

УДК 669.181.42

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ БАКЧАРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ НА СВОЙСТВА ВОЗДУШНО-СУХИХ И ВОССТАНОВЛЕННЫХ ТОСРФОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Архипов Виктор Сергеевич,

канд. хим. наук, доцент кафедры химической технологии топлива
и химической кибернетики Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: vsa@tpu.ru

Трифопова Евгения Петровна,

инженер кафедры общей и неорганической химии Института природных
ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: vsa@tpu.ru

Цель исследования. Бакчарские бурые железняки требуют обогащения с последующим окучкованием для металлургического передела. При этом в качестве связующего может быть использован торф, который залегает в непосредственной близости от рудного поля. В процессе металлизации торф будет являться восстановителем и заменит металлургический кокс. В связи с этим целью работы является изучение влияния измельчения руды на состав и свойства торфорудных материалов.

Актуальность. В связи с истощением местной железорудной базы в Горной Шории на металлургические комбинаты Кузбасса завозят половину требующегося объема железной руды. Освоение Бакчарского железорудного месторождения позволит избежать затрат на транспортировку железной руды на металлургические комбинаты Кузбасса и Урала с удаленных горно-обогатительных комбинатов.

Методы исследования. Для получения торфорудных материалов использовали бакчарскую руду, добытую гидравлическим методом и измельченную под сито 0,5; 0,25; и 0,1 мм. Руду смешивали с сырым торфом, и формовали цилиндрические образцы, которые затем сушили и подвергали нагреву в электрической печи. Нагревание проводили со скоростью 5 °С в минуту до температур 500...1100 °С с шагом в 100 °С. В связи с пирофорностью свежевосстановленных продуктов их охлаждали в атмосфере азота. Воздушно-сухие и восстановленные образцы испытывали на прочность в барабане и на испытательной машине МИРИ-500К. В восстановленных образцах определяли содержание железа общего, двухвалентного и металлического. По результатам анализов рассчитывали степень восстановления и металлизации продуктов восстановления.

Результаты. Измельчение руды повышает пластическую прочность сырой торфорудной массы. На стадии спекания при 1100 °С измельчение руды способствует упрочнению восстановленных образцов, содержащих 10 % торфа на сухую торфорудную массу.

Выводы. При повышенном содержании торфа в торфорудных материалах измельчение бакчарской руды приводит к некоторому упрочнению восстановленного продукта; при низком содержании торфа (10 %) измельчение руды существенно повышает прочность продукта при 1100 °С. Достигнутая прочность удовлетворяет требованиям к доменной шихте.

Ключевые слова:

Торф, руда, помол, прочность, восстановление

Введение

Современная годовая потребность в товарной железной руде заводов Кузбасса составляет 10 млн т [1]. Рудники Горной Шории обеспечивают половину этой потребности. Дефицит железорудного сырья металлургические комбинаты восполняют поставками товарной руды с удаленных горно-обогатительных комбинатов [2]: Костомукшского (расстояние 5 тыс. км), Михайловского и Лебединского (4 тыс. км), Качканарского и Высокогорского (2 тыс. км), Коршуновского (1 тыс. км).

Освоение Бакчарского железорудного месторождения Томской области позволит надолго обеспечить потребности металлургических заводов Южного Урала и Западной Сибири [3]. Уже сейчас по данным геологоразведочных работ можно утверждать, что прогнозные ресурсы Бакчарского месторождения в размере 28 млрд т будут в значительной степени перекрыты [4]. Из шести известных типов руд Бакчарского месторождения наиболее распространены плотные и рыхлые гетито-гидрогетитовые разновидности со средним содержанием железа 38...42 % [5]. По своему составу они близки к бурым железнякам

Аятского и Лисаковского месторождений. На этой руде работает Лисаковский горно-обогатительный комбинат [6], выпускающий концентрат гравитационно-магнитного обогащения ($Fe_{вал}=49\%$) и концентрат обжиг-магнитного обогащения ($Fe_{вал}=62\%$) для Карагандинского металлургического комбината (Казахстан). Таким образом, исходная бакчарская руда с содержанием общего железа 38...42 % должна быть обогащена до содержания общего железа 49...62 %, если ориентироваться на выплавку чугуна в доменных печах сибирских заводов.

Одним из вариантов переработки Бакчарской железной руды является полная или частичная металлизация концентрата в процессах прямого восстановления с последующим металлургическим переделом в доменных или сталеплавильных печах [7–9]. При этом проблема окучкования решается путём формования торфорудных материалов (ТРМ), в которых связующим компонентом и в то же время восстановителем является торф. Ранее проведенные исследования (1960–1970 гг.) показали принципиальную возможность получения ТРМ и их металлизации [10].

В качестве металлургического топлива при металлургии железных руд Бакчарского месторождения может быть использован торф северо-восточных отрогов Васюганского торфяного месторождения, занимающих водоразделы рек Шегарка–Икса–Бакчар–Парбиг (Бакчарское, Иксинское болото).

Первоочередной сырьевой базой для обеспечения торфом потребностей потенциального металлургического производства может служить торфяной массив, занимающий водораздел рек Бакчар–Икса, протянувшийся на 150 км от истоков этих рек до их впадения в р. Чая (Бакчарское болото). О структуре запасов этого торфяного массива мож-

но судить по результатам детальной разведки 1985 г. участка № 5 у с. Кр. Бакчар [11]. Верховой торф, составляющий 24 % от общих запасов участка № 5, представлен фускум, магелланикум и ангустифолиум видами. Преобладающий на участке переходный торф (52 % запасов) представлен осоково-сфагновым, осоковым, древесно-осоковым, сфагновым видами. Среди низинных торфов (18 % запасов) доминируют осоковый, древесно-осоковый и древесные виды. Средняя степень разложения торфа R составляет 22 % при зольности 6,0 %. Преобладают на участке торфа средней и низкой степени разложения. Указанные торфа следует рассматривать как реальное сырье для получения тор-

Таблица 1. Характеристика торфа месторождения Васюганское

Table 1. Characteristic of Vasyuganskoe deposit peat

Шифр образца торфа Peat sample code	Месторождение, пункт отбора Deposit, selection point	Ботанический состав Botanical composition		Тип, вид торфа Class, type of peat
		Растения торфообразователи Plants peat-formers	Содержание, % Content, %	
397-M2	Васюганское, уч. 5 у с. Кр. Бакчар, п. «Водоем» Vasyuganskoe, sec. 5, near selo Kr. Bakchar, poselok «Vodoe»	Сф. Магелланикум/Sph. Magellanikum Сф.	20	Верховой пушицево-сфагновый Upper cottongrass-sphagnous R=5...10 % A ^d =3,5 %
		Ангустифолиум/Sph. Angustipholium Сф.	25	
		Балтикум/Sph. Baltikum	5	
		Пушица/Cotton grass Кустарнички/Low strub	45 5	
397-M4	Васюганское, уч. 5 у с. Кр. Бакчар, п. «Осока» Vasyuganskoe, sec. 5, near selo Kr. Bakchar, poselok «Osoka»	К. лазиокарпа/К. lasiokarpa	45	Переходный осоково-сфагновый Transient sedgy-sphagnous R=35 % A ^d =5,9 %
		Пушица/Cotton grass	10	
		Шейхцерия/Scheuchzerinф	10	
		Вахта/Marsh	5	
		Сф. магелланикум/Sph. Magellanikum	20	
		Остатки древесины березы/Birch wood residual Сф. ангустифолиум/Sph. Angustipholium	5 5	
397-M5	Васюганское, уч. 5 у с. Кр. Бакчар, п. 245 дет. разведки 1985 Vasyuganskoe, sec. 5, near selo Kr. Bakchar, poselok 245 det. razvedki 1985	Сф. Фускум/Sph. Fuskum	95	Верховой фускум-торф Upper fuskum-peat R=3...4 % A ^d =1,4 %
		Вереск, кустарнички/Heather, low strub	3	
		Кора и древесина сосны/Pine bark and wood	2	

