

УДК 538.7+5503823

ОСТАТОЧНАЯ НАМАГНИЧЕННОСТЬ МАГНЕТИТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ И СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

© 2000 г. К. А. Валеев, С. С. Абсалямов

Башкирский государственный университет, г. Уфа

Поступила в редакцию 27.01.98 г.

Приведены результаты экспериментального изучения закономерностей разрушения различных видов остаточной намагниченности некоторых магнетитовых руд после обработки сдвиговой деформацией при высоких давлениях (ВД + СД). Установлено, что разрушение остаточной намагниченности насыщения $I_{\text{ис}}$ и термоостаточной намагниченности $I_{\text{т}}$ и рост пьезоостаточной намагниченности $I_{\text{п}}$ после обработки ВД + СД происходит значительно интенсивнее по сравнению с действием одного лишь давления. Проведено сравнительное изучение стабильности $I_{\text{ис}}$, $I_{\text{п}}$ образцов магнетитовых руд, предварительно подвергнутых к обработке ВД + СД по отношению к воздействию давления и переменного магнитного поля.

Закономерности формирования и разрушения намагниченности горных пород средних и нижних горизонтов земной коры могут быть изучены путем получения экспериментальных данных и последующего моделирования процессов намагничивания и разрушения намагниченности. Существенным моментом намагничивания и разрушения намагниченности горных пород в природных условиях является воздействие на породу сдвиговых деформаций геодинамического характера в присутствии геостатического напряжения, обусловленного весом налегающих слоев. Наличие сдвиговых напряжений обусловлено дифференцированными по скорости движения блоков и различных слоев земной коры.

Измерения реальных напряжений показывают резкую гетерогенность поля первичного горного давления, когда горизонтальные сдвиговые напряжения часто превышают вертикальные, а те и другие могут значительно отличаться от теоретических, вычисленных по массе пород. Так, на Покровском месторождении на глубине 100 м горизонтальные и вертикальные напряжения составили 330-606 и 384 против теоретических 9 и 28 кг/см². На Лебяжинском месторождении на глубине 330 м горизонтальные и вертикальные напряжения оказались равными 44-76 и 13 против 31 и 42 кг/см² теоретических [Горяинов, Сmealов, 1991].

В лабораторных условиях высокие статические давления в веществе достигаются помещением его между рабочими поверхностями двух наковален, которые затем прижимаются друг к другу достаточно большим усилием. Одновременные действия литостатического давления и касательного напряжения на горные породы можно смо-

делировать на установке Бриджмена с поворотными наковальнями [Бриджмен, 1955]. На этой установке для изучения горных пород в условиях высоких давлений и сдвиговых напряжений одну из наковален поворачивают относительно другой (поворотные наковальни). Систематическое изучение физических свойств горных пород в условиях высоких давлений и сдвиговых напряжений проведено в работе [Ярославский, 1982].

Изучение магнитных свойств горных пород в условиях деформаций сдвига под давлением необходимо для выяснения физических процессов намагничивания в условиях, приближенных к естественным.

В данной работе впервые приведены результаты экспериментального изучения закономерностей разрушения различных видов остаточной намагниченности некоторых магнетитовых руд после обработки сдвиговой деформацией при высоких давлениях.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом изучения были выбраны природные моно- и поликристаллы магнетита (из месторождений "Слюдорудник", "Малый Куйбас" Южного и Среднего Урала и "Ковдорское" Кольского полуострова), являющегося наиболее распространенным в природе ферромагнитным минералом. Химический и спектральный, а также термоманитный анализы вышеуказанных магнетитов приведены в работе [Абсалямов, Гареева, 1997]. Измерения остаточной намагниченности насыщения $I_{\text{ис}}$, термоостаточной $I_{\text{т}}$ и пьезоостаточной намагниченности $I_{\text{п}}$ производились (после нало-

жения и снятия давления) на рок-генераторе ИОН-1 и на астатическом магнитометре МА-21 по общепринятой методике. Различные виды остаточной намагниченности получены после предварительного размагничивания образца переменным полем амплитудой 400 А/м. Относительная погрешность измерения остаточной намагниченности не превышает 3%. Образцы имели форму цилиндра диаметром 10 мм и высотой 5 мм. Материалом для передачи давления служила пластмасса марки "Этакрилл", "Фторакс". Лабораторное поле компенсировалось тремя ортогональными парами колец Гельмгольца вмонтированными в пресс. Различные виды остаточной намагниченности получены после предварительного размагничивания образца переменным полем амплитудой 400 кА/м.

