

УДК 549 : 669.162.1

Петров А.В., Евтехов В.Д., Евтехов Е.В.,
Рева А.В., Долина Н.П., Беспояско Э.А.

Методы упрочнения брикетов железорудного концентрата с добавкой цементного клинкера

Изложены результаты изучения минерального и химического состава металлургических шламов комбината «АрселорМиттал Кривой Рог» и получаемого из них железорудного концентрата, используемого для производства железорудных брикетов с примесью цементного клинкера. Рассмотрены процессы, происходящие в брикетах при разных технологических режимах и влияющие на их конечную прочность. Предложен механизм взаимодействия физико-химических и теплофизических процессов, рассмотрено их влияние на тепло- и массоперенос при упрочнении брикетов. Определен характер преобразований исходных компонентов и их роль в упрочнении брикетов. Показана эффективность влияния тепловой энергии СВЧ-излучения на ускорение этих процессов.

Одной из основных проблем подготовки железорудного сырья к металлургическому переделу является придание ему физических и технических свойств, обеспечивающих необходимую эффективность процесса получения металла. К главным задачам относится обеспечение оптимальной кусковатости металлургического сырья (аглокуда, концентрат, другие компоненты металлургической шихты). Для железорудного сырья это достигается путем производства из него окатышей, агломерата, брикетов.

Авторы изучали процессы брикетирования железорудного концентрата, производимого из тонкозернистых отходов (шламов) металлургического производства комбината «АрселорМиттал Кривой Рог». Концентрат для получения брикетов будет производиться на обогатительной установке фирмы «Гонта-Технология», строительство которой завершается в 2009 г.

Краткая характеристика исходных материалов

Металлургические шламы, используемые как сырье для производства железорудного концентрата, являются продуктом смыва пылевидных отходов металлургического производства из разных цехов комбината. Образуясь в разных термодинамических условиях разных металлургических агрегатов, шламы характеризуются большим разнообразием минерального и химического состава [3, 4]. В ограниченном количестве шламы повторно используются как один из компонентов агломерационной шихты [7, 8]. По результатам минералогических исследований, входящие в состав шламов природные и техногенные компоненты можно разделить на три группы:

1) железо-содержащие минералы (металлическое железо, вюстит, магнетит, магхемит, гематит (мартит, железная слюдка, дисперсный гематит), ферриты кальция и магния, гидроксиды железа (гетит, лепидокрокит, дисперсный гетит) и др. – всего около 20 минеральных фаз, значительно отличающихся по химическому составу и физическим свойствам (магнитным параметрам, плотности и др.);

2) органогенные компоненты (коксовая пыль, технические масла);

3) нерудные минеральные компоненты (моно- и двухкальциевый силикаты, силикаты магния и железа, кварц, тридимит, кристобалит, силикатное и железо-силикатное стекло, гидратированная известь, карбонаты (кальцит, сидерит и др.), графит, сульфаты (гипс, ярозит), глинистые минералы, галогениды (галит, сильвин), цинкит и др.).

Компоненты первых двух групп – железорудная и энергетическая составляющие шламов – представляют коммерческий интерес. Железо-содержащие минеральные фазы составляют около 55 мас.% шламов, органогенные компоненты – около 15 %, нерудные компоненты – около 30%.

Общее содержание железа в составе шламов колеблется от 30 до 60 мас.%, в среднем составляет около 40 мас.%. Колебания содержаний других химических компонентов находятся в пределах: MnO – 0,2-0,7%; CaO – 8-20%; MgO – 0,5-3,5%; SiO₂ – 3-15%; Al₂O₃ – 0,2-1,5%. Содержание воды в шламах обезвоженных карт комбината изменяется от 15-20 до 30-35 мас.%. Негативной характеристикой шламов как железорудного сырья является повышенное содержание вредных примесей (оксиды натрия и калия, сера, фосфор, цинк, свинец, медь и др.) – суммарно – от 0,4 до 2,0%, в среднем около 0,7 мас.%.

