

УДК 549.26: 622.7

**ВЛИЯНИЕ ГРАНИЦ СРАСТАНИЯ МИНЕРАЛОВ
ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ НА РУДОПОДГОТОВКУ**

Т. Н. Гзогян¹, Ю. И. Головин², А. И. Тюрин², С. Р. Гзогян¹

¹*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,*

E-mail: mehanobr1@yandex.ru,

ул. Победы, 85, 308015, г. Белгород, Россия

²*Научно-образовательный центр “Нанотехнологии и наноматериалы”*

Тамбовского государственного университета им. Г. Р. Державина,

E-mail: yugolovin@yandex.ru,

ул. Интернациональная, 33, 392000, г. Тамбов, Россия

Рассмотрен характер границ срастания основных минералов (магнетит, гематит, кварц), слагающих железистые кварциты Курской магнитной аномалии. Представлены результаты исследования границ срастания контактирующих минералов на нанотрибометре Ti-950, динамическом нанотестере TNI и микротвердомере ПМТ-3М до и после механического воздействия. Изученные физико-механические свойства и структурные состояния основных минералов в микрообъеме демонстрируют разнообразие и сложность границ срастания. Установлена связь прочности межфазных границ и особенностей трещинообразования с их типом и структурой. Показано, что разрушение железистых кварцитов под действием только сжимающих усилий приведет к образованию “трудных” для разделения сростков, ошламованию измельченного материала и уменьшению массовой доли извлекаемого минерала в готовый продукт. Исходя из прочности контактирующих фаз, рекомендовано регулировать режим измельчения или применять эффективный способ механического воздействия.

Железистые кварциты, границы срастания, магнетит, гематит, кварц, наноиндентирование, нано- и микротвердость, зарождение микротрещины, структурное состояние

Эффективность процессов механического разделения минералов тесным образом связана с процессами рудоподготовки, дробления, измельчения [1]. Среди параметров, определяющих технологические свойства кварцитов, важную роль играют характер и свойства границ срастания контактирующих минералов. Исследованиями в области рудоподготовки изучен механизм разрушения рудной смеси, который позволяет рационально организовать процесс как селективного, так и менее энергоемкого вскрытия ее минеральных фаз.

Согласно гипотезе о дислокационном зарождении микротрещин (Гриффитса – Орована – Ребиндера), технология разрушения рудной смеси состоит из двух стадий: подготовки к вскрытию (дробления) и самого вскрытия (измельчения).

На кинетику разрушения рудной смеси оказывают влияние состав и свойства каждого компонента смеси: минеральный состав, текстурно-структурные особенности, свойства и характер границ срастания контактирующих минералов. Если в первой стадии рудоподготовки основ-

ную роль играют текстурные особенности и макроструктурные характеристики, то в последующей стадии все большее значение приобретают индивидуальные свойства компонентов рудной смеси, состояние и характер границ их срастания и микроструктурные характеристики вскрываемых при механическом воздействии компонентов смеси. Процесс вскрытия инициируется механическими воздействиями различного рода, поэтому данный процесс рассматривается как зарождение и рост разрушающих микротрещин в объеме сложноподобного агрегата зерен контактирующих минералов.

Объект исследований — тонковкрапленные железистые кварциты месторождений Курской магнитной аномалии (КМА), представляющие весьма неоднородную композицию из оксидов железа и диоксида кремния. Для исследований отобраны образцы кварцитов (286 шт.), отражающие наиболее представительные текстурно-структурные и минералогические особенности минералов. Особое внимание уделено характеру границ срастания зерен контактирующих минералов.

Железистые кварциты — сложная гетерофазная система, свойства которой обусловлены их генезисом, а поведение в технологическом процессе зависит от суммарного эффекта многих процессов. Механическое поведение магнетита в процессе вскрытия и обогащения определяется типом и характером его срастаний с контактирующими рудными и нерудными минералами: кварцем, силикатами, карбонатами и др. В данной работе изучен характер контакта основных рудных (магнетит, гематит) и нерудных (кварц) минералов.

