

О. Л. СВЕШНИКОВА

МИКРОТВЕРДОСТЬ СУЛЬФОАНТИМОНИТОВ
СВИНЦА И СЕРЕБРА

Диагностика сульфoантимонитов свинца и серебра чрезвычайно сложна вследствие поразительной близости свойств многих из этих минералов. Именно этим объясняется тот факт, что в течение 150 лет к фрейеслебениту относили два различных минеральных вида: фрейеслебенит и диафорит. Наиболее близки свойства у минералов, принадлежащих к одной группе (ранее нами было показано, что среди сульфoантимонитов свинца и серебра можно выделить три группы: фрейеслебенита, андорита и овихиита (О. Л. Свешникова, 1975).

Если выделение названных групп легко может быть выполнено с помощью рентгеновского метода, то при диагностике отдельных минералов внутри групп этот метод оказывается практически бессильным. Решающее значение в этом случае может приобрести измерение микротвердости сульфосолей.

Микротвердость сульфoантимонитов свинца и серебра изучена слабо. В наиболее крупных отечественных и зарубежных сводках по микротвердости рудных минералов (И. А. Пудовкина, 1957; С. И. Лебедева, 1963, 1969; F. Nakhla, 1956; С. Бови и Тэйлор, 1959; В. Jong and Millman, 1964; E. Rāgnarāa, 1963) отсутствуют какие-либо сведения о таких минералах, как физелиит, рамдорит и фрейеслебенит. Для последнего, правда, имеются данные у С. И. Лебедевой, но они, по замечанию самого автора, получены на недостоверном материале.

Несколько лучше дело с изучением микротвердости диафорита и андорита. Для андорита значения микротвердости можно найти у Янга и Пернамаа, а для диафорита у Янга и Л. Н. Индолева (1962), овихиит чаще других привлекал внимание исследователей. Сведения о его микротвердости имеются у И. А. Пудовкиной (1957), Л. Лоуренса (L. Lawrence, 1962), Л. Н. Индолева (1964) и Д. А. Тимофеевского (1967). Однако опубликованные этими авторами значения микротвердости овихиита обнаруживают значительные расхождения.

Микротвердость изучалась нами на микротвердомере ПМТ-3. Измерения проводились при постоянной для каждого минерала нагрузке, значения которой указаны в табл. 1. Время действия нагрузки — 10 сек. Исследуемый материал в большинстве случаев представлял собой запрессованные в брикеты разноориентированные зерна минералов.

Учитывая отсутствие кристаллографически ориентированных срезов, для получения достоверных и наиболее характерных значений твердости минералов в большинстве случаев производились массовые замеры микротвердости (25—30), а при обработке полученных таким образом результатов использовался один из методов математической статистики,

Таблица 1
Микротвердость сульфоантимонитов свинца и серебра

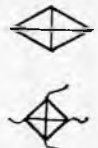
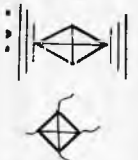
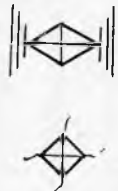
Минерал	Образец	Месторождение	Колич. обр.	Число замеров	Пределы значений H , кг/мм ²	Интервал, включающий 90% значений, кг/мм ² (для статистических замеров)	Средние значения			Форма отпечатка	Коэфф. анизотропии	Оптимальная нагрузка, г
							H_1	H_2	H_3			
Овихиит		Усть-Теремки, СССР	5	102	110—232	115—210	125	205	130		$K'_{H_1} = 1,64$	20
							$H_{\text{ср.}} = 162$ под $\angle 45^\circ$ к удлинению				$K'_{H_2} = 1,25$	
Фрейслебенит	27 889	Иендельэнсина, Испания	3	50	101—189	113—175	143	172	117		$K'_{H_1} = 1,20$	20
							$H_{\text{ср.}} = 157$ под $\angle 45^\circ$ к спайн.				$K'_{H_2} = 1,34$	
	9 582	Бройнсдорф, ГДР	2	24	96—189	104—179	140	180	115		$K'_{H_1} = 1,28$	20
							$H_{\text{ср.}} = 160$				$K'_{H_2} = 1,39$	
Диафорит	47 781	Бая Сприе, Румыния	2	45	100—238	123—231	160	220	—	Квадрат	$K'_{H_2} = 1,38$	30
	9 572	Пршибрам, ЧССР	2	47	156—238	172—223	195		—	»	—	30
	47 790	Сан Фозе дель Кро, Мексика	1	25	184—251	186—229	190		—	»	—	30
	47 780	Фрайберг, ГДР	1	9	179—247		205 ср арифм.		—	»	—	30

