавных производств / В. М. Страхов // Кокс и химия. – 2009. – № 1. – С. 20–25.

21. Использование углей марки СС в производстве технического кремния / В. М. Страхов [и др.] // Кокс и химия. – 2012. – № 2. – С. 11–14.

22. Страхов, В. М. Проблемы с углеродистыми материалами для рудной и химической электротермии и пути их решения / В. М. Страхов // Кокс и химия. – 2010. – № 8. – С. 29–33.

23. Кураков, Ю. И. Производство специальных продуктов из антрацита (Обзор) / Ю. И. Кураков // Кокс и химия. – 2005. – № 9. – С. 7–18.

24. Рудыка, В. И. Сталь, уголь, кокс – 2014 и перспектива (Аналитический обзор материалов саммита «Европейский кокс 2014») / В. И. Рудыка, В. П. Малина // Кокс и химия. – 2014. – № 7. – С. 15–25.
25. Новое поколение печей с вращающимся подом для производства губчатого железа на основе угля / Р. Дегель [и др.] // Черные металлы. – 2000. – № 7. – С. 31–39.
26. Люнген, Х. Б. Производство чугуна / Х. Б. Люнген, М. Петерс, П. Шмеле // Черные металлы. – 2010. – № 9. – С. 52–66.
27. Близнюков, А. С. Прямое восстановление железной руды углем / А. С. Близнюков // Новости черной металлургии за рубежом. – 2010. – № 6. – С. 20–25.
28. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния : монография : в 3 т. Т. 1. Полях О. А. Микрокремнезем в производстве карбида кремния / О. А. Полях, В. В. Руднева ; под ред. Г. В. Галевского. – М. : Флинта : Наука, 2007. – 248 с.
29. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния : монография : в 3 т. Дополнительный том. Руднева В. В. Плазмометаллургическое производство карбида кремния: развитие теории и совершенствование технологии / В. В. Руднева ; под ред. Г. В. Галевского. – М. : Флинта : Наука, 2008. – 387 с.

УДК 66.094.2

*А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Н.М. Кулагин, В.В. Васильев, Г.Н. Черновский*

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

## ИСКУССТВЕННЫЕ ТВЕРДЫЕ УГЛЕРОДИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СОВРЕМЕННОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Рассмотрены виды, свойства и применение в современной металлургии искусственных твердых углеродистых материалов: бурого угольных и каменноугольных полукокс, каменноугольного, нефтяного и пекового коксов.

Types, properties and application in modern metallurgy of artificial solid carbonaceous materials are considered: brown-coal and coal semi-coke, coal, oil and peak coke.