Обработка сдвиговой деформацией при высоких давлениях производилась по следующим схемам:

Схема I. $P_1^+ P_1^-, P_2^+ P_2^-, \dots, P_n^+ P_n^-, P_n = 2 \text{ ГПа}$,
 $P_{n-1} < P_n, H = 0$.

Схема II. $P_0^+ \sigma_1^+ \sigma_1^- P_0^-, P_0^+ \sigma_2^+ \sigma_2^- P_0^-, \dots, P_0^+ \sigma_n^+ \sigma_n^- P_0^-$,
где $P_0 = 1 \text{ ГПа}$, $\sigma_{n-1} < \sigma_n, H = 0$.

Схема III. $H_0^+ P_1^+ P_1^- H_0^-, H_0^+ P_2^+ P_2^- H_0^-, \dots, H_0^+ P_n^+ P_n^- H_0^-$,
где $P_{n-1} < P_n, H_0 = 400 \text{ А/м}$.

Схема IV. $H_0^+ P_1^+ \sigma_0^+ \sigma_0^- P_1^- H_0^-, H_0^+ P_2^+ \sigma_0^+ \sigma_0^- P_2^- H_0^-, \dots$
 $\dots, H_0^+ P_n^+ \sigma_0^+ \sigma_0^- P_n^- H_0^-$,
где $P_n > P_{n-1}, H_0 = 400 \text{ А/м}$.

Знак "+" означает приложение давления P , магнитного поля H или начало сдвиговой деформации σ , а знак "-" означает снятие давления, выключение магнитного поля или окончание сдвиговой деформации. Лабораторная установка типа

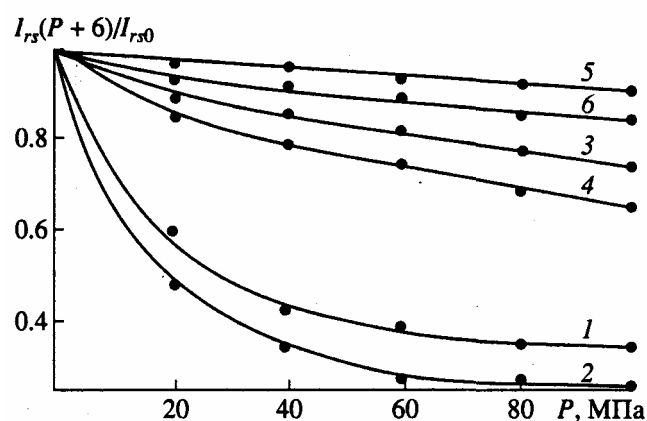


Рис. 1. Зависимость остаточной намагниченности насыщения порошка магнетита от давления (кривые 1, 3, 5) и от обработки ВД + СД (кривые 2, 4, 6); 1, 2 — 63 мкм; 3, 4 — 22 мкм; 5, 6 — 1 мкм.

Бриджмена [Абсалямов, Гареева, 1997; Абсалямов, Баймурзин, 1990], предназначенная для исследования горных пород в условиях БД + СД, состоит из неподвижной и поворотной наковален, между которыми помещается исследуемый образец.

Наковальни снабжены устройствами для приложения осевой силы и поворота. Высокие реологические поля в образце создавались в зоне соприкосновения двух наковален, одна из которых крепится к верхнему пуансону, а вторая жестко связана с поворотной станиной. Осевое усилие составляет $F = 1.5 \times 10^5 \text{ Н}$ момент силы, приложенной к наковальне, $M = 1 \times 10^3 \text{ Н м}$. Пресс был специально проградуирован путем непосредственного измерения усилия с помощью тензодатчика, а также с применением динамометра системы Н.Г. Токаря (гост 9500-75 тип ДОС-5) с индикатором часового типа ИЧ-10. Давление измерялось с погрешностью 3-5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первая серия экспериментов посвящена изучению закономерностей разрушения остаточной намагниченности насыщения I_{rs} порошка магнетита различных размеров (месторождение "Слюдорудник") от давления (рис. 1, кривые 1, 3, 5) и после обработки давления и сдвиговых I_{rs} деформаций (рис. 1, кривые 2, 4, 6) в скомпенсированном магнитном поле Земли. I_{rs} создавалась в магнитном поле с напряженностью 800 кА/м. На рис. 2 приведены данные разрушения I_{rs} частиц порошка магнетита после обработки ВД + СД в зависимости от угла поворота наковален. Введем коэффициенты

