

В. П. СИЗОВ

ИССЛЕДОВАНИЯ ΔE -ЭФФЕКТА И ЗАТУХАНИЕ УПРУГИХ ВОЛН В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ НИКЕЛЕ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

(Представлено академиком Б. А. Введенским 30 I 1953)

Настоящая заметка содержит некоторые результаты экспериментального исследования влияния магнитного поля и упругих напряжений в поликристаллическом никеле на ΔE -эффект и затухание упругих волн.

1. В качестве ферромагнетика исследовался поликристаллический никель в виде стержня длиной 199,75 мм, диаметром 5,95 мм. Содержание никеля, по данным спектрального анализа, составляло 99,5%; 0,5% примесей приходилось на железо, медь, кобальт, хром, кремний, магний.

Эксперимент заключался в измерении основной резонансной частоты и ширины резонансной кривой при продольных колебаниях стержня в зависимости от напряженности внешнего магнитного поля при двух структурных состояниях: в отсутствие внутренних напряжений и при искусственном создании таковых. В первом случае образец отжигался в атмосфере водорода в течение 3 час. при температуре 1000°, а затем постепенно охлаждался до комнатной температуры в течение 7 час. Во втором случае создавались внутренние напряжения мгновенным охлаждением образца от температуры 1150° в трансформаторном масле с температурой 10°. Кроме этого, стержень наклепывался путем прокатки под нагрузкой 75 кг. Возбуждение и регистрация продольных колебаний в стержне осуществлялись с помощью небольших пластинок, изготовленных из кристалла сегнетовой соли среза L^* , приклеенных к торцевым плоскостям стержня и присоединенных к генератору и усилителю. По измеренным значениям основной резонансной частоты f_1 в гц и ширины резонансной кривой Δf_1 вычислялись: модуль Юнга $E = 4l^2 f_1^2 \rho$ дн · см⁻² (где l — длина стержня в см, $\rho = 8,85$ — плотность никеля в г · см⁻³); декремент пространственного затухания $\delta = 27,3 \Delta f_1 / c$ дб · см⁻¹ (где $c = 2lf_1$ — скорость распространения продольных волн в стержне).

Измерены значения резонансных частот в интервале 12—12,5 кгц при напряженности магнитного поля до 1215 эрст. Намагничивающий соленоид обладал хорошей однородностью магнитного поля и был снабжен водяной рубашкой, что обеспечивало постоянство температуры $15^\circ \pm 0,1^\circ$ в течение опыта. Точность измерений в среднем составляла: 0,1% для модуля Юнга и порядка 3% для декремента пространственного затухания.

2. На рис. 1 приведены кривые $E(H)$ для никеля в двух структурных состояниях. Кривые показывают, что модуль Юнга при возрастании напряженности магнитного поля возрастает, достигая макси-

* Вес каждой пластинки составлял 0,001 веса стержня.

му при напряженности магнитного поля в 540 эрст. для отожженного образца и 675 эрст. — для наклепанного.

ΔE -эффект, как видно из полученных кривых, обнаруживает явление гистерезиса. Вследствие того что изменение модуля Юнга с перемagnичиванием тесно связано с изменением магнитострикции, при-