Таблица 1 (окончание)

Минерал	Образец	Месторождение	Колич. обр.	Число замеров	Пределы значений H , кг/мм ²	Интервал, включающий 90% значений кг/мм ² (для статистических замеров)	Средние значения			Форма отпечатка	Козфф. анизотропии	Оптимальная нагрузка, г
							H_1	H_2	H_3			
	Обр. Н. В. Максимовой	Иендельэнсина, Испания	1	7	179—205		190 ср. арифм.	—	»	—	30	
	T-V-26а, T-VI-120; T-C	Усть-Теремки, СССР	3	15	159—247		194 ср. арифм.	—	»	—	30	
Андорит	Андорит	Николаевское, СССР	2	31	160—247	170—244	180	225	»	$K'_{H_2} = 1,32$	30	
	Обр. Ш. Коха	Бая Сприе	1	21	155—268	168—250	184	223	»		»	
Рамдорит	47 758 (фаза $AgPb_2Sb_3S_7$)	Потоси, Боливия	1	3	200—203		201—ср. арифм.		»		20	
	Синтезированный		3	9	192—204		197 ср. арифм.		»		»	
Физелиит	11 110	Хержа, Румыния	1	29	113—182	121—175	128	157	»	$K'_{H_2} = 1,23$	20	

а именно метод нахождения наиболее вероятных значений твердости путем построения вариационных кривых (С. И. Лебедева, 1963). В тех случаях, когда различный характер и форма отпечатка давали возможность сгруппировать результаты измерения по сечениям, соответствующим определенным кристаллографическим направлениям, обработка результатов проводилась также путем нахождения среднего арифметического — H_{cp} из нескольких замеров микротвердости. Все результаты измерений и вычислений приведены в табл. 1, для некоторых минералов построены также графики (рис. 1—3).

Из табл. 1 видно, что для всех сульфoантимонитов свинца и серебра характерен большой разброс значений микротвердости, причем интервалы значений микротвердости различных минералов часто перекрывают друг друга. Это затрудняет использование полученных данных в общем виде для диагностических целей. Однако математическая обработка результатов, полученная с учетом различной кристаллографической ориентировки сечений, позволила выявить для каждого из минералов группы свои, наиболее для него характерные, значения микротвердости.

Проведенное исследование показало, что все сульфoантимониты свинца и серебра обнаруживают анизотропию твердости. При характеристике анизотропии твердости С. И. Лебедева (1963) предлагает различать два рода анизотропии: I рода — полярную, изменяющуюся в пределах одной плоскости (грани) в зависимости от кристаллографического направления и II рода — ретикулярную, связанную с атомной плотностью грани кристалла, различную на разных гранях и параллельных им сечениях или семействах граней одного и того же кристалла. Для количест-