Примечание: R – степень разложения торфа; A^d – содержание золы на абсолютно-сухую массу торфа; Сф. – сфагнум.

Note: R is the degree of peat decomposition; A^d is ash content per absolutely dry peat mass; Sph. is sphagnum.

Таблица 2. Прочность воздушно-сухих ТРМ

Table 2. Strength of air-dried peat-ore materials (POM)

Тип и вид торфа в составе ТРМ Class and type of peat in POM	Измельчение руды под сито, мм Peat dispersion for sieve, mm	Прочность на раздавливание Crush strength				Коэффициент истираемости, % при составе торф/руда Wearability ratio % at peat/ore composition	
		Состав торф/руда 10/90 Peat/ore composition 10/90		Состав торф/руда 30/70 Peat/ore composition 30/70			
		ρ	σ	ρ	σ	10/90	30/70
Переходный осоково-сфагновый (397-M4) Transient sedgy-sphagnous (397-M4)	0,5	115	15	209	40	56	4,7
	0,25	142	19	236	45	39	6,0
	0,1	129	17	230	43	39	6,7
Верховой пушицево-сфагновый (397-M2) Upper cottongrass-sphagnous (397-M2)	0,5	157	21	193	36	41	1,2
	0,25	172	21	180	32	30	3,3
	0,1	198	25	192	33	60	3,5
Верховой фускум (397-M5) Upper fuskum (397-M5)	0,5	132	16	132	18	57	8,9
	0,25	130	16	162	22	39	8,8
	0,1	108	13	168	24	36	10,6

Примечание: P – разрушающая нагрузка, кг на образец; σ – прочность на раздавливание, кг/см².

Note: P is the fracture load, kilo per sample; σ is the crush strength, kg/cm².

форудных материалов из Бакчарской руды. При этом наиболее реально использовать для окускования мелкозернистый концентрат обогащения Бакчарской руды. В связи с этим целью данной работы является изучение влияния измельчения бакчарской железной руды на состав и прочность воздушно-сухих и восстановленных ТРМ.

Методика эксперимента

Для приготовления ТРМ отобраны 3 технологические пробы торфа на участке № 5 Васюганского торфяного месторождения (табл. 1). Из них 2 образца верхового торфа – фускум-торф, пушицево-сфагновый торф, а также переходный осоково-сфагновый торф. В качестве рудной составляющей использовали руду-сыпучку, отобранную с площадки гидронамыва вблизи с. Полянника Бакчарского района. Руда представляет собой сыпучую массу бурого цвета, состоящую в основном из округлых блестящих оолитов и бобовин гетита ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и гидрогетита ($3\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Содержание железа общего в данном образце руды составило 46,3 %.

Для получения ТРМ руду измельчали до трёх значений крупности частиц – под сито 0,5; 0,25 и 0,1 мм. Такие размеры частиц близки к реальной дисперсности рудных концентратов. Сырой торф предварительно подсушивали до влажности 84...91 %. С каждым образцом торфа приготовлены 2 состава ТРМ, содержащие 10 и 30 % торфа в расчете на сухие вещества. С учётом трех значений дисперсности руды всего приготовлено 6 вариантов ТРМ с каждым торфом. ТРМ получали в следующей последовательности: сырую торфомассу выстилали слоем 1...2 см и равномерно распределяли по нему измельченную руду. Для усреднения торфорудной массы ее дважды пропускали через шнековый механизм и затем формовали путем выдавливания в специальной матрице цилиндрические образцы диаметром 34...35 мм. Сырые ТРМ затем сушили в условиях лабораторного помещения до постоянного веса (воздушно-сухое состояние). Во время сушки периодически измеряли размеры и массу формовок для расчета усадки. В сырой торфорудной массе определяли пластическую прочность с помощью конического пластометра.

С воздушно-сухими торфорудными материалами проводились испытания на прочность двумя методами:

- на раздавливание – на лабораторном гидравлическом прессе ПГЛ-5 и на испытательной машине МИРИ-500К. Машина может работать в разных режимах, включая режим сжатия. Механические испытания на описываемой машине осуществляются путем деформирования образца при контролируемой нагрузке. Испытание проводится по программе, заложенной в блоке управления. Результаты испытания выводятся на экран монитора в виде диаграммы и могут сохраняться в электронном виде для дальнейшего использования.

- на истирание – во вращающемся барабане со стальными шарами при скорости вращения 150 об/мин в течение 10 мин. Показатель истираемости определяли как выход мелочи менее 3 мм, в процентах от загрузки.

Результаты испытания представлены в табл. 2.

С полученными ТРМ проведены испытания по их металлизации в режиме нагрева с постоянной скоростью 5 °С/мин. Образцы помещали в реторту из жаропрочной стали ёмкостью 300 мл и нагревали в тигельной электропечи ТЭП-1 до температур 500...1000 °С с интервалом 100 °С. Парогазовые продукты разложения ТРМ выводились через штуцер в крышке реторты в конденсационную аппаратуру (ловушка, водяной конденсатор). По достижении конечной температуры нагрева реторту извлекали из печи и охлаждали до комнатной температуры. Учитывая пирофорность продуктов восстановления при охлаждении в реторте, поддерживали избыточное давление азота в течение полутора суток. Для прогрева ТРМ до температуры 1100 °С использовали высокотемпературную трубчатую печь СУОЛ-0,4412М2-У42. ТРМ помещали в муллиткремнеземистую трубку с заглушенным торцом и отводом парогазовых продуктов через открытый торец. В восстановленных ТРМ определялась механическая прочность на раздавливание (табл. 4, рис. 2–4).

В продуктах восстановления определяли содержание золы (ГОСТ 11306–83), выход летучих (ГОСТ 6382–2001), содержание железа общего (ГОСТ 23581.18–81), железа двухвалентного (ГОСТ 23581.3–79), железа металлического (ГОСТ 26482–90). На основании полученных данных рассчитывали степень восстановления α и степень металлизации φ (табл. 3).

