УДК 624.131:551.3

Р.Э.ДАШКО
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ОЦЕНКА БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД ЯКОВЛЕВСКОГО РУДНИКА

Рассмотрена природа формирования физико-механических свойств богатых железных руд (БЖР) как продукта химического выветривания железистых кварцитов. Проанализировано влияние остаточных и вторичных цементационных связей на прочности и устойчивость БЖР. Приведены данные оценки физических свойств осушенных и водонасыщенных БЖР. Показано, что разуплотнение БЖР приводит к существенному повышению их пористости до 50 % и более. Рассмотрены особенности деформационного поведения и прочности руд по результатам экспериментальных исследований, проведенных на образцах ненарушенного сложения. Диапазон показателей сопротивления сдвигу БЖР позволяет проводить расчеты устойчивости при различных условиях их водонасыщения и осушения.

The nature of physical mechanical properties of high grade iron ores (HGIO) formation as a product of chemical weathering of ferruginous quartzites is considered. Influence of residual and secondary cementing bonds on HGIO shear strengths and stability is analyzed. Assessment of drained and water-saturated HGIO physical properties are cited. It is shown that decompaction HGIO leads to essential increase of their porosity up to 50 % and more. Features of deformation behavior and ore shear strength by results of the experimental investigations realized on undisturbed samples are considered. Variation of HGIO shear strength parameters permits to make the stability calculations under different conditions of their water-saturation and drainage.

Существующая в настоящее время информация о состоянии и физико-механических свойствах богатых железных руд Яковлевского месторождения базируется на исследованиях, которые проводились еще в прошлом веке на образцах, отобранных при бурении скважин различного назначения. Вполне понятно, что керн БЖР, залегающий на глубинах более 550-600 м, не отличался хорошей сохранностью, во многих случаях был размыт. Соответственно, исследования таких важных характеристик, как параметры сопротивления сдвигу – сцепление и угол внутреннего трения, а также значения модуля общей деформации, проводились на образцах нарушенного сложения, предварительно уплотненных под нагрузками, отвечающими природному давлению. Как показывает практика таких испытаний, при формировании прочности горных пород, особенно в зонах химического выветривания, использование природного давления не всегда является корректным. БЖР – продукт химического выветривания железистых кварцитов в допалеозойское время – представляет собой образования, высокая пористость которых не отвечает реальным природным давлениям.

Эти руды могут быть охарактеризованы как недоуплотненные разности, в которых процессы растворения и выщелачивания силикатов определили достаточно высокую пористость и в отдельных случаях даже макропористость. Поскольку прочность материнских пород-кварцитов определяется их высокой плотностью и образованием структурных связей за счет кремнезема и его соединений, то выщелачивание и вынос силикатов в процессе выветривания создает условия для разуплотнения и разрушения цементационных связей.

В БЖР природа структурных связей может быть оценена в виде трех составляющих – остаточные цементационные, молекулярные и магнитные. Благодаря остаточным цементационным связям БЖР характеризуются высокой степенью изменчивости пористости, прочности и сжимаемости, которая незакономерно варьирует как по простиранию рудного пласта, так и по глубине. Еще большую изменчивость показателей физико-механических свойств БЖР создает вторичная цементация карбонатами, которая происходила уже в палеозойское время. Частичное заполнение карбонатами порового пространства, а также формирование порового и контактного цемента приводит к существенному повышению прочности и снижению сжимаемости под действием дополнительных напряжений.

БЖР, в которых отсутствуют остаточные и вторичные связи, обладают резко выраженной водонеустойчивостью, которая по своему проявлению близка к поведению лессовых и лессовидных супесей и суглинков при их взаимодействии с водой. При этом предоставляется возможность выполнить систематизацию степени водонеустойчивости БЖР по следующей схеме:

- переход БЖР в состояние суспензии или мелкообломочного материала в течение первых 5-10 мин воздействия воды;
- переход БЖР в состояние плывунов с фрагментами неразмокшей руды на протяжении нескольких часов;
- дезинтеграция БЖР в массиве как конгломерата с водонеустойчивыми связями между прочными обломками на протяжении нескольких суток.

