ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(6):106-114

УДК 622.02.112; 622.023 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-106-114

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ЗЕРЕН ПИРИТОСОДЕРЖАЩИХ РУД В СВЧ ПОЛЯХ

А.В. Бабич[1], В.А. Винников[1]

[1] НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com

Аннотация: Одним из перспективных видов воздействия на физико-механические свойства пород и руд являются поля СВЧ диапазона. При исследовании эффективного разупрочнения и уменьшения энергоемкости измельчения минералов крепких руд при СВЧ воздействии необходимо определять оптимальные параметры последнего: время воздействия СВЧ волн и температуру нагрева породы. Приведены результаты экспериментальных исследований структурных изменений пиритосодержащих руд при определенном оптимальном времени СВЧ воздействия. Структурные изменения рассчитывались по результатам ренгенографических исследований. Проанализированы относительные изменения размеров блоков мозаики, плотности дислокаций, находящихся на границе блоков и обуславливающих их разориентировку, плотности дислокаций внутри блоков, максимальные величины локальных напряжений на границе блока; средние величины локальных напряжений внутри блока до и после СВЧ воздействия. Предложен механизм структурных преобразований в зернах пирита с ростом температуры при СВЧ-воздействии. Явление температурной стабилизации, происходящей в пиритосодержащей руде в диапазоне времени воздействия СВЧ-волн около 3 минут, объяснено перераспределением дислокаций внутри зерен и их преимущественным накоплением на границе зерен пирита.

Ключевые слова: пиритосодержащая руда, СВЧ воздействие, оптимальное время облучения, температура стабилизации, структурные изменения в зернах пирита

Для цитирования: *Бабич А. В., Винников В. А.* Экспериментальные исследования структурных изменений минеральных зерен пиритосодержащих руд в СВЧ полях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 6. – С. 106–114. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-106-114.

Experimental investigations of structural changes of pyrite-containing ores mineral grains in the microwave fields

A.V. Babich[1], V.A. Vinnikov[1]

[1] National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com

Abstract: One of the most promising types of influence on the physico-mechanical properties of rocks and ores are the fields of the microwave range. In the study of effective softening and reducing the energy intensity of grinding of minerals of strong ores with microwave exposure, it is necessary to determine the optimal parameters of the latter, such as the exposure time of the microwave waves and the heating temperature of the rock. The results of experimental studies of structural changes in pyrite-containing ores at the optimum time of microwave exposure are presented. Structural changes were calculated based on the results of X-ray diffraction studies. Analyzed the relative

© А.В. Бабич, В.А. Винников. 2019.

changes in the size of mosaic blocks, density of dislocations located on the boundary of blocks and causing their disorientation, dislocation density inside blocks, maximum local stresses at the block boundary, average local stresses inside the block before and after microwave exposure. A mechanism of structural transformations in pyrite grains with an increase in temperature during microwave exposure is proposed. The phenomenon of temperature stabilization occurring in pyrite-containing ore in the range of exposure to microwave waves for about 3 minutes is explained by the redistribution of dislocations inside the grains and their predominant accumulation at the boundary of pyrite grains.

Key words: pyrite-containing ore, microwave exposure, optimum microwave exposure time, stabilization temperature, structural changes in pyrite grains.

For citation: Babich A. V., Vinnikov V. A. Experimental investigations of structural changes of pyrite-containing ores mineral grains in the microwave fields. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(6):106-114. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-106-114.

Введение

Известно, что в настоящее время в процессы переработки минерального сырья вовлекается большой объем трудно измельчаемых руд и пород, обладающих, как правило, высокой прочностью. Использование для их переработки традиционных способов измельчения приводит к значительному росту энергетических затрат и значительным потерям извлекаемых полезных компонентов за счет неполного раскрытия сростков. Для повышения эффективности переработки такого минерального сырья необходимо целенаправленно изменять его технологические свойства. Учет гетерогенности пород, слагающих рудное тело, и особенностей структурных преобразований рудных минералов при воздействии на них физическими полями позволит существенно снизить энергоемкость процесса измельчения.

