

УДК 620.179.14

**СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОАКУСТИЧЕКОЙ ЭМИССИИ В  
ФЕРРОМАГНЕТИКАХ**

*В. Н. КОСТИН, Е. Д. СЕРБИН, О. Н. ВАСИЛЕНКО*

ФГБУН «Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН»  
Екатеринбург, Россия

UDS 620.179.14

**STRUCTURALLY SENSITIVE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF  
MAGNETOACOUSTIC EMISSION IN FERROMAGNETS**

*V. N. KOSTIN, E. D. SERBIN, O. N. VASILENKO*

**Аннотация**

Исследованы характеристики магнитоакустической эмиссии (МАЭ) большой группы различающихся по физическим свойствам и размерам образцов металлических ферромагнетиков. Исследована структурная чувствительность таких параметров магнитоакустической эмиссии, как амплитуда и основная частота. Показано, что основная частота магнитоакустической эмиссии отожженных сталей меняется слабо и немонотонно, что делает проблематичным ее применение для контроля качества отжига. Зависимость амплитуды магнитоакустической эмиссии от частоты перемагничивающего поля имеет сходный немонотонный характер для большой группы различных по физико-химическим свойствам ферромагнетиков, при этом максимум амплитуды соответствует частоте поля 3–5 Гц. Установлено, что амплитудные и частотные параметры магнитоакустической эмиссии исследованных сталей коррелируют с их остаточной магнитной индукцией. Полученные результаты могут быть полезны при разработке магнитных и магнитоакустических методов контроля и диагностики.

**Ключевые слова:**

магнитоакустическая эмиссия, магнитоострикционная чувствительность, амплитуда, основная частота, частота перемагничивания, термическая обработка.

**Abstract**

The characteristics of magnetoacoustic emission (MAE) of a large group of metallic ferromagnets differing in the physical properties and dimensions of the samples were studied. The structural sensitivity of such parameters of magnetoacoustic emission as amplitude and fundamental frequency were studied. It is shown that the main frequency of magnetoacoustic emission of annealed steels varies weakly and nonmonotonely, which makes its application problematic for annealing quality testing. The dependence of the amplitude of magnetoacoustic emission on the frequency of the remagnetizing field has a similar nonmonotonic character for a large group of ferromagnets different in their physical and chemical properties, while a maximum of amplitude corresponding to a field frequency of 3-5 Hz. It is established that the amplitude and frequency parameters of the magnetoacoustic emission of the investigated steels corre-

late with their residual magnetic induction. The obtained results can be useful in the development of magnetic and magnetoacoustic methods of testing and diagnostics.

**Key words:**

magnetoacoustic emission, magnetostrictive sensitivity, amplitude, fundamental frequency, remagnetizing frequency, heat treatment.

Магнитоакустическая эмиссия представляет собой всю совокупность упругих колебаний, возникающих в ферромагнетике при его перемагничивании. Существует три основных механизма возникновения магнитоакустической эмиссии: магнестрикционный механизм, электро-магнитоакустическое преобразование (ЭМАП), упругие колебания, возникающие при необратимом смещении доменных границ (шум Баркгаузена). Механизм ЭМАП не проявляется при низких (единицы Гц) частотах перемагничивания из-за малости вихревых токов. Магнитоакустическая эмиссия несет информацию как о локальных магнестрикционных взаимодействиях, связанных с необратимыми смещениями 90-градусных доменных границ, так и о результирующем магнестрикционном изменении размеров ферромагнетика [1]. Сущность явления магнитоакустической эмиссии также описана в предыдущих работах авторов [2, 3].

Если рассматривать динамические процессы перестройки доменной структуры при перемагничивании ферромагнетика, то можно выделить различные размерные (например, площадь или длина пробега доменной границы), количественные (например, число одновременно смещающихся границ) и временные (время скачка Баркгаузена) характеристики, которые, естественно, будут проявляться на различных участках спектра упругих колебаний. Результирующий сигнал магнитоакустической эмиссии также зависит от переотражения упругих колебаний от границ ферромагнетика, т. е. параметры магнитоакустической эмиссии зависят от формы и размеров перемагничиваемого объекта [1, 2].

