

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ
НА ПАРАМЕТРЫ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ, С ПОМОЩЬЮ
МАГНИТОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

И. Г. Проценко, Ю. А. Брусенцов, И. С. Филатов

*Кафедра «Материалы и технология», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;
iliaprocenko@rambler.ru*

Ключевые слова: α' -фаза; акустическая эмиссия; дисперсность выделений; критическая температура; магнитостатическая энергия; магнитотвердые материалы; магнитоупругая энергия; размагничивающий фактор.

Аннотация: Рассмотрены результаты исследования магнитоупругой акустической эмиссии, возникающей в процессе контролируемого медленного охлаждения образца магнитотвердого материала из однофазной области в присутствии магнитного поля. Проведен анализ экспериментальных данных, по результатам которого сделан вывод о том, что наблюдаемые в результате охлаждения всплески активности магнитоупругой акустической эмиссии вызваны формированием микроструктуры магнитного материала. Установлено, что в верхнем температурном интервале происходит формирование зародышей частиц сильномагнитной фазы, число которых находится в зависимости от величины активности акустической эмиссии. Выявлено, что в нижнем температурном интервале, в процессе дораспада, параметр сигнала акустической эмиссии находится в корреляции от энергии, выделяющейся в процессе роста частиц, их укрупнения, а также формирования структуры под действием магнитного поля.

Постоянные магниты используются в качестве источников магнитных полей, являющихся важными элементами различных устройств во многих областях науки и техники – от электроники и медицины до пищевой и горнодобывающей промышленности.

Для изготовления постоянных магнитов используются магнитотвердые материалы – ферромагнетики с широкой петлей гистерезиса, коэрцитивная сила H_c которых находится в пределах $5 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^6$ кА/м, и с максимальной магнитной энергией в пределах $0,5 \dots 300$ кДж/м³ [1]. Как правило, высококоэрцитивные материалы принято классифицировать по способу производства и компонентам сплава.

Наиболее востребованными вследствие технологичности и доступности материалов являются литые и порошковые магнитные материалы на основе сплавов Fe-Ni-Al-Co, легированные медью, титаном, ниобием и другими химическими элементами. Отличительной особенностью данных материалов является высокая температурная и временная стабильность магнитных параметров при различных эксплуатационных воздействиях.

Известно [2, 3], что дисперсионно твердеющие сплавы на основе Fe-Ni-Al-Co обязаны своим высококоэрцитивным свойствам наличию в них после контроли-

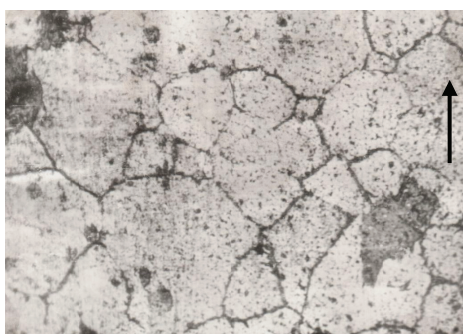


Рис. 1. Микроструктура магнитотвердого сплава на основе Fe-Ni-Al-Co после термомагнитной обработки, $\times 900$:
внутри зерен α -фазы (светлый фон) наблюдаются выделения ферромагнитной α' -фазы (черные точечные включения), расположенной перпендикулярно направлению магнитного поля

руемого и относительно медленного охлаждения со скоростью порядка 10...15 °/мин двухфазной структуры. Она состоит из сильномагнитных однодоменных и анизотропных по форме α' -частиц, изолированных одна от другой (в магнитном смысле) слабомагнитной матрицей, состоящей из α -фазы (рис. 1, стрелкой указано направление приложения магнитного поля).

При термической обработке II типа наблюдается процесс разложения однофазного твердого раствора, носящий двухступенчатый характер, сопровождающийся собственно распадом и дораспадом в нижнем интервале температур.

Наряду с образованием двухфазной структуры на величину магнитных параметров сплавов альнико с повышенным содержанием кобальта существенное влияние оказывает термическая обработка в присутствии магнитного поля [4]. Эффект термомагнитной обработки приводит к тому, что в материале возникает внешняя или индуцированная анизотропия, вызванная магнитостатической энергией, дополнительно к анизотропии, существующей в материале первоначально. Образующаяся однонаправленная двухфазная структура характеризуется тетрагональными искажениями. Особенность измененной решетки заключается в том, что оси выделений α' -фазы параллельны направлению магнитного поля, действующего при магнитной обработке [5, 6].