В настоящее время теоретически и экспериментально установлено, что электрофизические поля являются одним из возможных видов воздействия на горные породы высокой крепости, повышающих эффективность их разрушения. Действие таких полей основано на поглощении подводимой к породе электрической энергии, после преобразования которой происходит либо разрушение породы, либо значительное понижение ее прочности. Электрофизические поля можно расклассифицировать на несколько групп: основанные на применении постоянного тока или тока промышленной частоты, электрических импульсов высокого напряжения, энергии электромагнитного поля высокой и сверхвысокой (СВЧ) частоты, инфракрасного или оптического воздействия.

Одним из перспективных видов воздействия на физико-механические свойства пород и руд являются поля СВЧ диапазона. При воздействии СВЧ энергии на породу разупрочнение последней предопределяется объемным характером преобразования излученной энергии в тепловую, высокой температурой нагрева и действием возникающих при этом термических напряжений, обеспечивающих скорость разупрочнения, соизмеримую со скоростями механического нагружения. Известно, что при воздействии СВЧ-волнами на горные породы, содержащие, в частности, пирит, и минералы пустой породы (например, кварц), в металлосодержащих минералах происходит более значительное поглощение энергии СВЧ-волн, чем во вторых минералах. Поэтому в СВЧ-поле рудные минералы нагреваются, а пустая порода в начале остается холодной. За счет этого на границах раздела фаз возникают сильные термомеханические напряжения, часто превышающие предел прочности и приводящие к образованию новых микро-

трещин и развитию уже существующих, формируются остаточные напряжения, которые обусловливают изменение структурного состояния. Разрушение идет по границам раздела минералов, по местам включений, спайкам кристаллов и другим дефектам. Наряду с этим идет процесс испарения влаги, релаксация остаточных напряжений, происходят полиморфные и фазовые превращения, выгорание органических соединений. Эти процессы приводят к уменьшению прочности пород в несколько раз [1—3].

При исследовании эффективного разупрочнения и уменьшения энергоемкости измельчения минералов крепких руд при СВЧ воздействии необходимо определять оптимальные параметры последнего: время воздействия СВЧ волн и температуру нагрева породы. Большинство ученых, изучавших процессы воздействия СВЧ излучения на горные породы, определяли температуру образцов расчетным методом по их теплоемкости, а экспериментальные результаты зависимости удельной объемной энергоемкости измельчения от оптимального времени воздействия излучения показывали, что последнее колеблется для различных пород в диапазоне от 3 до 5 мин [4—6]. Проведенные авторами статьи экспериментальные исследования оптимального времени воздействия СВЧ излучения на пиритосодержащие руды в широком диапазоне изменения содержания рудного минерала показали согласие с ранее проведенными экспериментами и позволили установить, что оптимальное время воздействия для указанного типа руд составляет 3 мин. При таком времени воздействия в образце наступает температурная стабилизация (время СВЧ воздействия возрастает, температура образца практически не меняется) [7].

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований структурных изменений пиритосодержащих руд при определенном оптимальном времени СВЧ-воздействия.

Описание экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований были отобраны восемь образцов пиритосодержащей руды с содержанием FeS_2 от 0,3 до 68,8%. Для каждого образца в исходном состоянии производилась съемка рентгенограмм на компьютеризированном аппарате ADP2-01 с использованием Fe Kα излучения при следующих параметрах: длина волны — 1,93597 (Ang.); число точек для сглаживания — 7; степень полинома фона — 4; порог чувствительности — 3,0 sigma; ширина основания пиков — 3,0 ПШПВ; ПШПВ, град. — 0,120; асимметрия — 1,00; фактор формы — 0,60.

