

МАГНИТОАКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ МАГНЕТИТОВ**В.С. Иванченко, И.И. Глухих, Л.Г. Строкина, А.П. Хейнсон***Институт геофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия*

Рассматриваются данные по изучению параметров эффекта магнитоакустической эмиссии (МАЭ) на магнетитах из магнетитовых руд месторождений Урала и Западной Сибири. Показано, что различия в сигналах связаны с разнообразными типами доменной структуры образцов, жесткость закрепления которой определяется условиями образования магнетитов и последующим воздействием наложенных физико-химических процессов. По полевым параметрам проведено разделение исследованных магнетитов на три типа в зависимости от области магнитных полей, в которых наблюдается МАЭ. Эти параметры могут быть использованы в качестве типоморфных особенностей магнетитов различного генезиса.

Магнитоакустическая эмиссия, движение доменных стенок, железорудные месторождения, генезис, магнетит, поле отрыва.

MAGNETOACOUSTIC EMISSION OF MAGNETITES**V.S. Ivanchenko, I.I. Glukhikh, L.G. Strokina, and A.P. Kheinson**

We consider the parameters of the magnetoacoustic-emission (MAE) effect in magnetites from the ores of the Urals and West Siberia. It has been shown that the differences in signals are related to various types of the domain structures of samples, whose fixity is determined by the formation conditions of magnetite and the effect of superposed physicochemical processes. On the basis of the field parameters, the magnetites have been divided into three types depending on the area of magnetic fields with MAE. These parameters can serve as the typomorphic features of magnetites of different genesis.

Magnetoacoustic emission, movement of domain walls, iron deposits, genesis, magnetite, detachment field

ВВЕДЕНИЕ

Природные ферримагнетики, кристаллизуясь в довольно значительном диапазоне термодинамических условий, в своем химическом составе и магнитной текстуре несут информацию об этих условиях, что дает возможность использовать результаты их исследований для решения теоретических вопросов генезиса руд, образовавшихся одновременно с ними. Выделение различных типов генераций ферримагнетиков позволяет судить о последовательности геологических и наложенных физико-химических процессов. Знание генезиса руд и как следствие особенностей магнитных свойств магнетита имеет значительные перспективы для управления технологическими процессами прямого восстановления железных руд в металлургическом производстве (Костомукша, Новый Оскол, Абаканское месторождение и др.).

Одним из новых физических процессов для петромагнитных исследований является изучение магнитоакустической эмиссии (МАЭ) магнетитов.

Явление магнитоакустической эмиссии, связанное с возникновением акустических колебаний в образце при перемагничивании его постоянным полем, было открыто в 1924 г. Хипсом [Heaps, 1941]. Этот эффект в 1974 г. был детально исследован А. Лордом [Lord et al., 1974]. Позднее проведен целый ряд экспериментов по возможности использования эффекта магнитоакустической эмиссии для неразрушающего контроля [Kusanagi et al., 1979; Кумейшин и др., 1980; Ломаев и др., 1981; Малышев и др., 1981; Ono, Shibata, 1981; Shibata, Ono, 1981; Burkhard et al., 1982]. Выяснилась его чувствительность к изменениям структурного и напряженно-деформированного состояния ферромагнитного материала. В отличие от электромагнитного эффекта Баркгаузена, позволяющего исследовать только поверхность образца, магнитоакустическая эмиссия несет информацию о перестройке доменной структуры со всего перемагничиваемого объема.

Выполненные измерения МАЭ магнетитовых руд ряда магнетитовых месторождений и рудопроявлений [Глухих и др., 2007; Иванченко, Глухих, 2009] позволили провести качественную корреляцию особенностей формы кривой МАЭ с отличиями геологических условий образования этих магнетитовых руд. Однако вопрос о связи особенностей магнитной структуры магнетитов и регистрируемыми кривыми МАЭ остается открытым. В настоящей работе проанализированы измерения МАЭ магнетитов, образовавшихся в различных геологических условиях.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

При анализе аппаратуры, широко применяемой в неразрушающих методах контроля металлических изделий с помощью МАЭ [Кумейшин и др., 1980; Малышев и др., 1981], было установлено, что наиболее эффективным является регистрация непрерывной кривой МАЭ при низких частотах перемагничивания. На основе этого опыта в Институте геофизики УрО РАН [Иванченко, Глухих, 2009] создан аппаратный комплекс и методика исследования МАЭ природных ферромагнетиков.