Обсуждение результатов

На этапе подготовки ТРМ выявлено большое влияние состава торфорудной смеси на пластическую прочность. С увеличением содержания руды от 70 до 90 % пластическая прочность возрастает в 2–6 раз. Наиболее сильное возрастание в 5–6 раз отмечено в смесях с пушицево-сфагновым торфом 397-М2. Также существенно возрастает пластическая прочность при добавке мелкодисперсной руды по сравнению с грубодисперсной. Из трех образцов торфа, опробованных в торфорудных смесях, наибольшее значение пластической прочности до 266 кПа отмечено в составе с 90 % руды и верховым пушицево-сфагновым торфом 397-М2.

При высушивании ТРМ теряют большое количество воды и при этом уменьшаются в размерах. Потеря влаги при естественной сушке составляет от 29...39 % при содержании 10 % торфа в смеси, до 56...65 % при содержании торфа 30 %. Соответственно, величина усадки образцов ТРМ изменяется от 17...30 до 33...58 %. Продолжительность сушки составляет 5–6 дней. Основная часть влаги теряется в первые 2–3 дня сушки.

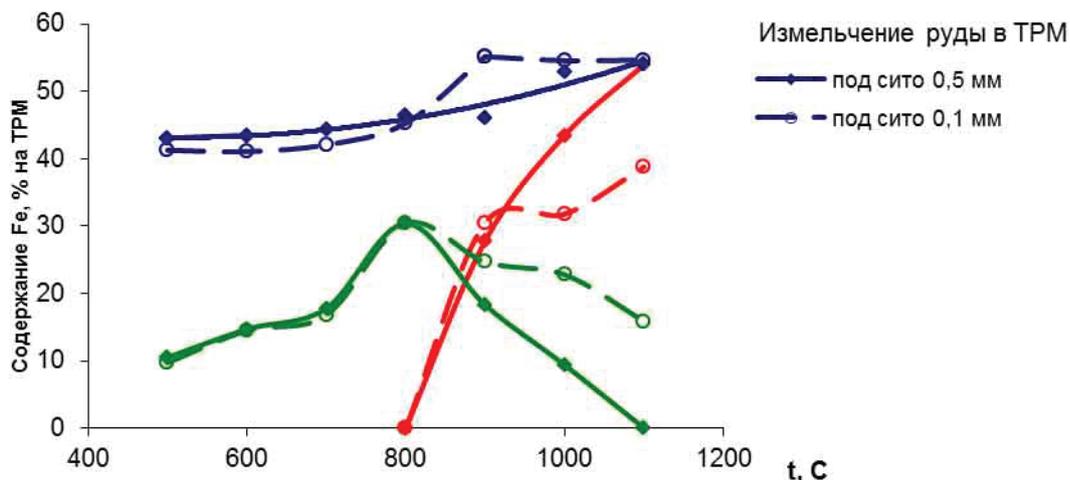


Рис. 1. Изменение содержания железа общего $Fe_{общ}$ (1,2), железа закисного Fe^{2+} (5,6), железа металлического $Fe_{мет}$ (3,4) в ТРМ при их нагреве (30 % торфа 397-М4)

Fig. 1. Crush of total iron content Fe_{total} (1, 2), protoxidic iron Fe^{2+} (5, 6), metallic iron Fe_{met} (3, 4) in POM at heating (30 % peat 397-M4)

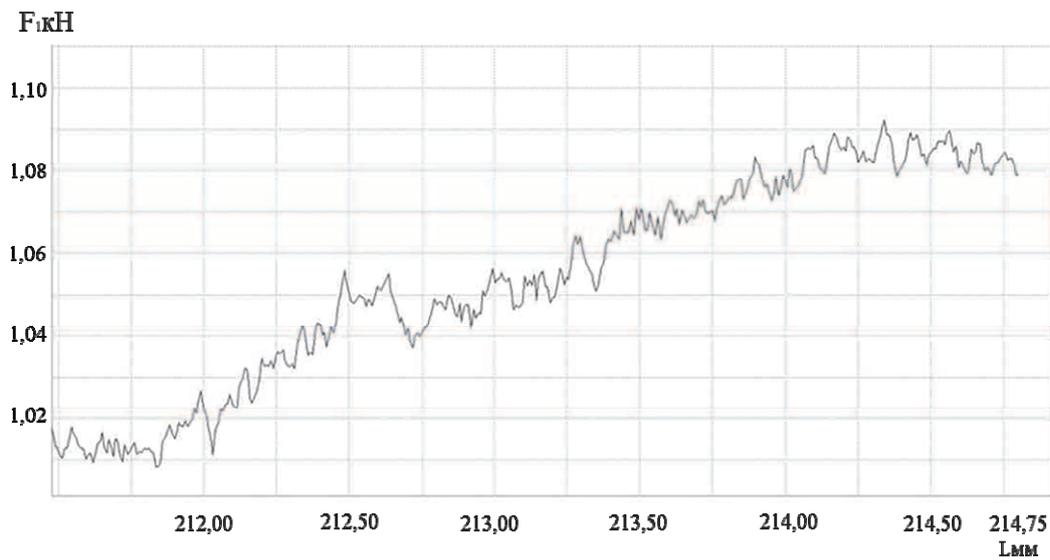


Рис. 2. Диаграмма разрушения ТРМ при определении прочности на машине МИРИ-500К. Состав ТРМ: 10 % торфа 397-М4, 90 % бакcharской руды, измельченной под сито 0,25 мм; температура восстановления 600 °С; прочность $P=7$ кг/образец. F – нагрузка на образец (здесь и на рис. 3, 4); L – движение поршня пресса (здесь и на рис. 3, 4)

Fig. 2. Diagram of POM destruction when determining strength on MIRI-500K. POM structure: 10 % of 397-M4 peat, 90 % of bakchar ore, reduced for 0,25 mm sieve; recovery temperature is 600 °C; strength is $P=7$ kg/sample. F is a load to the sample (here and in Fig. 3, 4); L is press piston (here and in Fig. 3, 4)

Во время сушки происходит упрочнение ТРМ вследствие структурообразования в торфорудной смеси [12]. Измерение прочности воздушно-сухих ТРМ показало (табл. 2), что наибольшее влияние на нее оказывает соотношение торфа и руды. Показатель прочности на раздавливание σ при содержании торфа 30 % существенно выше, чем в ТРМ с содержанием торфа 10 %. Так, в образцах ТРМ, содержащих 10 % переходного сфагнового торфа, $\sigma=15...19$ кг/см², что вдвое ниже, чем в образцах с 30 % этого торфа (40...43 кг/см²). Также существенно возрастает прочность по показателю истираемости (табл. 2). На образование прочного ТРМ влияет

также вид торфа. Из 3-х исследованных видов торфа наибольшую прочность обеспечивает переходный осоково-сфагновый и верховой пушицево-сфагновый торф. Гораздо ниже прочность на раздавливание ТРМ с фускум-торфом ($\sigma=13...22$ кг/см²). Наиболее высокой прочностью на истираемость (1,2...3,5 %) отличаются образцы ТРМ, содержащие 30 % верхового пушицево-сфагнового торфа. Гораздо ниже прочность на раздавливание ТРМ с фускум-торфом ($\sigma=13...22$ кг/см²). Наиболее высокой прочностью на истираемость (1,2...3,5 %) отличаются образцы ТРМ, содержащие 30 % верхового пушицево-сфагнового торфа.

