© В.Н. Аллилуев, 2012

УДК 622.272: 553.31

В.Н. Аллилуев

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СВОЙСТВ БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КМА

Приведены результаты анализа, обобщения и исследования состава и свойств богатых железных руд КМА, выявлены особенности и предложено деление богатых железных руд на типы по характеру связей и пределу прочности с целью обоснования комбинированного разрушения руды и измельчения её в забое.
Ключевые слова: богатые железные руды, состав, свойства.

Состав и свойства богатых железных руд (далее — БЖР) зависят не только от состава субстрата и положения относительно зон окисления и вторичной цементации, но являются одновременно во всем своем объеме сложным продуктом тектонических и гипергенных процессов, путей, состава и времени инфильтраций [1—5].

Для геотехнологической классификации руд недостаточно общего определения физических характеристик. Следует учитывать особенности вещественного, гранулометрического составов, структурные связи, структурно-текстурные особенности и другие свойства, вытекающие из сложной геологической истории формирования залежей [6].

В рамках данной работы приведены результаты анализа, обобщения и исследования состава и свойств богатых железных руд с позиций обоснования комбинированного разрушения руды и измельчения её в забое.

На месторождениях БЖР встречаются минералы: магнетит, кварц, дисперсный гематит, маршалит, гетит, кальцит, лепидокрокит, гидрослюды, сидерит, бемит, пирит, марказит, гиббсит, хлоропирит, апатит, галенит, хлорит [6].

Генетически среди этих минералов выделяются остаточные и новообразованные в результате процессов окисления, инфильтрационные и гидротермальные. К остаточным минералам относятся: магнетит, дисперсный гематит, пирит, железная слюдка, кварц. Железная слюдка является устойчивыми минералами в коре выветривания, другие не полностью выщелочены или замещены.

Новообразованными в процессе окисления минералами являются: гидроокислы железа, гидрогематит, гидрогетит и гетит, широко развитые на месторождениях. Они либо замещают минералы, неустойчивые в данной среде, либо заполняют поры, пустоты. Эти минералы своим образованием обязаны процессам окисления и гидратации, в результате которых ранее существующие железорудные и железосодержащие минералы разрушались. К новообразовавшимся относятся: маршалит — мучнистая разновидность кварца, каолинит, бемит.

К цементирующим минералам, образованным в результате инфильтрации растворов из толщи известняков, относятся сидерит, кальцит, шамозит, часть магнетита, сульфиды — пирит и халькопирит, гиббсит. Причем сиде-