Аппаратурный комплекс собран из стандартных приборов. Он состоит из устройства перемагничивания и устройства регистрации параметров МАЭ. В устройство перемагничивания входят: генератор сигналов специальной формы, усилитель мощности постоянного тока, электромагнитная система от преамплитуды для исследования магнитных свойств трансформаторных сталей.

Сигнал генератора треугольной формы устанавливаемой частоты и амплитуды усиливается и подается на электромагнит, в рабочем зазоре которого может быть создано магнитное поле частотой от 0.001 до 10 Гц с амплитудой до 300 кА/м.

Регистрация параметров МАЭ осуществляется пьезоэлектрическим акустическим преобразователем, включенным на вход селективного нановольтметра. Нановольтметр позволяет проводить спектральный анализ сигналов в диапазоне от 0 до 230 кГц.

Регистрация сигналов осуществляется двухкоординатным самописцем, на ось абсцисс которого вводится напряжение, пропорциональное воздействующему магнитному полю, а по оси ординат записывается сигнал с выхода нановольтметра, пропорциональный амплитуде МАЭ.

Методика исследования образцов была организована следующим образом.

1. Из отобранных геологических образцов вырезались стандартные кубики с ребром 24 мм. Допустимая шероховатость граней от 40 до 2.5 мкм и радиус кривизны не менее 100 мм.

2. Кубический образец помещали в зазор электромагнита. Для предотвращения акустического контакта образца с сердечником электромагнита на последний был наклеен тонкий слой резины. На образец с помощью прижимного устройства крепился пьезоэлектрический акустический преобразователь.

3. На грань образца, в месте контакта с пьезоэлектрическим акустическим преобразователем, наносилась среда с низким коэффициентом поглощения акустических волн. По проведенным экспериментам, наиболее эффективной смазкой для рыхлых образцов является салол, для плотных — трансформаторное масло.

4. При исследованиях магнитоакустической эмиссии на кристалле магнетита определены наиболее оптимальные частота перемагничивания первичного магнитного поля (0.1 Гц) и частота регистрации (130—140 кГц).

5. В качестве образца сравнения (эталонный образец) был использован кубик из сплошной магнетитовой руды.

6. Диапазон магнитного поля проявления МАЭ определяли по точкам пересечения касательных к кривым МАЭ с горизонтальной осью. В случае явно выраженной асимметрии левой части кривой МАЭ в этой части кривой проводили вторую касательную и определяли вторую точку пересечения с горизонтальной осью.

ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ

Измеренные образцы. *Монокристалл магнетита из хлоритовых сланцев* (Средний Урал, Ольховское рудопроявление). Образец представляет собой практически правильный октаэдр с размером ребра 23 мм. Поверхность граней однородна с небольшим количеством трещинок, по которым развивается гематит. Микротвердость по граням кристалла магнетита меняется от 6.21 до 6.95 кН/мм², что соответствует стехиометрическому магнетиту.

Поликристаллический магнетит с Абаканского месторождения. Образец представлен мелкозернистым магнетитом, размер зерен от 0.03 до 0.7 мм, структура аллотриоморфно-зернистая, содержание магнетита до 90 %, отмечается содержание (до 10 %) зерен гематита.

Магнетитовые руды Таштагольского месторождения. Образец ПК 11/-0,5 представлен магнетитовой тонкозернистой (скрытокристаллической) рудой с содержанием магнетита 80 %, наблюдается сферолитовая структура, размер сферул 4.5—7 мм. Образец ПК 15 — магнетитовая тонкозернистая руда, отмечается присутствие сферул. Содержание магнетита 85 %.

Магнетитовая руда Магнитогорского месторождения (карьер Дальний). Содержание магнетита > 82 %, удельная намагниченность насыщения 85.5 А · м²/кг, размер зерен от 0.01 до 0.5 мм, микротвердость от 5.25 до 7.29 кН/мм², зерна аллотриоморфные (обр. М-45).

Магнетитовые руды Естунинского месторождения. Образец 8601/780,6 на 80 % состоит из магнетита гипидиоморфно-зернистой структуры. Изредка наблюдается скелетная структура и структура

замещения магнетита пиритом. Для обр. 8420/1189,5 с содержанием магнетита 90 % характерна аллотриоморфно-зернистая структура, размер зерна до 1 мм.

Магнетитовые руды Западно-Песчанской залежи Песчанского месторождения. Образец ЗПЗ-8 представлен аллотриоморфным магнетитом (90 %) с выделенным по трещинкам пиритом и ассоциируемым с ним мелкими зернами халькопирита. Образец ЗПЗ-21 на 90 % сложен скрытокристаллическим магнетитом. Магнетит импрессионован мелкими вкраплениями халькопирита, местами отороченного пиритом. Доля сульфидной группы не более 1 %.