$$k = I_{rs}(P + \sigma)/I_{rs0}, \quad l = I_{rs}(P)/I_{rs0},$$

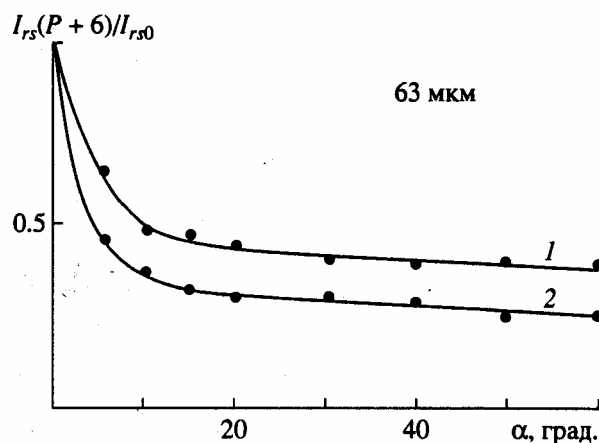


Рис. 2. Зависимость остаточной намагниченности насыщения порошка магнетита после обработки ВД + СД от угла поворота наковален: 1 — под давлением 40 МПа, 2 — 100 МПа.

Остаточная намагниченность насыщения при сдвиговой деформации в условиях высоких давлений (угол поворота наковален 85°)

Горные породы и минералы	P , МПа	$l = I_{rs}(P + \sigma)/I_{rs0}$, в процентах	$k = I_{rs}(P)/I_{rs0}$, в процентах	$k-l$
Перидотит	180	50	58	8
Гранодиорит–перидотит	230	28	35	7
Титаномагнетит	180	43	53	10
Магнетит 115–147 мкм	140	75	89	13
Магнетит 74–115 мкм	140	76	86	11

l – относительное изменение I_{rs} после обработки ВД,

k – относительное изменение I_{rs} после обработки ВД + СД.

где I_{rs0} – остаточная намагниченность насыщения в исходном состоянии, $I_{rs}(P)$ – остаточная намагниченность, которую имел образец после обработки высоким давлением P , $I_{rs}(P + \sigma)$ после обработки ВД + СД. Установлено, что I_{rs} образцов системы частиц магнетита после обработки ВД + СД уменьшается более интенсивно ($k > l$). С уменьшением размеров частиц магнетита разность $k-l$ уменьшается. При одинаковой сдвиговой деформации относительное уменьшение k зависит от величины высокого давления (рис. 2). Наиболее интенсивное уменьшение I_{rs} при обработке ВД + СД наблюдается при малых углах поворота наковален (до 20°). Обработка при ВД + СД в более жестких условиях не приводит к заметному изменению k . В таблице приведены данные I_{rs} после обработки при ВД + СД некоторых горных пород и ферритных минералов Южного Урала. Как видно из таблицы для изученных образцов всегда $k > l$.

Следующая серия экспериментов посвящена изучению закономерностей необратимых изменений I_{rs} магнетитовых руд Ковдорского месторождения после обработки ВД + СД.