На рентгенограммах были выделены наиболее информативные пики, соответствующие плоскостям $\{hkl\}_1 = 200$ и $\{hkl\}_2 = 311$ для пирита и $\{hkl\}_1 = 101$ и $\{hkl\}_2 = 112$ для кварца. Затем по известной методике, изложенной в [8], рассчитывались:

- размер блоков мозаики *D* (размер бездефектных — за исключением точечных дефектов — участков кристалла, окруженных малоугловыми границами);
- плотность дислокаций $\rho_{гр}$, находящихся на границе блоков и обуславливающих их разориентировку;
- плотность дислокаций внутри блоков $\rho_{вн}$;
- максимальная величина локальных напряжений на границе блока $\sigma_{гр}$;
- средняя величина локальных напряжений внутри блока $\sigma_{вн}$.

Затем каждый из образцов по отдельности помещался в СВЧ-печь (паспортная мощность 1300 Вт, частота излучения 2450 МГц) и подвергался нагреву в течение 3 мин. Температура фиксировалась высокотемпературным ИК-пирометром DT-8868H (диапазон измеряе-

Таблица 1

Результаты расчетов структурных изменений в зернах пирита ({hkl} = 200)
Resultant calculated structural change in pyrite grains ({hkl} = 200)

Номер образца	T, °C	$\bar{D}$	$\bar{\rho}_{гр}$	$\bar{\rho}_{вн}$	$\bar{\sigma}_{гр}$	$\bar{\sigma}_{вн}$
КЦ006 № 1	156,0	0,67	2,25	3,22	1,75	1,22
КЦ059 № 4	116,3	1,23	0,67	0,61	0,78	0,86
КЦ059 № 3	114,9	1,48	0,46	0,65	0,79	0,56
КЦ061 № 4	69,1	2,31	0,19	0,24	0,48	0,38

мых температур от –50 °С до +1850 °С, оптическое разрешение 50:1, погрешность ±1,5%, разрешение 0,1 °С, двойной лазерный указатель) в момент окончания нагрева при открытой дверце печи, причем ИК-пирометр был зафиксирован на подставке таким образом, чтобы пятно лучеуказателя попадало в фиксированную область неподвижного образца. Испытания проводились в режиме фиксации максимума измеряемой температуры при коэффициенте излучения 0,95. В качестве демпфера для защиты от пробоя образцов с высоким содержанием пирита во всех испытаниях в печь устанавливалась кювета с водой емкостью 500 мл, и измерения прекращались в момент закипания воды [9].

После проведения СВЧ-воздействия на образцы с них снова снимались рентгенограммы, по которым снова рассчитывались все вышеперечисленные структурные параметры.

В качестве оценки структурных изменений в зернах пирита и кварца после СВЧ-воздействия были приняты величины относительных изменений (величина после воздействия, отнесенная к величине до воздействия) размеров блоков мозаики $\bar{D}$, плотности дислокаций $\bar{\rho}_{гр}$, находящихся на границе блоков и обуславливающих их разориентировку, плотности дислокаций внутри блоков $\bar{\rho}_{вн}$, максимальной величины локальных напряжений на границе блока $\bar{\sigma}_{гр}$; средней величины локальных напряжений внутри блока $\bar{\sigma}_{вн}$.

Обсуждение результатов

Результаты расчетов структурных изменений в зернах пирита подверглись статистическому цензурированию и представлены в табл. 1 на рис. 1—5.