Магнетитовые руды Южной залежи Песчанского месторождения. Образец ЮЗ-2 нацело (до 95 %) представлен магнетитом с редкими зернами халькопирита размером до 0.3 мм. В обр. ЮЗ-12 — 80 % магнетита.

Магнетитовые руды Новопесчанского участка Песчанского месторождения. Образцы НПУ-12 и НПУ-15 на 95 % представлены магнетитом, имеются редчайшие вкрапленники пирита размером в среднем 0.2 мм. В обр. НПУ-12 выделения магнетита неправильной, заливообразной формы, в обр. НПУ-15 наблюдается гипидиоморфная структура зерен магнетита с частичным сохранением кристаллографических очертаний. Размер зерен в образцах в среднем 0.7 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Кривые МАЭ приведены на рис. 1, а параметры МАЭ — в таблице. В качестве параметров МАЭ использованы: значения намагничивающего поля, при котором наблюдаются максимумы кривой; амплитуда этих максимумов, диапазон намагничивающего поля, в котором наблюдается МАЭ; значение магнитного поля, соответствующее половине диапазона магнитного поля проявления МАЭ.

Диапазон магнитного поля проявления МАЭ определяли по точкам пересечения касательных к кривым МАЭ с горизонтальной осью. В случае явно выраженной асимметрии левой части кривой МАЭ проводили вторую касательную и определяли вторую точку пересечения с горизонтальной осью. В настоящей работе вопрос о величине (амплитуда максимумов и минимумов) МАЭ не обсуждается.

Если за основу классификации магнетитов по полевым параметрам МАЭ принять медианное значение диапазона магнитных полей проявления МАЭ, можно выделить три типа:

первый — значения медиан в диапазоне от +2 до +9.5 кА/м;

второй — значения медиан в диапазоне от +20.5 до +29 кА/м;

третий — значения медиан в диапазоне от +33 до +37.5 кА/м.

Для *первого типа* магнетитов максимумы кривой МАЭ находятся в интервале магнитных полей $-2.9...+9.6$ кА/м. МАЭ наблюдается в магнитных полях от -58 до $+70$ кА/м. Представлен монокристаллом магнетита и магнетитами Естюнинского месторождения.

Для *второго типа* магнетитов первые максимумы отмечаются в интервале магнитных полей $+10...+15$ кА/м, вторые максимумы — в интервале $+20...+30$ кА/м. Диапазон проявления МАЭ — от 40 до 60 кА/м в интервале магнитных полей $-7...+58$ кА/м. Этот тип представлен магнетитами Таштагольского, Магнитогорского месторождений, Западно-Песчанской залежи и Новопесчанского управления Песчанского месторождений. Сигнал МАЭ, формирующий левую асимметричную часть кривой, наблюдается в полях до -30 кА/м.

У *третьего типа* магнетитов первые максимумы на кривой МАЭ наблюдаются в магнитных полях $18—21$ кА/м, вторые максимумы — в магнитных полях $27—37$ кА/м. Диапазон магнитных полей проявления МАЭ от 55 до 82 кА/м — в интервале $-8...+74$ кА/м. На одном из образцов отмечается, кроме левой асимметрии в магнитных полях до -20 кА/м, уширение нижней части и в правой ветви кривой в магнитных полях до $+80$ кА/м. К этому типу относятся магнетиты Абаканского и Южной залежи Песчанского месторождений.

Наличие магнитных фаз (примесей) в изучаемых образцах оценивалось по результатам термомагнитного анализа.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Существуют два механизма, отвечающих за МАЭ: смещение на 180° и 90° стенок (МАЭ 1-го рода) и вращение вектора намагниченности домена (МАЭ 2-го рода) [Kwan et al., 1984]. Первый механизм работает в средних и слабых магнитных полях, второй — в сильных. Причем интенсивность МАЭ в средних и слабых полях коррелирует с магнитоотрицательной насыщением (эксперименты проводились на поликристаллических сплавах Fe-Ni). Для большинства материалов, применяемых в машиностроении и исследуемых с помощью МАЭ, характерно наличие двух максимумов на кривой [Deimel et al., 1983]. Наличие этих максимумов связано с перестройкой доменной структуры на разных уровнях индукции. Первый максимум связан с процессами смещения доменных стенок, а второй — с процессами зарождения и исчезновения доменов. Минимум между ними примерно соответствует коэрцитивной силе [Bertotti et al., 1981].