При охлаждении в магнитном поле сплавов на основе Fe-Ni-Al-Co на формирование геометрии высокомагнитных частиц и ориентацию их длинных осей оказывает влияние упругая, поверхностная и магнитостатическая энергии. Так, упругая энергия находится во взаимосвязи со структурой и определяется относительной разницей параметров фаз, образующихся в результате распада. Роль магнитного поля, а следовательно и магнитостатической энергии, заключается в выделении одного из направлений легчайшего намагничивания, при этом ориентация вдоль него более выгодна в энергетическом смысле, чем вдоль двух других. Таким образом, в магнитотвердых сплавах альнико магнитостатическая энергия отклоняет выделения α' -фазы от тетрагональных направлений в сторону направления магнитного поля. Наряду с этим анизотропия форм частиц и их размеры определяются главным образом величиной упругой энергии.

Очевидно, что в состоянии с максимальной коэрцитивной силой α' -фаза присутствует в виде мелкодисперсных анизотропных по форме стержневидных образований, диаметром в несколько сотен ангстрем и длиной около 1000Å, что приводит к однодоменной структуре. Наличие высококоэрцитивных частиц α' -фазы, определяет процесс вращения вектора намагниченности, что обуславливает в сочетании с анизотропией формы областей, большое значение коэрцитивной силы сплавов альнико, порядка 40...60 кА/м.

Размер (диаметр) частиц D магнитной фазы в направлении, перпендикулярном вектору намагниченности, должен удовлетворять условиям неравенств [1, 5]

$$D_{\min} < D < D_0,$$

где D_{\min} – минимальный размер частиц; D_0 – критический поперечный размер в случае однодоменного поведения частиц.

Теоретически показано [1], что коэрцитивная сила группы однодоменных частиц при их параллельном расположении

$$H_c = (N_{\parallel} - N_{\perp}) I_s = \Delta N I_s,$$

где $\Delta N = (N_{\parallel} - N_{\perp})$ – разность размагничивающих факторов вдоль и поперек однодоменной частицы; I_s – намагниченность насыщения частицы.

Таким образом, на величину коэрцитивной силы в магнитотвердых сплавах на основе Fe-Ni-Al-Co большое влияние оказывает разность размагничивающих факторов частиц сильномагнитной α' -фазы, определяющихся геометрическими размерами выделений.

На форму частиц оказывает влияние тип термомагнитной обработки. Особенностью обработки II типа является то, что она позволяет получать структуру с примерно одинаковыми по размеру выделениями. При обработке I типа структура обладает широкой дисперсностью, что негативно сказывается на формировании высококоэрцитивного состояния.

Анализируя факторы, влияющие на формирование высококоэрцитивного состояния сплавов альнико можно сделать предположение о том, что контролируя величину размеров сильномагнитных выделений α' -фазы в процессе высокотемпературного распада, можно добиться высоких значений характеристик постоянных магнитов.

В качестве одного из способов косвенного контроля дисперсности выделений высококоэрцитивной фазы в процессе термомагнитной обработки может быть использован метод акустической эмиссии, заключающийся в генерации магнитотвердым сплавом собственных акустических сигналов в процессе перестройки структуры материала.

На параметры акустической эмиссии при высокотемпературном распаде α' -фазы будут оказывать влияние процессы, связанные с ростом частиц высококоэрцитивной α' -фазы в направлении магнитного поля, обусловленного влиянием магнитостатической и поверхностной энергий. Помимо этого, процессы генерации собственных акустических колебаний взаимосвязаны с упругой энергией взаимодействия высококоэрцитивной фазы со слабомагнитной основой из-за поворота вектора спонтанной намагниченности под действием поля на угол 180° .

В работе применен метод акустической эмиссии, или его частного случая – магнитоупругой акустической эмиссии (эффект Баркгаузена), для исследования кинетики образования сильномагнитных частиц α' -фазы в процессе высокотемпературной термомагнитной обработки.