Все вышеуказанные особенности находят отражение в спектре магнитоакустической эмиссии. В предыдущей статье авторов [1] показано, что амплитуда гармоники с частотой, равной удвоенной частоте перемагничивания, пропорциональна линейной магнестрикционной чувствительности сплавов Fe-C, и что амплитуда данной гармоники пропорциональна протяженности ферромагнитного образца вдоль направления приложенного поля. В той же статье показано, что структурно-чувствительными параметрами магнитоакустической эмиссии могут быть основная частота и усредненная амплитуда сигнала магнитоакустической эмиссии.

Таким образом, задачей настоящей работы было исследование характеристик магнитоакустической эмиссии в ферромагнитных сталях с различной структурой и магнестрикционными свойствами с помощью широкополосных датчиков акустической эмиссии с целью выявления перспективных структурно-чувствительных параметров контроля материалов.

На образцах из трех марок сталей (сталь 10, 65Г и 95Х18) было проведено исследование влияния условий возбуждения на параметры магнитоакустической эмиссии в ферромагнетиках, различающихся по структурно-фазовому составу и, соответственно, по магнитным свойствам. Из данных сталей были изготовлены пластины размером  $4,6 \times 40,1 \times 90$  мм, которые затем были подвергнуты закалке и отпуску при различных температурах ( $T_{\text{зак}}$  и  $T_{\text{отп}}$  соответственно). Характеристики пластин приведены в табл. 1.

Табл. 1. Характеристики термообработанных стальных пластин

Материал	Обработка		Магнитные свойства			
	$T_{\text{зак}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{отп}}, ^\circ\text{C}$	$B_r, \text{T}$	$H_c, \text{A/cm}$	$\mu_{\text{max}}$	$B_{\text{max}}, \text{T}$
Сталь 10	930	400	1,08	8,89	531	2,12
Сталь 10	930	500	1,3	7,86	697	2,12
Сталь 10	930	600	1,52	5,95	942	2,11
65Г	870	200	0,925	32,3	153	1,68
65Г	870	400	1,45	14,4	556	2,05
65Г	870	600	1,55	13,6	563	2,00
95Х18	1070	200	0,525	74,5	37,0	1,01
95Х18	1070	550	0,826	27,8	165	1,46

Для исследования влияния формы и геометрических размеров ферромагнетиков на величину и характер магнитоакустической эмиссии из отожженного пермендюра (50 % Fe, 50 % Co) были изготовлены три образца: короткая прямоугольная пластина  $4,1 \times 40 \times 89$  мм (образец П1); длинная пластина размерами  $2 \times 8,9 \times 295$  мм (образец П2) и укороченная пластина размерами  $2 \times 9 \times 161$  мм (образец П3).

Для оценки влияния напряженно-деформированного состояния на сигнал МАЭ были выбраны образцы из сталей 20Г и 70Г, напряженно-деформированное состояние которых было проварьировано в широких пределах посредством холодной пластической деформации прокаткой до, соответственно, 40 и 63 % (по изменению сечения) и затем отжига при различных температурах в диапазоне от 20 до 800 °С в течение 1 часа с последующим охлаждением на воздухе. Затем образцы шлифовали для снятия окалины и обезуглероженного слоя. Конечные размеры образцов стали 20Г составили  $4 \times 10,2 \times 69$  мм, а стали 70Г –  $6 \times 9,5 \times 88$  мм.

Магнитные свойства вещества образцов были определены с помощью измерительного комплекса REMAGRAPH C-500 производства фирмы Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH, Германия. Погрешность измерения намагниченности не превышала 2 %, погрешность измерения поля – 1 %.