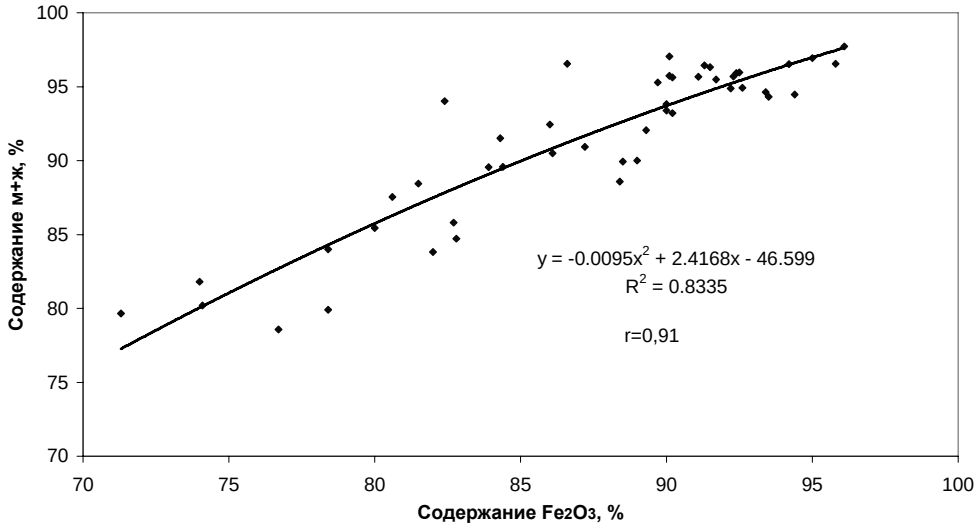

Рис. 1. Зависимость содержания мартита + железной слюдки от Fe_2O_3

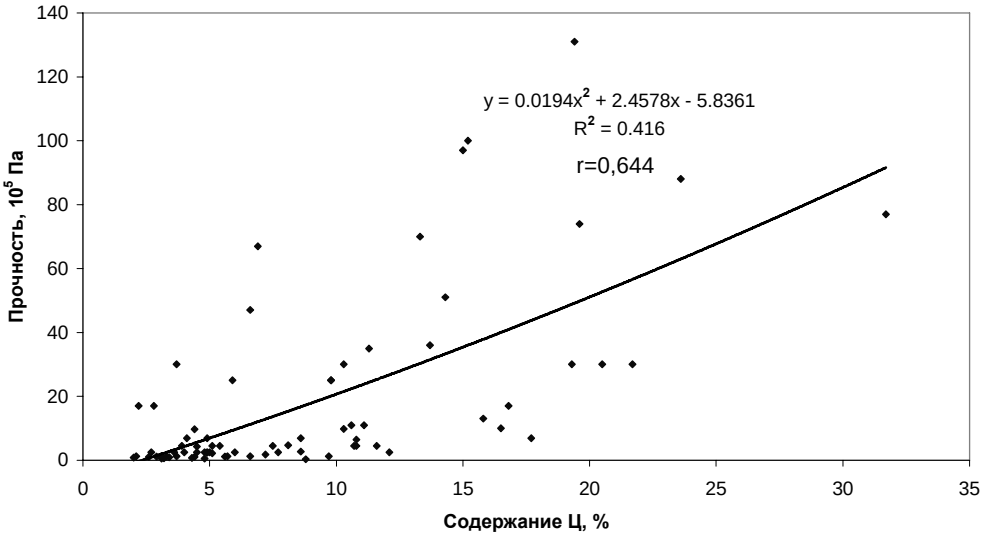

Рис. 2. Зависимость предела прочности на сжатие от содержания цементирующих минералов

рит и хлорит, выделявшиеся после выщелачивания кварца, способствовали уплотнению руд.

Вместе с тем минералогия рыхлых руд ничем не отличается от минералогии скальных руд, и те и другие разности сложены одними и теми же минералами. Разница между рыхлыми и скальными разностями руд одного и того же типа заключается прежде всего в количественных соотношениях между гематитом (мартит + железная слюдка) и вторичными по отношению к нему минералами, главным образом сидеритом и хлоритом. А именно, в рыхлых рудах сидерита и хлорита

всегда меньше, чем в скальных рудах, а содержание гематита находится в пределах 83,6 — 97,27 %, что сказывается на особенностях химического состава этих руд (рис.1) [7]. По химизму рыхлые руды характеризуются наиболее высоким содержанием железа от 65,2 до 68,4 %, а в среднем 67,7 %. Содержание кремнезема не превышает 2,12 % в среднем 1,38 %, глинозема не более 2,02 % в среднем 1,05 %.

Предел прочности на сжатие тесно связан и зависит от содержания цементирующих минералов Ц (рис. 2).

С увеличением содержания цементирующих минералов уменьшается плотность и пористость. В работе [8] предложено объединять минералогические типы БЖР по химическому составу в две группы: 1) мартитовые, железнослюдково-мартитовые; 2) гидрогематито-мартитовые, хлорито-мартитовые, гидрогетито-гидрогематитовые.

Классификационные показатели, используемые для грунтов, не в полной мере могут быть применены к характеристикам богатой руды [9]. Для рыхлых разностей БЖР характерно: малое сопротивление сжатию, маленький коэффициент фильтрации, большая насыщенность водой, большая величина максимальной молекулярной влагоемкости, тиксотропность.