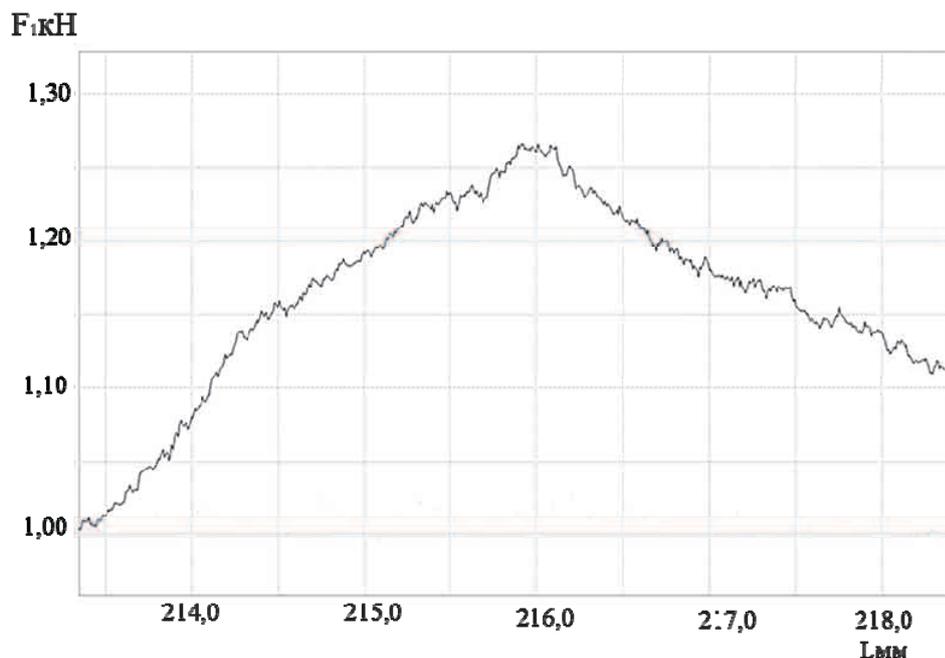


Рис. 3. Динамика разрушения ТРМ при определении прочности на машине МИРИ-500К. Состав ТРМ: 30 % торфа 397-М4, 70 % бакcharской руды, измельченной под сито 0,25 мм; температура восстановления 700 °С; прочность $P=25$ кг/образец

Fig. 3. Dynamics of POM destruction when determining strength on MIRI-500K. POM structure: 30 % of 397-M4 peat, 70 % of bakchar ore, reduced for 0,25 mm sieve; recovery temperature is 700 °C; strength is $P=25$ kg/sample

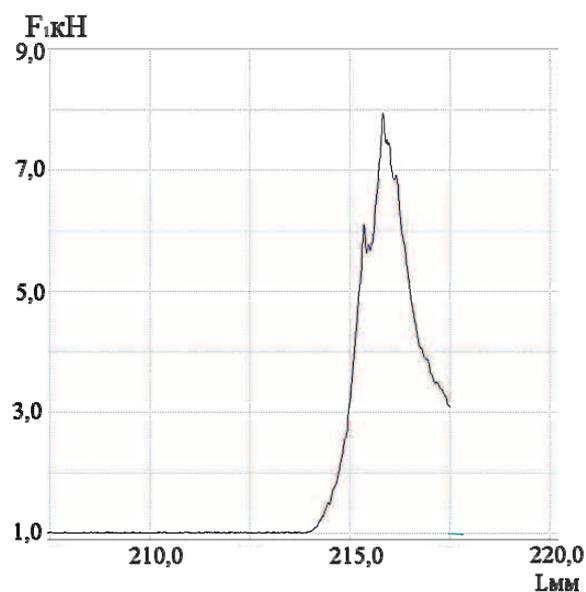


Рис. 4. Динамика разрушения ТРМ при определении прочности на машине МИРИ-500К. Состав ТРМ: 10 % торфа 397-М4, 90 % бакcharской руды, измельченной под сито 0,25 мм; температура восстановления 1100 °С; прочность $P=700$ кг/образец

Fig. 4. Dynamics of POM destruction when determining strength on MIRI-500K. POM structure: 10 % of 397-M4 peat, 90 % of bakchar ore, reduced for 0,25 mm sieve; recovery temperature is 1100 °C; strength is $P=700$ kg/sample

Измельчение руды неоднозначно повлияло на прочность воздушно-сухих ТРМ. В разных составах наблюдалось как увеличение прочности на раздавливание (состав с 30 % фускум-торфа 397-М5, состав с 10 % торфа 397-М2), так и снижение этого показателя (состав с 10 % торфа 397-М5). Прочность на истираемость в образцах разного состава изменяется с ростом дисперсности руды в разном направлении. В ТРМ с 10 % торфа она в основном возрастает, а в ТРМ с 30 % торфа снижается (табл. 2).

При нагреве ТРМ протекают процессы термической деструкции (коксование) торфа и восстановления железной руды [13, 14]. Эти процессы сопровождаются потерей массы в виде летучих веществ торфа и газообразных продуктов восстановления железной руды. Вместе с тем происходит перестройка структуры твёрдого вещества ТРМ, в ходе которой по мере нагрева протекают процессы разрыхления и уплотнения новых углеродных и минеральных фаз. На основании измерения размеров образцов (диаметр и высота) рассчитана их усадка по мере восстановления в интервале температур 500...1100 °С. Уже при температуре нагрева до 500 °С усадка ТРМ с 10 % торфа составляет 2...10 %. При нагреве до 1100 °С она доходит до 50...60 %. Параллельно снижается масса образцов в среднем на 16...20 % при нагреве до 500 °С и на 25...30 % при нагреве до 1100 °С. В ТРМ с 30 % торфа усадка и потеря массы при нагреве до 500 °С в среднем составляет 30 %, а при более высоких температурах эти величины в ТРМ с 10 % торфа

и с 30 % сближаются. Следует отметить, что потеря массы и усадка неравномерно увеличиваются с ростом температуры нагрева. Наибольшие изменения происходят в интервале 800...900 °С, что явно связано с процессом восстановления железной руды.

Результаты анализа восстановленных ТРМ на содержание $Fe_{\text{общ}}$, Fe^{+2} и $Fe_{\text{мет}}$ позволяют представить кинетику превращения окислов железа и связать ее с наблюдаемыми изменениями в структуре ТРМ – усадкой, убылью массы и прочностью.

В изученном интервале температур 500...1100 °С содержание $Fe_{\text{общ}}$ постоянно возрастает при нагревании за счет потери летучих веществ торфа и газообразных продуктов восстановления окислов железа. В составе с 10 % торфа содержание железа общего изменяется в интервале 46...60 %, в составе с 30 % торфа – 40...60 %.