Перемагничивание исследуемых образцов проводилось в соленоиде на частотах 0,1–15 Гц синусоидальным током. Синусоидальный сигнал

вырабатывался прецизионным низкочастотным генератором ГЗ-110, усиливался специально разработанным усилителем мощности и подавался в соленоид. Максимальная амплитуда перемагничивающего поля составляла 160 А/см. Для уменьшения влияния поперечных сил в соленоиде образцы размещались на демпфирующей подкладке. Акустические колебания регистрировались широкополосными датчиками акустической эмиссии LD-11 и А-9 ЭЛТЕСТ. Более полное описание установки для возбуждения и регистрации магнитоакустической эмиссии можно найти в работах [2, 3].

На указанной установке были произведены магнитоакустические измерения с целью установления характера зависимости амплитуды МАЭ от частоты перемагничивания ( ) группы образцов с различным структурно-фазовым состоянием (см. табл. 1). Как видно из рис. 1, для всех образцов из сталей 10 и 95Х18 характерно наличие максимума на зависимости амплитуды МАЭ от частоты переменного поля. При уменьшении частоты поля ниже 0,5 Гц сигнал резко уменьшается до уровня шума. При увеличении частоты сигнал достаточно быстро уменьшается и при частоте 15 Гц и более также становится соизмерим с шумовым уровнем. Не монотонность зависимости амплитуды МАЭ от частоты переменного поля и “резонансная” частота МАЭ, приходящаяся на частоты 3–4 Гц, наблюдаются для всех образцов группы, несмотря на различия их физических свойств.

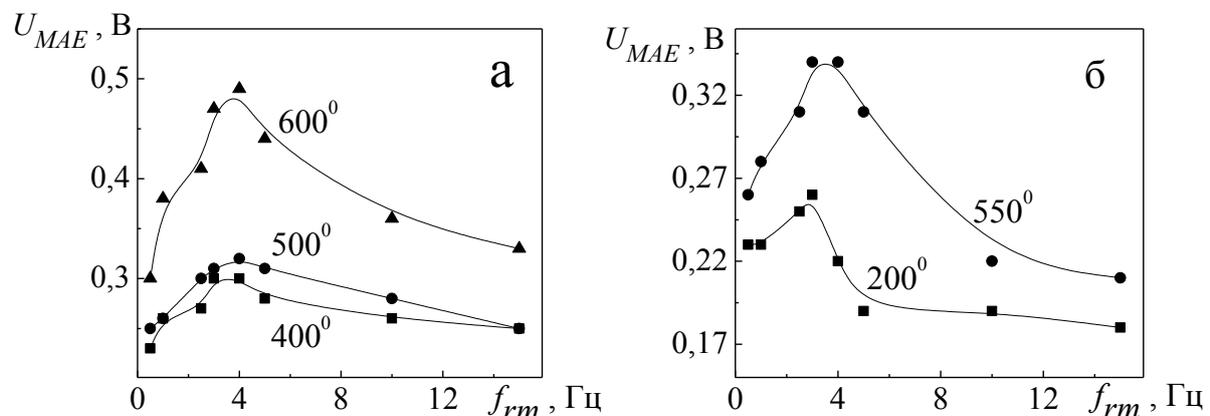


Рис. 1. Зависимость амплитуды МАЭ закаленных и отпущенных при различных температурах образцов из (а) стали 10 и (б) стали 95Х18 от частоты поля  $f_{rm}$ . Температуры отпуска отдельных образцов указаны в поле рисунка

В работе [1] в качестве одного из возможных структурно чувствительных параметров была предложена основная частота магнитоакустической эмиссии (т. е. частота гармоники с максимальной амплитудой и мощностью). Зависимость усредненных по пяти измерениям значений основной частоты МАЭ сигнала от температуры отжига стали 70Г представлена на рис. 2. Как видно из рис., его величина меняется не более, чем на 12 %, что делает проблематичным применение МАЭ для контроля исследованных материалов. Ранее установлено [1], что основная частота может быть новым парамет-

ром контроля средне- и высокотемпературного отпуска сталей различного химического состава [4].

