

ВЛИЯНИЕ РАЗРУШЕНИЯ И ДРОБЛЕНИЯ ОБРАЗЦА ПРИ СДВИГОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАГНЕТИТА

©2002г. С. С. Абсалямов

Башкирский государственный университет, г. Уфа

Поступила в редакцию 24.10.2000г.

Изучены магнитные свойства и температурная зависимость намагниченности насыщения крупнокристаллического магнетита и порошка магнетита, полученного сдвиговым воздействием под давлением на наковальнях Бриджмена, Совместное воздействие повышенных давлений и деформаций сдвига приводит к необратимому уменьшению намагниченности насыщения магнетита и изменению характера ее температурной зависимости.

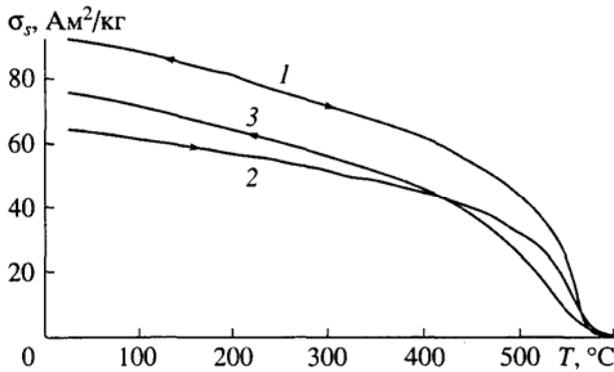
Ключевые слова: магнетит, намагниченность насыщения, давление, сдвиг.

Проведенные в последние десятилетия исследования по тектонике платформ, основанные на материалах глубокого бурения и сейсмопрофилеирования, существенно изменили ранние представления и показали, что платформы подвержены многочисленным и многообразным тектоническим дислокациям, среди которых ведущее место занимают надвиги и шарьяжи. Строение континентальной и океанической коры в настоящее время рассматривается как совокупность шарьяжных пластин, движением которых объясняются важнейшие геологические явления [Казанцева, 2000; Камалетдинов и др., 1991]. Сейсмическая активность, землетрясения свидетельствуют о том, что тектонические пластины земной коры находятся в постоянном движении относительно друг друга. При таких движениях в них возникает сложное полб напряжений с преобладанием касательной составляющей [Казанцева, 2000]. Действие на породу давления, определяемой нагрузкой вышележащих толщ горных пород и направленного напряжения, вызванного тектоническими движениями, в лабораторных условиях моделируется на установке Бриджмена [Бриджмен, 1955; Ярославский, 1982]. Эти условия создаются в зоне соприкосновения наковален, одна из которых крепится к верхнему пуансону, а вторая жестко связана с поворотной станиной. Степень сдвигового воздействия при этом определяется углом поворота наковален.

Известно, что сдвиговое воздействие под давлением (ВД + СД) приводит к резкому изменению физических свойств горных пород [Ярославский, 1982]. В работе [Валеев, Абсалямов, 2000] установлено, что разрушение остаточной намагниченности насыщения, термоостаточной намагни-

ченности и рост пьезостаточной намагниченности после сдвигового воздействия под давлением происходит значительно интенсивнее по сравнению с действием одного лишь давления. Обработка магнетита в условиях ВД + СД значительно увеличивает стабильность термоостаточной намагниченности и остаточной намагниченности насыщения по отношению к воздействию давления и переменного магнитного поля. В работе [Глухих и др., 1991] отмечается значительное влияние тектонических воздействий на микроструктуру и на магнитные свойства магнетита из зон динамометаморфизма. Следует подчеркнуть, что в настоящее время практически не исследовано влияние сдвигового воздействия под давлением на температурную зависимость намагниченности насыщения ($\sigma_s(T)$) горных пород и минералов. Эти результаты позволят расширить возможности магнитной диагностики и изучения магнитных состояний горных пород, находящихся в напряженном состоянии или испытавших действия повышенных давлений и сдвиговых воздействий под давлением.

В данной работе приведены результаты исследования температурной зависимости намагниченности насыщения и магнитных свойств магнетита, являющегося наиболее распространенным в природе ферримагнитным минералом, после сдвигового воздействия под давлением на наковальнях Бриджмена при повороте наковален на угол 360° под давлением 2000 МПа. Объектом изучения выбраны природные магнетиты Ковдорского месторождения (Кольский полуостров) с малым содержанием Ti (0.49%). После испытания магнетита в условиях ВД + СД получается порошок с различными размерами частиц. Наиболее мелкая



Температурная зависимость намагниченности насыщения магнетита Ковдорского месторождения в исходном состоянии (1) и после сдвигового воздействия под давлением ($P = 200$ МПа, $\alpha = 720^\circ$), 2 – кривая нагрева, 3 – кривая охлаждения.