Проведено сравнительное изучение стабильности I_{rs} образцов магнетитовых руд из естественного магнитного состояния и после воздействия давления, а также после обработки ВД + СД по отношению к воздействию давления (рис. 3, 4) и переменного магнитного поля (рис. 5). Кривая 1 (рис. 3) выражает зависимость $I_{rs} = f(P)$ магнетита из естественного магнитного состояния. Кривые 2, 3 (рис. 3) иллюстрируют зависимость $I_{rs} = f(P)$ образца, предварительно испытывавшего ВД. Кривые 4, 5 (рис. 3) выражают зависимость $I_{rs} = f(P)$ для образца, испытывавшего ВД + СД. Как видно из рис. 3, 4, обработка образца магнетита высоким давлением значительно увеличивает стабильность I_{rs} по отношению к воздействию давления, по сравнению со стабильностью I_{rs} образца из естественного магнитного состояния. Приложение более высоких давлений при обработке приводит к дальнейшему росту стабильности I_{rs} . Обработка ВД + СД вызывает еще дополнительный рост стабильности I_{rs} по отношению к воздействию давления (рис. 3, кривые 4, 5). При одинаковых величинах давления наиболее стабильными по от-

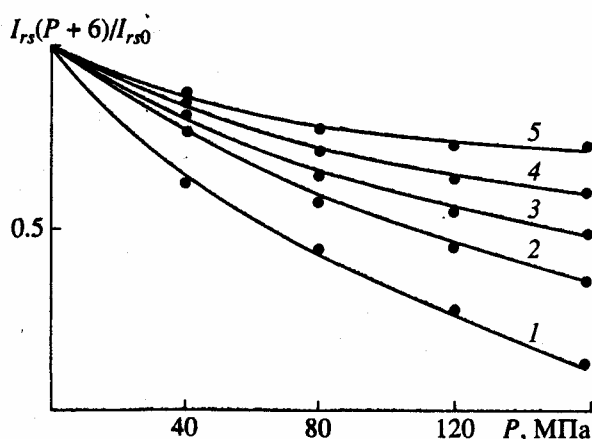


Рис. 3. Зависимость остаточной намагниченности насыщения от давления: 1 – исходный; 2, 3 – после обработки ВД (1 и 2 ГПа), 4, 5 – после обработки ВД + СД (1 и 2 ГПа, 360°) соответственно. Образец 1048/6 (6 скважина, глубина 1048 м).

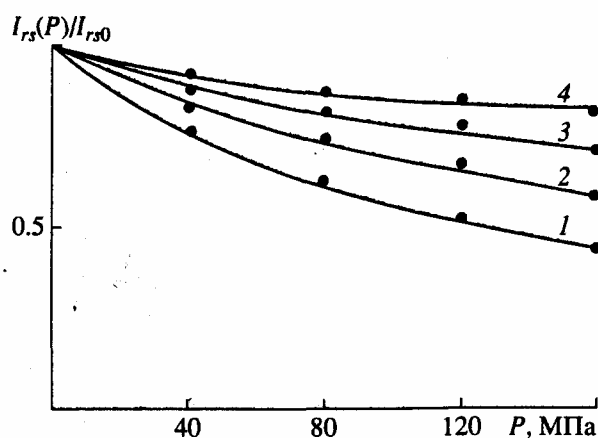


Рис. 4. Зависимость остаточной намагниченности насыщения от давления: 1, 2, 3 и 4 – после сдвига под давлением на 90°, 360°, 720° и 1020° соответственно. Образец 859/6 (6 скважина, глубина 859 м).

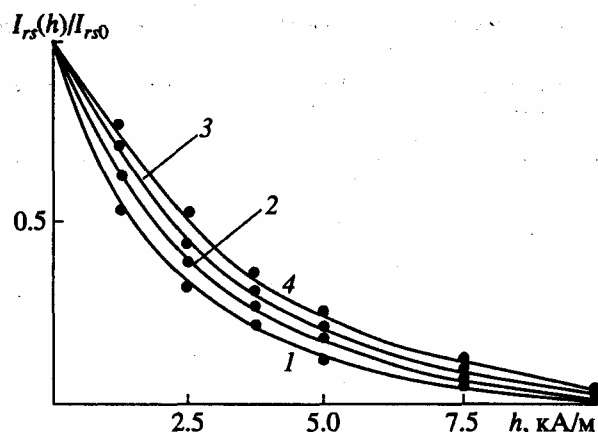


Рис. 5. Зависимость остаточной намагниченности насыщения от переменного магнитного поля; 1, 2 – после обработки ВД (1, 2 ГПа); 3, 4 – после обработки ВД + СД (1 и 2 ГПа, 360°) соответственно. Образец 859/6 (6 скважина, глубина 859 м).

