

Л. В. КИРЕНСКИЙ, А. И. ДРОКИН,
Д. А. ЛАПТЕЙ

ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ И ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ВЕЛИЧИНУ ТЕМПЕРАТУРНОГО МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

В работе приведены результаты экспериментального исследования температурного магнитного гистерезиса по циклу А на образцах никеля, подвергнутых сжатию, и пермаллой-65, подвергнутых растяжению. Показано различие влияний упругих и пластических деформаций. Дается качественное истолкование полученных результатов.

Введение

К числу необратимых явлений, протекающих в реальных ферромагнетиках, относится температурный магнитный гистерезис (ТМГ), заключающийся в том, что при циклическом изменении температуры образца, помещенного в слабое магнитное поле, его намагниченность изменяется необратимо.

В ранее опубликованных работах [1—4] было показано, что ТМГ наблюдается лишь в том случае, если изменения намагниченности осуществляются смещением границ между доменами. Исчезновение процессов смещения приводит к исчезновению ТМГ. К числу причин, приводящих к необратимым изменениям намагниченности, т. е. к гистерезисным явлениям [5], относятся неоднородности напряжений в любом реальном магнитном материале. Такого рода неоднородности внутренних напряжений приводят к скачкообразным перемещениям отдельных участков границ (эффект Баркгаузена).

В ряде работ [6—9] было показано, что внешние механические напряжения вызывают перераспределение напряжений в материале, видоизменяя картину изучаемого явления. Внешние механические напряжения изменяют магнитную структуру и, в зависимости от направления напряжений и знака магнитострикции, способствуют росту одних и уничтожению других магнитных фаз.

В настоящей работе проводились исследования ТМГ при таких механических воздействиях на образец, в результате которых роль процессов смещения не уменьшалась, как это имело место в работе [10], а увеличивалась. Последнее осуществлялось путем внешнего механического воздействия:

- а) сжатием образцов с отрицательной магнитострикцией (никель),
- б) растяжением образцов с положительной магнитострикцией (пермаллой-65).

Исследуемые образцы и методика измерений

Исследование проводилось на образцах из электролитического холодноотянутого никеля и образцах пермаллоя-65 (65% Ni, 35% Fe). Образцы никеля имели форму проволок длиной 100 мм и диаметром 2,5 мм. Образцы пермаллоя-65 имели форму тонких полосок длиной 100 мм и сечением $0,12 \times 2$ мм. Перед измерениями образцы были подвергнуты отжигу при температуре 1100°C в течение 4 часов с последующим медленным охлаждением в печи. Измерения проводились на вертикальном аstaticком магнетометре методом автоматической фотозаписи [11]. Сжатие никелевых образцов осуществлялось с помощью рычага, давление которого передавалось на образец через латунный стержень. Кроме того, во избежание изгиба он помещался в специально приготовленную латунную форму. Так как в процессе увеличения нагрузки достигался предел текучести никеля, то проводить исследования на одном и том же образце в полях различной напряженности не представлялось возможным. Поэтому была изготовлена серия образцов из одного куска никелевой проволоки. Проведенные повторные исследования на различных образцах показали достаточно хорошую воспроизводимость результатов измерений.

Исследование ТМГ никеля в зависимости от величины сжимающего напряжения проводилось по следующей методике: перед началом измерений исследуемый образец в исходном состоянии сжимался соответствующей нагрузкой и размагничивался нагреванием до температуры выше точки Кюри с последующим охлаждением до температуры -183°C . При этой температуре включалось магнитное поле заданной величины и исследовалась зависимость $I(t)$ по известному циклу А в интервале температур $-183^\circ \div +\Theta \div -183^\circ\text{C}$. В течение всего температурного цикла внешнее магнитное поле и сжимающаяся нагрузка оставались строго постоянными. По истечении цикла внешнее поле выключалось, на образец накладывалась дополнительная нагрузка, далее производилось указанным образом размагничивание и цикл повторялся вновь в том же поле. Таким образом, при каждом измерении ТМГ никеля исходные состояния образца задавались точками девственной кривой намагничивания при $t = -183^\circ\text{C}$. Результаты исследования каждого температурного цикла получались в виде магнитотермограмм автоматической фотозаписи намагниченности и соответствующей ей температуры. Употреблявшийся способ размагничивания одновременно давал возможность контролировать состояние компенсации [12] вертикальной составляющей магнитного поля Земли и других паразитных полей.

Исследование на никеле проводилось при следующих значениях напряженности поля: 0,013; 0,065; 0,13; 0,52; 1,3; 3,9; 10,24 э. Исследование ТМГ на образцах пермаллоя-65, подвергнутых растяжению, проводилось также по циклу А в интервале $-183^\circ \div +20 \div -183^\circ\text{C}$.

В отличие от методики исследования, применявшейся ранее [1—3, 5, 10], при измерении ТМГ пермаллоя-65 исходные значения намагниченности брались на восходящей ветви петли гистерезиса. При этом был выбран следующий порядок измерений: в начале образец охлаждался до температуры -183°C , растягивался соответствующей нагрузкой и перемагничивался несколько раз по петле при изменении магнитного поля от $-H_{\text{макс}}$ до $+H_{\text{макс}}$, равного 30 э, с последующим заданием исходного состояния, соответствующего определенной точке на нижней спинке петли. Далее, не снимая нагрузки, после каждого измерения ТМГ перемагничивание повторялось с последующим заданием нового исходного состояния.