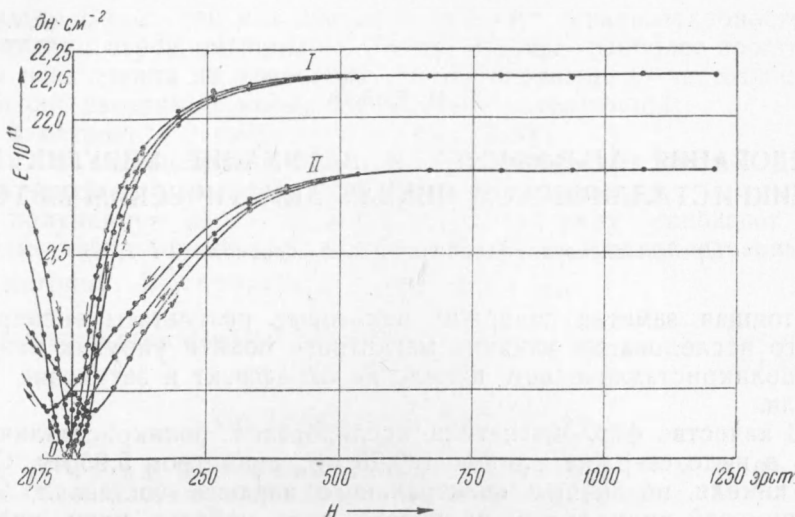


Рис. 1. 99,5% Ni. I — образец отожжен; II — образец наклепан

надлежащей к классу «четных» эффектов, кривые гистерезиса ΔE -эффекта также носят «четный» характер. Расширение петли гистерезиса для наклепанного образца может быть объяснено влиянием остаточных внутренних напряжений в последнем, что ведет к увеличению энергетических потерь на переориентацию векторов магнитных моментов областей самопроизвольной намагниченности I_S (магнитно-упругий гистерезис). Далее, кривые показывают, что максимальное значение модуля Юнга при намагничении до насыщения наклепанного образца примерно на 25% меньше максимального значения для отожженного образца. Это снижение максимума ΔE -эффекта также происходит за счет перераспределения I_S -областей в результате действия внутренних напряжений. Поскольку ΔE -эффект является четным, представляло интерес сравнить этот результат с закономерностями для других четных эффектов — гальваномагнитного и термомагнитного. Как показано в работах К. П. Белова и Д. И. Волкова (^{1,2}), максимум этих эффектов при намагничении до насыщения для деформированного никеля снижается на 25%. Полученные нами данные подтверждают существование этой закономерности четных эффектов никеля также и для ΔE -эффекта. Таким образом, для ΔE -эффекта никеля имеем $(\Delta E/E)_\sigma = 3/4 (\Delta E/E)_s$ где σ и s соответствуют наклепанному и отожженному образцу.

3. Величина механострикционной деформации $(\delta l/l)_m$ (³) может быть вычислена из следующих соображений. Для магнитных полей в области вращения изменения магнитострикционной и механострикционной деформаций для изотропного поликристаллического ферромагнетика описываются равенствами (⁴)

$$(\delta l/l)_H = C (\overline{\cos^2 \varphi_1} - \overline{\cos^2 \varphi_0}), \quad (1)$$

$$(\delta l/l)_m = C (\overline{\cos^2 \varphi_2} - \overline{\cos^2 \varphi_0}), \quad (2)$$

где $(\delta l/l)_n$ — магнитострикционная деформация при намагничении до насыщения ($J = J_S$); $\cos^2 \varphi_0$ характеризует распределение векторов I_S -областей до намагничения; $\cos^2 \varphi_1$ и $\cos^2 \varphi_2$ характеризуют распределение I_S -областей при некотором намагничении ($J < J_S$); C — постоянные; φ_0 , φ_1 и φ_2 — углы между направлением одного из векторов области I_S и осью образца.

Для хорошо размагниченного «мягкого» никеля можно в среднем с достаточной степенью точности полагать $\cos^2 \varphi_0 \cong 1/3$. При действии магнитного поля вблизи насыщения имеем для (1) $\varphi_1 \rightarrow 0$, $\cos \varphi_1 \rightarrow 1$. При действии упругих напряжений имеем для (2) $\varphi_2 \rightarrow 90^\circ$, $\cos \varphi_2 \rightarrow 0$. На основании (1) и (2) и условия $\cos^2 \varphi_0 \cong 1/3$ имеем

$$(\delta l/l)_m = -1/2 (\delta l/l)_n. \quad (3)$$

Величина магнитострикции никеля при намагничении до насыщения равна в среднем $-3\delta \cdot 10^{-6}$, следовательно, величина механострикции мягкого никеля $(\delta l/l)_m \cong 18 \cdot 10^{-6}$.

4. Из теории четных эффектов следует, что ΔE -эффект поликристаллического никеля должен линейно зависеть от квадрата намагниченности $(J/J_S)^2$. Для области слабых полей, где намагничение происходит за счет смещения границ областей, справедлива формула (6)

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{81 \chi_0 \lambda_S^2}{35 J_S^2} \left(\frac{J}{J_S} \right)^2, \quad (4)$$

где χ_0 — начальная восприимчивость, λ_S — магнитострикция насыщения в направлении [111].

На рис. 2 построены по экспериментальным данным кривые зависимости $\Delta E/E$ от $(J/J_S)^2$ для отожденного (I) и наклепанного (II) образцов. Ход кривой I в области значений квадрата намагниченности 0—0,64 согласуется с формулой (4). При значении квадрата намагниченности 0,64, которому соответствует смена процесса смещения процессом вращения, имеет место резкий излом. В случае наклепанного образца подобного излома нет. В начальной стадии намагничения в интервале значений 0—0,2 для наклепанного образца также имеет место отклонение от линейности ΔE -эффекта. Это может быть объяснено наличием у наклепанного образца больших неоднородностей внутренних напряжений, в результате чего имеет место наложение процессов смещения и вращения. По этим кривым также можно заключить, что в области смещения ΔE -эффект имеет меньшее приращение, чем в области вращения. Последнее находит объяснение в том, что в слабых полях возрастание намагничения происходит за счет двух процессов — процесса переориентации I_S -областей на 180° и изменения направлений I_S -областей на угол меньший, чем 180° . Первый процесс в виду четности ΔE -эффекта не дает изменения модуля Юнга, изменение которого поэтому происходит за счет второго процесса. Если бы имел место только первый процесс, ΔE -эффект отсутствовал бы.