Использование традиционной техники и технологии рудоподготовки обуславливает появление сростков рудных минералов с различным количественным соотношением нерудных, влияющих на качество продуктов разделения. Максимально полное вскрытие минералов достигается лишь при измельчении до размера вкрапленности зерен извлекаемого минерала, что влечет за собой увеличение как энергетических затрат, так и переизмельчение компонентов рудной смеси, в том числе и уже вскрытых минералов, и, как следствие, их потерю. Для достижения максимально полного вскрытия компонентов рудной смеси необходимо учитывать особенности границ срастания контактирующих минералов.

Согласно классификации Б. И. Пирогова применительно к железистым кварцитам КМА, типы срастаний контактирующих минералов могут быть благоприятными или неблагоприятными для их разделения [2, 3]. Благоприятными считаются типы срастания, в которых извлечение минерала максимальное. В зависимости от состояния и технологии разделения при измельчении они легко- и среднераскрываемы. Типы срастания, в которых при разделении потери извлекаемого минерала значительны, являются неблагоприятными. При таком типе срастания концентраты разубожены “трудными” сростками и вредными примесями, извлекаемые минералы теряются с хвостами, что усложняет процесс разделения.

Для механического разделения благоприятны простые типы срастаний зерен контактирующих минералов:

— с однородным внутренним строением, правильными формами и ровными границами контактирующих минералов, сами минералы — субидiomорфны;

— с криволинейными, извилистыми, зазубренными, зубчатыми границами контактирующих минералов, сами минералы — ксеноморфны.

Среди неблагоприятных для механического разделения выделяют сложные и весьма сложные типы срастаний зерен контактирующих минералов. Сложные границы срастания:

— пойкилитовые с включением зерен одного минерала в другом, зерна минералов округлые, реже идиоморфные;

— мирмекитоподобные с проникновением зерен одного минерала в другой при тесном их срастании между собой.

Весьма сложные границы срастания:

— замещения с особыми типами срастаний, обусловленными замещением минералов вплоть до полных псевдоморфоз с образованием скелетных форм зерен, а при более глубоком замещении реликтов — с образованием островков магнетита в гематите и мартите при мартитизации или островков гематита в магнетите при мушкетовитизации;

— катакластические с различной степенью дезинтеграции зерен и сложными взаимоотношениями, вызванными срастанием зерен и агрегатов контактирующих минералов.

В различных минеральных разновидностях кварцитов месторождений КМА наблюдаются два типа срастаний контактирующих минералов [2, 3]. У первого граница контакта ровная, гладкая, у второго — с извилистыми очертаниями, наличием участков с дефектами и примесями как в рудной, так и в нерудной части. Второй тип срастания имеет большее распространение среди железистых кварцитов КМА, чем первый [3].

В процессе рудоподготовки рудная смесь подвергается внешним механическим воздействиям, которые неоднородны и сосредоточены в какой-либо локальной зоне разрушаемой рудной смеси. Результатом механических воздействий является неуправляемый и случайный характер, обеспечивающий селективность разрушения. Это затрудняет прямые исследования процессов, а также определение физико-механических свойств (в частности, прочностных и упругих) горных пород при использовании стандартных способов и методик измерения (одноосное сжатие, растяжение, кручение, изгиб и т. д.).

Известно, что деформирование, трещинообразование и разрушение материала начинается на микро- и наноуровне, поэтому для изучения таких процессов необходимо применять методы нано- и микроиндентирования (NI) [4–11]. Их преимущество состоит в том, что они локальны и позволяют исследовать процессы пластической деформации и разрушения материала в микро- и наномасштабе без макроразрушения и усреднения данных по всему объему образца [4–6, 8–11]. Для оценки прочностных свойств минералов выбраны методы микро- и наноиндентирования для определения их микро- (МТ по Виккерсу) и нанотвердости (НТ по Оливеру–Фару), вязкости разрушения K_c и др.