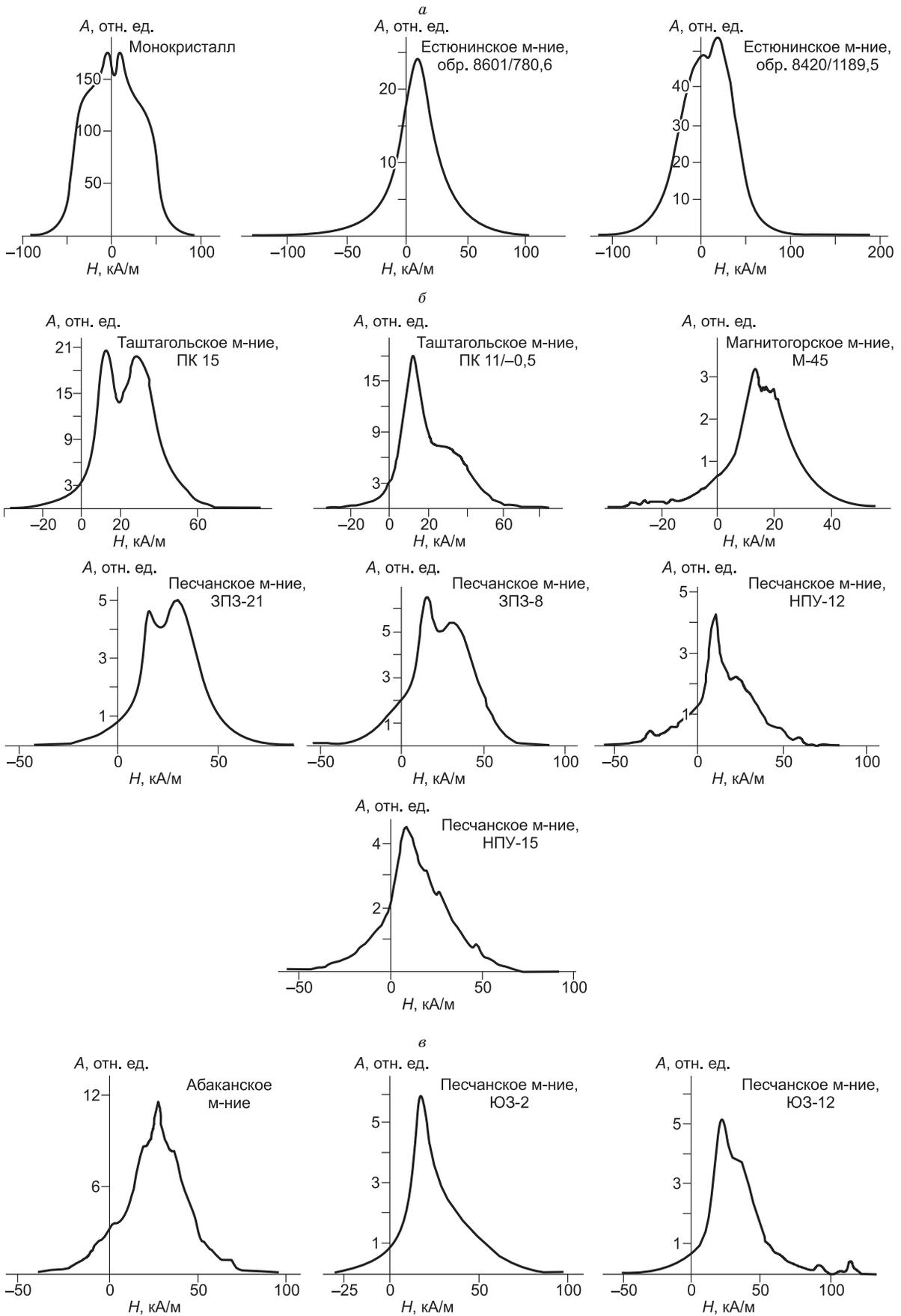


Рис. 1. Первый тип (а), второй тип (б) и третий тип (в) магнетитов по параметрам медианного значения диапазона магнитных полей проявления МАЭ.