Характер водонеустойчивости будет зависеть от особенностей состава БЖР и строения в рудном теле in situ и, в первую очередь, будет определяться наличием объема руд с остаточными, либо вторичными структурными связями цементационного типа, которые относительно водоустойчивы. Дополнительное поступление воды в БЖР, не имеющих цементационных связей между частицами, либо вскрытие таких руд в водонасыщенном состоянии переводит их в состояние тяжелой жидкости.

Следует отметить, что испытания прочности небольших по размеру образцов БЖР в лабораторных условиях свидетельствуют о значительном разбросе значений этого важного показателя в силу различной степени сохранности структурных связей, изменения их плотности и пористости. БЖР в условиях их естественного залегания и водонасыщения можно рассматривать как неоднородный материал, который состоит из обломков выветрелых материнских пород с заполнителем, состоящим из песчано-пылеватого материала с низким содержанием тонкодисперсной фракции ($d < 0{,}002$ мм). Именно слабая связность заполнителя создает большие трудности при обеспечении их устойчивости в состоянии полного водонасыщения либо дополнительном увлажнении уже осушенных руд. Присутствие коллоидов (фракции менее 0,0001 мм) на пылеватых и песчаных частицах руд в виде «рубашек» при их высыхании обеспечивает достаточно высокую связность и агрегирование мелких фракций при сохранении высокой пористости. Образование агрегатов при одновременном снижении влажности способствует повышению угла внутреннего трения по сравнению с водонасыщенными разностями.

При количественной оценке прочности БЖР со слабыми структурными связями необходимо сохранение их естественного сложения для повышения достоверности получаемых параметров. С этой целью были проведены экспериментальные исследования для определения сопротивления сдвигу БЖР на образцах, непосредственно отобран-

Таблица 1

Показатели физических свойств БЖР, определенных на образцах из экспериментальной выработки и транспортного орта (данные 2005 г.)

Номер образца	Место отбора образцов	ρ, г/см^3	W, %	$\rho_{мин}$, г/см^3	$\rho_{ск}$, г/см^3	n, %	e	$W_п$	G	Примечание
1	Транспортный орт	3,26	12,5	5,12	2,9	43,3	0,763	0,149	0,84	Руда естественной влажности
2	Транспортный орт	3,42	13,4	5,21	3,01	42,2	0,730	0,141	0,98	
5	Транспортный орт	3,45	13,6	5,25	3,04	42,6	0,742	0,138	0,98	
9	Экспериментальная выработка	2,52	4,4	5,22	2,41	53,9	1,169	0,223	0,2	Осушенная руда
16	Экспериментальная выработка	2,42	7,2	5,18	2,26	56,3	1,288	0,249	0,29	
14	Экспериментальная выработка	2,49	5,2	5,18	2,36	54,5	1,197	0,230	0,23	
17	Экспериментальная выработка	2,82	10,8	5,25	2,54	51,6	1,060	0,203	0,53	
11	Экспериментальная выработка	2,36	6,3	5,14	2,22	56,8	1,314	0,256	0,25	
10	Экспериментальная выработка	2,74	8,2	5,15	2,53	50,8	1,032	0,201	0,41	
13	Экспериментальная выработка	2,78	6,0	5,22	2,62	49,8	0,992	0,19	0,31	
6	Экспериментальная выработка	2,63	9,7	5,25	2,39	54,4	1,192	0,228	0,42	
3	Экспериментальная выработка	2,63	4,1	5,25	2,52	52,0	1,080	0,206	0,2	
8	Экспериментальная выработка	3,07	11,9	5,26	2,74	47,9	0,919	0,174	0,68	Вторичное увлажнение
5	Экспериментальная выработка	2,68	13,3	5,18	2,37	54,3	1,188	0,228	0,58	
2	Экспериментальная выработка	2,78	12,5	5,15	2,47	52,0	1,083	0,21	0,60	

ных в экспериментальном штреке, в котором залегают полностью осушенные руды. Определения параметров сопротивления сдвигу БЖР проводились на одноплоскостных срезных приборах системы ВСВ-25 в диапазоне нормальных давлений от 0,5 МПа и выше, позволяющих оценить особенности деформационного поведения в процессе сдвига при действии достаточно высоких нормальных напряжений.