Естественная пористость руд, оказывается больше расчетной пористости. Это обстоятельство обязано тому, что воду, содержащуюся в руде, принято рассматривать как жидкую фазу, размещенную исключительно между частицами грунта, т.е. в порах. Часть воды может находиться в виде пленок, т.е. поглощаться коллоидами. Пленочная молекулярно связанная вода может находиться в твердом состоянии и объединяться с системой твердых минеральных частиц. Образованию водных пленок вокруг минеральных частиц способствует более высокая энергия поглощения катионов железа по сравнению с катионами алюминия, кальция, магния. Как известно прочносвязанная вода имеет плотность 1,5—2 г/см^3 и модуль сдвига 20 МПа. Поскольку эта фаза не может быть расчленена и удалена из пор путем сжатия руды под нагрузкой, то она должна быть присоединена к твердой фазе грунта, то есть часть воды в руде как бы идет на увеличение твердой фазы. Поэтому фактическая пористость руды резко уменьшается по сравнению с расчетной пористостью. Значение фактической пористости видимо колеблется от 15 до 40 %.

Этот факт может свидетельствовать о наличии в БЖР водно-коллоидных связей, которые обусловливаются взаимодействием между минеральными частицами, пленками воды и коллоидными оболочками. Различают следующие виды структурных связей: водно-коллоидные (коагуляционные и конденсационные) — пластичные, мягкие, обратимые и кристаллизационные — жесткие, хрупкие, необратимые [10]. Коагуляционные связи обычно возникают при выпадении осадков и свертывании коллоидов. Конденсационные — при уплотнении коагуляционных структур до соприкосновения минеральных частиц и полимеризации гелей. При малой влажности водонасыщенных руд водно-коллоидные связи больше, с уменьшением толщины водных оболочек увеличивается молекулярное притяжение диполей прочносвязанной воды и вещества. С увеличением влажности водно-коллоидные связи уменьшаются.

В пользу этих предположений свидетельствует положение о поведении пылеватых и глинистых частиц, которые способны образовывать агрегаты

с цементом из коллоидов [11]. БЖР являются двух фазной системой твердые частицы и вода. Системы с размером частиц 0,1—5 мкм могут обладать специфическими свойствами коллоидных систем, находиться в состоянии геля. Способность руды давать в воде устойчивые коллоидные растворы, не оседающие в течение долго времени, свидетельствует о наличии водно-коллоидных связей.

На основе экспериментальных исследований свойств воды в грунтах А.Ф. Лебедев (1935 г.) выделил истинные плывуны — пески с примесью глинистых пылеватых и ультраколлоидных частиц и псевдоплывуны — тонкозернистые пески. Грансостав тонкозернистых песков 0,1—0,05 мм — 60 %; 0,1—0,5 мм — 10 %; < 0,05 мм — 30 %. Под воздействием вибрации плывуны разжижаются, влажность 15—17 %, плотность выше, чем у обычных песков 1900—2100 кг/м^3, пористость 25 %. Плывуны медленно фильтруют и отдают воду. При нормальном давлении 0,8 МПа плывуны сжимаются, при разгрузке дают упругую отдачу. Если плывуну некуда расплываться, он обладает хорошей несущей способностью. Без воды сильно оплывают и обладают значительной плотностью упаковки. Угол естественного откоса при естественной влажности под водой 9—10°, без воды 6—9°. Плывуны, находящиеся под водой в течение трех дней имели влажность 13 %. При взбалтывании истинных плывунов с водой коллоидная часть устойчива и не оседает длительное время в течение нескольких месяцев.

Например, количество воды, удерживаемое силами молекулярного притяжения при размере частиц меньше 1 мкм у лимонита — 23 %, биотита — 48 %. При значительной пористости БЖР водопроницаемые, коэффициент фильтрации 0,1—1 м/сутки.