В отличие от показателя твердости по шкале Мооса, МТ отражает способность того или иного минерала сопротивляться проникновению в его поверхность стандартного тела (индентора), не доводя образец до макроразрушения. Для определения МТ в работе использован метод Виккерса, отличающийся повышенной точностью, методика измерений изложена в [12, 13]. Измеряемый параметр — диагональ восстановленного отпечатка (d) индентора, вдавливаемая нагрузка $P = 0.981$ мПа/мм² (рис. 1). Усреднение определений МТ осуществлялось по измерению 30–60 отпечатков, полученных в одинаковых условиях измерения, расчет МТ — по стандартной формуле для пирамиды Виккерса:

$$H = 1.854P / d^2,$$

где H — число микротвердости, мПа.

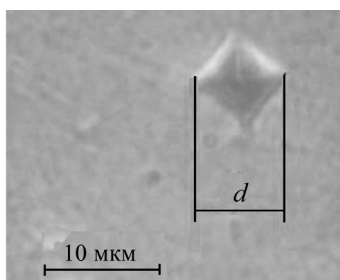


Рис. 1. Диагональ восстановленного отпечатка индентора

Для определения МТ использовалась методика Оливера–Фара [7] в соответствии со стандартами [13]. Результаты определения МТ выполнены на большом статистическом материале и набирались по образцам железистых кварцитов. Одновременно проводилось по 30 измерений МТ зерен магнетита, гематита, кварца, а также в зоне их контакта со стороны магнетита с кварцем, гематитом и силикатами. Сравнительная оценка МТ зерен основных минералов железистых кварцитов и у границы их контакта со стороны магнетита приведена в табл. 1 с использованием результатов работы [12].

ТАБЛИЦА 1. Сравнительная оценка микротвердости основных минералов железистых кварцитов и у границы срастания со стороны магнетита, МПа

Минералогическая разновидность	МТ зерна			МТ Mgt у границы срастания		
	Mgt	Hgt	SiO ₂	с SiO ₂	с Sil	с Hgt
Михайловское месторождение						
Гематит-магнетитовая	57.56	117.09	153.86	58.15/126.1	36.2–41.9	68.35
Лебединское месторождение						
Магнетитовая	56.09	113.66	140.33	52.96/108.0	65.5	69.92
Стойленское месторождение						
Магнетитовая	51.00	110.13	148.08	50.0/118.9	67.57	68.55
Коробковское месторождение						
Магнетитовая	56.88	87.47	148.67	58.1/127.6	68.94	64.23
Приоскольское месторождение						
Магнетитовая	55.51	108.17	127.49	60.0/97.9	68.06	68.94

Примечание. В числителе указана МТ с простыми, в знаменателе — со сложными границами срастания; Mgt — магнетит, Hgt — гематит, SiO₂ — кварц, Sil — силикаты

Прочность связи между зернами минералов определяется многими факторами, в том числе условиями минералообразования и последующего метаморфизма, обуславливающими кристаллографические параметры поверхности срастания, ее химический состав, структуру и тип химической связи. В зависимости от генезиса следует ожидать вариации типа и характера связи минералов в кварцитах. Так, если в процессе минералообразования и метаморфизма возникла диффузная зона через поверхность срастания, то МТ контактирующих минералов заметно различается и выше МТ самих минералов, что создает упрочнение границ срастания (табл. 1). Например, МТ магнетита Михайловского месторождения составляет в среднем 57.56, гематита — 117.09, кварца — 155.86, а на границе срастания магнетита с кварцем МТ достигает 126.1, с гематитом — 68.35 МПа, аналогичная картина прослеживается и для других месторождений КМА.

Особенности механического воздействия на основные минералы нашли отражение и в их МТ (табл. 2). В частности, после механического воздействия у магнетита отмечается снижение МТ с 57.76 до 50.31 МПа, у гематита — с 117.68 до 88.55 МПа соответственно. В целом МТ магнетита уменьшается на 13, а гематита — на 25 %.