Для сравнительной оценки изменения сопротивления сдвигу в зависимости от величины влажности БЖР (осушенные и неосушенные руды) были отобраны образцы из неосушенных руд в транспортном орте.

Необходимо остановиться на характеристике физического состояния исследованных руд, которая во многом определяет их прочность. Наибольший объем определений физических свойств был выполнен на осушенных БЖР из экспериментального штрека (табл.1).

Широкое варьирование величины естественной влажности от 4,1 до 10,8 % свидетельствует о различной степени гидрофильности БЖР и соответственно об остаточной водонасыщенности. Следует отметить, что высокая остаточная влажность говорит о низкой водоотдаче руд и способности БЖР переходить в неустойчивое состояние при неполном осушении. Однако, по данным исследований такие типы БЖР, для которых коэффициент водонасыщения превышает 0,4, составляют около 30 %. Необходимо подчеркнуть, что в экспериментальном штреке в результате упругого разуплотнения руд в ее приповерхностной зоне наблюдается повышение пористости выше 50 %, в отдельных точках величина пористости превышает 56 %, что фиксировалось ранее при испытании первых образцов БЖР в СПГГИ (ТУ) в 1998-1999 гг. В отдельных образцах БЖР пористость превышала 57 %. Исследованные образцы характеризовались высоким содержанием железа, если судить по величине плотности минеральной части, которая во всех случаях превышала 5,0 г/см^3 (см. табл.1). Экспериментальная выработка пройдена в «синьках», гранулометрический состав которых характеризуется преобладанием фракций крупной пыли 0,05-0,01 мм, от 50 до 79 %, лишь в отдельных случаях в железно-слюдково-мартитовой руде отмечается падение содержания пылеватой фракции до 39 % (табл.2).

Подобный гранулометрический состав определяет плывунные свойства БЖР при условии отсутствия в них цементационных

Таблица 2

Основные показатели состава и состояния руд для оценки их способности к проявлению плывунных свойств

Расстояние от забоя скважины в плане, м	Визуальное описание руды	Содержание фракций (мм), %						Состояние суспензии (скорость отстаивания, цвет)	$K_н$	Влажность квазигигроскопическая (остаточная), %	Плотность минеральной части, г/см^3	Способность руды к проявлению плывунных свойств и степень гидрофильности
		>2	2-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	<0,002					
50,0	Железно-слюдково-мартитовая, хлоритизированная	6	16	11	61	3	3	Устойчивая, красновато-бурая	3,9	5,1	5,03	Высокая способность, гидрофильная
58,3	Железно-слюдково-мартитовая	2	10	10	73	3	2	Неустойчивая, прозрачная (через сутки)	3,0	2,8	5,10	Потенциальная способность в зависимости от гидродинамического давления
75,7	Железно-слюдково-мартитовая	3	8	7	79	2	1	Среднеустойчивая, светло-коричневая с красноватым оттенком	2,3	0,13	5,26	Выраженные плывунные свойства, негидрофильная
79,0	Железно-слюдково-мартитовая (слабо окисляется)	1	10	22	66	1	сл	Неустойчивая, прозрачная	3,3	0,05	5,28	Отсутствие плывунных свойств
82,0	Мартито-железно-слюдковая	3	9	12	74	1	1	Устойчивая, кирпичная	2,8	0,06	5,28	Выраженные плывунные свойства
85,6	Мартито-железно-слюдковая	5	12	16	64	2	1	Среднеустойчивая, светло-коричневая, с красноватым оттенком	3,3	0,09	5,24	Потенциальная способность к проявлению плывунных свойств
53,8	Мартито-железно-слюдковая (слабо окисляется)	8	26	26	38	1	1	Неустойчивая, прозрачная	5,3	0,4	4,60	Отсутствие плывунных свойств

связей либо при наличии водонеустойчивых связей, например за счет глинистых минералов, таких как железистый хлорит (шамозит). Карбонатизация повышает водоустойчивость БЖР при условии, что в воде, взаимодействующей с рудой, отсутствует агрессивный диоксид углерода.