Для достижения поставленной цели разработана экспериментальная установка, структурная схема которой приведена на рис. 2. Исследуе-

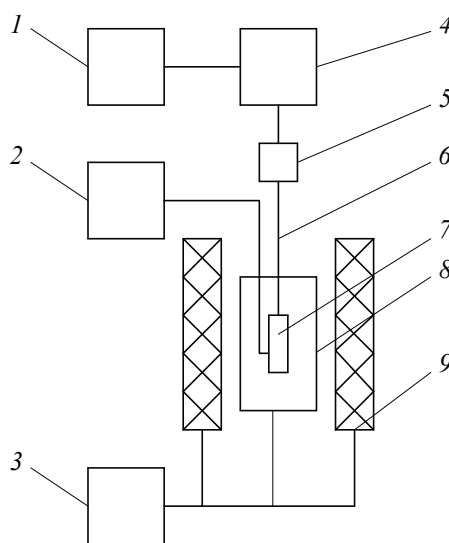


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки для изучения магнитоупругой акустической эмиссии магнитотвердых материалов:
 1 – блок обработки сигналов акустической эмиссии; 2 – блок регистрации температуры; 3 – лабораторный автотрансформатор; 4 – усилитель; 5 – пьезокристаллический датчик; 6 – волновод; 7 – образец; 8 – трубчатая печь; 9 – электромагнит

мый образец из магнитотвердого материала ЮНДК24 с геометрическими размерами $10 \times 10 \times 5$ мм соединялся с волноводом, выполненным из аустенитной нержавеющей стали, и фиксировался внутри трубчатой печи, расположенной между полюсами электромагнита.

Задавая с помощью лабораторного автотрансформатора скорости нагрева и охлаждения образца и величину напряженности магнитного поля электромагнита, моделировались условия высокотемпературной термомагнитной обработки II типа.

Выход волновода крепился к калиброванному высокочувствительному пьезокерамическому датчику акустической эмиссии на основе пьезокерамики ЦТС-19, выполненному совместно с предварительным усилителем. Данная конструкция позволяет размещать датчик на значительном расстоянии от основного усилителя. Для улучшения акустического контакта датчика и волновода торцевая поверхность последнего смазывалась вакуумным маслом.

Наблюдение результатов эксперимента проводилось с помощью блока обработки сигналов акустической эмиссии, позволяющего анализировать поток сигналов, основными параметрами которых являются: время регистрации импульса от начала эксперимента t , с; длительность импульса τ , с; активность акустических импульсов, зарегистрированных с начала эксперимента N' ; активность амплитуды импульса U_m . Помимо этого, осуществлялся анализ спектра каждого акустического импульса с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье.

Для исследования кинетики образования сильномагнитных выделений α' -фазы, исследуемый образец помещался в трубчатую муфельную печь и нагревался в ней до 900 °С, после чего при данной температуре проводилась выдержка в течение $15 \dots 20$ мин, в целях образования однофазной структуры. После этого, изменяя питание трубчатой печи, проводился процесс охлаждения образца со скоростью 10 °/мин до температуры 600 °С в магнитном поле, индуцированном электромагнитом, напряженностью 120 кА/м.

В процессе охлаждения зарегистрированы и преобразованы сигналы акустической эмиссии, графическая интерпретация которых представлена на рис. 3. Максимальное значение коэрцитивной силы наблюдается в случае последовательного распада сначала в верхнем ($850 \dots 800$ °С) и затем нижнем ($700 \dots 650$ °С) температурных интервалах [5].

Учитывая данную особенность режима термомагнитной обработки можно сделать следующие предположения о причинах возникновения акустической эмиссии в магнитотвердых материалах ЮНДК24. В процессе распада в верхнем

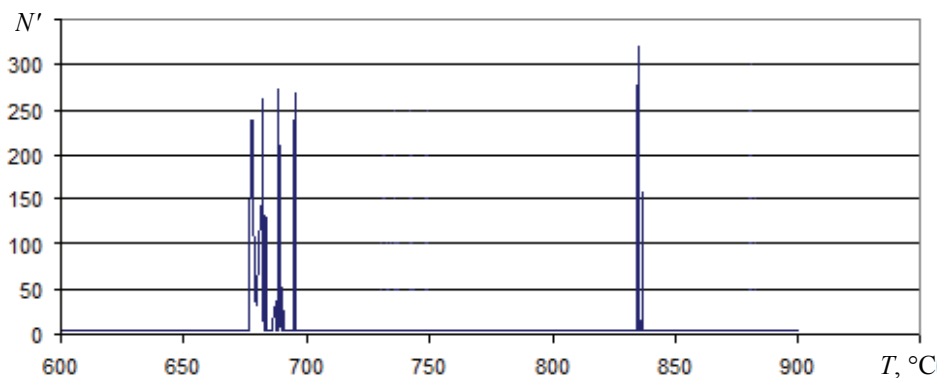


Рис. 3. Зависимость активности магнитоупругой акустической эмиссии N' от температуры T охлаждения образца

температурном интервале происходит зарождение сильномагнитной α' -фазы. При условии охлаждения с критической скоростью наблюдается большое число зародышей частиц. Если интервал температур их образования достаточно мал, то это способствует небольшой дисперсности и в процессе выделения частиц высококоэрцитивной фазы возникает сильнонапряженное состояние, связанное с тетрагональным искажением фаз.