Железо-содержащие минеральные фазы шламов делятся на ферро- и ферримагнетики. К первым, сильномагнитным, относятся металлическое железо, магнетит, магхемит; ко вторым, слабомагнитным – мартит, железная слюдка, вюстит, гетит, ферриты и др. Безжелезистые силикаты, карбонаты, стекло, коксовая пыль и другие компоненты относятся к диамагнетикам и парамагнетикам, являясь практически немагнитными. Плотность железо-содержащих фаз относительно высокая – от 4000 до 5500 кг/м³; для силикатов, карбонатов, графита, стекла этот показатель составляет 2000-3200 кг/м³, для коксовой пыли – 870-1500 кг/м³.

Исходя из значений физических характеристик шламообразующих минералов, гранулометрического состава, структурных и текстурных особенностей шламов, была разработана комбинированная магнитно-гравитационная технология их обогащения, реализованная в обогатительной установке фирмы «Гонта-Технология».

В технологической цепи установки происходит разделение металлургических шламов на четыре продукта:

– железорудный концентрат с общим содержанием железа 65-66 мас.% – выход около 40%;

– энергетическое сырье (смесь коксовой пыли и технических масел с примесью негорючих частиц), характеризующееся зольностью 25-30% и выходом около 15%;

– песчанистый силикатный продукт (строительный или балластный материал с крупностью частиц 0,1-1,0 мм) – выход около 20%;

– тонкодисперсные отходы обогащения (тонкозернистая (менее 0,04 мм) смесь нерудных и рудных частиц с примесью коксовой пыли) – выход около 25%.

Технологической схемой обогащения шламов предусмотрено удаление основного количества упомянутых выше вредных примесей из производимого железорудного концентрата. Характер перераспределения химических компонентов между концентратом и отходами обогащения 1-й очереди обогатительной установки показан в табл. 1.

Таблица 1.

Химический состав (мас.%)
материала объединенной пробы лежалых шламов (1),
полученного из нее концентрата (2) и отходов обогащения (3)

Химические компоненты	1	2	3
Данные фазового анализа железа			
Fe _{общ.}	40,21	65,52	23,34
Fe _{мет.}	3,02	5,18	1,58
Fe _{магн.}	15,75	26,89	8,32
Fe _{гем. + гидр.}	18,19	32,47	8,67
Fe _{жарб. + сил.}	3,25	0,98	4,77
Коксовая пыль, технические масла и другие горючие компоненты	13,98	4,86	20,07
Данные полного силикатного химического анализа			
SiO ₂	11,81	3,95	17,05
TiO ₂	0,042	0,052	0,035
Al ₂ O ₃	0,23	0,06	0,35
Fe ₂ O ₃	37,62	56,98	24,72
FeO	16,56	25,77	10,42
Fe _{мет.}	3,01	5,38	1,43
MnO	0,350	0,135	0,493
ZnO	0,23	0,07	0,33
MgO	0,96	0,21	1,47
CaO	10,95	2,82	16,37
Na ₂ O	0,70	0,12	1,08
K ₂ O	0,13	0,04	0,18
P ₂ O ₅	0,088	0,047	0,115
CO ₂	0,27	0,10	0,38
C _{орг.}	13,03	3,17	19,60
C _{графита}	3,09	0,81	4,62
S	0,208	0,073	0,226
H ₂ O ⁺	0,45	0,09	0,68
H ₂ O ⁻	0,25	0,10	0,35
Сумма	99,978	99,977	99,889
Количество определений	21	15	15

Дальнейшее использование полученного концентрата в металлургическом переделе возможно только после его окускования, которое может быть осуществлено методом брикетирования.

Исследование процессов получения железорудных брикетов авторы настоящей статьи проводили с использованием в качестве исходного сырья железорудного концентрата, который планируется производить с помощью обогатительной установки фирмы «Гонта-Технология». Концентрат был получен в лабораторных условиях из представительной пробы лежалых шламов комбината «АрселорМиттал Кривой Рог». Работу под научным руководством доц. К.В.Николаенко выполнили В.В.Филенко, С.В.Карпенко, Т.П.Нестеренко – сотрудники Лаборатории технологической минералогии кафедры прикладной экологии, минералогии и рационального использования недр Криворожского технического университета. Основными технологическими операциями были защитное грохочение шламов, их промывка с целью удаления тонкодисперсного (размер частиц менее 0,04 мм) материала и двухстадиальное гравитационное обогащение песчанистого продукта промывки.

