

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 5503823

МАГНИТНАЯ ДИАГНОСТИКА ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

© 1997 г. Л. Е. Шолпо, В. А. Иванов*, Г. П. Борисова

СПбФ ИЗМИРАН

*ДВГУ, г. Владивосток

Поступила в редакцию 01.06.94 г.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитная диагностика доменной структуры (ДС) ферромагнитных частиц, диспергированных в парамагнитной матрице, представляет собой одну из важных прикладных задач науки о магнетизме горных пород. На протяжении последних тридцати лет не раз казалось, что эта задача близка к решению, однако дальнейшее развитие практики магнетизма горных пород, палеомагнитных лабораторных исследований, а также теоретических исследований ДС приводило к необходимости критически пересматривать достигнутые результаты, вводить определенные ограничения на применение тех или иных критериев ДС, а некоторые из них – даже признать ошибочными. Современное состояние дел характеризуется наличием нескольких в разной степени апробированных критериев ДС, которые, однако, не решают всех проблем, связанных с магнитной диагностикой ДС ферромагнитных компонентов горных пород. Напомним эти проблемы, имея в виду лишь простейшее подразделение ДС на многодоменную (МД), однодоменную (ОД) и псевдоодно доменную или "малодоменную" (ПОД). (Теоретические работы последних лет приводят к выводу, что каждая из этих ДС имеет свои "внутренние" сложности и подразделения, определяющие особенности их поведения при воздействии магнитного поля и температуры [1, 2 и др.]. Однако, это тот уровень, выход на который вряд ли может быть когда-либо достигнут на основе макроскопических магнитных методов.)

Естественно, прежде всего были использованы принципиальные различия механизмов намагничивания и, следовательно, коэрцитивных свойств МД- и ОД-зерен: отношение остаточной к полной намагниченности насыщения (J_{rs}/J_s), коэрцитивная сила по J_{rs} и ее отношение к коэрцитивной силе предельного цикла (H_{cr}/H_c). Результаты расчета этих параметров [3] показывают, что интервалы их возможных значений для МД- и ОД-частиц достаточно обособлены, а "промежуток" между этими интервалами логично закрыть за ПОД-частицами.

Уже на этом этапе, имея дело с интегральными характеристиками образца, мы сталкиваемся,

по меньшей мере, с четырьмя проблемами: 1 – каким образом можно отличить ПОД-частицы от смеси МД- и ОД-частиц; 2 – как оценить при измерении H_c и J_s влияние намагниченности суперпарамагнитных и парамагнитных минералов, образующих породу, особенно – если содержание ферромагнитных минералов относительно мало; 3 – должен ли быть учтен концентрационный фактор в связи с тем, что концентрацией ферромагнитных зерен в образце горной породы определяются эффекты их взаимодействия и экранирования, а также – величина эффективного намагничивающего фактора образца? 4 – наконец, известно, что совокупность ферромагнитных компонентов в горной породе представляет собой, как правило, систему, неоднородную по химическому составу, по степени дефектности зерен, по распределению в них напряжений, немагнитных включений и т.п. То же самое зачастую характеризует не только всю совокупность, но и каждое зерно в отдельности. (По-видимому, это и обуславливает существование "жестких" МД- и "мягких" ОД-компонентов горных пород, что уже отмечалось в литературе, например, в работе [4], и явилось чувствительным ударом по "коэрцитивным критериям" ДС.)

Поиски новых методов были ориентированы прежде всего на отстранение от индуцированной намагниченности, а также на замену предельных характеристик (J_{rs} , H_{cr}) или их дополнение параметрами, описывающими весь процесс намагничивания. Так, была предпринята попытка использовать не величину J_{rs}/J_s , а функцию $J_r/J = f(H)$, т.е. поведение отношения необратимой части намагниченности к полной с ростом намагничивающего поля H [5]. Пока эта попытка не получила развития и апробации.