Более динамично изменяется содержание двухвалентного железа Fe^{+2} . В исходной руде содержание Fe^{+2} незначительно. Поэтому принимаем, что

все железо Fe^{+2} в восстановленных ТРМ появляется при восстановлении исходного оксида Fe_2O_3 , входящего в состав гидрогетита. Из полученных данных видно, что содержание Fe^{+2} в восстановленных ТРМ меняется сложным образом, причем решающую роль в динамике изменения Fe^{+2} играет соотношения торф/руда. При содержании торфа 10 % повышение температуры нагрева ТРМ приводит к накоплению Fe^{+2} от 5...8 % при 500 °С до 48...55 % при 900 °С. При дальнейшем нагреве до 1100 °С содержание Fe^{+2} изменяется мало или несколько снижается. Таким образом, при этом соотношении торф/руда процесс восстановления завершается, в основном превращением $Fe_2O_3 \rightarrow FeO$.

Металлическое железо появляется в интервале 800...900 °С и к 1100 °С, его содержание доходит до 10...15 %. Интервал температур 800...900 °С отличается наиболее высокой скоростью накопления Fe^{+2} и ростом степени восстановления в среднем от 16 до 35...45 %.

Таблица 3. Изменение степени восстановления и металлизации ТРМ при нагреве в зависимости от состава торф/руда (% масс.) и измельчения руды

Table 3. Change in rate of POM recovery and metallization when being heated depending on peat/ore composition (% wt.) and ore reduction

Температура нагрева, °С Heating temperature, °С	Переходный осоково-сфагновый торф (397-M4) в составе ТРМ Transient sedgy-sphagnous peat (397-M4) in POM structure				Верховой пушицево-сфагновый торф (397-M2) в составе ТРМ Upper cotton grass-sphagnous peat (397-M2) in POM structure				Верховой фускум-торф (397-M5) в составе ТРМ Upper fuskum peat (397-M5) in POM structure			
	10/90		30/70		10/90		30/70		10/90		30/70	
	α	φ	α	φ	α	φ	α	φ	α	φ	α	φ
Измельчение руды под сито 0,5 мм/Ore reduction for 0,5 mm sieve												
500	4,4	–	7,7	–	4,1	–	7,3	–	10,4	–	12,0	–
600	7,7	–	11,0	–	13,4	–	8,6	–	11,2	–	15,6	–
700	15,2	–	13,1	–	14,9	–	14,9	–	11,7	–	17,7	–
800	16,5	–	21,3	–	19,6	–	19,3	–	18,0	–	21,2	–
900	40,7	12,1	73,2	60,3	34,2	2,5	92,9	89,5	44,7	18,0	82,1	73,5
1000	43,6	16,4	88,0	82,2	36,2	5,4	93,6	90,6	51,9	28,7	90,6	86,0
1100	51,0	27,4	100,0	100,0	33,7	1,7	99,9	99,8	57,0	36,2	98,6	97,9
Измельчение руды под сито 0,25 мм/Ore reduction for 0,25 mm sieve												
500	5,3	–	10,4	–	6,6	–	6,8	–	4,2	–	10,1	–
600	9,8	–	13,0	–	5,6	–	8,8	–	4,4	–	13,1	–
700	12,8	–	14,1	–	12,5	–	14,0	–	11,0	–	14,6	–
800	18,9	–	22,9	–	16,0	–	17,3	–	15,5	–	16,9	–
900	45,7	19,5	80,3	70,8	33,7	1,7	96,2	94,4	41,0	12,6	75,5	63,6
1000	47,1	21,6	94,4	91,7	36,3	5,6	98,4	97,7	46,7	20,9	88,2	82,5
1100	45,2	18,8	89,3	84,1	36,8	6,3	95,2	92,9	54,5	32,5	97,8	96,8
Измельчение руды под сито 0,1 мм/Ore reduction for 0,1 mm sieve												
500	4,9	–	7,6	–	3,8	–	7,0	–	6,0	–	11,9	–
600	8,4	–	11,5	–	4,6	–	8,2	–	4,4	–	12,3	–
700	12,1	–	13,0	–	11,7	–	10,1	–	12,7	–	14,9	–
800	17,5	–	21,8	–	14,9	–	13,1	–	15,5	–	17,4	–
900	44,5	17,7	69,8	55,2	33,4	1,3	67,9	52,4	38,9	9,4	66,7	50,6
1000	54,6	32,6	71,8	58,2	37,6	7,4	84,6	77,2	45,6	19,3	75,0	62,9
1100	44,1	17,2	80,4	70,9	44,7	18,0	89,5	84,4	54,1	31,9	94,6	92,0

α – степень восстановления, %; φ – степень металлизации, %.

Note: α is the recovery degree, %; φ is the metallization degree, %.

Таблица 4. Прочность на раздавливание восстановленных торфорудных материалов с разным составом торф/руда (% масс.)
Table 4. Crushing strength of reduced peat-ore materials with different peat/ore composition (% wt.)

Температура нагрева, °С Heating temperature, °C	Переходный осоково-сфагновый торф (397-М4) в составе ТРМ Transient sedgy-sphagnous peat (397-M4) in POM structure				Верховой пушицево-сфагновый торф (397-М2) в составе ТРМ Upper cotton grass-sphagnous peat (397-M2) in POM structure				Верховой фускум-торф (397-М5) в составе ТРМ Upper fuskum peat (397-M5) in POM structure			
	10/90		30/70		10/90		30/70		10/90		30/70	
	P	σ	P	σ	P	σ	P	σ	P	σ	P	σ
Измельчение руды под сито 0,5 мм/Ore reduction for 0,5 mm sieve												
500	5,5	0,79	20,3	4,6	52	5,7	31	3,4	11	1,1	20	1,8
600	6,0	0,85	27	6,5	48	5,3	36	3,9	6,6	0,6	19	1,8
700	4,6	0,67	22	5,3	40	4,4	26	2,8	6,2	0,6	16	1,4
800	3,2	0,46	16	4,0	30	3,3	27	3,0	0,8	0,1	11	1,1
900	менее 0,2	менее 0,1	10	2,8	15	1,6	29	3,2	менее 0,2	менее 0,1	13	1,2
1000	менее 0,2	менее 0,1	5	1,4	менее 0,2	менее 0,1	32	3,5	менее 0,2	менее 0,1	12	1,1
1100	115	27,5	2	1,0	317	35	3	0,3	9,7	2,5	менее 0,2	менее 0,1
Измельчение руды под сито 0,25 мм/Ore reduction for 0,25 mm sieve												
500	31	4,4	31	7,1	55	6,1	26	2,8	12	0,8	29	5,0
600	10	1,4	27	6,3	53	5,9	26	2,9	7,8	0,6	27	4,1
700	12	1,6	27	6,5	25	2,7	27	2,9	2,8	0,2	27	3,8
800	23	3,2	24	6,3	37	3,9	30	3,3	3,0	0,2	14	2,1
900	1,8	0,5	13	3,2	28	3,1	24	2,7	0,7	0,1	13	2,4
1000	?1	0,4	4,5	1,2	30	3,3	29	3,1	менее 0,2	менее 0,1	11	2,2
1100	740	250	2,3	1,2	850	94	2	0,3	167	46	менее 0,2	менее 0,1
Измельчение руды под сито 0,1 мм/Ore reduction for 0,1 mm sieve												
500	21	2,9	36	7,9	38	4,2	34	3,8	11	0,7	26	4,1
600	19	2,5	41	9,1	38	4,2	32	3,6	9,5	0,7	34	5,3
700	14	2,0	33	7,2	32	3,6	39	4,3	4,6	0,3	31	4,6
800	12	1,7	31	6,8	33	3,6	40	4,5	2,2	0,2	17	2,6
900	6,4	1,0	12	3,1	36	4,0	28	3,1	6,3	0,5	15	2,8
1000	28	4,8	5,5	2,3	38	4,2	22	2,4	17	1,8	12	2,4
1100	457	155	4,5	2,2	900	100	2,7	0,3	265	69	менее 0,2	менее 0,1