фракция порошка магнетита со средним размером частиц менее 0.5 мкм была выделена седиментационным методом в дистиллированной воде (в дальнейшем порошок магнетита). Кривые $\sigma_s(T)$ порошка магнетита были сняты в вакууме 1.5×10^{-3} Па с непрерывной откачкой на автоматических вакуумных микровесах в магнитном поле с напряженностью 240 кА/м [Мулюков и др., 1998]. Скорость изменения температуры при записи кривых $\sigma_s(T)$ составляла $4^\circ\text{C}/\text{мин}$.

На рисунке представлена кривая $\sigma_s(T)$ крупнокристаллического магнетита (кривая 1). Эта кривая была записана в процессе нагревания и остывания образца после 15-минутной выдержки при 600°C . Как видно, кривые $\sigma_s(T)$ крупнокристаллического магнетита при нагревании и охлаждении совпадают. Это говорит о том, что в вакууме крупнокристаллический магнетит является устойчивым до достаточно высоких температур. Температура Кюри (T_c), определенная экстраполяцией наиболее крутого участка кривой $\sigma_s(T)$ на ось температур, составляет 570°C , что соответствует значению точки Кюри стехиометрического магнетита.

На этом же рисунке приведены кривые $\sigma_s(T)$ порошка магнетита, снятые также в вакууме при нагревании (кривая 2) и остывании (кривая 3) образца. В первую очередь следует отметить, что величина намагниченности насыщения (σ_s) порошка магнетита на 30% меньше намагниченности крупнокристаллического образца. Во-вторых, кривые $\sigma_s(T)$ порошка магнетита при нагревании и охлаждении не совпадают. Так, в интервале температур от T_c до 400°C кривая охлаждения лежит ниже кривой нагрева, при 400°C они пересекаются, и в области более низких температур кривая охлаждения идет выше кривой нагрева. После нагрева – охлаждения наблюдается восстановление величины намагниченности на

15%. Однако при этом ее величина не достигает значения намагниченности крупнокристаллического состояния. Измельчение магнетита в процессе сдвигового воздействия под давлением приводит не только к значительным изменениям величины намагниченности насыщения, но и других магнитных свойств. Эти результаты приводятся в таблице. Как видно, уменьшение значения σ_s , наблюдаемое после сдвигового воздействия под давлением, зависит от величины приложенного давления и от угла поворота наковальни Бриджмена. При этом, такие свойства, как относительная остаточная намагниченность (σ_r/σ_s), коэрцитивная сила (H_c) и разрушающее поле (H_{cr}) порошка магнетита увеличиваются с ростом величины приложенного давления и угла поворота.

Рассмотрим основные причины, которые могут привести к уменьшению величины σ_s . Сначала можно предположить, что величина намагничивающего магнитного поля недостаточна для намагничивания до насыщения порошка магнетита. Чтобы проверить это предположение, проведена экстраполяция величины σ_s на бесконечно большое магнитное поле использованием закона приближения к насыщению. Разложение удельной намагниченности (σ) в ряд по степеням малой величины $1/H$ называется законом приближения к насыщению [Вонсовский, Шур, 1948]: $\sigma = \sigma_s(1 - a_1/H - a_2/H^2 - a_3/H^3 - \dots)$. Входящий в этот закон коэффициент a_2 определяется энергией кристаллографической анизотропии и поэтому когда намагничивание образца в области высоких полей осуществляется лишь с помощью процессов вращения, σ_s должна быть функцией только $1/H^2$. Коэффициент a_1 определяется внутренними напряжениями, возникающими при обработке образцов в условиях ВД + СД. Если это так, то кривая намагничивания образца после обработки в условиях сдвигового воздействия под давлением должна описываться членом a_1/H закона приближения к насыщению. В результате оказалось, что величина σ_s , соответствующая бесконечно большому полю, равна 71.8 Ам²/кг, которая на 22% меньше намагниченности насыщения Fe_3O_4 в крупнокристаллическом состоянии. Это свидетельствует о том, что намагниченность насыщения Fe_3O_4 после обработки сдвигового воздействия под давлением действительно уменьшается. Поэтому значение намагниченности насыщения магнетита после обработки ВД + СД, полученная путем экстраполяции σ на бесконечно большое поле, получилось меньше намагниченности насыщения крупнокристаллического магнетита.

С другой стороны, такое значительное уменьшение намагниченности насыщения может быть обусловлено фазовыми изменениями, которые произошли в процессе сдвигового воздействия под давлением. В работе [Валеев, 1982] уменьшение намагниченности насыщения мелких частиц маг-

нетита, полученных измельчением при помощи ультразвукового диспергатора, объясняют окислением поверхностного слоя частицы до гематита и противоположным направлением намагниченности поверхностно-окисленной части к намагниченности сердцевинной частицы. Однако, как показывают результаты, полученные в работе [Абсалямов, Мулюков, 2000], мелкие частицы гематита неустойчивы. С другой стороны, изменения фазового состава порошка магнетита после сдвигового воздействия под давлением методом рентгеноструктурного анализа не обнаружены.