Б.В. Дерягиным было установлено, что прочносвязанная вода находится в твердом состоянии и объединяется с системой твердых минеральных частиц, также им установлен расклинивающий эффект воды, который при увеличении влажности приводит к уменьшению прочности.

Процессы бурения и СГД приводят к увеличению влажности, к снижению и разрыву водно-коллоидных связей и руда в отобранных пробах представляет собой пылеватый и мелкий песок. Кроме того, высокопористые руды (железно-слюдково-мартитовые и мартитовые) имеют систему замкнутых пор заполненных водой, находясь в нетронутом массиве под давлением, они не теряют несущей способности и ведут себя как упругие мало сжимаемые тела. При разгрузке в процессе бурения и ведения горных работ проявляется способность БЖР рассыпаться и превращаться в песок.

Кристаллизационные связи (связи кристаллов окислов железа и кремния) и обусловливаются действием химических сил, образуя в точках контактов с минеральными частицами поликристаллические соединения [10]. Этими связями обладают плотные и твердые сцементированные богатые железные руды.

Неоднородность, переслаиваемость плотных и мягких прослоек также влияют на точность определения: плотности, сжимаемости, сопротивления сдвигу, набухания и коэффициента фильтрации. Тиксотропные свойства не позволяют правильно определить влажность и границу текучести. При определении удельного веса отмечено свойство руды всплывать и подниматься по стенкам пикнометра. Способность руды удерживать значительное количество воды в виде молекулярной влагоемкости не позволяет точно определить водоотдачу.

Водоотдача их, определенная по разности полной молекулярной влагоемкости и максимальной молекулярной влагоемкости, колеблется в пределах 4,7 % до 12,6 %. Основной особенностью структуры мягких остаточных руд является агрегированность кристаллов гематита. Структурную основу полурыхлых руд составляют звезчато-шиповатые микроагрегаты гематита (мартита и железной слюдки) величиной 0,03—0,1 мм. Размер зерен мартита составляет 25—50 мкм (0,025—0,05 мм), а железной слюдки от 53 до 73 мкм (0,053—0,073 мм). Кристаллические зерна гематита, слагающие микроагрегаты довольно прочно связаны между собой силами межкристаллического сцепления. Эти микроагрегаты служат элементами, из которых построены более крупные агрегаты, связанные также силами межкристаллического сцепления либо непосредственно между зернами гематита, либо посредством сидерита и хлорита. В следствие звезчато-шиповатой формы элементарных микроагрегатов, более крупные агрегаты, а равным образом и вся мягкая руда, обладают высокой пористостью, а благодаря наличию межкристаллического сцепления между соприкасающимися кристаллами и микроагрегатами гематита эти агрегаты обладают некоторой жесткостью.

Очень малая площадь контактов гематитовых зерен, по которым развиты силы сцепления между их агрегатами, и рыхлое, криптокристаллическое порошковатое сложение агрегатов хлорита, заполняющих часть структурных пор в рудах, обусловливают чрезвычайно низкую общую прочность мягких руд и быстрое их размокание, несмотря на высокую прочность отдельных гнезд с сидеритовой цементацией. Поэтому при нарушении условия всестороннего сжатия мягкие руды от небольших напряжений хрупко разрушаются, превращаясь в раздельно-зернисто-агрегатную массу, дальнейшее поведение которой будет зависеть от ее агрегатно-гранулометрического состава, увлажненности, характера и способа приложения нагрузки.

В зависимости от характера структурных связей можно выделить следующие группы БЖР:

1. Землистые, плывунные или зернистые со слабым скелетом с коагуляционными водно-коллоидные связями (с наличием прочносвязанной и рыхлосвязанной воды).

2. Мягкие связные глиноподобные или со скелетом с конденсационными водно-коллоидными связями (с прочносвязанной водой).

3. Плотные спорадически сцементированные, слабосцементированные с кристаллизационными жесткими связями с контактным цементом.