Значительно повысилась эффективность диагностики ДС в результате разработки термоманитного (ТМ) критерия, основанного на невыполнении третьего закона Телье для МД-частиц в отличие от ОД-частиц [6]. Вскоре за этим был предложен и безнагревный метод, основанный на том, что конфигурации изолиний магнитной плотности на диаграмме Прейсаха (ДП) для ансамблей МД- и ОД-частиц резко различны. В це-

лях диагностики ДС использовалось либо непосредственно построение диаграммы, либо - в более простом варианте - определение характеристических параметров F и F' области занятости диаграммы [7,8]. Аналог второго варианта содержался и в работе [4]. ТМ-метод и метод ДП отличаются высокой разрешающей способностью, установленной при их опробовании на ансамблях "чисто МД-" и "чисто ОД-" частиц. Так, например, значения параметра F в этих случаях различаются на порядок и более. Можно считать, что оба метода свободны не только от влияния парамагнитных и суперпарамагнитных минералов, но в значительной мере и от влияния концентрационного фактора, особенно ТМ-метод. Кроме того, построение ДП позволяет диагностировать смесь МД- и ОД-зерен. Показательный пример этого содержится в работе [7]. Подобную задачу призван решать более оперативным путем недавно предложенный метод [9]. К сожалению, этот метод пока не получил достаточной практической проверки, включающей в себя такие элементы, как опробование на синтезированных МД- и ОД-зернах и сопоставление с результатами по ТМ-критерию и анализу ДП.

Вообще следует заметить, что некоторые предложения новых критериев ДС грешат отсутствием четких сопоставлений результатов их применения с данными, полученными другими методами на этих же объектах. Иногда авторов этих предложений не смущает возврат к использованию индуцированной намагниченности [10,11].

Оценивая создавшуюся ситуацию, можно прийти к выводу о необходимости применения в целях магнитной диагностики ДС при исследовании горных пород некоторого комплекса методов, о чем говорилось уже в работе [3]. Этот принцип по возможности выдерживался при разработке методов, связанных с диаграммой Прейзаха [7, 8]. Однако в последнее десятилетие, насколько известно авторам, не появилось ни одного примера практического применения достаточно емкого комплекса в целях идентификации ДС ферромагнитных компонентов горных пород.

Из применяемых методов лишь ТМ-метод (критерий) ориентированна прямое решение вопроса о присутствии достаточно развитой многодоменной структуры. Предпринятые нами исследования метастабильности ДС многодоменного магнетита и термомагнитных эффектов ее перестройки [12, 13], привели к возможности дополнения ТМ-метода рядом других термомагнитных тестов.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Приводимые в настоящей статье результаты получены на образцах горных пород, неодно-

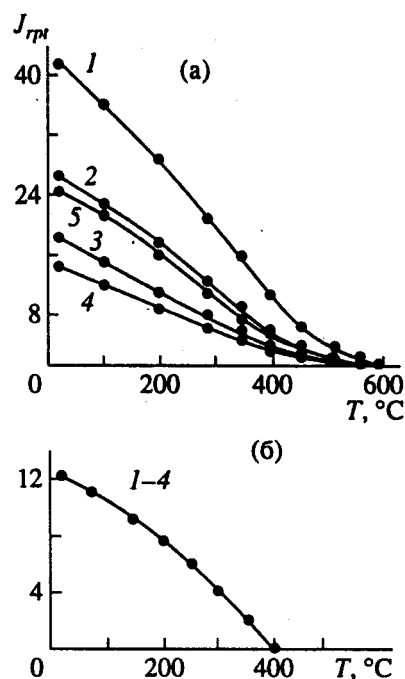


Рис. 1. Температурное разрушение $J_{гр}(400/20)$, созданной в поле 1 Э, при различных способах подхода к верхней температуре: 1 – охлаждение от 600°C (состояние АНС₄₀₀); 2 – нагрев до 400°C с последующим воздействием переменного поля с убывающей амплитудой от 2 кЭ до нуля (состояние НС₄₀₀); 3 – охлаждение от 600 до 20°C и последующий нагрев до 400°C (состояние АНС₂₀ → 400); 4 – нагрев до 400°C из исходного НС (состояние НС₂₀ → 400); 5 – охлаждение до 200°C из исходного АНС₄₀₀, затем нагрев до 500°C и охлаждение до 400°C (АНС₄₀₀ → 200, 500). Обозначения магнитных состояний заимствованы из [13]; (а) – обр. П-2; (б) – обр. 42. Здесь и далее намагниченность в условных единицах.