Для изучения механизма упрочнения железорудных брикетов авторы готовили шихту, основными компонентами которой были, кроме железорудного концентрата, подготовленный цементный клинкер [2] и вода. Выбор цементного клинкера вместо стандартного портландцемента объясняется тем, что при производстве последнего используется значительное количества гипса. Входящая в его состав сера относится к вредным химическим примесям железорудного сырья [1]. Характеристики основных компонентов шихты приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2.

Содержание основных химических компонентов в составе шихты

Компоненты шихты	Содержание химических компонентов, мас.%									
	Fe _{общ.}	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	п.п.п.
железорудный концентрат	65,52	56,98	25,77	3,95	2,82	0,21	0,06	0,047	0,073	1,46
цементный клинкер	2,49	3,50	0,05	21,80	62,90	2,35	5,4	0,010	0,120	1,80

Таблица 3.

Гранулометрический состав и некоторые технические характеристики основных компонентов шихты

Материал	Гранулометрический (мм) состав, мас.%					Удельная поверхность, м ² /кг	Насыпная плотность, кг/м ³
	+0,5	0,25-0,5	0,1-0,25	0,074-0,1	-0,074		
железорудный концентрат	19,3	20,0	28,5	17,2	15,0	81,0	2480
измельченный цементный клинкер	0,0	0,0	0,3	4,9	94,8	363,0	1500

Подготовка цементного клинкера к экспериментам включала измельчение его до величины удельной поверхности 360-380 м²/кг. Кроме того для ускорения набора прочности брикета к измельченному клинкеру добавлялись поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые выполняют роль модификатора процесса кристаллизации, способствуют

формированию более мелкозернистой структуры цементных минералов [6]. По экспериментальным данным, наибольшую эффективность имели ПАВ, имеющие состав 3% CaCl_2 + 0,2% сульфит-спиртовой барды (ССБ) или 1,2% CaCl_2 + 1% NH_4NO_3 (содержание компонентов приведено по отношению к общей массе клинкера). Массовая доля клинкера в шихте в оптимальном варианте составляла 7%. Подготовленный цементный клинкер в дальнейшем сокращенно будем именовать КИА (клинкер измельченный активированный).

Шихту, включающую все компоненты, подвергали механохимической активации методом перетирания с целью повышения степени взаимодействия вновь образованных поверхностей [1].

При тщательном смешивании КИА с влажным концентратом возникает контакт дисперсных частиц сухого КИА с водной пленкой, адсорбированной на поверхности частиц концентрата. Сжатие этой смеси в брикетном прессе обеспечивает более плотный контакт частиц шихты. Следует отметить, что шихта для брикетирования, включающая цементное связующее, должна иметь содержание воды, превышающее количество, необходимое для процесса брикетирования, на 1,0-1,6 мас.% – для обеспечения затворения цемента. От соблюдения этого условия в значительной мере зависит активность процессов, протекающих в поровом пространстве брикета.

Подготовленную шихту брикетировали с использованием лабораторного штемпельного прессы с гидроприводом и цилиндрических пресс-форм диаметром 30 мм и высотой 25-40 мм. Давление прессования выдерживалось в пределах 500-550 kg/cm^2 . В ходе экспериментов определялось изменения прочности брикетов на разных стадиях упрочнения, изучались минералогические преобразования, происходившие в объеме брикетов при их упрочнении.

Для упрочнения брикетов применялись методы естественного твердения при вылеживании и тепловлажностной обработки.

Упрочнение железорудных брикетов методом естественного твердения

Для определения влияния метода естественного твердения брикетов при их вылеживании в атмосферных условиях партию брикетов, изготовленных в одинаковых условиях, укладывали на стеллажи и через определенные промежутки времени определяли их прочность путем приложения раздавливающего усилия. Результаты определения прочности брикетов, приведенные в табл. 4, свидетельствуют о том, что набор прочности брикетов происходил постепенно.

Для достижения достаточной высокой прочности брикетов уже после выход их из брикетного прессы, что обеспечило бы надежность их погрузки, транспортирования, складирования, желателен применение быстротвердеющих цементов. В связи с этим предпочтение следует отдавать связующему, в составе которого преобладают высокоалюминат-

ные быстротвердеющие соединения. При гидратации и твердении они связывают повышенное количество воды, обеспечивают ускоренное образование прочных коагулятов, препятствуют водоотделению. К таким связующим относится глиноземистый цемент, в составе которого преобладают алюминаты кальция. По стандартной методике были приготовлены также брикеты с добавкой глиноземистого цемента. Результаты определений (табл. 4) показали, что набор прочности этими брикетами происходит быстрее в сравнении с брикетами, содержащими другие упрочняющие добавки.