Можно далее показать, что для никеля в области вращения также имеет место линейная зависимость ΔE -эффекта от квадрата намагниченности. При переходе в состояние магнитного насыщения в отсутствие

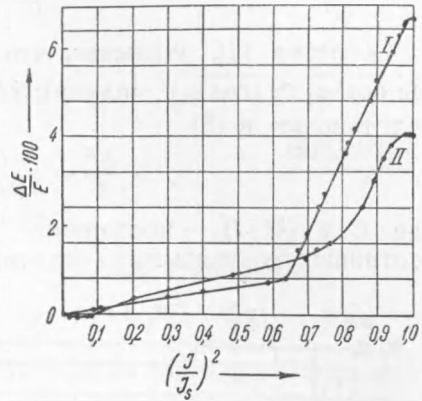


Рис. 2

внутренних напряжений справедливо соотношение $(6) \frac{\Delta E}{E} = \left(\frac{\delta l}{l}\right)_m / \left(\frac{\delta l}{l}\right)_r$, где $(\delta l/l)_r$ — гуковская деформация. Заменяв $(\delta l/l)_m$ по (3), получим

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1/2 (\delta l/l)_H}{(\delta l/l)_r} \quad (5)$$

Согласно (2), учитывая, что при насыщении $\overline{\cos \varphi_1} = J/J_S$ и полагая $\overline{\cos^2 \varphi_1} \simeq (\overline{\cos \varphi_1})^2$, получим $(\delta l/l)_H = C [(J/J_S)^2 - 1/3]$. Это дает после подстановки в (5)

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{C}{2(\delta l/l)_r} \left[\left(\frac{J}{J_S}\right)^2 - \frac{1}{3} \right], \quad (6)$$

где C и $(\delta l/l)_r$ — постоянные для области насыщения. Последнее соотношение указывает на линейную зависимость ΔE -эффекта от квадрата намагниченности и в области полей, где намагничение идет путем вращения I_S -областей. Этот вывод подтверждается нашим экспериментом (рис. 2).

5. На рис. 3 представлены кривые зависимости декремента пространственного затухания упругих волн в никеле от внешнего магнитного поля. Затухание для отожженного образца затухает, стремясь к

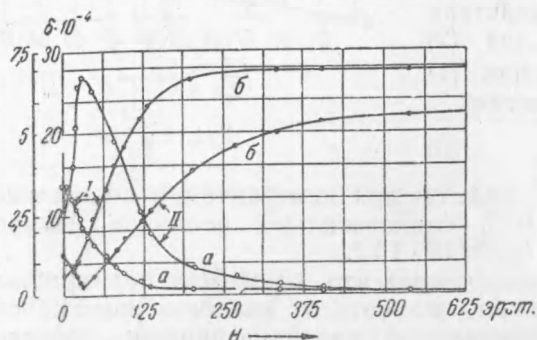


Рис. 3. 99,5% Ni. I — образец отожжен, II — образец наклепан; а — декремент затухания, б — амплитуда

некоторому предельному минимальному значению при полях насыщения. Иной характер носит эта зависимость для наклепанного образца. При нулевом значении напряженности внешнего магнитного поля декремент затухания имеет несколько меньшее значение, чем в первом случае. Затем уже при небольших полях декремент затухания резко возрастает, достигая максимума при поле в 30 эрст. (минимум модуля Юнга), а затем не менее быстро уменьшается и при значении поля в 125 эрст. становится меньше, чем в отсутствие поля.

На рис. 3 также показано, что с возрастанием напряженности магнитного поля амплитуда монотонно возрастает для отожженного образца, а для наклепанного — с явно выраженным минимумом при напряженности магнитного поля, соответствующей наибольшему затуханию. Далее можно заметить, что максимальные значения амплитуд имеют различную величину для отожженного и наклепанного образцов. Это уменьшение амплитуды колебаний и возрастание затухания никелевого стержня, связанные со снижением упругих свойств никеля в состоянии наклепа, сопровождаются снижением максимума ΔE -эффекта (четный эффект).

Научно-исследовательский институт физики
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

Поступило
29 XI 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ К. П. Белов, ЖЭТФ, 9, 685, 695 (1939). ² К. П. Белов, Д. И. Волков, ЖЭТФ, 9, 1529 (1939). ³ Н. С. Акулов, Е. И. Кондорский, ЖЭТФ, 3, 109 (1939). ⁴ Н. С. Акулов, Ферромагнетизм, 1939. ⁵ S. Siegel, S. Quimby, Phys. Rev., 49, 663 (1936). ⁶ К. П. Белов, Упругие тепловые и электрические явления в ферромагнитных металлах, 1951. ⁷ Ф. К. Горский, ЖТФ, 9, 1111 (1950).