кратно подвергшихся в лаборатории нагреву до 620°C и к началу исследований не изменяющих своих основных магнитных характеристик в результате каждого последующего нагрева более чем в пределах погрешности измерений. В дальнейшем температура образца не превышала 620°C. Таким образом была обеспечена возможность использовать в качестве опорных два метода диагностики ДС, получивших наибольшее признание - ТМ-метод, к недостаткам которого относят опасность изменения ферромагнитных компонентов/при нагреве, и метод построения ДП, дефектов которого считается трудоемкость. Многие из исследованных затем характеристик обычно иллюстрируются графически, однако, в этом случае полученный материал превысил бы разумные размеры статьи. Поэтому была принята табличная форма отражения этого материала с приведением отдельных графических иллюстраций в качестве примеров, разъясняющих цифровые данные таблицы.

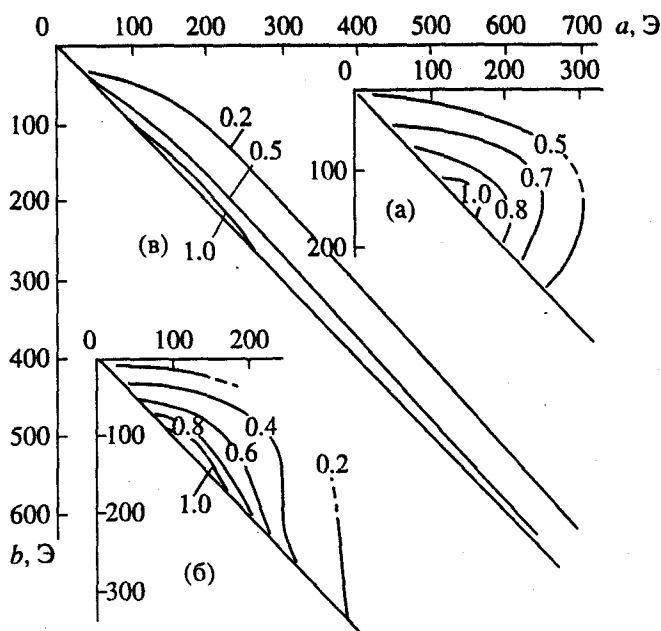


Рис. 2. Диаграммы Прейзаха образцов 26 (а), 302 (б) и 21 (в).

Во второй графе таблицы приведена величина остатка парциальной термоостаточной намагниченности $J_{pi}(T_x/20)$ при нагреве образца до верхней температуры, T_x , в процентах исходной (при 20°C) величины, здесь же указана температура T_x . Как видно, образцы четко разделились на две группы – согласно использованному критерию, на МД- и ОД-группы. Нелишне отметить, что J_{pi} создавалась неоднократно, при разных способах подхода к T_x , примеры чего приведены на рис. 1. Указанный в таблице “остаток” относится к случаю, когда J_{pi} создавалась способом “сверху”, т.е. когда T_x достигалась охлаждением от 620°C – исходное абсолютное нулевое состояние АНС $_{T_x}$. Третья графа сопоставляет величину этой J_{pi} с величиной J_{pi}^* , полученной способом “снизу”, т.е. из исходного состояния АНС $_{20} \rightarrow T_x$. Результаты (рис. 1) согласуются с представлением о сильной зависимости J_{pi} от способа ее образования для МД-образцов и, напротив, с безразличием J_{pi} ОД-образцов к температурной предыстории. (Абсолютная погрешность определений не превышает 0.02 указанных условных единиц.)