4. Твердые, скальные сцементированные с кристаллизационными твердыми связями с поровым цементом.

По гранулометрическому составу мягкие руды характеризуются преобладанием суммы мелкой песчаной (0,1—0,05 мм), пылеватой (0,05—0,01 мм) и глинистой (<0,005 мм) фракций при существенном содержании коллоидно-дисперсной фракции, что обусловлено размерами монокристаллов и микроагрегатов гематита и присутствием аморфных гидроокислов железа. Эти же причины обусловливают тонкую пористость руд, высокую капиллярность, большую величину максимальной молекулярной влагоемкости, низкую водопроницаемость.

Гранулометрический состав минеральных разновидностей БЖР четко разделяется (рис. 3). Исследования, выполненные ситовым методом позволяют получить зависимости для синек частиц фракций меньше 0,05 мм около 40 % — (ряды 1—3); для красковых

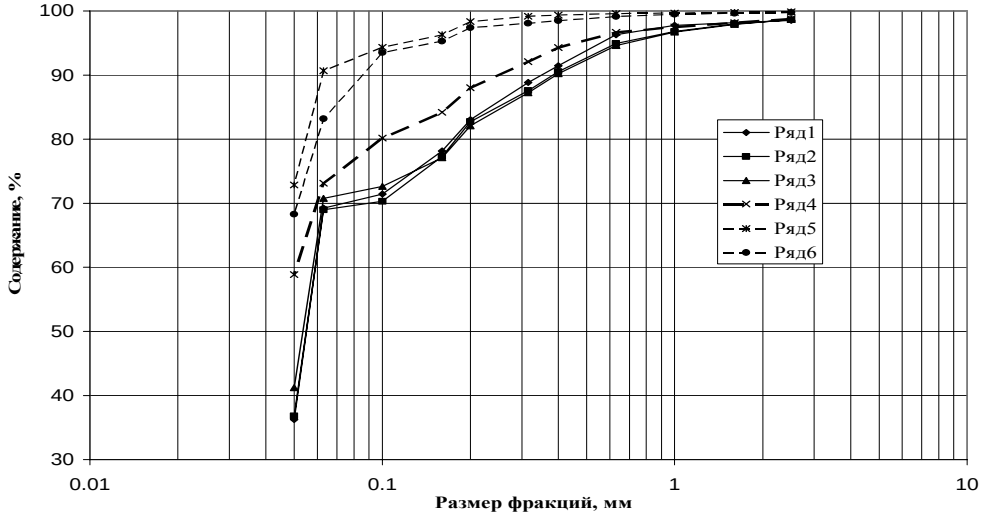

Рис. 3. Гранулометрический состав БЖР

руд, больше от 60 до 72 % (ряды 4—6). Исследования с использованием фотометрического седиментометра компании Ходакова, показали существенное отличие распределения частиц у синек менее 0,005 мм (5 мкм), т.е. глинистых частиц 2,4 % и у красок 25 %, размером менее 0,002 мм (2 мкм) 1,5 и 10,8 %, менее 0,001 (1 мкм) 1,2 и 2,2 % соответственно. Определив степень неоднородности для БЖР по формуле $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$, получим, что синьки являются однородными по гранулометрическому составу $C_u = 2$, краски весьма неоднородными $C_u = 12$.

На основе изложенных подходов предлагается следующее объединение разновидностей БЖР по химическому и минеральному составу с учетом гранулометрического состава:

А — железно-слюдково-мартитовая; мартито-железно-слюдковая; мартитовая (синьки);

В — гидрогематито-мартитовая; гетитомартито-гидрогематитовая, гидрогетито-гематитовая (краски).