ТАБЛИЦА 2. Изменение микротвердости основных минералов железистых кварцитов до и после механического воздействия

Минерал	Микротвердость, МПа			
	до воздействия		после воздействия	
	Пределы	Среднее	Пределы	Среднее
Магнетит	50.0–74.8	57.76	46.58–56.0	50.31
Гематит	97.08–166.8	117.68	64.92–108.75	88.55
Кварц в прослоях:	109.8–246.2	157.0	143.96–187.6	147.2
рудных	129.5–197.1	138.27	97.77–157.98	128.76
безрудных	122.6–246.2	155.34	109.64–187.6	136.31

В рассматриваемой минеральной ассоциации доминирующим и самым прочным минералом является кварц, который играет роль матрицы и особенности которого сказываются на физико-механических свойствах рудной смеси. Например, МТ кварца в безрудных слойках варьирует в пределах 122.6–246.2, составляя в среднем 155.34 МПа, в рудных 129.5–197.1, в среднем 138.27 МПа. После механического воздействия МТ кварца в безрудных слойках изменяется от 109.64 до 187.6, в среднем составляя 136.31 МПа, в рудных — от 97.77–157.98, в среднем — 128.76 МПа.

Исследования по изучению зарождения микротрещин на границе контакта минералов выполняли на нанотестере ТНИ (разработка НОЦ “НТиНМ” ТГУ, г. Тамбов) для определения физико-механических свойств методом непрерывного роста нагрузки на индентор до 100 мН. Рассмотрим примеры возникновения и распространения микротрещин на контакте магнетита, гематита и кварца, имеющих сложные границы срастания (рис. 2–4). При приложении нагрузки на зерно кварца микротрещина зарождается в нем и распространяется далее до зерна магнетита, упираясь в которое ее рост останавливается (рис. 2*а, б*). При приложении нагрузки на границе контакта магнетита и кварца микротрещина возникает в зерне кварца и далее распространяется по границе их срастания (рис. 2*в, з*).

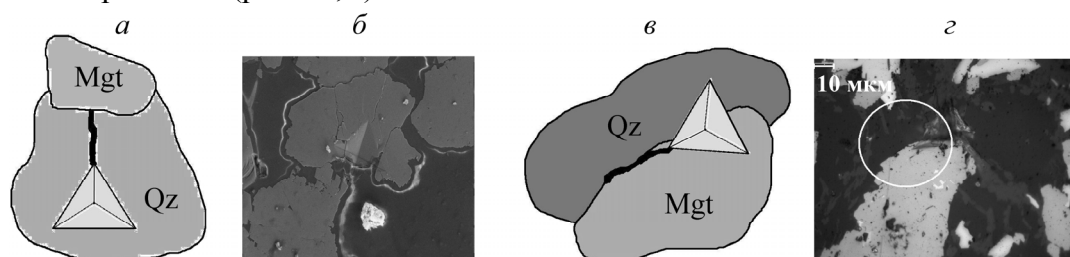


Рис. 2. Характер разрушения на границе срастания зерен кварца и магнетита: схематическое изображение (*а, в*) и микрофотография поверхности (*б, з*)

Микротрещина, зарождаясь в зерне гематита, проходит через него и зерно магнетита и раскалывает их с образованием магнетит-гематитового сростка (рис. 3*а, б*). В результате приложения нагрузки на границе срастания кварца и гематита образуется уже “трудный” сросток гематит-кварцевый состава (рис. 3*в, з*).