Параметры магнитоакустической эмиссии магнетитов

№ п/п	Месторождение, номер образца	Интервал магнитного поля, в котором отмечается МАЭ, кА/м	Диапазон магнитного поля МАЭ, кА/м	Медианное значение диапазона, кА/м	Значение магнитного поля в экстремальных точках кривой МАЭ, кА/м		
					первый максимум	минимум	второй максимум
1	Ольховское, монокристалл	-55...+59	114	+2	-2.9	+2.2	+8.8
2	Естюнинское, 8601/780,6	-18...+37	55	+9.5	+9.6	—	—
3	Естюнинское, 8420/1189,5	-58...+70	128	+6	0.0	+3.2	+14.4
4	Таштагольское, ПК 15	-19*/+2...+54	52	+28	+12.8	+19.2	+28.8
5	Таштагольское, ПК 11/-0,5	-11*/0...+58	58	+29	+12.8	Неявно	+29.6
6	Магнитогорское, М-45	-13*/+1...+40	39	+20.5	+13	»	+20
7	Песчанское, ЗПЗ-8	-22*/+1...+52	51	+26.5	+13	+20.2	+25.9
8	Песчанское, ЗПЗ-21	-18*/+5...+52	47	+28.5	+14.8	+21.3	+29.5
9	Песчанское, НПУ-12	-26*/0...+49	49	+24.5	+10.0	Неявно	+24.6
10	Песчанское, НПУ-15	-30*/-7...+51	58	+22	+9.8	»	Неявно
11	Абаканское	-8...+74	82	+33	+18.8	»	+27.5
12	Песчанское, ЮЗ-2	-18*/+5...+70	65	+37.5	+18.4	»	Неявно
13	Песчанское, ЮЗ-12	-20*/+8...+60/+80**	52	+34	+20.8	»	+36.7

* Значение магнитного поля по касательной к асимметричной левой части кривой МАЭ.

** Значение магнитного поля по касательной к асимметричной правой части кривой МАЭ.

Наблюдение доменной структуры на отожженном монокристалле магнетита из хлоритовых сланцев Шабровского месторождения выполнено А.А. Богдановым и А.Я. Власовым [Богданов, Власов, 1965]. В этой работе показано, что при намагничивании по оси легкого намагничивания в наблюдаемой на поверхности (112) доменной структуре со 180° границами происходит смещение границ, в результате которого исчезают домены, намагниченные неблагоприятно по отношению к приложенному полю (22—50 кА/м). Замыкающие домены при этом изменяются незначительно и сохраняются до полей, соответствующих процессу вращения. Полностью доменная структура исчезает в полях порядка 88 кА/м. На поверхности (110) наблюдается аналогичная картина, когда вектор намагниченности домена направлен по одной из осей [111].

Из сопоставления результатов измерений МАЭ монокристалла магнетита (рис. 2) и вышеприведенных данных работы [Богданов, Власов, 1965] видно, что диапазон полей, в которых проявляется измеренная МАЭ, полностью соответствует установленному диапазону области полей, в которых происходит процесс смещения доменных границ. При намагничивании в области вращения векторов МАЭ отсутствует, т. е. в соответствии с классификацией по работе [Kwan et al., 1984] в монокристалле магнетита при предложенной методике измерений наблюдается МАЭ первого рода. Уширение кривой МАЭ в области полей 35—55 кА/м при намагничивании по направлениям [110] и [100] обусловлено вовлечением в процесс смещения на 109° и 71° , а также на 180° , более жестко закрепленных.

При измерениях МАЭ на частном цикле перемагничивания (рис. 3) отмечается снижение амплитуды МАЭ и уменьшение величины намагничивающего поля максимума сигнала МАЭ при уменьшении амплитуды намагничивающего поля.

Результаты измерения МАЭ на частных циклах при смещении по кривой намагничивания образца, приведенные на рис. 4, показывают и уменьшение сигнала МАЭ, и то, что область возникновения МАЭ находится в пределах того же диапазона магнитного поля, что и при несмещенном намагничивающем

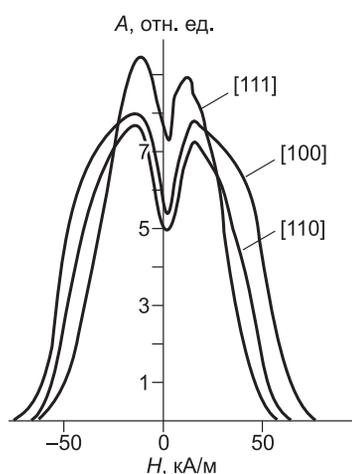


Рис. 2. Экспериментальная зависимость интенсивности МАЭ по различным плоскостям монокристалла [Глухих, Иванченко, 1998].