Таблица 4.

Прочность на раздавливание брикетов, полученных в процессе естественного твердения

Упрочняющие добавки	Прочность брикетов (кг/бр.) при вылеживании в течение ... дней					
	1 день	3 дня	5 дней	8 дней	12 дней	21 день
клинкер измельченный, *S = 320 м ² /кг	29	42	56	65	73	128
клинкер измельченный, S = 380 м ² /кг	32	47	62	84	95	136
КИА (S = 380 м ² /кг)	37	46	66	91	103	142
цемент глиноземистый, S = 320 м ² /кг	41	59	77	96	141	не опр.

*S = значение удельной поверхности клинкера измельченного;
не опр. – определения не проводились.

Одновременно с определением прочности производилось изучение изменений в структуре брикетов. Уже на первых стадиях вылеживания брикетов в связи с гидратацией КИА было отмечено образование гелеобразного вещества, игольчатых, пластинчатых кристаллов гидроалюмосиликатов кальция, сопровождавшееся твердением цементного связующего на зёрнах концентрата. Гидратация КИА в объеме брикета сопровождалась непрерывным изменением щелочности, концентрации ионов кальция в воде затворения, взаимодействием образующихся продуктов, перекристаллизацией их индивидов и агрегатов. Неравномерность протекания физико-химических процессов и образования цементных минералов обуславливала неравномерность прочности отдельных брикетов. Это подтверждает необходимость операции механохимической активации, эффективного усреднения шихты перед её брикетированием.

Роль ПАВ состояла в образовании пленок на поверхности зародышевых кристаллов гидроалюмосиликатов кальция, вследствие чего происходило замедление их роста и, как результат, – образование большего количества кристаллов в единице объема брикета. Последнее способствовало упрочнению связей в агрегатах цементных минералов, соединяющих частицы железорудного концентрата, увеличению прочности брикетов.

В процессе твердения глиноземистого цемента в объеме брикетов также вначале наблюдалось образование коллоидной фазы, из которой кристаллизовались мельчайшие (менее 0,01 мм по максимальному из-

мерению) кристаллы гидроалюмината кальция $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ в гелеобразной массе $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$. При вылеживания брикета при температуре 18-30°C на протяжении 3-4 суток из этих кристаллов формировался агрегат, прочно соединявший частицы железорудного концентрата.

Полученные результаты показали, что использование глиноземистого цемента при производстве железорудных брикетов позволит значительно снизить затраты на процессы их упрочнения. Однако применение глиноземистого цемента пока ограничивают недостаточные объемы его производства.

Упрочнение брикетов при тепловлажностной обработке

Тепловлажностную обработку сырых брикетов, изготовленных из железорудного концентрата и КИА по описанной выше методике, производили в лабораторном автоклаве. Основным путем передачи в нем тепла брикетам при нагреве является конденсация пара на их открытой поверхности. Теплообмен между брикетами и окружающей парогазовой средой осуществляется путем конвективного теплообмена, конденсации пара на поверхности, испарения жидкости с поверхности и из объема брикетов [1].

Процесс тепловлажностной обработки можно разделить на следующие основные стадии: 1) подогрев от температуры загрузки до температуры изотермической выдержки; 2) изотермическая выдержка при оптимальной температуре; 3) охлаждение от температуры изотермической выдержки до температур окружающей среды [5]. Вначале температура поднималась до 110°C при давлении около 1 атм.; затем значения этих параметров повышались: температуры до 160-170°C, давления до 6-7 атм. В таких условиях брикеты выдерживались в течение 3-5 час. Затем в течение 2,5-3,0 час. осуществлялось снижение давления до 1 атм. и охлаждение брикетов до исходной температуры в течение 1,0-1,5 час.

Эффективность тепловлажностной обработки брикетов в среде насыщенного водяного пара определяется условиями внешнего и внутреннего тепло- и массопереноса. Теплофизические явления в значительной мере контролируют ход физико-химических процессов в сложной многофазовой системе продуктов твердения, определяют характер изменения структуры, напряжений, прочности брикетов.