Звезчато-шиповатая форма микроагрегатов и высокая энергия поверхности микрокристаллов гематита, а также аморфных частичек гидроокислов железа обусловливают ясно выраженные тиксотропные свойства рыхлых масс руд (разжижение при встряхивании и восстановление прочности после прекращения встряхивания). Высокая пористость полурыхлых руд и их глубокое залегание ниже уровня подземных вод является причиной их высокой влажности. Большая плотность твердых частиц руд, приближающийся к 5000 кг/м^3 и даже выше, определяется преобладанием в их составе гематита и низким содержанием более легких минералов. По плотности твердых частиц БЖР можно отнести к классу тяжелых минералов.

По физическому состоянию керна в сопоставлении с гидрогеологическими, геофизическими данными и по наблюдениям процесса гидродобычи предлагается выделить типы руд по пределу прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$.

БЖР разновидности А:

1. Очень низкой прочности менее 3 МПа f = 0,3.

2. Низкой прочности менее 3 до 7 МПа включительно, f = 0,3—0,7.

3. Малой прочности менее 7 до 10 МПа включительно, f = 0,7—1,0.

4. Прочная свыше 10 или f>1,0.

БЖР разновидности В:

1. Очень низкой прочности менее 2 МПа f = 0,2.

2. Низкой прочности менее 2 до 5 МПа включительно, f = 0,2—0,5.

3. Малой прочности менее 5 до 10 МПа включительно, f = 0,5—1,0.

4. Прочная свыше 10 или f>1,0.

Таким образом, выявленные особенности состава и свойств богатых железных руд позволяют предложить выделение групп по характеру структурных связей и типов по пределу прочности на сжатие с целью обоснования комбинированного разрушения руды, а в дальнейшем разработать геотехнологическую классификацию БЖР КМА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Британ И.В.* Богатые железные руды КМА как объект скважинной гидродобычи/ И.В. Британ, С.Г. Лейзерович //Горный информационно-аналитический бюллетень, № 2, 1999. — С. 105—109.

2. *Британ И.В.* О факторах, влияющих на выбор системы разработки при скважинной гидродобыче/И.В. Британ//Горный информационно-аналитический бюллетень, № 1. — 2003. — С. 213—217.

3. *Британ И.В.* Ресурсы богатых железных руд КМА для скважинной гидродобычи/И.В. Британ//Горный журнал, № 1. — 2004. — С. 59—61.

4. *Британ И.В.* О критериях оценки ресурсов богатых железных руд / И.В. Британ // Горный информационно-аналитический бюллетень, № 3. — 2005.

5. *Британ И.В.* Скважинная гидродобыча — важное направление расширения минерально-сырьевой базы страны/ И.В. Британ//Недропользование — XXI век. — 2007. — № 6. — С. 52—58.

6. *Шевырев И.А.* Геотехнологическая классификация железных руд КМА / И.А. Шевырев, В.И.Онищенко, В.Д.Татьянин // 1-ый Советско-Югославский симпозиум по проблеме скважинной гидравлической технологии. Том I. — М.: МГРИ, 1991. — С. 53—56.

7. *Аллилуев В.Н.* Изменчивость физико-механических свойств богатых железных руд на глубокозалегающих месторождениях Курской магнитной аномалии/ В.Н. Аллилуев // Горный информационно-аналитический бюллетень, № 11. — 2006. — С. 258—261.

8. *Геология*, гидрогеология и железные руды бассейна Курской магнитной аномалии (КМА). Том III. Железные руды /И.Н. Леоненко, И.А. Русинович, С.И. Чайкин; под ред. И.Н. Леоненко. — М.: Недра, 1969. — 320 с.

9. *ГОСТ* 25100—95. Грунты. Классификация. — М.: МНТКС, 1995. — с. 38.

10. *Цытович Н.А.* Механика грунтов/ Н.А. Цытович. — М.: Высш. шк., 1983. — 288 с.

11. *Барталомей А.А.* Механика грунтов/А.А. Бартоломей. — М.: АСВ, 2004. — 304 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Аллилуев Валерий Николаевич — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Губкинский институт (филиал) Московского государственного открытого университета.