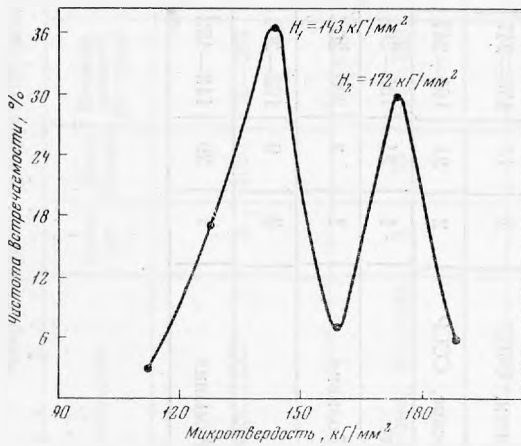
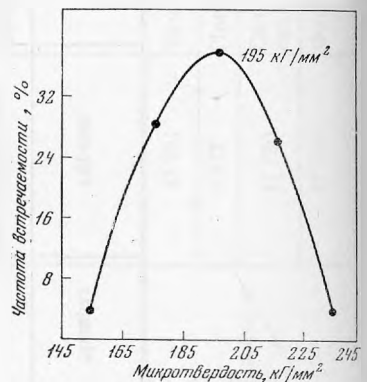
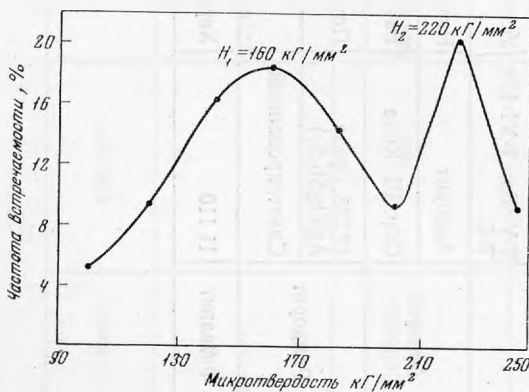


Рис. 1. Вариационная кривая твердости фрейслейбенита. Анизотропные сечения (м-ние Йендельзсинса, обр. 27889)

Рис. 2. Вариационная кривая твердости диафорита (м-ние Бая Сприе, обр. 47781)

Рис. 3. Вариационная кривая твердости диафорита (м-ние Пршибрам, обр. 9572)



венной оценки степени анизотропии твердости предложен коэффициент анизотропии $K_H = H_{\max}/H_{\min}$. Для каждого минерала K_H колеблется в сравнительно небольших пределах, и поэтому может быть использован в качестве дополнительной характеристики при диагностике близких по твердости минералов.

По характеру анизотропии твердости среди сульфоантимонитов свинца и серебра резко выделяются два минерала: овихиит и фрейеслебенит, относящиеся к моноклинной сингонии. Будучи самыми низкосимметричными из всех свинцово-серебряных сульфосолей (остальные относятся к ромбической сингонии)¹, эти минералы характеризуются и наиболее низкой симметрией распределения твердости по различным кристаллографическим направлениям. Овихииту и фрейеслебениту присущи два вида анизотропии твердости, в то время как для остальных сульфоантимонитов свинца и серебра характерна лишь анизотропия II рода.

Анизотропия I рода проявляется у овихиита в сечениях, сошлифованных вдоль оси *C*. Отпечатки, полученные на этих сечениях, имеют форму четкого ромба, большая диагональ которого ориентирована параллельно удлинению кристалла. Средняя твердость овихиита в этом направлении $H_{1cp} = 125$ кг/мм² значительно ниже, чем в перпендикулярном направлении — $H_{2cp} = 205$ кг/мм². Степень анизотропности этих сечений, судя по коэффициенту анизотропии $K_{H_1} = 1,64$, весьма высокая.

Изометричные и линзовидные сечения овихиита, близкие к (001), изотропны в отношении твердости, фигура давления на них имеет форму квадрата. Среднее значение твердости для этих сечений H_{3cp} — составляет 130 кг/мм². Коэффициент анизотропии II рода для овихиита вычислялся как отношение средней твердости анизотропных сечений (определялась под $\angle 45^\circ$ к удлинению) к средней твердости изотропных сечений $K_{H_2} = H_{cp} \angle 45^\circ$ к удл. (сеч. $\parallel c$)/ H_{3cp} (сеч. $\perp c$). Величина этого коэффициента = 1,25 свидетельствует о более слабой анизотропии II рода овихиита по сравнению с анизотропией I рода.

У фрейеслебенита анизотропия I рода наблюдается в сечениях, перпендикулярных спайности (110). Трещины спайности в этих сечениях ориентированы параллельно короткой диагонали отпечатка, имеющего форму ромба.