Брикет представляет собой капиллярно-пористое тело, состоящее из твердого каркаса и пор, заполненных воздухом, жидкостью, паром. Его теплопроводность зависит от общей пористости, размера пор и структуры брикета. Передача тепла происходит через твердый скелет и вещество, заполняющее поры. С увеличением плотности брикета после прессования при брикетировании шихты, теплопроводность его возрастает, приближается к теплопроводности основного компонента шихты – железорудного концентрата.

В начальный период обработки брикетов – на стадии нагрева при атмосферном давлении – водяной пар, находящийся в рабочем пространстве, вступая в контакт с относительно холодной поверхностью брикетов, интенсивно на ней конденсируется. При этом освобождается его теплота конденсации (парообразования), которая идет на увеличение теплосодержания материала. В период нагрева поверхность брикета покрыта пленкой конденсата. Ее температура выше температуры поверхности брикета и ниже температуры греющего пара, а температура внутри брикета, даже на глубине в несколько миллиметров значительно ниже, чем на поверхности.

Температура воздуха, находящегося в порах и капиллярах брикета, равна температуре материала брикета. Для того, чтобы насыщенный водяной пар из окружающего пространства мог проникнуть в поры брикета и там сконденсироваться, он должен вначале проникнуть сквозь пленку конденсата на поверхности и далее переместиться по порам на некоторую глубину, где температура ниже температуры насыщения, т.е. ниже температуры перехода вещества из газообразного состояния в жидкое. На стадии нагрева перенос тепла внутри брикета происходит путем теплопередачи и переноса тепла влагой, внедряющейся в поры. При этом теплопроводность брикета со стороны поверхности нагрева возрастает по мере внедрения конденсата в поры и капилляры, уплотнения в них оставшегося воздуха и создания «теплопроводящих мостиков».

В процессе нагрева брикетов в рабочем пространстве пропарочного агрегата воздух, находящийся в порах брикетов, расширяется пропорционально увеличению его температуры, и вследствие этого частично вытесняется в окружающую среду. Удаление воздуха из пор брикета происходит также вследствие увеличения влагосодержания брикета и связанного с этим замещением влагой части воздуха в порах. Поток воздуха вследствие температурного расширения, а также вытеснения из пор мигрирующей жидкостью направлен из глубины к поверхности брикета, при этом он оказывает противодействие перемещению влаги вглубь брикета. В этот период вследствие массопереноса, создания температурных градиентов, происходит активная миграция влаги от периферийных участков к центру брикетов.

Влага, мигрирующая в порах брикетов под действием градиентов влагосодержания и температуры, стремится сжать воздух, находящийся в порах, вследствие чего в них создается избыточное давление. Градиенты давлений постепенно уравниваются, и происходит равномерная миграция влаги в объеме брикетов с выравниванием теплопроводности. При изотермической выдержке брикетов происходит окончательное выравнивание влагосодержания и температуры в объеме брикетов.

В процессе снижения давления в автоклаве до атмосферного также происходит перераспределение пара, влаги, температуры внутри брике-

тов. В начальной стадии снижения давления выделяющийся пар образуется в основном за счет вскипания воды, находящейся в поверхностных слоях брикета, а в конце сброса давления – основная масса пара образуется в глубинных слоях брикета.

Таким образом, механизм упрочнения брикетов при тепловлажностной обработке можно представить, как сорбцию молекул воды, содержащей ионы связующего, поверхностью частиц концентрата. Эта сорбция сопровождается разрушением поверхностных слоев минеральных частиц и растворением свободного кремнезема, глинозема и других растворимых соединений. Скорость этих процессов возрастает с повышением температуры. Образующиеся гели кремнезема, глинозема и оксидов железа сорбируют ионы кальция, в результате образуются гидросиликаты, гидроалюминаты и гидроферриты кальция, которые, кристаллизуясь на поверхности частиц концентрата, сращивают их в прочный агрегат.

Увеличения скорости и улучшения качества тепловлажностной обработки брикетов, т.е. равномерности образования минеральной связки по всему сечению и объему брикетов, можно добиться путем совершенствования внешнего и внутреннего тепло- и массопереноса, повышения степени равномерности прогрева.