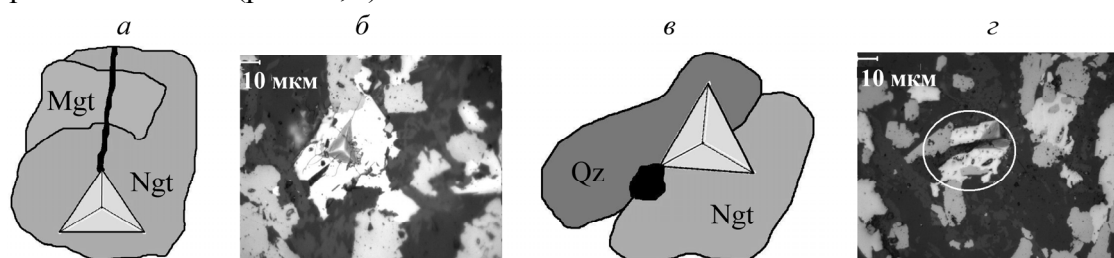


Рис. 3. Характер разрушения на границе срастания зерен гематита и магнетита, гематита и кварца: схематическое изображение (*а, в*) и микрофотография поверхности (*б, з*)

При приложении нагрузки на границе срастания зерен магнетита, гематита и кварца микротрещина зарождается на границе контакта магнетита и гематита, начинает свой рост и резко уходит в зерно гематита. Проходя через него, она останавливает рост у границы контакта гематита с кварцем (рис. 4*а, б*). При приложении нагрузки на границе контакта гематита и кварца с пойкилитовым включением магнетита микротрещина зарождается на границе срастания зерен гематита и кварца, проходит по границе их контакта и, упираясь в зерно магнетита, останавливает рост (рис. 4*в, з*).

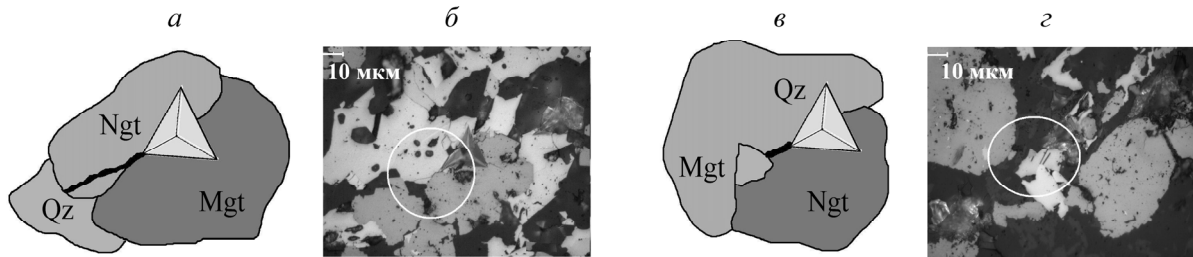


Рис. 4. Характер разрушения на границе срастания зерен кварца, магнетита и гематита: схематическое изображение (а, в) и микрофотография поверхности (б, г)

Таким образом, при наличии сложных границ срастания контактирующих минералов, обладающих повышенной прочностью, межзеренное разрушение происходит в направлении слабых мест. В результате механического воздействия на железистые кварциты образуются “трудные” сrostки, т. е. характер границ контакта является одним из основных факторов, влияющих на прочность срастания контактирующих минералов.

Существует ряд характеристик, позволяющих учесть возможные вариации состояния кристаллической решетки минералов, которые влияют на физико-механические свойства и на вскрытие контактирующих минералов [11, 14–16]. Эти параметры объединяются понятием “структурное состояние”, под которым понимают дефектность и напряженное состояние структурных элементов отдельных минералов и всей системы в целом при механическом воздействии. Именно такая информация позволяет описывать структурные изменения в железистых кварцитах от макро- до микроуровня. Физико-механические свойства железистых кварцитов можно прогнозировать на основе анализа напряженного состояния и дефектности основных минералов, слагающих кварциты. При сравнении параметров структурного состояния видно, что наиболее прочными минералами в системе являются гематит и кварц, наименее прочным — магнетит (табл. 3). Следовательно, в процессе рудоподготовки в первую очередь повреждается магнетит, что вызывает его переизмельчение и потери со шламами при разделении.