Средняя твердость анизотропных сечений для фрейеслебенита из различных месторождений 157—160 кг/мм² (при $H_{1cp} = 140$ —143 кг/мм² и $H_{2cp} = 172$ —180 кг/мм² (рис. 1). Коэффициент анизотропии I рода $H_{H_1} = 1,20$ —1,28.

Сечения фрейеслебенита, параллельные плоскости спайности, изотропны, фигура давления на них имеет форму квадрата, от углов которого отходят трещины разрыва. Эти сечения имеют минимальную для фрейеслебенита твердость $H_{3cp} = 115$ —117 кг/мм². Коэффициент анизотропии II рода $K_{H_2} = 1,34$ —1,39.

Таким образом, овихиит и фрейеслебенит, для которых характерны оба вида анизотропии твердости, отличаются друг от друга по степени проявления этой анизотропии. У овихиита сильно выражена анизотропия I рода при значительно более слабо проявленной анизотропии II рода. У фрейеслебенита же более высокое значение имеет коэффициент анизотропии II рода. Согласно исследованиям С. И. Лебедевой (1968), именно этот коэффициент является наиболее четким показателем анизотропии минерала, связанной со структурными факторами.

Все остальные сульфоантимониты свинца и серебра, среди которых диафорит, андорит, рамдорит и физелиит, также характеризуются анизо-

¹ Хотя для диафорита исследованиями Хельнера также установлена принадлежность к моноклинной сингонии, он вследствие микродвойникования является псевдоромбическим (E. Hellner, 1958).

тропией твердости, но лишь анизотропией II рода. Эта анизотропия, легко выявляемая при измерении хорошо ограненных кристаллов или кристаллографически ориентированных сечений, как в случае с овихитом и фрейеслебенитом, при неориентированных замерах микротвердости обнаруживала себя в значительном разбросе значений твердости минералов. Выявлению этой анизотропии способствует обработка полученных результатов путем построения вариационных кривых.

Так, вариационная кривая микротвердости диафорита из месторождения Бая Сприе (РНР) имеет два максимума, соответствующие двум наиболее вероятным и характерным значениям твердости минерала: $H_{1cp} = 160$ кг/мм² и $H_{2cp} = 220$ кг/мм² (рис. 2). Вариационные кривые твердости диафоритов из месторождений Пришибрам (ЧССР) и Сан-Фозе дель Кро (Мексика) имеют по одному максимуму, отвечающему значению микротвердости $H_{cp} = 190-195$ кг/мм² (рис. 3). Эта величина является средней из H_{1cp} и H_{2cp} диафорита. Анизотропию твердости диафорита в последних двух случаях не удалось выявить, по-видимому, из-за отсутствия в брикете соответствующих, наиболее мягких сечений минерала, которые, вероятно, не пользуются большим развитием в его структуре. Учитывая это, а также умеренный характер анизотропии диафорита, мы полагаем, что для его диагностики можно пользоваться средним значением микротвердости H_{cp} , равным 190—205 кг/мм².

Микротвердость диафоритов из Фрейберга (ГДР), Иендельэнсины (Испания) и Усть-Теремков (СССР, Забайкалье), полученная путем вычисления среднего арифметического из нескольких замеров, соответствует этой средней величине. Отвечают ей и данные Л. Н. Индолева (200 кг/мм²) для диафорита из Верхне-Менкеченского месторождения (СССР, Якутия) (Л. Н. Индолев, 1962). Коэффициент анизотропии твердости диафорита ($K_{H_2} = 1,39$) практически равен соответствующему коэффициенту фрейеслебенита.