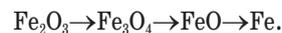
Примечание: P – разрушающая нагрузка, кг на образец; σ – прочность на раздавливание, кг/см².

Note: P is the fracture load, kilo per sample; σ is the crush strength, kg/cm².

При соотношении торф/руда 30/70 динамика восстановления качественно меняется. Содержание Fe⁺² возрастает при нагреве до 800 °С и затем резко снижается до нескольких процентов (рис. 1). В то же время при 800 °С начинается интенсивная металлизация и к 1100 °С железо в основном переходит в металлическую фазу. Степень восстановления торф/руда 30/70 хорошо выражено влияние измельчения руды на скорость последних этапов восстановления (металлизация). Чем выше степень измельчения руды, тем ниже скорость металлизации и, соответственно, степень восстановления. Наиболее ярко этот эффект выражен в составе с 30 % осоково-сфагнового торфа (397-М4). При увеличении помола руды от крупного (<0,5 мм) до среднего (<0,25 мм) и тонкого (<0,1 мм) степень восстановления α при 1100 °С составила для этого состава 100, 89 и 80 % (табл. 3). Эти результаты не согласуются с известными данными других авторов [15, 16], в которых показано, что скорость восстановления возрастает при измельчении железорудных материалов. Возможно, причиной такого несоответствия является повышенная плотность

ТРМ вследствие спекания мелкодисперсных частиц минеральной фазы.

Протекающие при нагревании ТРМ процессы коксования торфа и восстановления железной руды радикально изменяют структуру и прочность ТРМ. Коксование приводит к деструкции вещества торфа и понижению прочности исходного воздушно-сухого ТРМ. В процессе восстановления железной руды происходит смена оксидов железа [17–19]:



При этом частицы со структурой оолитов уменьшаются в объеме, уплотняются и на последних стадиях (FeO, Fe) приобретают пластичность и спекаемость [20]. Наложение этих превращений торфяного и железорудного материала обусловило сложный характер изменения прочности ТРМ при их нагреве. Из полученных результатов по определению прочности восстановленных ТРМ на раздавливание видно, что эта характеристика изменяется в широком диапазоне – от менее чем 1 кг до 900 кг на образец (табл. 4). Прочность образцов обусловлена температурой нагрева и обычно она быстро падает при нагревании. Кроме того, суще-

ственное влияние оказывает состав ТРМ (вид торфа и его содержание) и дисперсность руды. Влияние температуры нагрева на прочность ТРМ можно рассмотреть на примере ТРМ, содержащего 10 % переходного осоково-сфагнового торфа и 90 % руды крупностью менее 0,5 мм. При нагреве до 500 °С исходная прочность воздушно-сухого ТРМ $P=115$ кг/обр. падает до $P=5,5$ кг/обр. (табл. 4, рис. 2). При дальнейшем нагреве до 800 °С она слабо изменяется. Резкое снижение прочности происходит в интервале 800...1000 °С, что связано с интенсивным восстановлением в этом интервале температур. Образцы при температуре 900...1000 °С становятся рыхлыми ($P<0,2$ кг/обр.) и рассыпаются при извлечении из реторты. Дальнейший нагрев до 1100 °С приводит к упрочнению ТРМ вследствие спекания фазы вюститита (FeO). При этом достигается прочность $P=115$ кг/обр. Повышение содержания торфа до 30 % приводит к умеренному упрочнению восстановленных ТРМ в диапазоне температур 500...1000 °С (рис. 3). В то же время этап спекания при 1100 °С отсутствует вследствие низкого содержания вюститита, перешедшего в металлическое железо. Измельчение руды приводит к существенному упрочнению восстановленных ТРМ во всем интервале температур, и особенно на стадии спекания при 1000...1100 °С. Так, для состава с 10 % переходного осоково-сфагнового торфа прочность спеченных образцов составила 740 и 457 кг/обр. при измельчении руды соответственно под сито 0,25 и 0,1 мм (табл. 4, рис. 4).

Аналогичные закономерности проявляются в составах ТРМ с верховым пушицево-сфагновым и фускум-торфом. Из трех исследованных образцов торфа в составе ТРМ наиболее прочная структура образуется при восстановлении ТРМ на основе верхового пушицево-сфагнового торфа. На стадии спекания образцов с 10 % этого торфа достигнута прочность 900 кг/обр. при крупности руды менее 0,1 мм. Это максимальная величина прочности среди всех изученных вариантов (табл. 4). Наименьшей прочностью отличаются восстановленные ТРМ, полученные на основе фускум-торфа. Образцы, содержащие 10 % фускум-торфа, лишь при 500 °С сохраняют прочность 11–12 кг/обр., которая при дальнейшем нагреве падает вплоть до минимума (менее 0,2 кг/обр.) при 900...1000 °С. На стадии спекания образцы этого состава упрочняются до значений 9,7 кг/обр. при измельчении руды под сито 0,5 мм. При более тонком помоле руды под сито 0,25 и 0,1 мм прочность восстановленных образцов этого состава на стадии спекания достигает соответственно $p=167$ и 265 кг/обр. (табл. 4). Более прочную структуру образуют составы, содержащие 30 % фускум-торфа, но при

нагреве их прочность падает вплоть до минимальной при 1100 °С.

Заключение

Влияние измельчения бакчарской железной руды на свойства торфорудных материалов изучено на трёх образцах торфа при двух составах торф/руда и при трех дисперсностях руды – менее 0,5, менее 0,25 и менее 0,1 мм. Установлено, что измельчение руды оказывает влияние как на стадии подготовки ТРМ, так и при их восстановлении в режиме линейного нагрева до температур 500...1100 °С. При получении ТРМ (90 % руды на сухие вещества) измельчение руды повышает пластическую прочность сырой торфорудной массы вдвое в составе с верховым пушицево-сфагновым торфом. В других вариантах этот эффект также выражен, но в меньшей степени.

Прочность воздушно-сухих ТРМ наиболее высока в составах с 30 % переходного осоково-сфагнового торфа; при измельчении руды под сито 0,25 мм она составила 236 кг/образец.