ТАБЛИЦА 3. Изменение параметров структурного состояния основных минералов железистых кварцитов до и после механического воздействия

Параметр	До воздействия			После воздействия		
	Mgt	Hgt	SiO ₂	Mgt	Hgt	SiO ₂
δ_s , ГПа	-2.82	-1.86	1.37	-1.78	-1.36	0.79
$\delta_{s_{\text{бл}}}$, ГПа	0.17	8.34	1.6	0.49	0.41	1.14
$\delta_{s_{\text{гр}}}$, ГПа	5.36	54.9	0.69	4.42	4.96	7.58
D_m , нм	86.1	36.0	51.1	45.4	64.7	136.3
$\rho_D \cdot 10^{-11}$, нм ⁻²	5.15	6.18	5.76	15.1	6.71	1.7
$\rho_\varepsilon \cdot 10^{-11}$, нм ⁻²	0.80	4.1	0.52	2.83	1.18	1.43
$\rho_{\text{ср}} \cdot 10^{-11}$, нм ⁻²	1.36	33.8	0.45	5.73	1.75	12.42
$C_{\text{дв}}$	0.02	0.53	7.44	0.21	1.42	0.65
$C_{\text{дв}}$	0.16	0.54	10.7	1.1	2.56	5.97
Φ	0.89	17.2	5.3	0.67	11.4	8.4

Примечание. δ_s — остаточные структурные напряжения; $\delta_{s_{\text{бл}}}$, $\delta_{s_{\text{гр}}}$ — максимальные локальные напряжения в блоке и на границе зерна; D_m — размер блока мозаики; ρ_D , ρ_ε , $\rho_{\text{ср}}$ — плотность дислокаций на границе блока, в блоке и средняя; $C_{\text{дв}}$, $C_{\text{дв}}$ — плотность деформационных и двойниковых дефектов упаковки; Φ — фактор раскрытия трещины

Сравнение значений плотности дислокаций на границе блока мозаики и внутри показывает, что для приведенных минералов наиболее вероятным является зарождение микротрещины в объеме зерна, однако ее раскрытие свидетельствует о том, что вероятность разрушения внутри зерна гематита и кварца гораздо выше, чем магнетита. Это подтверждается измерениями коэффициента вязкости разрушения K_c , определяемого методами микроиндентирования в зернах отдельных минералов и на границах их срастания (рис. 5). Можно отметить, что значения K_c зависят от типа исследуемого минерала и характера границы срастания. Так, K_c , полученные в зернах отдельных минералов, отмечают наименьшую вязкость разрушения у кварца, а наибольшую — у гематита. Исследование вязкости разрушения отдельных границ срастания указывает на довольно низкую (примерно в 2–3 раза меньше) прочность границ контакта магнетит–кварц и гематит–кварц (K_c соответственно 0.68 и 0.38 МПа·м^{1/2}), по сравнению с границей контакта магнетит–гематит ($K_c = 1.28$ МПа·м^{1/2}) (рис. 5). При этом модуль Юнга исследуемых минералов варьирует у магнетита от 130 до 207, у гематита от 170 до 218 и у кварца от 80 до 96 ГПа.