В следующей графе мы прибегли к вынужденному в условиях табличной иллюстрации подразделению ДП на три основных типа (рис. 2). Первый тип характеризует распределение магнитной плотности в ансамбле МД-частиц, цифрой 2 обозначен тип ДП, на которой можно видеть тенденцию к вытянутости изолиний вдоль диагонали, тип 3 несомненно соответствует ансамблю взаи-

модействующих ОД-частиц. Параметры F и F' еще раз подтверждают четкое разделение образцов на две группы. Приняв это разделение, основанное на хорошей согласованности основных критериев ДС, рассмотрим результаты исследований, отраженные в следующих графах таблицы, ограничившись пока простой констатацией этих результатов и пояснениями к методике.

Графа “Тип КС” заполнена на основе подразделения коэрцитивных спектров образцов из исходных АНС $_{20}$ и нулевого состояния НС $_{20}$ на три типа, из которых первый оказывается достаточно жестко связанным с МД-структурой. Рис. 3а иллюстрирует признаки этого типа: параллельность спектров АНС и НС в области Рэлея, пересечение в полях, мало превышающих H_m , величину параметра $N_T > 0.25$. Основное отличие второго типа (рис. 3б) состоит в существенно меньшей величине N_T . При этом пересечение спектров чаще всего отодвинуто от H_m в сторону больших H , а спад dJ/dH при $H > H_m$ происходит более медленно. Третий тип (рис. 3в) прежде всего, непригоден для определения N_T , различие спектров АНС и НС наблюдается на участке их параллельности оси абсцисс или очень медленного спада значений dJ/dH . Типы 2 и 3 характеризуют группу ОД-образцов.

Крайне интересным оказалось разделение образцов по соотношению КС, полученных при 300°C при разных способах подхода к этой температуре. Здесь можно говорить лишь о двух типах КС. Соотношение КС МД-образцов в этом случае представлено на рис. 3г. Кроме состояний

Таблица

№ обр.	П-2	26	1848	302	428	23	21	42	46
$T_c, ^\circ\text{C}$	580	540	500	580	400	540	560	620	580
ТМ-критерий	20	19	20	15	15	0	0	0	0
	400	350	350	450	300	350	350	400	400
J_{rpt}/J_{rpt}^*	3.04	2.1	2.0	1.6	1.3	1.02	0.99	1.00	1.00
Тип ДП	1	1	1	2	1	3	3	3	3
F	0.40	0.46	0.55	—	—	0.05	0.02	0.03	0.09
F'	0.32	0.45	0.36	0.35	0.35	0.04	0.09	0.05	0.04
Тип КС	1	1	1	1	1	3	3	2	2
N_T	0.45	0.50	0.43	0.45	0.50	—	—	0.17	0.17
Тип КС при 300°С	1	1	1	1	1	2	2	2	2
J_{rv}/J_{rv}	3.06	1.5	2.0	2.0	1.7	0.98	0.98	1.00	1.00
Тип кривых охлаждения	1	1	2	3	2	3	3	3	3
$H_{cr}, \text{Э}$	100	240	235	190	195	390	1300	440	390
H_{cr}/H_c	2.5	2.2	1.65	1.7	1.85	3.0	5.1	2.2	1.9
J_{rs}/J_s	0.07	0.12	0.23	0.31	0.28	0.25	0.32	0.24	0.30
Критерий Л.—Ф.	2	1	1	1	—	2	1	1	1

АНС₃₀₀ (охлаждение от 620°С) и НС₃₀₀ в качестве исходных были получены состояния АНС₂₀ → 300 (нагрев до 300° С из АНС₂₀) и, аналогично, НС₂₀ → 300. Рис. 3г характеризует АНС₃₀₀ как обладающее наибольшей степенью метастабильности, затем метастабильность снижается в последовательности: АНС₂₀ → 300, НС₂₀ → 300, НС₃₀₀, как и следовало ожидать, согласно [12]. Что касается группы образцов, которые мы определили как однодоменные, то здесь результат получен довольно неожиданный: КС состояний АНС₃₀₀ и АНС₂₀ → 300 идентичны, НС₃₀₀ характеризуется наиболее трудным намагничиванием, состояние же НС₂₀ → 300 обнаруживает самую высокую степень метастабильности по отношению к НС₃₀₀.