Воздействие тепла СВЧ-энергии на процессы упрочнения брикетов

Эффективность тепловлажностного упрочнения брикетов можно повысить путем микроволнового нагрева с использованием источников СВЧ-энергии. Поскольку микроволновый нагрев предполагает прямое поглощение энергии нагреваемым материалом, устраняются потери тепла, возникающие при использовании его внешних источников с одновременным снижением общей продолжительности процесса.

Была проведена серия опытов с целью определения влияния СВЧ-энергии на процессы твердения брикетов. Установка включала реакционную камеру, соединенную волноводами с СВЧ-генератором с регулируемой выходной мощностью от 0,5 до 6 кВт и рабочей частотой 2450 МГц \pm 1,4 %. Тепловлажностная обработка брикетов проводилась с изменением параметров работы СВЧ-генератора. Изучалась структура брикетов на разных стадиях их упрочнения.

Результаты экспериментов показали, что при прохождении микроволнового излучения через брикеты, происходит поглощение энергии компонентами шихты, в первую очередь, молекулами воды, находящейся в макро- и микропорах, за счёт этого осуществляется быстрый нагрев материала брикетов. Рост температуры способствует активизации процессов миграции ионов, атомов и молекул, снижению вязкости образующихся коллоидов, обеспечивает лучшее их проникновение в поры, более эффективное покрытие ими рудных частиц. При дальнейшем выпаривании воды цементные минералы в виде колломорфных образова-

ний и микрокристаллов относительно равномерно распределяются в объеме брикетов, срачивают рудные частицы в прочный агрегат.

Брикет, имеющий общую пористость от 33 до 40 %, можно рассматривать как микроавтоклав, в котором при микроволновом нагреве и быстром образовании пара в поровом пространстве при общей температуре в объеме агрегата 70-105°C постепенно создается давление от 0,9 до 1,5 атм. Это способствует ускоренному переводу свободной поровой влаги в химически связанное состояние, активизации процессов гидратации и гидролиза, образованию цементных минералов. Последующая сушка брикетов для удаления остатков не связанной влаги способствует увеличению их прочности.

Таким образом, положительным результатом применения СВЧ-энергии является устранение температурного градиента между поверхностью и внутренними частями брикетов, который лимитирует процессы тепло- и массо-переноса. Проникновение продуктов парообразования внутрь брикетов не задерживается до момента выравнивания их температуры и температуры поверхности. Тепло- и массоперенос осуществляются во всем объеме брикетов с высокой скоростью, практически одновременно и равномерно. Скорость нагрева материала зависит от подводимой мощности и частоты СВЧ-энергии. Для каждого материала величина эта является индивидуальной и определяется экспериментально. Показатели прочности брикетов, достигнутые при разных режимах, приведены в табл. 5.

Таблица 5.

Методы упрочнения брикетов	Продолжительность процесса	Прочность на сжатие, кг/брикет	Расход КИА	
			мас. % в составе шихты	кг/т шихты
выдержка в атмосферных условиях	15-18 сут.	110-122	10-12	100-120
тепловлажностная обработка с применением пропарки и сушки (ускоренный режим)	8-10 час.	115-130	9-10	90-100
тепловлажностная обработка с использованием СВЧ-энергии	50-70 мин.	180-210	5-7	50-70

Выводы

1. Основным исходным материалом для изготовления железорудных брикетов был железорудный концентрат, полученный из лежалых металлургических шламов комбината «АрселорМиттал Кривой Рог». Концентрат характеризуется полиминеральностью – в его состав входят более 20 железосодержащих минеральных фаз и около 20 нерудных компонентов.

2. Железорудный концентрат, имеющий удельную поверхность менее 100 см²/кг, целесообразно окусковывать методом брикетирования с применением в качестве упрочняющей добавки цементного клинкера с удельной поверхностью 360-460 м²/кг, активированного поверхностно активными веществами.

3. Сформированные брикеты должны содержать некоторое количество избыточной влаги, обеспечивающее полное затворение цементной составляющей и активное протекание процессов гидролиза, гидратации, минералообразования в период твердения.

4. Нарастивание прочности брикетов происходит в связи с образованием новых минеральных фаз в цементной составляющей шихты, процессами перекристаллизации их индивидов и агрегатов.

5. Существует тесная связь между теплофизическими, физико-химическими процессами, явлениями тепло- и массо-переноса, минералообразованием при тепловлажностной обработке брикетов железорудного концентрата в период их твердения и упрочнения.