Таким образом, всплеск активности акустической эмиссии в верхнем температурном интервале объясняется зарождением частиц сильномагнитной фазы и находится в зависимости от упругой энергии образца, причем интенсивность данных всплесков объясняется числом зарождаемых центров кристаллизации.

При последующем охлаждении во втором температурном интервале, за счет наличия дисперсности выделений и сильнонапряженного состояния наблюдается дораспад уже частично распавшегося α -твердого раствора. В ходе данного процесса происходит формирование конечной структуры магнитотвердых сплавов альнико.

На первоначальном этапе происходит формирование однодоменной структуры, заключающееся в медленном росте частиц ферромагнитной фазы в процессе охлаждения под действием упругих сил, возникающих в процессе тетрагонального искажения фаз распада. Однодоменные частицы характеризуются наличием вектора спонтанной намагниченности, увеличивающегося в процессе роста самой частицы. При наличии магнитной анизотропии, индуцированной магнитным полем, происходит изменение направления вектора намагниченности однодоменной частицы, что приводит к ее ориентации в направлении поля. После выравнивания частиц по полю наблюдается их последующий рост, обусловленный снижением влияния магнитной и упругой энергий на магнитотвердый материал.

В результате данной перестройки происходит генерация магнитоупругой акустической эмиссии, что регистрируется измерительным устройством. Величина всплесков активности сигнала находится в тесной взаимосвязи с энергией, выделяющейся в процессе намагничивания и роста выделений сильномагнитной фазы.

Таким образом, при использовании метода акустической эмиссии может быть реализован способ экспресс-контроля технологических параметров изготовления постоянных магнитов. В дальнейшем планируется проведение экспериментов по выявлению взаимосвязи параметров этапов термомагнитной обработки с величиной магнитоупругой акустической эмиссии, структурой и магнитной энергией сплавов альнико.

Список литературы

1. Бозорт, Р. Ферромагнетизм : пер. с англ. / Р. Бозорт ; под ред. Е. И. Кондорского, Б. Г. Лившица. – М. : Изд-во иностр. лит., 1956. – 786 с.
2. Гудремон, Э. Специальные стали : пер. с нем. В 2 т. Т. 1. / Э. Гудремон. – М. : Metallurgizdat, 1959. – 953 с.
3. Лифшиц, Б. Г. Высококоэрцитивные сплавы / Б. Г. Лифшиц, В. С. Львов. – М. : Metallurgia, 1960. – 176 с.
4. Ермоленко, А. С. О механизме термомагнитной обработки высококоэрцитивных сплавов типа альни и альнико / А. С. Ермоленко, Я. С. Шур // Физика металлов и металловедение. – 1962. – Т. 14, вып. 3. – С. 348 – 357.
5. Довгалецкий, Я. М. Легирование и термическая обработка магнитотвердых сплавов / Я. М. Довгалецкий. – М. : Metallurgia, 1971. – 176 с.
6. Брусенцов, Ю. А. Исследование структуры и свойств порошковых сплавов / Ю. А. Брусенцов, А. М. Минаев // Вестн. Тамб. гос техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 1Б. – С. 228 – 233.

Determination of Structural Factors Influencing Parameters of Permanent Magnets Using Magnetoacoustic Emission

I. G. Protsenko, Yu. A. Brusentsov, I. S. Filatov

Department "Materials and Technologies", TSTU;
iliaprocenko@rambler.ru

Keywords: acoustic emission; critical temperature; demagnetization factor; magnetic materials; magnetoelastic energy; magnetostatic energy; α' -phase dispersion of precipitates.