В следующей графе отражен результат исследования так называемой термовязкой намагниченности, J_{rv} . Напомним, что J_{rv} формируется при повышении температуры образца в присутствии постоянного поля и обнаруживается путем сопоставления с изотермической вязкой намагниченностью J_{rv} , полученной за время, в течение которого проводится нагрев от T_0 до T_x , при любой температуре в пределах этого интервала, в том числе — максимальной. В соответствующей графе таблицы приведены отношения J_{rv}/J_{rv} , полученные следующим путем: образец при 20° С приводится в НС и в отсутствие поля нагревается до 350°С. При этой температуре определяется нормальная намагниченность в поле 5 Э (J_1) и остаточная намагниченность (J_2), получаемая в результате последующей выдержки образца в по-

ле в течение времени, равного времени нагрева: $J_2 - J_1 = J_{rv}$. Образец охлаждается и вновь приводится в НС, но нагрев осуществляется в присутствии поля; при достижении 350°С измеряется остаточная намагниченность (J_3). Эффект термовязкого намагничивания при этом определяется как $J_3 - J_1 = J_{rv}$. Как явствует из таблицы, для группы ОД-образцов характерно примерное равенство J_{rv} и J_{rv} , т.е. по существу отсутствие эффекта термовязкости; МД-образцы обнаруживают значительное превышение J_{rv} над J_{rv} .

Графа “тип кривых охлаждения” содержит сведения о характере изменений $J_{rpt}(T_c/T_x)$ при уменьшении температуры. Первый тип кривых соответствует монотонному спаду J_{rpt} (рис. 4) по мере охлаждения образца от нижней температуры ее образования T_x до 20°С. Вторым тип характеризуется немонотонностью и значением J_{rpt} при 20°С, близким к исходному; соответствие с ростом J_s при понижении T отсутствует. Наконец, кривые третьего типа иллюстрируют рост J_{rpt} , удовлетворительно согласующийся с ростом J_s . Завершает таблицу графа, в которой использовалась разбивка на типы экспериментальных кривых, полученных по методу Лаури—Фуллера [14]. Здесь цифра 1 означает, что с ростом постоянного поля H образования термоостаточной намагниченности J_n кривые разрушения J_n переменным полем, нормированные на значение J_n при $h = 0$, приближаются к таковым для J_n “сверху”.

К типу 2 мы отнесли кривые, которые обнаружили очень слабую зависимость от H и нерегулярный сдвиг с ростом H . Не было обнаружено сколь-