Микротвердость андорита, измеренная на образцах из месторождений Бая Сприе и Николаевское (Д. Восток), характеризуется, согласно вариационным кривым, двумя наиболее вероятными значениями. Для андорита из Бая Сприе — это $H_{1cp} = 184$ кг/мм² и $H_{2cp} = 223$ кг/мм². Для андорита из Николаевского месторождения соответственно $H_{1cp} = 180$ кг/мм² и $H_{2cp} = 225$ кг/мм². Исследованием этих андоритов на микронзонде в обратно-рассеянных электронах установлена их полная однородность. В большинстве же случаев андориты неоднородны. В них всегда в подчиненном количестве присутствует фаза ранее неизвестного состава — $AgPb_2Sb_3S_7$ (Свешникова О. Л., 1975). Эта же фаза была ранее установлена нами в образце рамдорита из Потоси (Боливия), где она пользуется одинаковым с андоритом развитием и находится с ним в тесных закономерных сростаниях (Бородаев Ю. С., Свешникова О. Л., и др. 1971). Это обстоятельство необходимо учитывать при измерении твердости как андорита, так и рамдорита.

Микротвердость фазы $AgPb_2Sb_3S_7$, за которой нами предложено сохранить название рамдорита, — 201 кг/мм². Эта величина является среднеарифметической из трех замеров, выполненных на одном зерне. Возможность определения твердости этого минерала, установленного в образце из Потоси (Боливия), ограничена чрезвычайно мелкими размерами его выделений. Полноту картины микротвердости природного рамдорита в некоторой степени дополняют данные, полученные при измерении его искусственного аналога, средняя твердость которого составляет 197 кг/мм².

Самым мягким из сульфоантимонитов свинца и серебра минералом является физиелит. Наиболее характерными значениями микротвердости для него являются $H_{1cp} = 128$ кг/мм² и $H_{2cp} = 157$ кг/мм².

Таким образом, исследованием микротвердости сульфоантимонитов свинца и серебра выявлена присущая всем минералам анизотропия твер-

дости и связанный с ней большой разброс значений, получаемый при ее измерении. Тем не менее для каждой сульфосоли удалось установить наиболее характерные для нее значения микротвердости, что дает возможность уверенно использовать полученные данные для диагностики этих минералов.

ЛИТЕРАТУРА

- Бови С., Тэйлор К. Определитель рудных минералов. Международн. конф. по мирному использованию атом. энергии (Женева, 1958). Атомиздат, 1959.
- Бородаев Ю. С., Свешникова О. Л., Мозгова Н. Н. О неоднородности рамборита.— ДАН СССР, 1971, 199, № 5.
- Индолев Л. Н. Первая находка диафорита в СССР.— ДАН, 1962, 142, № 6.
- Индолев Л. Н. Овихит из месторождений Южного Верхоянья.— ДАН, 1964, 154, № 6.
- Лебедева С. И. Определение микротвердости минералов. Изд-во АН СССР, 1963.
- Лебедева С. И., Минцер Э. Ф. Исследование анизотропии твердости висмутина.— Физ. св. редкомет. минералов и методы их исслед. Изд-во «Наука», 1968.
- Пудовкина И. П. Точные методы определения отражательной способности и твердости рудных минералов.— В кн. «Современные методы минералогического исследования горных пород, руд и минералов», Госгеолтехиздат, 1957.
- Свешникова О. Л. Химический состав и классификация сульфоантимонитов свинца и серебра.— Новые данные о минералах СССР, вып. 24. Изд-во «Наука», 1975.
- Юшко С. А., Юшко-Захарова, Лебедева С. И., Максимюк И. Е. Диагностические свойства рудных минералов. Изд-во «Недра», 1969.
- Hellner E. Über komplex zusammengesetzte Spießglanze. III. Zur Structur des Diaphorits: $Ag_3Pb_2Sb_3S_8$.— Zeitschr. Kristallographie, 1958, 110, Hf. 3.
- Joung B. B., Millman A. P. Microhardness and Deformation of Ore Minerals.— Bull. Inst. Metal., 1964, 73, N 689.
- Lawrence L. J. Owyheete from Rivertree New South Walley.— Min. Mag., 1962, 33, N 259.
- Nakhla F. M. The hardness of metallic minerals in polished sections.— Econ. Geol., 1956, 51, N 8.
- Pärnamaa E. On the Use of Vicers Microhardness (vh) in the Microscopical Identification of Ore Minerals, especially Sulfides of Pb, Bi, Sb.— Lunds Univ, årsskrift, 1963, N. F., Avd. 2, Bd. 59, N 3.