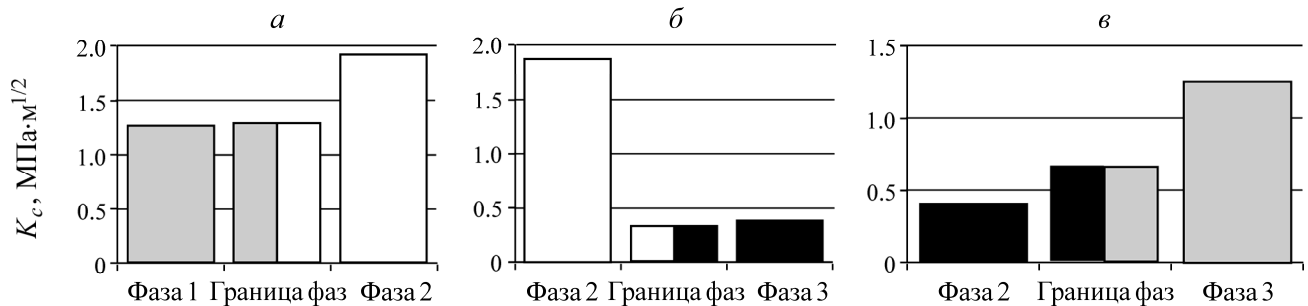


Рис. 5. Значения коэффициента вязкости разрушения K_c для отдельных фаз и границ срастания зерен минералов железистых кварцитов: *а* — магнетит (фаза 1), гематит (фаза 2) и их граница срастания; *б* — гематит (фаза 2), кварц (фаза 3) и их граница срастания; *в* — кварц (фаза 3), магнетит (фаза 1) и их граница срастания

Статистическая обработка результатов исследований показала, что влияние различной повреждаемости минералов в процессах рудоподготовки на технологические показатели разделения можно учесть, используя параметры структурного состояния. Для прогноза массовой доли железа в концентрате β , между которой и комплексом параметров, несущих информацию о структурном состоянии железистых кварцитов, выявлена функциональная зависимость. В частности, для извлекаемого минерала магнетита она имеет вид

$$\beta = 230.97d + 0.86T_c + 57\varepsilon - 65.05\rho_{\text{ист}} \cdot 10^{-12} - 2.88 \sum \partial_y - 0.04M_{0.045} - 2368.58,$$

где d — параметр решетки магнетита, Å; T_c — температура Кюри магнетита, °C; ε — относительная деформация кристаллической решетки магнетита; $\rho_{\text{ист}}$ — истинная плотность дислокаций в зернах магнетита, см⁻²; $\sum \partial_y$ — сумма дефектов упаковки; $M_{0.045}$ — массовая доля зерен магнетита размером менее 0.045 мм.

Таким образом, учет параметров структурного состояния железистых кварцитов наряду с их минералого-петрографическими характеристиками позволяет осуществлять более точный прогноз качественных технологических показателей разделения. Показано, что исходные состояния и характер границ срастания контактирующих минералов у исследованных образцов разнообразны и сложны. Установлено, что границы контакта в основном четкие, а топология

границ разнообразна: от прямых и извилистых до сложных взаимопрорастающих форм. Состав и структура приграничных областей во многом неопределенны, исследования свидетельствуют о наличии диффузной зоны в области границ срастания. Диффузия играет значительную роль, определяющую свойства границ контакта минералов. Методом просвечивающей электронной микроскопии выявлены особенности формирования границы срастания, например магнетита и кварца, за счет процессов диффузии вещества на контакте этих минералов, а микросондовым методом определен химический состав вещества в приграничной области (Fe_2SiO_4), при этом ее модуль Юнга составил 96 ГПа (рис. 6). В результате возникновения диффузной зоны произошло упрочнение границы срастания, МТ которой составила от 97.9 до 127.6 МПа (табл. 1).

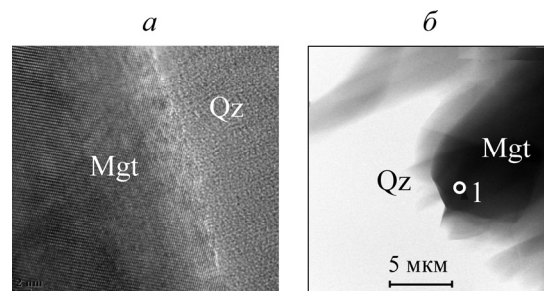


Рис. 6. Границы срастания зерен магнетита (а) и кварца (б) (просвечивающая электронная микроскопия — изображение в темном и светлом поле)

ВЫВОДЫ

Раскрытие кварцитов определяется селективной механической прочностью, которая во многом зависит от напряжений, возникающих в рудной смеси, а также от упругих свойств и дислокационной структуры. Повышенная плотность дислокаций у границ срастания приводит к образованию микротрещин и хрупкости зоны контакта минералов, пониженная — к значительным напряжениям и развитию разрушения по границе срастания.