Результаты расчетов структурных изменений в зернах кварца сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов структурных изменений в зернах пирита ({hkl} = 101)
Resultant calculated structural change in pyrite grains ({hkl} = 101

Номер образца	T, °C	$\bar{D}$	$\bar{\rho}_{гр}$	$\bar{\rho}_{вн}$	$\bar{\sigma}_{гр}$	$\bar{\sigma}_{вн}$
КЦ006 № 1	156,0	0,67	2,25	3,22	1,75	1,22
КЦ006 № 2	147,1	0,43	5,52	3,89	2,03	2,88
КЦ006 № 1	116,3	0,67	2,25	3,22	1,75	1,22
КЦ059 № 3	114,9	1,48	0,46	0,65	0,79	0,56
КЦ006 № 2	114,2	0,43	5,52	3,89	2,03	2,88
КЦ059 № 4	92,1	1,23	0,67	0,61	0,78	0,86
КЦ059 № 5	80,3	9,19	0,01	0,01	0,10	0,12
КЦ061 № 2	69,1	1,08	0,86	0,85	0,93	0,93

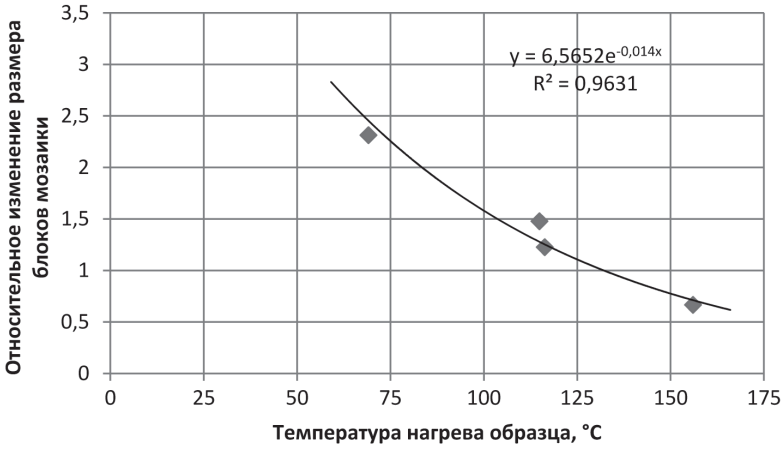

Рис. 1. Зависимость относительного изменения блоков мозаики зерен пирита от температуры нагрева образца (время воздействия СВЧ-поля частотой 2,45 ГГц — 3 мин)

Fig. 1. Relative variation in mosaic of pyrite grains versus heating temperature (treatment time of UHF field with frequency of 2.45 Hz is 3 min)

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что, по всей видимости, взаимосвязь структурных изменений с температурой нагрева образца не прослеживается. Иначе обстоит дело с зернами пирита, где взаимосвязь структурных изменений с температурой образца видна явно (см. табл. 1).

На рис. 1—5 представлены экспериментальные взаимосвязи относительного изменения структурных параметров зерен пирита (размеров блоков мозаики $\overline{D}$, плотности дислокаций $\overline{\rho}_{гр}$, находящихся на границе блоков и обуславливающих их разориентировку, плотности дислокаций внутри блоков $\overline{\rho}_{вн}$, максимальной величины локальных напряжений на границе блока $\overline{\sigma}_{гр}$; средней величины локальных напряжений внутри блока $\overline{\sigma}_{вн}$) от температуры нагрева образца, а также приведены предполагаемые линии тренда, дано их аналитическое выра-

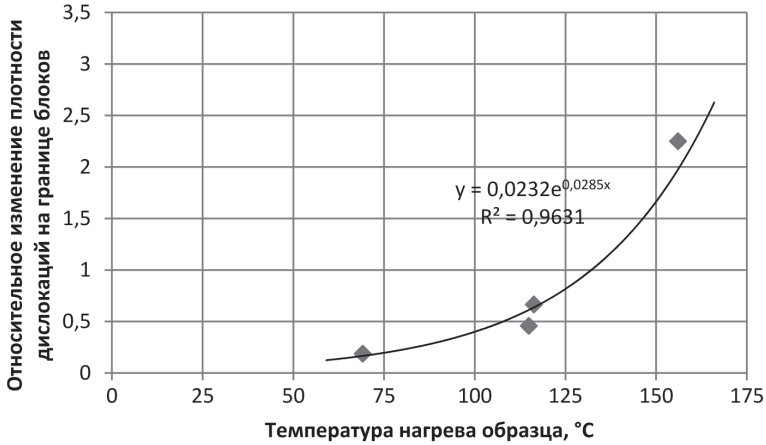

Рис. 2. Зависимость относительного изменения плотности дислокаций на границе зерен пирита от температуры нагрева образца (время воздействия СВЧ-поля частотой 2,45 ГГц — 3 мин)