Исследование отобранных образцов БЖР из неосушенных зон (транспортный орт) дает возможность утверждать, что руды имеют высокую степень гидрофильности и соответственно малую величину водоотдачи, что способствует их переходу в неустойчивое состояние при отсутствии осушения. Следует отметить, что в осушенных рудах, как правило, величина пористости выше, чем в неосушенных либо вторично увлажненных (табл.1). В естественно увлажненных рудах проявляется эффект капиллярной связности – стягивающее влияние капиллярных менисков вогнутого типа (вода как смачивающая жидкость), что приводит к некоторому сокращению объема пор.

Капиллярная связность в неполностью осушенных рудах может рассматриваться как дополнительный упрочняющий фактор.

Исследование сопротивления сдвигу БЖР в состоянии их полного осушения

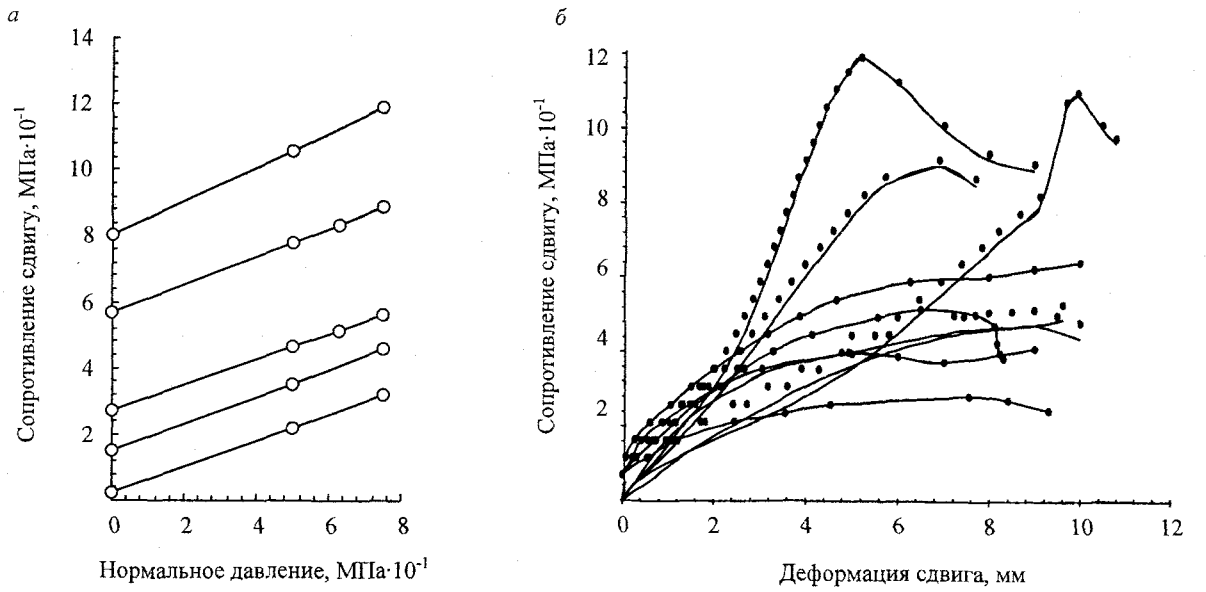


Рис.1. Диаграммы сопротивления сдвигу (*а*) и характер деформационного поведения осушенных БЖР ненарушенного сложения, без цементационных связей (*б*) при $\varphi = 23°$; $c = 0{,}025\text{-}0{,}8$ МПа; $W = 4{,}1\text{-}10{,}8$ %; $\rho = 2{,}42\text{-}2{,}82$ г/см^3

(удаление свободной и частично капиллярной влаги) дало возможность установить следующие закономерности их деформационного поведения и изменения параметров прочности.

1. Отмечается широкий диапазон изменения величины сцепления, зависящий, прежде всего, от остаточных либо вторичных цементационных связей (0,025-0,8 МПа).

2. При высоких значениях сцепления отчетливо фиксируется максимальная прочность, величина которой определяется наличием цементационных связей (рис.1); по мере снижения влияния цементационных связей на прочность руд уменьшается величина сцепления, деформирование образцов и их разрушение имеет в большинстве случаев пластический характер (см. рис.1).