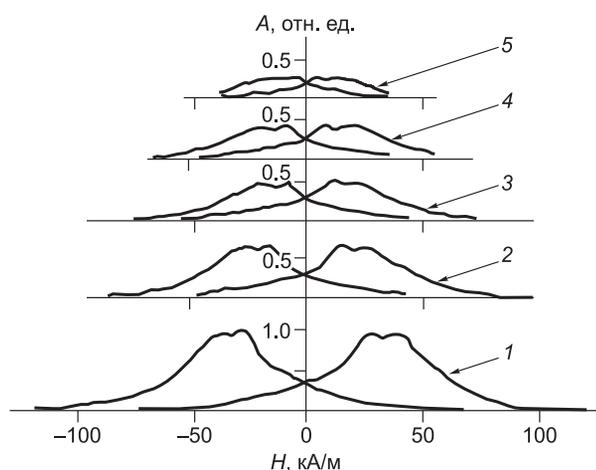


Рис. 3. МАЭ на частных циклах (размагниченное состояние):

1 — 200, 2 — 100, 3 — 75, 4 — 50, 5 — 30 кА/м.

поле. Следовательно, правилен вывод о том, что МАЭ магнетита возникает только при движении доменных границ (в первую очередь на 180°).

Таким образом, МАЭ магнетитов вызывается движущимися доменными границами, для смещения которых достаточна величина приложенного переменного магнитного поля при данном намагниченном состоянии образца. При намагничивании образца переменным магнитным полем с амплитудой, обеспечивающей достижение намагниченности насыщения, сигнал МАЭ обусловлен движением всех типов границ.

Все исследованные магнетиты имеют одну магнитную фазу с температурой Кюри $578\text{--}585^\circ\text{C}$, что свидетельствует о составе, близком к стехиометрическому, поэтому формирование доменной структуры, т. е. объем и типы доменных границ, будет определяться степенью раскристаллизованности зерен магнетита, их размером и наличием внутренних неоднородностей, обусловленных внутренними напряжениями и дефектами.

Детальные исследования, выполненные в работах [Горкунов, Драгошанский, 1999; Горкунов и др., 1999а,б,в, 2000], показывают, что:

1. Основным препятствием для движения доменных границ являются границы дефектов, к которым относятся локальные дефекты, границы между зернами, дефекты кристаллической структуры, зоны неоднородностей внутренних напряжений и т. д. Переход 180° границы через такой дефект сопровождается перестройкой доменной структуры около дефекта и приводит к задержке смещения доменной границы. Интерпретация каждого отдельного факта смещения доменной границы как взаимодействия с определенным типом дефекта практически невозможна, поскольку измеренные данные дают информацию о кластерном перемагничивании отдельных участков ферромагнетика, в котором движутся как 180° -е, так и 90° -е границы, движение которых становится взаимосвязанным. Отрыв границы на этих дефектах происходит при более высоких магнитных полях.

2. Для поликристаллических образцов наблюдаемое различие измеряемой величины по различным направлениям перемагничивания может служить критерием текстурированности изучаемого образца (наличие наведенной магнитной анизотропии) из-за влияния кристаллографической анизотропии отдельных кристаллитов.

3. Наличие максимумов, разделенных критическими магнитными полями, свидетельствует об образовании при термической объемной обработке фаз, отличающихся структурой магнитных доменов и, следовательно, условиями движения доменных границ.

По-видимому, диапазон полей, в которых наблюдается МАЭ магнетитов, соответствует диапазону полей, где происходит движение доменных границ, а максимум соответствует наиболее характерному значению критического поля или поля отрыва для данного типа границ в образце, что хорошо согласуется с выводами работы [Burkhard et al., 1982].

В этом случае разложение кривой МАЭ на составляющие с одним максимумом будет соответствовать выделению определенных типов движущихся доменных границ, а величина магнитного поля максимума на кривой МАЭ — определять степень жесткости закрепления границы на неоднородности.