Fig. 2. Relative variation in dislocation density at the boundaries of pyrite grains versus heating temperature

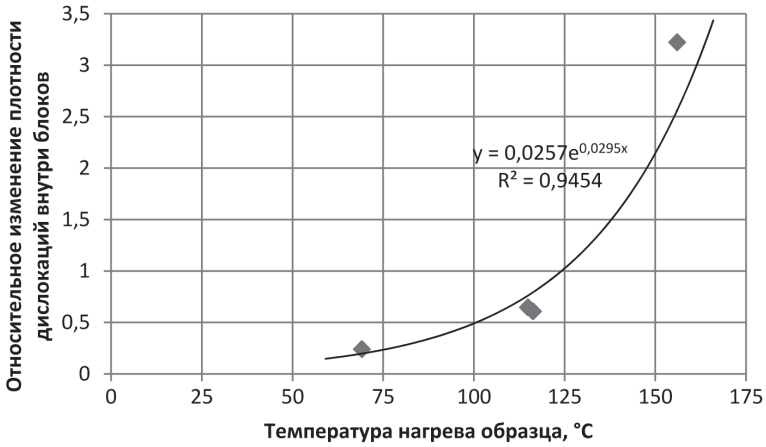

Рис. 3. Зависимость относительного изменения плотности дислокаций внутри зерен пирита от температуры нагрева образца (время воздействия СВЧ-поля частотой 2,45 ГГц — 3 мин)
Fig. 3. Relative variation in dislocation density inside pyrite grains versus heating temperature

жение и оценка степени достоверности. Из этих рисунков видно, что структурные изменения в зернах пирита наступают после достижения температуры образца 125—130 °С, причем с превышением этой температуры размер блоков мозаики уменьшается, а все остальные параметры возрастают.

Уменьшение с ростом температуры размеров блоков мозаики в зернах пирита свидетельствует о том, что, с одной стороны, повышается плотность дислокаций, а, с другой стороны, упругие искажения кристаллической решетки, порождаемые этим процессом, создают многочисленные препятствия движению дислокаций. Все эти процессы структурных изменений в совокупности приводят к повышению прочности зерен пирита при СВЧ-воздействии.

С другой стороны, рост средних локальных напряжений в зернах пирита

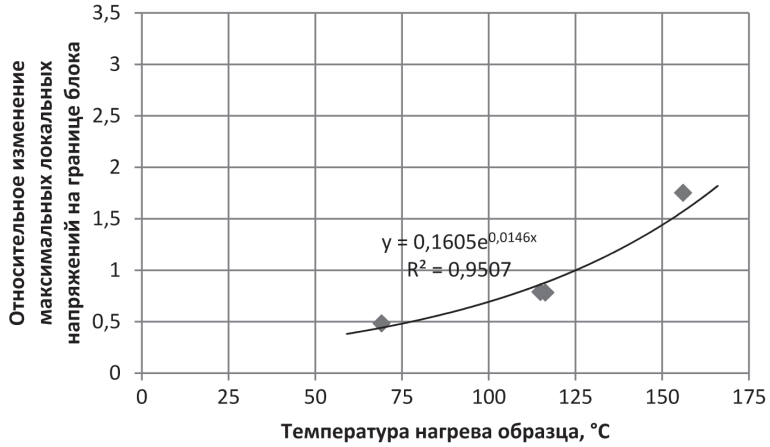

Рис. 4. Зависимость относительного изменения максимальных локальных напряжений на границе зерен пирита от температуры нагрева образца (время воздействия СВЧ-поля частотой 2,45 ГГц — 3 мин)
Fig. 4. Relative variation in maximum local stresses at the boundaries of pyrite grains versus heating temperature