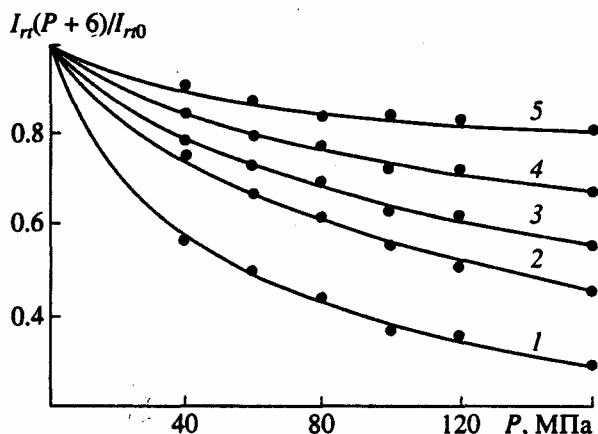


Рис. 6. Зависимость термоостаточной намагниченности от давления: 1 – исходный; 2, 3 – после обработки ВД (1, 2 ГПа); 3, 4 – после обработки ВД + СД (1 и 2 ГПа, 360°) соответственно. Образец 966/6 (6 скважина, глубина 966 м).

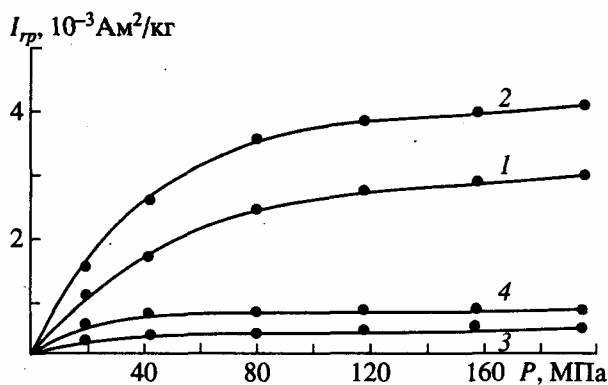


Рис. 7. Зависимость пьезоостаточной намагниченности порошка магнетита от давления ($H = 400$ А/м, H/P): 1, 2 – 35 мкм; 3, 4 – 170 мкм; 2, 4 – после обработки ВД + СД (1 ГПа, 360°) соответственно.

ношению к воздействию давления являются I_{rs} образцов, подвергнутых обработке ВД + СД ($k > 1$). Увеличение угла поворота наковален при этом также приводит к росту стабильности I_{rs} по отношению к воздействию давления (рис. 4).

Увеличение величины ВД при предварительной обработке образца приводит также к росту стабильности I_{rs} по отношению к воздействию переменного магнитного поля (рис. 5). При одинаковом давлении дополнительная обработка СД приводит к дальнейшему росту стабильности I_{rs} по отношению к воздействию переменного магнитного поля (h). При одинаковых углах поворота наковален более стабильным по отношению к воздействию переменного магнитного поля являются образцы, подвергнутые обработке СД при более высоких давлениях P . На рис. 6 приведены данные изучения стабильности термоостаточной намагниченности I_{pi} по отношению к воздействию давления. Кривая 1 (рис. 6) относится к $I_{pi} = f(T)$ образца 966/6 Ковдорского месторождения из естественного магнитного состояния. Кривые 2, 3 (рис. 6) иллюстрируют зависимость $I_{pi} = f(P)$ образца магнетита, предварительно испытывавшего ВД. Кривые 4, 5 выражают зависимость $I_{pi}(P)$, образованной в образце магнетита после обработки ВД + СД. Обработка СД при высоких давлениях приводит к значительному увеличению стабильности I_{pi} по отношению к воздействию давления.