Измельчение руды неоднозначно влияет на прочность разных составов ТРМ, что позволяет регулировать ее, варьируя степень измельчения руды и составом ТРМ.

При нагревании ТРМ изменяется структура и состав образцов вследствие деструкции торфа и восстановления оксидных фаз руды. По ходу нагрева возрастает содержание $Fe_{общ.}$ от 40 % при 500 °С до 60 % при 1100 °С. Содержание Fe^{+2} изменяется с максимумом при 800...900 °С (рис 1). Металлическое железо появляется при 800 °С, и затем его доля непрерывно возрастает при нагреве до 1100 °С. Наиболее полно металлизация протекает в составе с 30 % торфа. В составе с 10 % торфа степень восстановления не превышает 45 % (табл. 3). Установлено, что измельчение руды снижает скорость восстановления в составах с высоким содержанием торфа (30 %) на этапе металлизации, т. е. при температуре выше 800 °С.

Прочность ТРМ при нагревании, в основном, падает, но при низком содержании торфа (10 %) при высокой температуре 1100 °С происходит спекание образцов с резким возрастанием прочности до 900 кг/образец. Как показали анализы, это связано с высоким содержанием вюститита FeO в восстановленном ТРМ. Наибольшей прочностью при восстановлении отличаются образцы из верхового пушицево-сфагнового торфа 397-М2. Измельчение руды заметно повышает прочность восстановленных ТРМ. Так, образцы на основе фускум торфа (10 %) при измельчении руды под сито 0,5; 0,25 и 0,1 мм на стадии спекания упрочняются до величин $P=9,7, 167$ и 265 кг/обр. соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов П.А., Фрейдин А.М. О развитии рудной базы металлургического комплекса Западной Сибири // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 4. – С.133–143.
2. Железородная база России / Л.К. Антоненко, Г.И. Архипов, Г.И. Бергман и др. – М.: Геоинформмарк, 1998. – 842 с.
3. Перспективы освоения Бакчарского железородного месторождения, Томская область / А.К. Мазуров, Г.Ю. Боярко, В.Г. Емешев, А.В. Комаров // Руды и металлы. – 2006. – № 2. – С. 64–70.
4. Гринев О.М. Освоение железородных гигантов среднего Приобья – начало планомерного промышленного перерождения Томской области и Западной Сибири // Минерально-сырьевая база Сибири: история становления и перспективы: Матер. научно-практ. конф. Т. 1 Полезные ископаемые. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 215–223.
5. Литогеохимическая характеристика основных типов железных руд Бакчарского месторождения / О.М. Гринев, Е.А. Григорьева, Е.А. Булаева, Е.П. Тюменцева // Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых: Матер. Междунар. конф. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – С. 190–196.
6. Сырье для черной металлургии. Справочник / М.Г. Ладыгичев, В.М. Чижикова, В.И. Лобанов и др. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 1. – 896 с.
7. Ковалёв Д.А., Ванюкова Н.Д., Ванюкова А.А. Исследование металлургических свойств самовосстанавливающихся окатышей // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 4. – С. 7–9.
8. Kumabara Masatashi. The mode of simultaneous processing for metalling iron and carbonisation coal // Curr. Adv. Mater. And Prozess. – 1989. – V. 2. – № 1. – P. 120–xxx.
9. W.-K. Lu, Frank Huang D. The Evolution of Iron making Process Based on Coal-Containing Iron Ore Agglomerates // ISIJ International. – 2001. – V. 41. – № 8. – P. 807–812.
10. Смольянинов С.И. Комплексное использование торфа в химико-металлургическом процессе на базе бакчарских руд // Итоги исследований по химии за 50 лет 1917–1967 гг.: Труды межвузовской научной конф. – Томск: Изд-во ТГУ, 1968. – С. 90–98.
11. Торфяные ресурсы Томской области и их использование / Л.И. Инишева, В.С. Архипов, С.Г. Маслов, Л.С. Михантьева. – Новосибирск: Изд-во, 1995. – 88 с.
12. Смольянинов С.И., Криницын Г.Г., Сенченко А.И. О роли химического взаимодействия между гумусовой частью торфомассы и окислами железа в процессе получения топливо-плавильных материалов // Известия ТПИ. – 1977. – Т. 214. – С. 16–18.
13. Определеение кинетических параметров процесса термического разложения торфа по дериватографическим данным / С.И. Смольянинов, В.И. Лозбин, В.М. Икрин, Я.А. Белихмаер // Химия твёрдого топлива. – 1973. – № 4. – С. 50–56.
14. Особенности термического разложения торфа по дериватографическим данным / С.И. Смольянинов, В.И. Лозбин, В.М. Икрин, Я.А. Белихмаер // Известия ТПИ. – 1976. – Т. 274. – С. 56–60.
15. Архипов В.С., Подальщук Т.С. Влияние дисперсности окислов железа на кинетику восстановления древесным углем // Сборник «Минеральное сырье и нефтехимия». – Томск: Кемеровский полиграфкомбинат, 1979. – С. 133–137.
16. Кудрявцев В.С., Пчёлкин А.С. Металлизированные окатыши. – М.: Металлургия, 1974. – 120 с.
17. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа. – М.: Академкнига, 2007. – 464 с.
18. Basu Projjal, Sarcas S.B., Ray H.S. Isothermal reduction of coal mixed iron oxide pellets // Irons. Indian Inst. Met. – 1989. – V. 42. – № 2. – P. 165–172.
19. Nakano Masanori, Naito Masaaki, Higuchi Kenichi. Non-spherical Carbon Composite Agglomerates: Lab-scale Manufacture and Quality Assessment // ISIJ International. – 2004. – V. 44. – № 12. – P. 2079–2085
20. Малышева Т.Я., Долицкая О.А. Петрография и минералогия железородного сырья. – М.: МИСИС, 2004. – 424 с.

Поступила 07.04.2014 г.

UDC 669.181.42

THE INFLUENCE OF GRINDING BAKCHAR IRON ORE ON THE PROPERTIES OF AIR-DRIED AND RECOVERED PEAT-ORE COMPOSITIONS

Victor S. Arkhipov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: vsa@tpu.ru

Evgeniya P. Triphonova,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: vsa@tpu.ru

The aim of the study: Bakchar iron, brown iron ores require enrichment and subsequent sintering for metallurgical processing. The peat which lies in the immediate vicinity to the ore field can serve as a binder. In metallization the peat will be the restorer and it will replace metallurgical coke. In this regard, the aim of the research is to study ore reduction effect on composition and properties of peat materials.

The relevance: Owing to depletion of local iron ore base in Mountain Shoria a half of the required volume of iron ore is delivered to metallurgical complexes of Kuzbass. The development of Bakchar iron ore deposits allows avoiding the costs of transporting iron ore to the steel mills of the Kuznetsk basin and the Urals from the remote mining and processing plants.