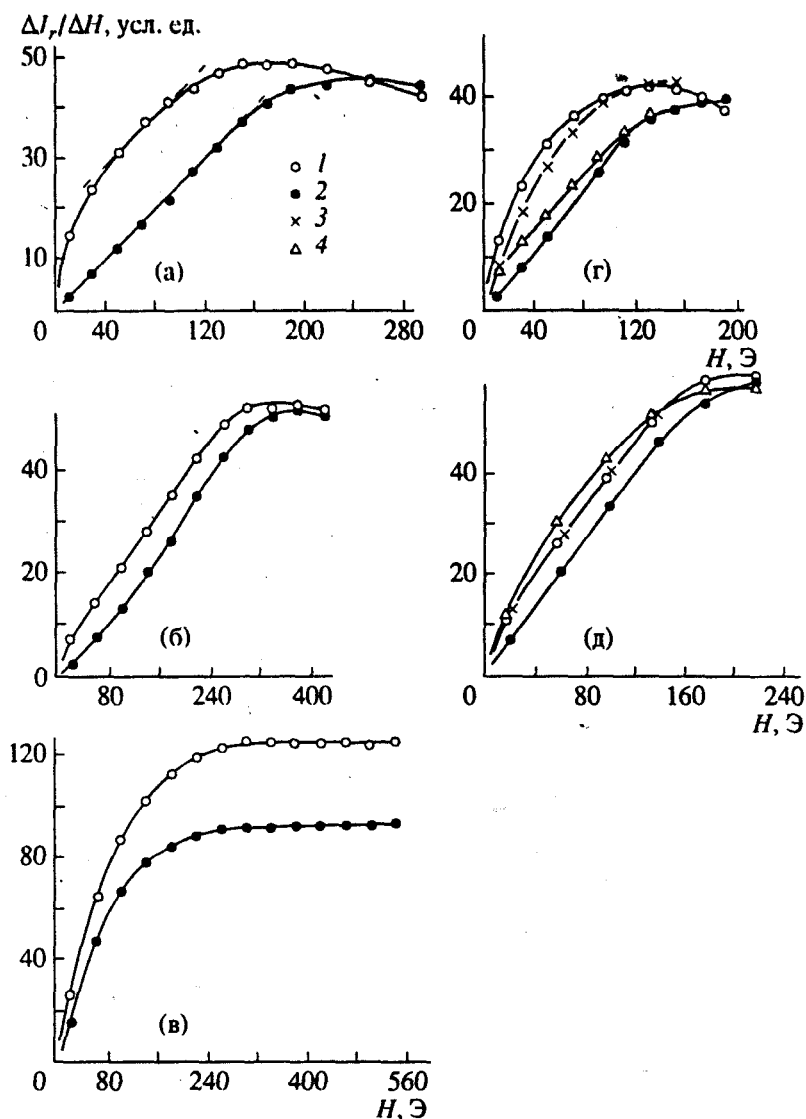


Рис. 3. Коэрцитивные спектры, полученные при 20°C (а, б, в) и при 300°C (г, д) для образцов 26 (а, г), 42 (б, д) и 21 (в). Исходные состояния: (а), (б), (в) – АНС₂₀ (1), НС₂₀ (2); г, д – АНС₃₀₀ (1), НС₃₀₀ (2), АНС₂₀ → 300 (3), НС₂₀ → 300 (4).

ко-нибудь заметного сближения кривых $J_r(h)$ и $J_n(h)$ “снизу”, т.е. одного из основных типов, на которых основан этот метод диагностики ДС.

ОБСУЖДЕНИЕ

Подведем некоторые итоги. В последних четырех графах таблицы приводятся результаты опробования тех критериев, которые, на наш взгляд, не следует использовать для диагностики ДС, во всяком случае – без привлечения хотя бы некоторых из исследований, отраженных в первой части таблицы. Наибольшей согласованностью с “опорными” критериями ДС из числа нереконструируемых обладает величина H_{cr} : максимальное значение в МД-группе образцов меньше минимального в ОД-группе. В целом же очевид-

но, что контрастность двух групп образцов по определениям первой части таблицы значительно выше, чем по характеристикам коэрцитивности, магнитной жесткости. Обратим, однако, внимание на обр. 302. Неожиданным кажется поведение J_{r1} этого образца при охлаждении в отсутствие поля; по этому признаку его следовало бы отнести к группе ОД-образцов. Заметим также, что тип ДП обр. 302 отклоняется от “чисто многодоменного”, что приводит к дилемме: псевдооднодоменные зерна или смесь МД- и ОД-зерен. (Не располагая достаточным опытом различения этих двух случаев по характеру ДП, мы не рискуем дать определенный ответ, хотя и считаем вариант ПОД-зерен более вероятным.) Обращает на себя внимание и величина J_{r1}/J_s , которая, при всей ее условности как критерия ДС, для МД-зе-

рен маловероятна. Нельзя исключить и тот случай, когда относительно небольшая примесь ОД-частиц в МД-образце оказывается ответственной за большую часть J_r (см. пример в [7]), что главным образом проявляется именно в характере изменений J_{gr} при понижении температуры, не подавляя других эффектов, связанных с перестройкой ДС МД-компоненты.