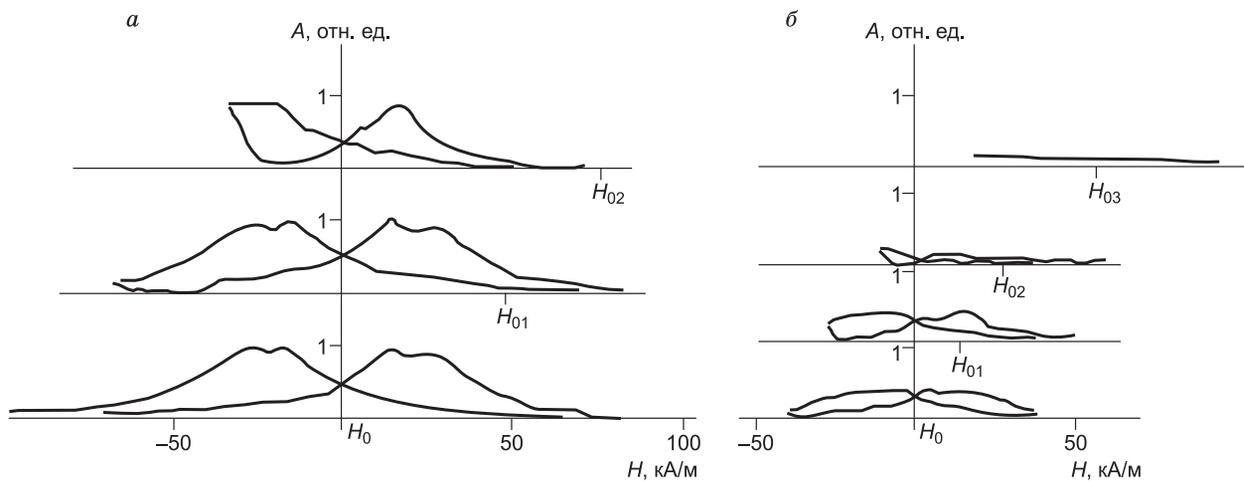


Рис. 4. МАЭ на частных циклах при различных подмагничивающих полях:

a — 100, *б* — 30 кА/м.

Крупные гнезда немагнитных включений, представленные кальцитом, эпидотом, полевыми шпатами, сульфидами, по-видимому, не оказывают определяющего влияния на формирование доменной структуры. Более важным является наличие немагнитных неоднородностей с размерами, сопоставимыми с размерами доменов и толщиной доменных границ. И именно их распределение скажется на задержке смещения границ.

Полевые параметры МАЭ магнетитов (интервал магнитных полей проявления МАЭ, диапазон и значения магнитных полей экстремумов МАЭ) характеризуют гомогенность, однородность магнетитов, наличие остаточных внутренних напряжений и позволяют разделять магнетиты по термодинамическим условиям образования и последующим наложенным физическо-химическим процессам.

Известно, что наложенные процессы метаморфизма приводят к «очищению» магнетита, и в нем отмечается уменьшение элементов-примесей. Такими магнетитами представлен первый выделенный нами тип магнетитов. Магнитные поля экстремумов в диапазоне $-3...+9$ кА/м, характерные для монокристалла и магнетитов Естюнинского месторождения, соответствуют доменной структуре, обусловленной в преобладающей степени энергией анизотропии.

Второй тип представлен магнетитами типично скарнового генезиса. В этом случае выноса элементов-примесей из магнетитов не происходит. Формирование доменной структуры осуществляется с учетом как немагнитных включений и остаточных внутренних напряжений, так и обменной энергии и энергии кристаллографической анизотропии. Для магнетита Магнитогорского месторождения при увеличении $1800\times$ отмечаются выделения шпинели по (100) и (111), сопровождающиеся точечными выделениями гематита. Для таштагольских магнетитов возможно влияние на образование доменной структуры остаточных внутренних напряжений. Это приводит к появлению на кривой МАЭ максимумов в диапазонах магнитных полей от 10 до 15 и от 20 до 30 кА/м. Магнитное поле экстремума 27.5 кА/м на магнетите стехиометрического состава Абаканского месторождения, третий выделенный нами тип, обусловлено в значительной мере межзерненными границами и образованием большого объема замыкающих доменов с 90° -ми границами.

ВЫВОДЫ

Полевые параметры МАЭ магнетитов (интервал магнитных полей проявления МАЭ, диапазон и значение магнитных полей экстремумов кривой МАЭ) позволяют выделить определенные типы движущихся доменных границ с различными величинами магнитного поля отрыва границы, определяющих жесткость закрепления границы на различных неоднородностях (немагнитные включения, внутренние напряжения, дефекты кристаллической решетки и т.д.) и разделить магнетиты по термодинамическим условиям образования и последующим наложенным физико-химическим процессам.

Разложение общей кривой МАЭ на составляющие с центром в экстремумах кривой позволяет выделить отдельные семейства (кластеры) доменных границ, движение которых определяется наличием конкретных факторов.

МАЭ в области слабых магнитных полей (магнитное поле экстремумов кривой МАЭ в диапазоне $-3 \dots +9.5$ кА/м) характерна для метаморфизованных магнетитов, у которых доменная структура определяется в основном энергией кристаллографической анизотропии.

Наличие немагнитных включений и остаточных внутренних напряжений, что типично для магнетитов скарновой формации, смещает МАЭ в область средних магнитных полей (магнитные поля экстремумов кривой МАЭ 10—15 и 20—30 кА/м).