3. Положение слоистости по отношению к направлению сдвигающего усилия оказывает влияние на величину сцепления БЖР (*с*). Наименьшее значение *с* при исследовании образцов, как и следовало ожидать, оказалось в БЖР при действии сдвигающего усилия параллельно слоистости и составило 0,025 МПа. При действии сдвигающего усилия под углом к слоистости отмечается незначительное повышение величины сцепления (рис.2).

4. Динамика развития деформаций сдвига в осушенных БЖР в процессе роста сдвигающих усилий характеризуется медленным накоплением деформаций в условиях быстрого их затухания после приложения каждой ступени сдвигающей нагрузки. Развитие деформаций ползучести в них не наблюдается. Однако разрушение образцов происходит при достаточно высоких значениях деформаций сдвига, составляющих более 10 %. Это необходимо учитывать при оценке устойчивости БЖР, развитие сдвиговых деформаций будет создавать дополнительные напряжения в крепи выработок.

5. В осушенных БЖР отмечается существенная специфическая особенность при оценке их параметров сопротивления сдвигу: при проведении массовых испытаний образцов БЖР ненарушенного сложения в состоянии их осушения величина угла внутреннего трения φ была постоянна и составляла 23°, в то время как величина сцепления варьировала в зависимости от наличия остаточных структурных связей, положения слоистости, а также величины плотности, характеризуемой значением плотности скелета руды. В то же время величина остаточной влажности БЖР не влияет на их сопротивление сдвигу. По результатам массовых

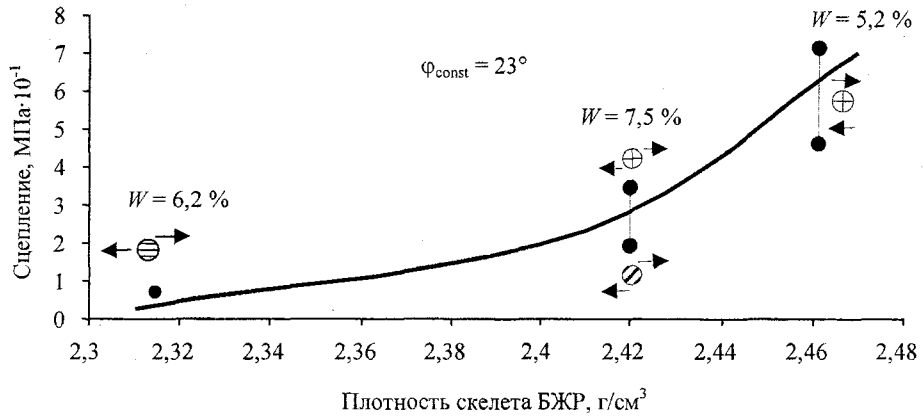


Рис.2. Характер изменения величины сцепления осушенных БЖР в зависимости от степени их плотности (место отбора образцов – экспериментальный штрек). Направление сдвигающего усилия по отношению к слоистости БЖР:

– вкрест; – под углом; – параллельно

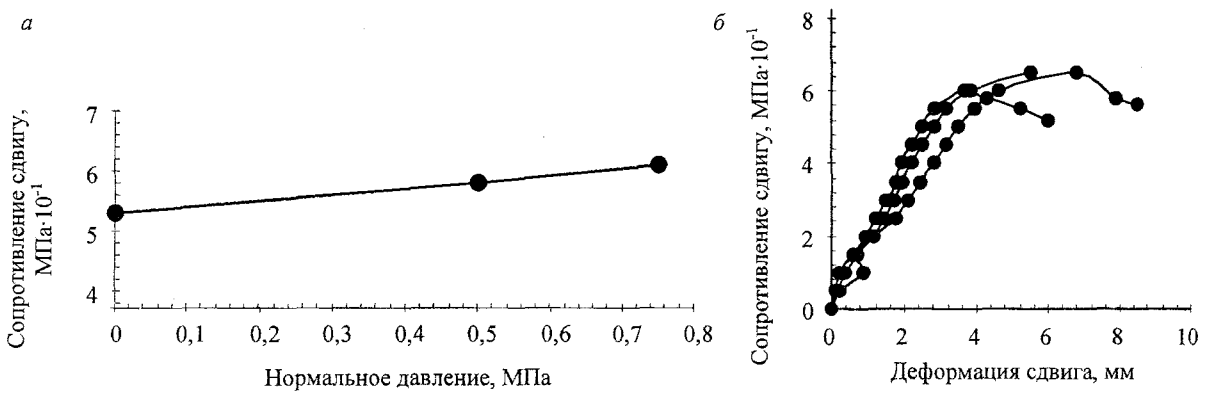


Рис.3. Диаграммы сопротивления сдвигу (*а*) и характер деформационного поведения БЖР естественной влажности, ненарушенного сложения, место отбора образцов – транспортный орт (*б*) при φ = 8-9°; *c* = 0,5 МПа; *W* = 11,4-13,6 %; ρ = 3,42-3,55 г/см³, *n* = 42,2-43,3 %

определений сопротивления сдвигу БЖР построена кривая, отображающая зависимость между величиной сцепления (в диапазоне ее изменения) с учетом влияния слоистости и значением плотности скелета руд (рис.2).

Постоянство углов внутреннего трения осушенных БЖР определяется их гранулометрическим составом – повышенным содержанием пылеватой фракции и низкой влажностью.

Значительно меньший объем исследований был проведен на образцах ненарушенного сложения, отобранных в неосушенных БЖР (транспортный орт).

Образцы характеризовались практически полным водонасыщением, что отразилось на величине угла внутреннего трения, которая снизилась до 8°, отражая влияние не только пленок воды, сорбированных на частицах, но также бактериальных пленок, состоящих из живых и мертвых клеток микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности. Вместе с тем, образцы БЖР, отобранные в транспортном орте, имеют остаточные структурные связи цементационного характера, что отразилось на величине сцепления, значение которого соизмеримо со сцеплением осушенных образцов. Разрушение водонасыщенных БЖР происходит по

Таблица 3

Сравнительная оценка значений деформационных характеристик осушенных и увлажненных БЖР

Характер создания давления	Интервал давлений, МПа	Осушенные образцы БЖР		Водонасыщенные образцы БЖР после уплотнения	
		Модуль общей деформации E_o, МПа		Модуль общей деформации E_o, МПа	
		Образец 2	Образец 3	Образец 2	Образец 3
Ветвь загрузки	0-0,2	6,1	3,6	16,0	8,4
	0,2-0,6	14,0	9,5	18,2	15,4
	0,6-1,7	21,2	13,8	48,3	28,0
		Модуль упругости E_y, МПа		Модуль упругости E_y, МПа	
Ветвь разгрузки	1,7-0,4	94,6	98,1	92,9	68,4
	0,4-0,2	17,9	15,4	23,5	12,5
	0,2-0	7,6	5,4	6,8	8,3

типу практически пластического деформирования с мало выраженным пиком максимальной прочности. Однако критическая величина деформации сдвига, при которой начинается разрушение образцов, меньше, чем в осушенных образцах (рис.3). Вторичное увлажнение образцов сопровождалось в процессе их испытания на сдвиг развитием провальных деформаций при создании нормального давления и значительного доуплотнения руды.

Таким образом, достоверных характеристик сопротивления сдвигу вторично увлажненных БЖР при использовании традиционных методов испытаний получить не удалось. Вполне понятно, что вторично увлажненные руды будут иметь угол внутреннего трения не более 8° и величину сцепления на порядок ниже, чем для водонасыщенных образцов.

Исследование сжимаемости образцов ненарушенного сложения БЖР производилось в компрессионном приборе (при отсутствии развития боковых деформаций). Были исследованы осушенные образцы БЖР из экспериментального штрека, которые показали относительно высокую сжимаемость (табл.3).

Для подобных пород (руд) характерна низкая сжимаемость в водонасыщенном состоянии по сравнению с воздушно-сухим при их испытании в замкнутом объеме (без возможности боковых расширений), что подтверждается результатами испытаний (табл.3).

Полученные закономерности деформационного поведения и прочности БЖР необходимо учитывать в расчетах устойчивости выработок и, в первую очередь, при оценке прогнозирования различных горно-геологических процессов и явлений. К числу наиболее опасных процессов могут быть отнесены прорывы подземных вод из вышележащего неосушенного нижнекаменноугольного водоносного горизонта.