Обратимся к результатам определения КС образцов при исходных АНС и НС. Напомним, что характер КС МД-частиц в терминах ДП объясняется тем, что в процессе изменения температуры от T_c до комнатной формируется придиагональная полоса "перемешивания" положительно и отрицательно намагниченных фаз с удвоенной магнитной плотностью. В НС эта полоса отсутствует (точнее, резко уменьшает ширину). Такое различие определяет АНС как метастабильное, обеспечивающее более легкое намагничивание, чем НС. Физический смысл этого состоит в метастабильности МД-структуры и ее перестройке в процессе изменения температуры. Доводом в пользу такой интерпретации метастабильности, проявляющейся в КС МД-частиц, может служить прямая корреляция между степенью метастабильности магнитного состояния МД-частиц при различных способах подхода к некоторой температуре $T_x < T_c$ и величиной $J_{gr}(T_x/20)$ [12]. Так, из рис. 1а видно, что $J_{gr}(400/20)$ наибольшая, если 400°C были достигнуты охлаждением от T_c ; соответственно, мы будем иметь дело с наиболее метастабильным состоянием – АНС, спектр которого характеризуется наибольшим различием со спектром НС. Способы подхода к 400°C (2, 3, 4) приводят ко все большему снижению величины J_{gr} и, в той же последовательности, – к уменьшению различия спектров состояний, сформировавшихся при охлаждении, со спектром НС (рис. 3г).

Однако, нельзя было считать, что в пределах области, занимаемой на ДП ансамблем взаимодействующих ОД-частиц, не может возникнуть подобная полоса перемешивания частиц с противоположной ориентацией магнитных моментов. Напротив, было показано [1], что такая полоса присутствует и при НС, и – более широкая – при АНС такого ансамбля. Таким образом, мы вправе ожидать рассматриваемые различия КС в случае ОД-частиц, определяя эти различия как показатель метастабильности, но лишь в том случае, если плотность частиц в полосе перемешивания также повышена. По этому поводу авторы [1] справедливо замечают, что пока еще далеко не достаточно изучены ни вопрос о механизме, приводящем к метастабильности ансамблей ОД-зерен, ни сам характер КС образцов с заведомо ОД-частицами. Очевидно только, что эта метастабильность (переориентация моментов частиц как целого) должна иметь иную природу, чем метастабильность МД-частиц (метастабильность ДС).

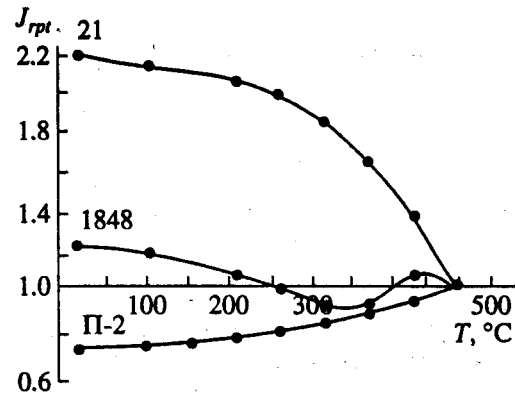


Рис. 4. Изменения $J_{gr}(600/450)$ при охлаждении образца в отсутствие поля – приведение к исходному, при 450°C, значению.

Поэтому нельзя ожидать и тесной связи J_{gr} ОД-частиц с метастабильностью того или иного магнитного состояния. Напомним, что применительно к ОД-частицам понятие метастабильности имеет и совершенно иной смысл, описывая возможные переходы ОД состояния в двух-, трех- доменные или более сложные структуры.

Сам факт, что некоторые образцы при одних исследованиях ведут себя как однодоменные, при других – как многодоменные, показывает, что в представленном комплексе различные методы обладают разной чувствительностью (или избирательностью) по отношению к МД- и ОД-компонентам смеси. В конкретизации подобной избирательности состоит одна из задач дальнейших исследований.