Abstract: Magnetic materials based on iron – nickel – aluminum – cobalt alloys are used in many fields of science and technology, owing to their high performance and magnetic characteristics. High coercive force is caused by controlled and relatively slow cooling from the single phase region in the presence of a magnetic field, a two-phase structure consisting of single-domain and anisotropic in shape formations, isolated in a magnetic sense, weakly magnetic matrix. The paper describes the results of the study of magnetoelastic acoustic emission arising in the course of the controlled slow cooling of the sample magnetic material from phase region in the presence of a magnetic field. The analysis of experimental data brought us to the conclusion that bursts of activity of magnetoelastic acoustic emission observed after cooling are caused by the formation of the microstructure of the magnetic material. It was found that in the upper temperature range the formation of germ particles of strongly magnetic phase was observed, the number of which was dependent on the activity of acoustic emission. In addition, it was found that in the lower temperature range, in the process before the collapse the parameter of acoustic emission signal was in correlation to the energy released in the process of growth of the particles, their enlargement, as well as the formation of the structure under the influence of the magnetic field.

References

1. Bozorth R.M. *Ferromagnetism*, Toronto, New York, London : D. Van Nostrand Company, Inc, 1951, 968 p.
2. Houdremont, E. *Handbuch der Sonderstahlkunde* (Manual of special steel customer), Berlin, Springer-Verl., Dusseldorf, Verl. Stahleisen, 1956.
3. Lifshits B.G., L'vov V.S. *Vysokokoertsitivnye splavy* (High-coercivity alloys), Moscow: Metallurgiya, 1960, 176 p.
4. Ermolenko A.S., Shur Ya.S. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1962, vol. 14, issue 3, pp. 348-357.
5. Dovgalevskii Ya.M. *Legirovanie i termicheskaya obrabotka magnitotverdykh splavov* (Alloying and heat treatment of magnetic alloys), Moscow: Metallurgiya, 1971, 176 p.
6. Brusentsov Yu.A., Minaev A.M. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2004, vol. 10, no. 1B, pp. 228-233.

Bestimmung der Struktur Faktoren, die die Parameter der Dauermagneten beeinflussen, mit Hilfe der magnetakustischen Emission

Zusammenfassung: Im Artikel sind die Ergebnisse der Untersuchung der magnetoelastischen akustischen Emission, die im Prozess der kontrollierenden langsamen Abkühlung des Musters des Dauermagnetwerkstoffes aus dem einphasigen

Gebiet in Anwesenheit vom Magnetfeld entsteht, betrachtet. Es ist die Analyse der experimentellen Angaben durchgeführt. Als Ergebnis wurden die Konsequenzen gezogen, dass die im Laufe der Abkühlung beobachtenden Aktivitätsausbrüche der magnetelastischen akustischen Emission von der Formierung der Mikrostruktur des Magnetstoffes hervorgerufen sind. Es wurde festgestellt, dass im oberen Temperaturintervall die Formierung der Keimen der Teilchen der starkmagnetischen Phase geschieht, deren Zahl sich in Abhängigkeit von der Größe der Aktivität der akustischen Emission befindet. Es ist festgestellt, dass der Parameter des Signals der akustischen Emission im unteren Temperaturintervall im Prozess des Nachzerfalles sich in der Korrelation von der Energie befindet, die im Prozess des Anwachsens der Teilchen, ihrer Vergrößerung und auch der Formierung der Struktur unter der Einwirkung des Magnetfeldes entstanden ist.

Définition des facteurs structurels affectant sur les paramètres magnétiques des aimants permanents, avec l'aide de l'émission magnétique acoustique

Résumé: Cet article décrit les résultats d'une étude de l'émission magnétique élastique engagée dans un processus du refroidissement lent contrôlé d'un échantillon magnétique solide du domaine à une phase en présence d'un champ magnétique. Est effectuée une analyse des données expérimentales, à l'issue de laquelle est conclu que des éclats de l'activité magnétique élastique observés lors du refroidissement sont provoqués par la formation de la microstructure du matériau magnétique. Est constaté que dans le dernier intervalle de température au processus avant la désintégration le paramètre du signal de l'émission acoustique se trouve en corrélation de l'énergie libérée au cours de la croissance des particules, leur agrandissement, ainsi que la formation de la structure sous l'action d'un champ magnétique.

Авторы: *Проценко Илья Григорьевич* – аспирант кафедры «Материалы и технология»; *Брусенцов Юрий Анатольевич* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология»; *Филатов Иван Сергеевич* – магистрант кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Фесенко Александр Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение, электротехника и информационное обеспечение энергетических систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