Известно, что для ферритмагнетиков характерно существование спонтанно намагниченных подрешеток и магнитный порядок в них обусловлен косвенным обменным взаимодействием, которое осуществляется через ионы кислорода [Liu, 1961]. Результирующий магнитный момент феррита представляет собой разность между магнитными моментами подрешеток и в основном определяется энергией косвенного обменного взаимодействия [Вонсовский, Изюмов, 1962]

$$A_{\text{косв}} = \frac{96Z^2r^2}{zV_0^2E_f} F(2k_f|R_n - R_m|).$$

Из приведенной формулы вытекает, что $A_{\text{косв}}$, в свою очередь, зависит от расстояния между взаимодействующими атомами $|R_n - R_m|$. Сдвиговое воздействие под давлением в процессе получения порошка магнетита приводит к созданию в частицах сильно деформированных областей с высокой плотностью дислокаций. В этих областях объема частиц с высокой плотностью дислокаций среднее расстояние $|R_n - R_m|$ между атомами из-за искажения кристаллической решетки изменяется, и оно становится больше или меньше его равновесного значения [Valiev и др., 1997]. Так как $A_{\text{косв}}$ сильно зависит от расстояния между атомами, его изменение приводит к уменьшению величины $A_{\text{косв}}$ и, следовательно, к затруднению удержания ферритмагнитного упорядочения в участках, насыщенных дислокациями и подверженных мощным внутренним напряжениям. Таким образом, искажения строгой периодичности кристаллической решетки в местах накопления дислокаций, вызванных сдвиговым воздействием под давлением, приводят к уменьшению результирующего магнитного момента σ_s в ферритмагнетиках.

Частичное восстановление величины намагниченности насыщения порошка магнетита после нагрева и охлаждения в вакууме объясняется отжигом дефектов. При высоких температурах в результате отжига неравновесные (насыщенные дислокациями) участки объема частиц переходят в равновесные состояния. Частичное восстановление равновесной структуры в сильно деформированных участках приводит в свою очередь к об-

ратному восстановлению величины намагниченности насыщения порошка магнетита.

Магнитные параметры	σ_s , Ам ² /кг	$\sigma_s/\sigma_{\text{ТС}}$	H_c , кА/м	$H_{\text{сг}}$, кА/м
Исходный образец	92	0.032	3.44	14.8
$P = 200$ МПа, $\alpha = 90^\circ$	87.4	0.040	4.48	17.1
$P = 400$ МПа, $\alpha = 360^\circ$	79.1	0.050	5.12	20.5
$P = 2000$ МПа, $\alpha = 720^\circ$	64.4	0.070	6.43	22.7

ратному восстановлению величины намагниченности насыщения порошка магнетита.

Таким образом, установлено, что переход магнетита из крупнокристаллического состояния в мелкие частицы в результате сдвигового воздействия под давлением сопровождается уменьшением величины намагниченности насыщения и изменением характера температурной зависимости намагниченности насыщения. Уменьшение значения σ_s порошка магнетита, наблюдаемое после сдвигового воздействия под давлением, зависит от величины приложенного давления и от угла поворота наковальни Бриджмена. Уменьшение величины намагниченности насыщения типичного ферритмагнетика – магнетита объясняется искажением строгой периодичности кристаллической решетки в участках, насыщенных дислокациями и подверженных мощным внутренним напряжениям, вызванным сдвиговым воздействием под давлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абсалямов С.С., Мулюков Х.Я. Устойчивость гематита в частицах малых размеров // Докл. РАН. 2000. Т. 375. № 4. С. 469–471.
- Бриджмен П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд-во иностр. лит. 1955. 444 с.
- Валеев К.А., Абсалямов С.С. Остаточная намагниченность магнетита при воздействии высоких давлений и сдвиговых деформаций // Физика Земли. 2000. № 3. С. 59–64.
- Валеев К.А. О магнетизме ансамбля мелких частиц магнетита // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1982. № 8. С. 91–99.
- Вонсовский С.В., Изюмов Ю.А. Электронная теория переходных металлов // УФН. 1962. Т. 77. № 3. С. 377–448.
- Вонсовский С.В., Шур Я.С. Ферромагнетизм. М.: Изд. тех.-теор. лит. 1948. 816 с.
- Глухих И.И., Шерендо Т.А., Шерстобитова Л.А., Смирнов Ю.П. Влияние тектонических воздействий на микроструктуру зерен и магнитные свойства магнетита из динамометаморфизма // Материалы IV Всесоюзного съезда по геомагнетизму. Владимир–Суздаль. 1991. Ч. III. С. 83–84.