Разумеется, термомагнитные эффекты, прямо связанные с перестройкой ДС в пределах многодоменного состояния, могут быть использованы для диагностики ДС значительно шире, чем это представлено в настоящей статье. Однако преимущественная роль в этой диагностике с точки зрения практики должна все-таки принадлежать безнагревным методам. Не следует, например, забывать о весьма перспективном, но, к сожалению, лишь "промелькнувшем" в отдельных работах коэффициенте K , применение которого основано на принципиальном различии механизмов магнитной вязкости ансамблей МД- и ОД-частиц – соответственно, диффузионного и термо-флуктуационного [7, 8, 15]. Кроме того, расширение комплекса методов возможно на базе детального изучения процессов дезаккомодации и метастабильности магнитных состояний во времени, о которых сообщалось в работе [16] и которые протекают различным образом в МД- и ОД-зернах. Весьма важной явилась бы и достаточная апробация метода, предложенного в [9], поскольку он

претендует на количественную оценку относительного содержания фаз с различной ДС в их смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Щербаков В.П., Ламаш Б.Е., Щербакова В.В.* Физика магнетизма горных пород. М.: Наука, 1991. 186с.
2. *Каримов Ф.Х.* Магнитная структура и свойства ферромагнитных частиц. Обзорная информация. Душанбе: Таджик НИИТИ, 1991. 24 с.
3. *Щербаков В.П., Щербакова В.В.* Критерии идентификации доменной структуры ферромагнитных зерен в минералах горных пород. Решение географических задач геомагнитными методами. М.: Наука, 1980. С. 136-148.
4. *Ясонов П.Г.* Методика магнитно-минералогических исследований: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Казань: Казанский Гос. Университет, 1980. 172 с.
5. *Старунов В.А.* Об использовании величины J^*J , в магнетизме горных пород // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1983. № 1. С. 80-81.
6. *Большаков А.С., Щербакова В.В.* Термомагнитный критерий определения доменной структуры ферромагнетиков // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1972. № 2. С. 38-47.
7. *Иванов В.А., Хабурзания И.А., Шолпо Л.Е.* Использование диаграммы Преайзаха для диагностики одно- и многодоменных зерен в образцах горных пород // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1981. № 1. С. 55-65.
8. *Иванов В.А., Шолпо Л.Е.* Количественные критерии одно- и многодоменных состояний ферромагнитных минералов горных пород // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1982. № 8. С. 84-90.
9. *Герник В.В.* Диагностика доменной структуры носителей остаточной намагниченности // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1987. № 12. С. 93-101.
10. *Большаков В.А., Виноградов Ю.К.* О безнагревных методах определения доменной структуры // Исследования в области палеомагнетизма и магнетизма горных пород. М.: Наука, 1989. С. 55-72.
11. *Гончаров И.Л.* Использование индуктивной РРМ в палеомагнетизме // Палеомагнетизм докембрия и раннего палеозоя. Киев: Наукова Думка, 1992. С. 164-174.
12. *Шолпо Л.Е., Иванов В.А., Борисова Г.П.* Метастабильность доменной структуры магнетита. I, II. М.: ИЗМИРАН, 1989. 23 с. (Препринт № 25(851)), 25 с. (Препринт № 26(852)).
13. *Шолпо Л.Е., Иванов В.А., Борисова Г.П.* Термомагнитные эффекты перестройки доменной структуры // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1991. № 7. С. 119-128.
14. *Lowrie W., Fuller M.* On the alternating field demagnetization characteristics of multidomain thermoremanence in magnetite // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 6339-6349.
15. *Иванов В.А.* Температурная зависимость магнитных свойств магнетитсодержащих горных пород. Дис. канд. физ.-мат. наук. М., 1978. 119 с.
16. *Шолпо Л.Е., Лузянина Э.Н.* Проявления метастабильности доменной структуры ферромагнитных минералов // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1974. № 7. С. 64-71.

Сдано в набор 03.02.97 г.

Подписано к печати 31.03.97 г.

Формат бумаги 60 x 88 Vg

Офсетная печать

Усл. печ.д. 12,5

Усл. кр.-отт. 5,1

Уч.-изд. л. 11,5

Бум. л. 6,0

Тираж 396

Зак. 1605