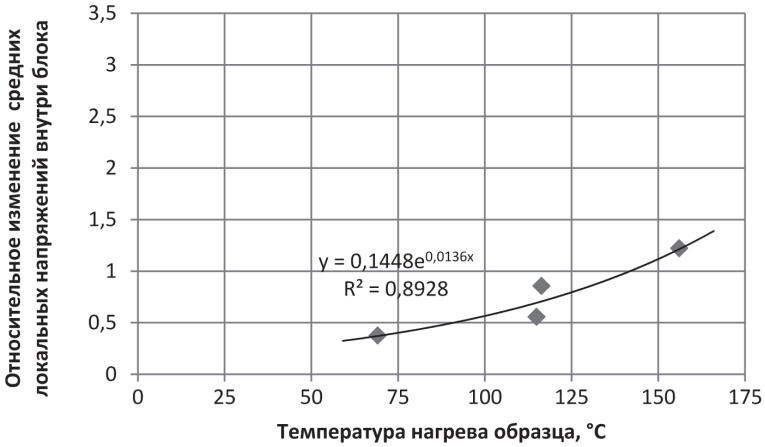

Рис. 5. Зависимость относительного изменения средних локальных напряжений внутри зерен пирита от температуры нагрева образца (время воздействия СВЧ-поля частотой 2,45 ГГц — 3 мин)

Fig. 5. Relative variation in average local stresses inside pyrite grains versus heating temperature

незначителен (см. рис. 5), в то время как изменение максимальных локальных напряжений на границе зерен пирита с ростом температуры происходит достаточно интенсивно (рис. 4). Также весьма интенсивно растет плотность дислокаций на границе зерен пирита, что приводит к уменьшению прочности пиритосодержащей руды. Эти результаты подтверждаются исследованиями [10—13].

На рис. 6 приведены микрофотографии образца КЦ059 № 3 до СВЧ-воздействия и после при увеличении х250 с нанесенной миллиметровой сеткой. Из фотографий видно, что даже при столь незначительном нагреве (на 115 °С) межзеренные границы на микрофотографии после СВЧ-воздействия прорисованы четче, чем до воздействия, что косвенно подтверждает вышеприведенные экспериментальные факты.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования структурных изменений в зернах основных рудообразующих минералов пиритосодержащей руды позволили в качестве одного из возможных механизмов структурных преобразований в зернах пирита с ростом температуры при СВЧ-воздействии можно предположить следующее. При превышении температуры 125—130 °С при воздействии на пиритосодержащие руды СВЧ-полями в зернах пирита наблюдаются структурные изменения, обусловленные уменьшением размеров блоков мозаики, что приводит к повышению прочности зерен пирита. В основе этого явления лежат два механизма: с одной стороны, повышается плотность дислокаций, а, с другой стороны, упругие искажения кристаллической решетки, порождаемые этим процессом, создают многочисленные препятствия движению дислокаций.

Наряду с этим, наблюдается интенсивный рост максимальных локальных напряжений и значительное повышение плотности дислокаций на границе зерен пирита. Таким образом, отмеченная в статье температурная стабилизация, происходящая в пиритосодержащей руде в диапазоне времени воздействия СВЧ-волн около 3 мин, может быть объяснена именно вышеописанным механизмом перераспределения дислокаций и их преимущественным накоплением на гра-

а) б)