Изучено также влияние предварительной обработки ВД + СД на образование пьезоостаточной намагниченности. При этом направление постоянного магнитного поля было параллельно относительно оси приложения сжимающего напряжения. Образцы предварительно размагничивались в переменном магнитном поле. I_{pi} образовалась в постоянном магнитном поле $H_0 = 400$ А/м. В первом случае наложение и снятие давления в магнитном поле осуществлялись по схеме III. Зависимость $I_{pi}(P)$ приведена на рис. 7 (кривые 1, 3). Во втором случае образец, находящийся под давлением в магнитном поле $H_0 = 400$ А/м, подвергался сдвиговой деформации путем поворота нижней наковальни на 85° по схеме IV. При этом перед каждым испытанием нижняя наковальня возвращалась в исходное положение. Результаты измерений иллюстрированы на рис. 7 (кривые 2, 4).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для выяснения различного поведения магнитных параметров магнетита после обработки в условиях высоких давлений, а также при одновременном действии высокого давления и сдвиговых деформаций рассмотрим физические процессы, приводящие к изменению магнитного состояния ферромагнетика при действии их. Изучение стабильности I_{rs} к воздействию давления на частицах

различных размеров показало следующее: в многодоменных частицах магнетита после их намагничивания до насыщения и при последующем наложении давления в скомпенсированном магнитном поле Земли происходит интенсивное необратимое уменьшение I_n , что можно объяснить смещением легко подвижных доменных границ, ростом существующих и образованных зародышей перемангничивания в процессе приложения давления [Абсальмов, Гареева, 1997]. С уменьшением размеров магнетитовых зерен наблюдается увеличение стабильности I_n по отношению к воздействию давления. Это связано с тем, что по мере уменьшения размеров частиц магнетита затрудняется образование и рост зародышей обратной намагниченности [Абсальмов, Гареева, 1997]. При достаточно мелких размерах ферритмагнитных частиц затрудняется процесс смещения доменных границ и перемангничивание осуществляется в основном за счет вращения векторов намагниченности доменов. После сдвиговой деформации под давлением количество образующихся дефектов значительно увеличивается [Абсальмов, 1997]. В этих частицах из-за больших градиентов внутренних напряжений, приложение давления вызывает малое уменьшение I_n после обработки ВД + СД.

Рассмотрим особенности поведения термоостаточной намагниченности ферритмагнитных частиц различных размеров при высоких давлениях, а также механизм закрепления магнитных моментов в процессе охлаждения ферритмагнетика. При охлаждении магнитного минерала в магнитном поле имеется область, где ферритмагнетик обладает высокой восприимчивостью. При прохождении этой области поля рассеяния, определяемые I_s , появляются раньше, чем энергетические барьеры, препятствующие движению границ. С другой стороны, при высоких температурах T ($T < T_C$, где T_C – температура Кюри) магнитное упорядочение в ферритмагнетике не начинается однородно по всему объему частиц, а лишь в ее отдельных областях. Магнитные моменты упорядоченных областей преимущественно ориентируются по направлению приложенного поля. При дальнейшем охлаждении в магнитном поле они увеличиваются до определенной величины. В процессе роста и стыковки таких областей возникает доменная структура. Таким образом, термоостаточная намагниченность отличается от других видов остаточных намагниченностей упорядоченным расположением магнитных моментов зародышей перемангничивания. Перемангничивание I_n при наложении давления происходит в многодоменных частицах за счет смещения доменных границ и роста зародышей перемангничивания. Как известно, с уменьшением размеров зерен происходит затруднение образования зародышей перемангничивания, что также приводит к увеличению стабиль-

ности I_n по отношению к воздействию давления. Расположение доменных границ при образовании I_n определяется взаимодействием их с различного рода дефектами. Высокие энергетические барьеры, вызванные большими количествами дислокаций в частицах после обработки ВД + СД, которые обуславливают более стабильную I_n по отношению к воздействию давления.

В образцах с сильно дефектной структурой после обработки ВД + СД из-за взаимодействия дислокаций друг с другом и скопления дислокаций в различных плоскостях скольжения создаются высокие энергетические барьеры. В несовершенствах кристалла, на дефектах может сохраняться большое число остаточных зародышей, в том числе имеющих значения поля старта. С одной стороны, дефекты облегчают процессы зародышеобразования, а с другой – затрудняют рост остаточных зародышей в процессе перестройки доменной структуры во внешнем поле. Поэтому для образцов с сильно дефектной структурой увеличение стабильности обусловлено задержкой перемангничивания путем смещения доменных границ. В связи с этим в образце с сильно дефектной структурой из-за присутствия большого числа дислокаций (или скопления дислокаций) затрудняется перемангничивание в слабых полях путем смещения доменных границ и роста зародышей перемангничивания по сравнению с образцом с менее дефектной структурой. Это подтверждается тем, что величина H_C образцов после ВД + СД значительно больше величины H_C образцов, подвергнутых обработке ВД [Абсальмов, 1997].