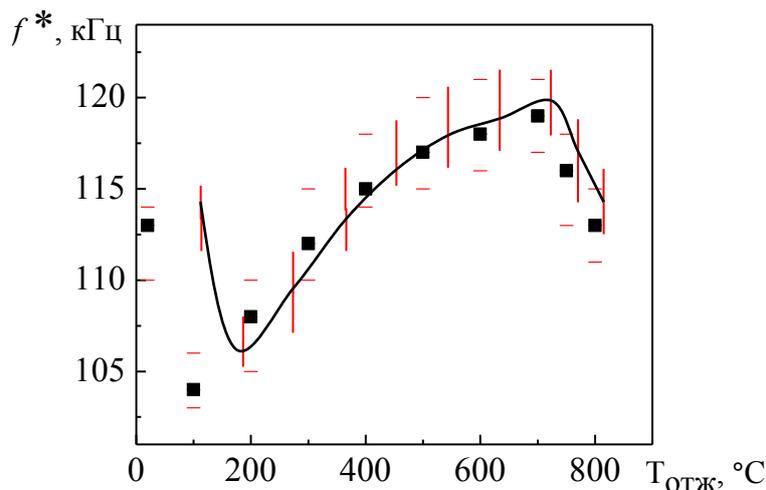


Рис. 2. Зависимость основной частоты МАЭ сигнала от температуры отжига стали 70Г (частота перематничивания  $f_{rm} = 4$  Гц)

Для отожженных сталей 20Г и 70Г более перспективными являются амплитудные параметры магнитоакустической эмиссии. На рис. 3 показаны зависимости амплитуды МАЭ и остаточной магнитной индукции от температуры отжига образцов из холоднодеформированных и отожженных сталей 20Г и 70Г. На рис. 3 наблюдается явная корреляция между остаточной магнитной индукцией и амплитудой МАЭ. При увеличении температуры отжига в диапазоне  $(20 \div 700)^\circ\text{C}$  величина  $U_{MAE}$  сталей 20Г и 70Г возрастает приблизительно в 2 раза, что сопоставимо с изменением остаточной магнитной индукции этих материалов.

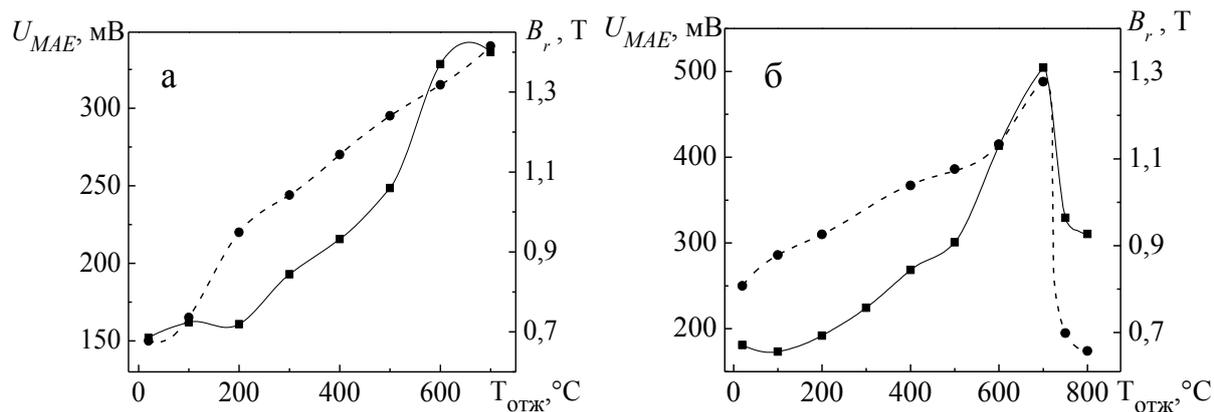


Рис. 3. Зависимости амплитуды МАЭ и остаточной магнитной индукции от температуры отжига образцов из холоднодеформированных и отожженных сталей 20Г (а) и 70Г (б)

Также планируется проведение исследования зависимости магнитоакустических характеристик образцов стали 30, подвергнутой пластической деформации прокаткой в валках и последующему плоскому прессованию, от эволюции структуры и уровня напряжений.