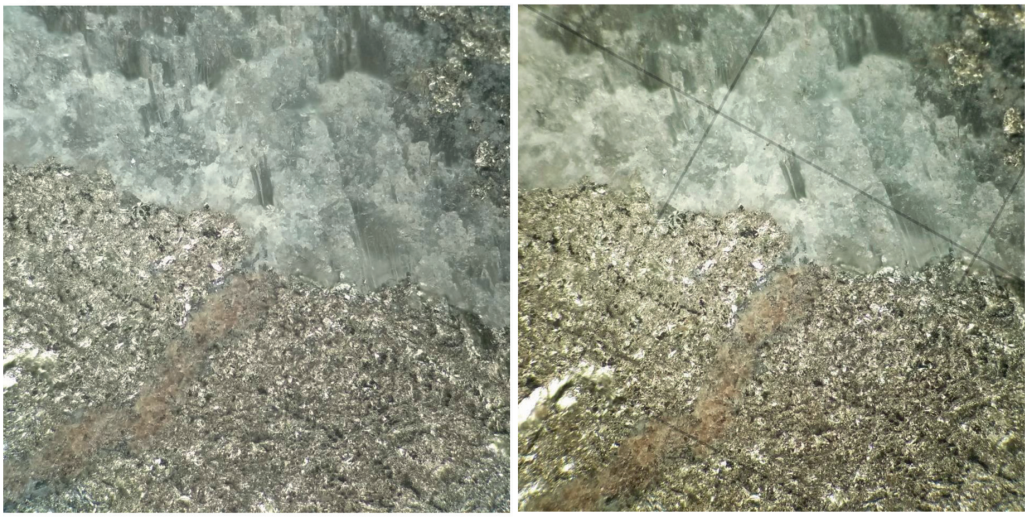

Рис. 6. Микрофотографии образца КЦ059 № 3 до СВЧ-воздействия (а) и после (б). На нижней микрофотографии нанесена миллиметровая сетка

Fig. 6. Micrographs of sample KTS059 No. 3 (a) before and (b) after UHF treatment. The bottom micrograph has millimeter paper pattern

нице зерен. Это явление создает предпосылки для увеличения степени извлечения пирита из пиритосодержащей руды за счет одновременного ослабления границ зерен пирита и повышения прочности самих зерен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Максименко А. Г.*, *Уваров А. П.* Исследование комбинированного СВЧ-механического воздействия на горные породы / Применение СВЧ энергии в технологических процессах и научных исследованиях. Всесоюзная VI научно практическая конференция. — Саратов, 1991. — С. 71—73.

2. *Петров В. М.* Новые применения радиоэлектроники: разупрочнение горных пород мощным электромагнитным полем СВЧ // Информост. Радиоэлектроника и Телекоммуникации. — 2002. — № 22. — С. 63—72.

3. *Yatsenko S. N.*, *Yatsenko M. A.*, *Doroshev Y. S.* Promising development of new methods for destruction of rocks // European science, 2016, no 6(16), pp. 13—17.

4. *Султаналиева Р. М.* Определение удельной энергоемкости и оптимальной температуры крепких руд после воздействия СВЧ волн // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 11. — С. 148—152.

5. *Тажибаев К. Т.*, *Султаналиева Р. М.* Энергосберегающий способ измельчения крепких руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 12. — С. 76—82.

6. *Тажибаев К. Т.*, *Султаналиева Р. М.* Результаты исследования закономерности изменения температуры руд от продолжительности времени воздействия на них СВЧ-волнами // Вестник КРСУ. — 2015. — Т. 15. — № 5. — С. 135—140.

7. *Babich A. V.*, *Vinnikov V. A.* On the Determination of the Optimum Time of Microwave Exposure to Pyrite-Containing Ore // Journal of Mining and Geological Sciences, 2018, Vol. 61, Part II. pp. 24—27.

8. *Зильбершмидт М. Г.*, *Заворыкина Т. К.* Методы анализа структурного состояния горных пород. Ч.1. — М.: Изд-во МГИ, 1989. — с. 88.

9. *Martin Chaplin*. Water and Microwaves / Water Structure and Science. [Электронный ресурс], http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html (дата обращения 12.05.2019)

10. *Тажибаев К. Т.*, *Султаналиева Р. М.*, *Акматалиева М. С.*, *Тажибаев Д. К.* Способ подготовки к обогащению высокопрочных руд // Известия КГТУ им. И.Раззакова. — 2014. — № 33. — С. 336—340.