Из результатов измерения МТ в отдельных зернах основных рудных минералов и на границе их срастания видно, что в большинстве случаев прочность на границах оказывается выше соответствующих параметров рудной фазы. Следовательно, разрушение железистых кварцитов под действием только сжимающих усилий приведет к образованию “трудных” сростков и ошломованию измельченного материала, т. е. к снижению массовой доли извлекаемого минерала в готовый продукт.

В каждом конкретном случае, зная прочность контактирующих фаз, необходимо регулировать режим измельчения или применить эффективный способ механического воздействия. При механическом разрушении микротрещины вначале пройдут по межзеренной границе, а для разрушения вдоль границы срастания минералов необходимо на границе их контакта создать большие сдвиговые напряжения [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гзогян С. Р. Современное состояние техники и технологии рудоподготовки железистых кварцитов // ГИАБ. Спец. вып. — 2013. — № 11. — С. 3–24.
2. Мананга Ж. Типы срастаний минералов в железистых кварцитах докембрия и закономерности их формирования: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. — Киев, 1984. — 29 с.

3. **Пирогов Б. И., Поротов Г. С., Холошин В. Н. и др.** Технологическая минералогия железных руд. — Л.: Наука, 1988. — 304 с.
4. **Головин Ю. И.** Наноиндентирование и его возможности. — М.: Машиностроение, 2009. — 312 с.
5. **Bhushan B.** Springer handbook of nanotechnology, Berlin, Springer, 2010. — 1968 p.
6. **Fischer-Cripps A. C.** Nanoindentation, New York, Springer, 2011. — 280 p.
7. **Oliver W. C., Pharr G. M.** Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology, *J. Mater. Res.*, 2004, Vol. 19, No. 1. — P. 3–20.
8. **Головин Ю. И.** Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор) // ФТТ. — 2008. — Т. 50. — № 12. — С. 2113–2141.
9. **Головин Ю. И., Васюков В. М., Коренков В. В., Столяров Р. А., Шуклинов А. В., Поляков Л. Е.** Размерные эффекты в твердости ГЦК-металлов в микро- и наноразмерной области // ЖТФ. — 2011. — Т. 81. — Вып. 5. — С. 55–58.
10. **Golovin Yu. I., Tyurin A. I., Farber V. Ya.** Time-dependent characteristics of materials and micromechanisms of plastic deformation on a submicron scale by a new pulse indentation technique, *Philosophical Magazine A: Physics of Condensed Matter, Structure, Defects and Mechanical Properties*, 2002, Vol. 82, No. 10, Spec. — P. 1857–1864.
11. **Викторов С. Д., Головин Ю. И., Кочанов А. Н., Тюрин А. И., Шуклинов А. В., Шуварин И. А., Пирожкова Т. С.** Оценка прочностных и деформационных характеристик минеральных компонентов горных пород методом микро- и наноиндентирования // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 46–54.
12. **Гзогян Т. Н., Мельникова Н. Д.** Влияние микротвердости основных минералов железистых кварцитов на технологические свойства // ФТПРПИ. — 2001. — № 3. — С. 112–122.
13. **ГОСТ Р 8.748-2011.** Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Ч. 1. Метод испытаний. — Введ. 01.05.2013. — 28 с.
14. **Гзогян Т. Н., Ряполов А. Н., Гзогян С. Р.** Изменение структурного состояния железистых кварцитов при механическом воздействии // ГИАБ. Спец. вып. — 2013. — № 11. — С. 25–36.
15. **Гзогян Т. Н., Мельникова Н. Д.** Структурное состояние породы — дополнительная возможность оценки технологических свойств железистых кварцитов // ФТПРПИ. — 2000. — № 6. — С. 94–101.
16. **Чантурия В. А.** Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // ФТПРПИ. — 1999. — № 3. — С. 6–16.

Поступила в редакцию 12/V 2016