6. Установлено положительное влияние тепловой энергии СВЧ-излучения на ускорение процессов упрочнения брикетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Березний М.М., Мовчан В.П. Збагачення та окусування сировини // Дніпропетровськ: Пороги, 2002.– 365 с.
2. Горчаков Г.И., Баженев Ю.М. Строительные материалы // Москва: Стройиздат, 1986.
3. Иванченко В.В., Евтехов В.Д., Ковальчук Л.Н. и др. Минералы железа в металлургических шлаках КГМК «Криворозжсталь» // Вісник Криворізького технічного університету.– 2003.– Вип. 2.– С. 72-77.
4. Иванченко В.В., Котляр М.И., Шатоха В.И. и др. Минеральный состав и агломерация железосодержащих металлургических шламов // Кривой Рог: Издательский центр Криворожского технического университета, 2007.– 144 с.
5. Лотош В.Е., Окунев А.И. Безобжиговое окусование руд и концентратов // Москва: Наука, 1980.– 216 с.
6. Менковский М.А., Равич Б.М., Окладников В.Б. Связующие вещества в процессах окусования горных пород // Москва: Недр, 1977.– 182 с.
7. Мищенко И.М., Клягин Г.С., Хлапонин Н.С. и др. Утилизация металлургических шламов на аглофабриках Украины // Металлург.– 2000.– № 6.– С. 30-31.
8. Черепанов К.А., Черныш Г.И., Динельт В.М., Сухарев Ю.И. Утилизация вторичных материальных ресурсов в металлургии // Москва: Металлургия, 1994.– 224 с.

ПЕТРОВ А.В., ЄВТЄХОВ В.Д., ЄВТЄХОВ Є.В., РЕВА О.В., ДОЛИНА М.П., БЕСПОЯСКО Е.О. Методи зміцнення брикетів залізорудного концентрату з добавкою цементного клінкеру.

РЕЗЮМЕ. Залізорудний концентрат окусовувався методом брикетування з використанням у якості зміцнюючої добавки цементного клінкеру, активованого поверхнево активними речовинами. Сформовані брикети містили деяку кількість надлишкової води для підвищення ефективності процесів гідролізу, гідратації, утворення нових мінеральних фаз у період твердіння. Існує тісний зв'язок між теплофізичними, термодинамічними процесами, явищами тепло- і масо-переносу, мінералоутворенням при термічній дії на брикети. Обробка брикетів тепловою енергією НВЧ-випромінення значно підвищує ефективність процесів зміцнення брикетів.

ПЕТРОВ А.В., ЕВТЕХОВ В.Д., ЕВТЕХОВ Е.В., РЕВА А.В., ДОЛИНА Н.П., БЕСПОЯСКО Э.А. Методы упрочнения брикетов железорудного концентрата с добавкой цементного клинкера.

РЕЗЮМЕ. Железорудный концентрат окусовывался методом брикетирования с применением в качестве упрочняющей добавки цементного клинкера, активированного поверхностно активными веществами. Сформированные брикеты содержали некоторое количество избыточной воды для повышения эффективности процессов гидролиза, гидратации, образования новых минеральных фаз в период твердения. Существует тесная связь между теплофизическими, термодинамическими процессами, явлениями тепло- и массо-переноса, минералообразованием при терми-

ческом воздействии на брикеты. Обработка брикетов тепловой энергией СВЧ-излучения значительно повышает эффективность процессов упрочнения брикетов.

PETROV A.V., EVTEKHOV V.D., EVTEKHOV E.V., REVA O.V., DOLYNA M.P., BESPOYASKO E.O. Methods of hardening of iron ore concentrate briquettes with addition of cement clinker.

SUMMARY. Iron ore concentrate has been agglomerated by briquetting method using cement clinker activated by surface-active substance as a hardening additive. Briquettes contained certain amount of spill water to increase the effectiveness of hydrolysis and hydration processes, to form new mineral phases during the solidification period. There exist a close link between thermophysic, termodynamic processes, phenomena of heat and mass transfer, mineral formation under thermal action on briquettes. Briquettes treatment with thermal energy of microwaves considerably increases efficiency of briquettes hardening processes.

*Надійшла до редакції 15 травня 2007 р.
Представив до публікації проф. Б.І.Пирогов.*