11. *Like Q., Jun D.* Analysis on the growth of different shapes of mineral microcracks in microwave field // Frattura ed Integrità Strutturale, 2016, no 37, pp. 342—351.
12. *Kingman S.W.*, Vorster W., *Rowson N.A.*, The influence of mineralogy on microwave assisted grinding // Minerals engineering, 2015, no 22 (1), pp. 160—163.
13. *Like Q., Jun D.* Meso-mechanics Simulation Analysis of Microwave-assisted Mineral Liberation // Frattura ed Integrita Strutturale, 2015, no 34 (34), pp. 543—553. ГИАБ

REFERENCES

1. Maksimenko A.G., Uvarov A.P. Combination UHF–mechanical effect on rocks. *Primenenie SVCH energii v tekhnologicheskikh protsessakh i nauchnykh issledovaniyakh. Vsesoyuznaya VI nauchno prakticheskaya konferentsiya*. Saratov, 1991, pp. 71—73.
2. Petrov V.M. New radionics applications: Softening of rocks by high-intensity UHF electromagnetic field. *Informost. Radioelektronika i Telekommunikatsii*. 2002, no 22, pp. 63—72. [In Russ].
3. Yatsenko S.N., Yatsenko M.A., Doroshev Y.S. Promising development of new methods for destruction of rocks. *European science*, 2016, no 6(16), pp. 13—17.
4. Sultanalieva R.M. Specific energy content and optimal temperature of hard ore after treatment by UHF waves. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 11, pp. 148—152. [In Russ].
5. Tazhibaev K.T., Sultanalieva R.M. Energy-saving method of hard ore milling. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 12, pp. 76—82. [In Russ].
6. Tazhibaev K.T., Sultanalieva R.M. Research results on regularities of change in ore temperature versus time of treatment by UHF waves. Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo slavyanskogo universiteta. 2015. Vol. 15, no 5, pp. 135—140. [In Russ].
7. Babich A.V., Vinnikov V.A. On the Determination of the Optimum Time of Microwave Exposure to Pyrite-Containing Ore. *Journal of Mining and Geological Sciences*, 2018, Vol. 61, Part II. pp. 24—27.
8. Zil'bershmidt M.G., Zavorykina T.K. *Metody analiza strukturnogo sostoyaniya gornykh porod* [Analysis techniques for structural condition of rocks], Part 1, Moscow, Izd-vo MGI, 1989. pp. 88.
9. Martin Chaplin. Water and Microwaves. *Water Structure and Science*, http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html (accessed 12.05.2019).
10. Tazhibaev K.T., Sultanalieva P.M., Akmatalieva M.S., Tazhibaev D.K. Method of high-strength ore preparation for processing. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova*. 2014, no 33, pp. 336—340. [In Russ].
11. Like Q., Jun D. Analysis on the growth of different shapes of mineral microcracks in microwave field. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2016, no 37, pp. 342—351.
12. Kingman S.W., Vorster W., Rowson N.A., The influence of mineralogy on microwave assisted grinding. *Minerals engineering*, 2015, no 22 (1), pp. 160—163.
13. Like Q., Jun D. Meso-mechanics Simulation Analysis of Microwave-assisted Mineral Liberation. *Frattura ed Integrita Strutturale*, 2015, no 34 (34), pp. 543—553.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бабич Артур Владимирович[1] — аспирант, e-mail: a.v.babich1992@yandex.ru,
Винников Владимир Александрович[1] — д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой,
e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com,
[1] НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Винников В.А., e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Babich[1], Graduate Student, e-mail: a.v.babich1992@yandex.ru,
V.A. Vinnikov[1], Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Head of Chair,
e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com,
[1] National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: V.A. Vinnikov, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com.