Формирование доменной структуры с большим количеством замыкающих доменов, характерное для магнетитов со значительным объемом межзеренных границ, сдвигает МАЭ в область более сильных магнитных полей (магнитные поля экстремумов кривой МАЭ 27—37 кА/м).

ЛИТЕРАТУРА

Богданов А.А., Власов А.Я. Доменная структура на монокристалле магнетита // Настоящее и прошлое магнитного поля Земли. М., Наука, 1965, с. 100—109.

Глухих И.И., Иванченко В.С., Уткин В.И. Магнитоакустическая эмиссия магнетитовых руд сложного генезиса // Докл. РАН, 2007, т. 412, № 2, с. 251—253.

Горкунов Э.С., Драгошанский Ю.Н. Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов. (Обзор 1) // Дефектоскопия, 1999, № 6, с. 3—23.

Горкунов Э.С., Драгошанский Ю.Н., Миховски М. Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов. (Обзор 2) // Дефектоскопия, 1999а, № 7, с. 3—30.

Горкунов Э.С., Драгошанский Ю.Н., Миховски М. Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов. (Обзор 3) // Дефектоскопия, 1999б, № 8, с. 3—25.

Горкунов Э.С., Драгошанский Ю.Н., Миховски М. Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов. (Обзор 4) // Дефектоскопия, 1999в, № 12, с. 3—23.

Горкунов Э.С., Драгошанский Ю.Н., Миховски М. Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов. (Обзор 5) // Дефектоскопия, 2000, № 6, с. 3—23.

Иванченко В.С., Глухих И.И. Экспериментальное исследование магнитоакустической эмиссии природных ферритмагнетитов. Екатеринбург, УрО РАН, 2009, 92 с.

Кумейшин В.Ф., Лаптев В.В., Волков В.В., Черниковский М.Ю., Щербинин В.Е. Аппаратура для регистрации скачков Баркгаузена с помощью пьезодатчика // Материалы II Всесоюзной школы-семинара «Эффект Баркгаузена и его использование в технике». Калинин, Изд-во КГУ, 1980, с. 147—153.

Ломаев Г.В., Комаров В.А., Рубцов В.Н. Экспериментальное исследование акустического проявления эффекта Баркгаузена в конструкционных сталях // Эффект Баркгаузена и его применение в технике / Ред. В.М. Рудяк. Калинин, Изд-во КГУ, 1981, с. 78—84.

Мальшев В.С., Комаров В.А., Рубцов В.Н. Аппаратура для исследования акустического проявления эффекта Баркгаузена // Эффект Баркгаузена и его применение в технике / Ред. В.М. Рудяк. Калинин, Изд-во КГУ, 1981, с. 135—138.

Bertotti G., Fiorillo F., Sassi M.P. Barkhausen noise and domain structure dynamics in Si-Fe at different points of magnetization curve // J. Magnetism and Magnetic Materials, 1981, № 23, p. 136—148.

Burkhard Y.L., Beissner R.E., Matskanin Y.A., King I.D. Acoustic methods for obtaining Barkhausen noise stress measurements // Material Eval., 1982, v. 40, № 5, p. 669—675.

Deimel P., Kuppler D., Herz K. Block wall arrangement and Barkhausen noise in steel 22NiMoCr37 and 12MnMoNiV53 // J. Magnetism and Magnetic Materials, 1983, № 36, p. 277—289.

Heaps C.W. Discontinuities of magnetostriction and magnetization in nickel // Phys. Rev., 1941, № 59, p. 585—587.

Kusanagi H., Kimura H., Sasaki H. Stress effect on magnitude of acoustic emission during magnetization of ferromagnetic materials // J. Appl. Phys., 1979, v. 50, № 4, p. 2985—2987.

Kwan M.M., Ono K., Shibata M. Magnetomechanical acoustic emission of ferromagnetic material at low magnetization levels (type I behavior) // J. Acoustic Emission, 1984, v. 3, № 3, p. 144—156.

Lord A.E., Vatchev R., Robinson M. Acoustic emission associated with changes of magnetization in thin nickel rods // Lett. Appl. Eng. Sci., 1974, v. 2, № 9, p. 1—9.

Ono K., Shibata M. Magnetomechanical acoustic emission for residual stress and prior strain determination // Advances in acoustic emission. Knoxville, 1981, p. 154—174.

Shibata M., Ono K. Magnetomechanical acoustic emission — a new method for nondestructive stress measurement // NDT & E International, 1981, v. 14, № 5, p. 227—234.