Были проведены измерения магнитных параметров стали 30. На рис. 4, а показана зависимость коэрцитивной силы от степени деформации стали. Видно, что коэрцитивная сила имеет максимум при деформации порядка 6 % и монотонно падает при увеличении деформации до 20 %. Остаточная магнитная индукция (рис. 4, б) напротив, увеличивается при увеличении деформации от 6 %.

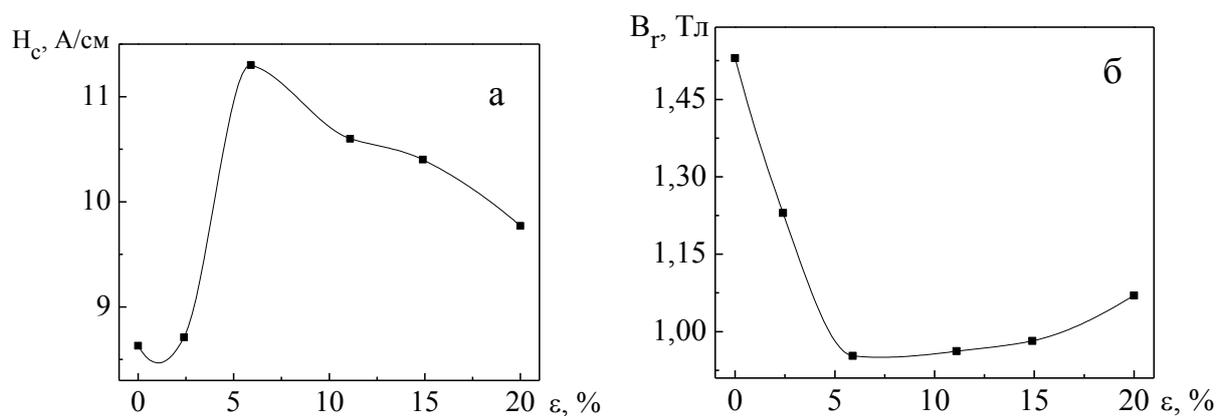


Рис. 4. Зависимости коэрцитивной силы (а) и остаточной магнитной индукции (б) от степени деформации стали 30

В результате выполнения данной работы установлено, что зависимость амплитуды магнитоакустической эмиссии от частоты перемагничивающего поля имеет немонотонный характер. Для большой группы различных по физическим свойствам и размерам образцов металлических ферромагнетиков частота поля, соответствующая максимальной амплитуде МАЭ, составляет 3–5 Гц.

Исследована структурная чувствительность таких параметров магнитоакустической эмиссии, как основная частота и поле максимума МАЭ. Основная частота магнитоакустической эмиссии слабо меняется при увеличении температуры отжига исследованных сталей 20Г и 70Г, что делает проблематичным ее использование в качестве параметра контроля. Показано, что оптимальным параметром контроля отожженных сталей являются амплитуда МАЭ.

Показано, что амплитуда магнитоакустической эмиссии отпущенных сталей 20Г и 70Г коррелирует с их остаточной магнитной индукцией.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке магнитных и магнитоакустических методов контроля и диагностики.

Работа выполнена по теме «Диагностика» № 01201463329.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Amplitude-frequency characteristics of magnetoacoustic emission in heat-treated Fe alloys / V. N. Kostin [et. al.] // Physical mesomechanics. – 2013. – V. 16. – № 5. – P. 103–110.

2 Особенности возбуждения и регистрации магнитоакустической эмиссии в ферромагнитных объектах / В. Н. Костин [и др.] // Акустический журнал. – 2017. – № 2. – С. 209–216.

3 Магнитоакустический контроль твердости холоднодеформированных и термообработанных углеродистых сталей / В. Н. Костин [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 2. – С. 41–46.

4 Магнитные и магнитоакустические параметры контроля напряженно-деформированного состояния углеродистых сталей, подвергнутых холодной пластической деформации и отжигу / В. Н. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2015. – № 10. – С. 33–41.