Создание однородных напряжений вызывает перераспределение напряжений в материале, видоизменяя тем самым распределение градиента граничной энергии в направлении смещения. Известно [Вонсовский, 1971], что для случая 180° соседств уравнение граничной энергии (плотность энергии граничного слоя) может быть представлено в виде

$$\gamma = 4\sqrt{A/a} \left(\frac{3}{2} \lambda_s \sigma + bK \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где A – обменный интеграл, K – константа магнитной анизотропии, a – постоянная решетки, b – коэффициент, близкой к единице, λ_s – магнитострикция насыщения, σ – напряжение.

Отсюда

$$d\gamma/dx = 2\sqrt{A/a} \left[\frac{3}{2} \lambda_s \frac{d\sigma}{dx} / \left(\frac{3}{2} \lambda_s \sigma + bK \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (2)$$

Если учесть внутренние и внешние P напряжения, то формулу (2) для градиента граничной

энергии в пределах упругой деформации можно записать в виде

$$\begin{aligned} d\gamma/dx = \\ = 2\sqrt{A/a} \frac{3}{2} \lambda_s \frac{d(\sigma_i + P)}{dx} / \left[\frac{3}{2} \lambda_s (\sigma_i + P) + bK \right]^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку внешние напряжения однородны, то и они будут фигурировать лишь в знаменателе формулы (3), уменьшая величину $d\gamma/dx$. В сильно дефектной частице $\sigma_i \gg P$, поэтому наложение напряжения P вызывает малое уменьшение величины $d\gamma/dx$. В связи с этим I_{rs} и I_n образца после обработки ВД + СД менее чувствительна к воздействию давления. Этим объясняются малые необратимые уменьшения I_{rs} , I_n в частицах после обработки ВД + СД. В менее дефектном минерале приложение той же величины напряжения P существенным образом перераспределяет "геометрию" градиента энергии, так как $P \approx \sigma_i$. Это приводит к значительному уменьшению I_{rs} , I_n под давлением образцов, подвергнутых обработке ВД.

Установлено, что уменьшение I_{rs} , I_n и рост I_p при обработке ВД + СД происходит интенсивнее по сравнению с действием одного лишь давления. Обработка магнетита ВД + СД значительно увеличивает стабильность I_{rs} , I_n по отношению к воз-

действию давления и переменного магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абсалямов С.С., Баймурзин Р.Г. Установка для высокотемпературных испытаний горных пород при сдвиговых деформациях. Тез. докл. УШ Всесоюзного совещания по физическим свойствам горных пород при высоких давлениях и температурах. Уфа. 1990. Т. II. С. 24.
- Абсалямов С.С., Гареева М.Я. Магнетизм горных пород при высоких термодинамических параметрах. Уфа: Изд-во БашГУ, 1997. 170 с. Абсалямов С.С. Коэрцитивная сила магнетита при воздействии высокого давления и сдвиговых деформаций. Сб. науч. трудов Всероссийской конференции "Физика конденсированного состояния". Стерлита-мак. 1997. Т. 2. С. 33-34.
- Бриджмен П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд-во Иностран. лит-ры, 1955. 444 с.
- Браун У.Ф. Микромагнетизм. М.: Наука, 1976.
- Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971. 1032 с.
- Горяинов И.Н., Смекалов А.С. О природе полосовых магнитных аномалий в мировом океане (интерференционно-тектонномагнитная модель). Докл. АН СССР. 1991. Т. 321. №3. С. 563-568.
- Ярославский М.А. Реологический взрыв. М.: Наука, 1982. 193 с.

Статья рекомендована к печати членом редколлегии д-ром физ.-мат. наук В.И. Трухиным.