Methods of the research: To obtain peat materials the authors have used Bakchar iron ore mined by hydraulic method and crushed for 0,5; 0,25 and 0,1 mm sieve. The ore was mixed with damp peat and cylindrical samples were molded. The latter were then dried and heated in an electric furnace at a speed of 5 °C per minute to 500...1100 °C in increments of 100 °C. Owing to pyrophorosity of newly restored products they were cooled in nitrogen atmosphere. Air-dried and recovered samples were tested to the limit in a drum and on the test machine MIRI-500K. In the recovered samples the authors determined the content of total, ferrous and metal iron. Test results were used to calculate the degree of recovery and plating of recovery products.

Results: Ore grinding increases plastic strength of raw corporates mass. At the stage of sintering at 1100 °C ore grinding contributes to hardening of the reduced samples containing 10 % of peat to dry peat-ore mass.

The conclusion: Grinding Bakchar iron ore results in some strengthening of the recovered product at high-peat thorough materials; if there is a low content of peat (10 %) ore grinding increases significantly the strength of the product at 1100 °C. The strength achieved meets the requirements of the blast furnace charging.

Key words:

Peat, ore, grinding, durability, reduction.

REFERENCES

- Fillipov P.A., Freydin A.M. O razvitiy rudnoy basy metallurgicheskogo kompleksa Zapadnoy Sibiri [On the development of ore base at metallurgical complex of Western Siberia]. *Fiziko-technicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2012, no. 4, pp. 171–176.
- Antonenko S.L., Arkhipov G.I., Bergman G.I. *Zhelezorudnaya baza Rossii* [Iron ore base of Russia]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1998. 842 p.
- Mazurov A.K., Boyarko G.I., Emeshev V.G., Komarov A.V. Perspektivy osvoeniya Bakcharskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya, Tomskaya oblast [Prospects of exploring iron ore Bakcharskoe deposit, Tomsk region]. *Rudy i metally*, 2006, no. 2, pp. 64–70.
- Grinyov O.M. Osvoenie zhelezorudnykh gigantov srednego Priobya – nachalo planomernogo promyshlennogo pererozhdeniya Tomskoy oblasti i Zapadnoy Sibiri [Development of iron ore giants in middle Ob – beginning of planned industrial rebirth of Tomsk region and Western Siberia]. *Mineralno-syryevaya baza Sibiri: istoriya stanovleniya i perspektivy: Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Mineral-reserve base of Siberia: history of establishment and prospects. Materials of research conference]. Tomsk, 2008. Vol. 1, pp. 215–223.
- Grinyov O.M., Grigorieva E.A., Bulaeva E.A., Tyumentsieva E.P. Litogeokhimicheskaya kharakteristika osnovnykh tipov zheleznykh rud Bakcharskogo mestorozhdeniya [Lithochemical characteristic of the main types of iron ore of Bakcharskoe deposit]. *Sovremennye problemy geologii i razvedki polesnykh iskopaemykh: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [Current problems of geology and minerals exploration. Proc. International conference]. Tomsk, TPU Publ. House, 2010. pp.190–196.
- Lodygichev M.G., Chizhikova V.M., Lobanov V.I. *Syrye dlya chernoy metallurgii. Spravochnik* [Raw materials for steel industry. Reference book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. Vol. 1, 896 p.
- Kovalev D.A., Vanyukov N.D., Vanyukova A.A. Issledovanie metallurgicheskikh svoystv samovostanavlivayushchikhsya okatyshey [Study of metallurgical properties of self-healing pellets]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, 2013, no. 4, pp. 7–9.
- Kumabara Masatachi. The mode of simultaneous processing for metalling iron and carbonization coal. *Curr. Adv. Mater. and Process*, 1989, vol. 2, no. 1, pp. 120–xxx.
- W.-K. Lu, Frank Huang D. The Evolution of Iron making Process Based on Coal Containing Iron Ore Agglomerates. *ISIJ International*, 2001, vol. 41, no. 8, p. 807–812.
- Smolyaninov S.I. Kompleksnoe ispolzovanie torfa v khimiko-metallurgicheskoy protsesse na baze bakcharskikh rud [Integrated use of peat in chemical and metallurgical process based on Bakchar ores]. *Itogi issledovaniy po khimii za 50 let 1917–1967gg: Trudy mezhvuzovskoy nauchnoy konferentsii* [Results of researches in chemistry for fifty years 1917–1967. Proc. of student scientific conference]. Tomsk, TSU Press, 1968, pp. 90–98.
- Inisheva L.I., Arkhipov V.S., Maslov S.G., Michanteyeva L.S. *Torfyanye resursy Tomskoy oblasti i ikh ispolzovanie* [Peat resources in Tomsk Region and their use]. Novosibirsk, Изд-во, 1995. 88 p.
- Smolyaninov S.I., Krinitsyn G.G., Senchenko A.I. O roli khimicheskogo vzaimodeystviya mezhdum gumusovoy chastyu torfomassy i oksidami zheleza v protsesse polucheniya toplivo-plavilnykh materialov [On the role of chemical interactions between humic part of peat mass and iron oxides while preparing fuel-melting materials]. *Izvestiya TPI*, 1977, vol. 214, pp. 16–18.
- Smolyaninov S.I., Lozbin V.I., Ikrin V.M., Belikhmaer Ya.A. Opredelenie kineticheskikh parametrov protsessa termicheskogo raslozheniya torfa po derivatograficheskim dannym [Determination of kinetic parameters of peat thermal decomposition by derivatographic data]. *Khimia tverdogo topliva*, 1973, no. 4, pp. 50–56.
- Smolyaninov S.I., Lozbin V.I., Ikrin V.M., Belikhmaer Ya.A. Osobennosti termicheskogo raslozheniya torfa po derivatograficheskim dannym [Features of peat thermal decomposition by derivatographic data]. *Izvestiya TPI*, 1976, vol. 274, pp. 56–60.
- Arkhipov V.S., Podalshchuk T.S. Vliyaniye dispersnosti zheleza na kinetiku vosstanovleniya drevesnym uglem [Influence of iron oxide dispersion on recovery kinetics by charcoal]. *Mineralnoe syrye i neftekhimiya*, Tomsk, Kemerovskiy poligrafkombinat, 1979. pp. 133–137.
- Kudryavtsev V.S., Pcholkina A.S. *Metallizovannyye okatyschi* [Metallic pellets]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974. 120 p.
- Yusfin Y.S., Pashkov N.F. *Metallurgiya zheleza* [Iron metallurgy]. Moscow, Akademkniga Publ., 2007. 464 p.
- Basu Projjal, Sarkas S.B., Ray H.S. Isothermal reduction of coal mixed iron oxide pellets. *Irons. Indian Inst. Met*, 1989, vol. 42, no. 2, pp. 165–172.
- Nakano Masanori, Naito Masaaki, Higuchi Kenichi. Non-spherical Carbon Composite Agglomerates: Lab-scale Manufacture and Quality Assessment. *ISIJ International*, 2004, vol. 44, no. 12, pp. 2079–2085.
- Malysheva T.Ya., Dolitskaya O.A. *Petrografia i mineralogiya zhelezorudnogo syrya* [Petrography and mineralogy of iron ore]. Moscow, MISIS Press, 2004. 424 p.

Received: 07 April 2014.