Результаты измерений и их анализ

На рис. 1 представлены графики ТМГ образцов никеля, подвергнутых сжатию в полях, равных 0,065; 0,13 и 1,3 э. Из рассмотрения графиков рис. 1 видно, что на ветвях нагрева, как уже отмечалось [2], с

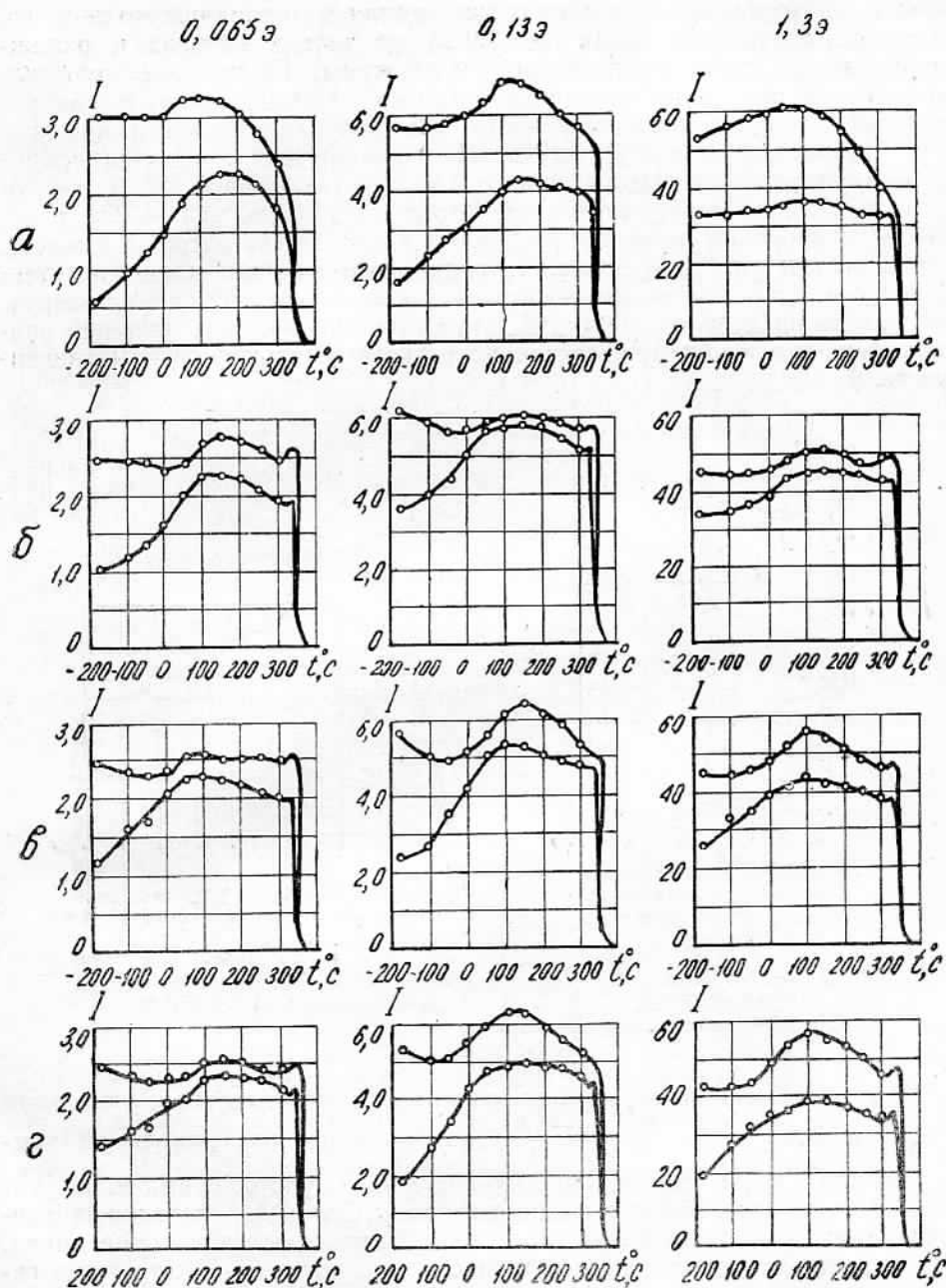


Рис. 1. ТМГ никеля при различных сжимающих нагрузках.

$H_e = 0,065$ э: а — 0, б — 0,87, в — 1,5, г — 2,5 кг/мм²;
 $H_e = 0,13$ э: а — 0, б — 2,5, в — 3,0, г — 5,5 кг/мм²;
 $H_e = 1,3$ э: а — 0, б — 2,1, в — 3,7, г — 5,55 кг/мм².

ростом температуры происходит возрастание намагниченности до определенной температуры, при которой она достигает максимума. Для различных полей величина этой температуры изменяется, смещаясь с ростом поля в сторону более низких температур. На ветвях охлаждения также имеет место максимум намагниченности, однако аналогичного смещения его в сторону низких температур обнаружено не было. В слабых магнитных полях (до 3,9 э) на ветвях нагрева и охлаждения, кроме того, наблюдаются максимумы Гопкинсона, которые появляются при соответствующих нагрузках. Намагниченность как начальная, так и при соответствующих температурах с ростом σ , как правило, возрастает до $\sigma = 2,5 \text{ кг/мм}^2$. Дальнейший рост σ приводит к спаду намагниченности. Намагниченность ветвей охлаждения в зависимости от σ изменяется иначе: она уменьшается до σ , равной $2,5 \text{ кг/мм}^2$, и далее, с увеличением нагрузки, растет. Из рис. 1 (ветви нагрева) следует, что с ростом упругосжимающих усилий возникающая магнитная текстура ведет к возрастанию намагниченности, а при достижении нагрузки, равной пределу текучести [13], эта созданная текстура начинает разрушаться, что и обнаруживается по резкому уменьшению намагниченности.

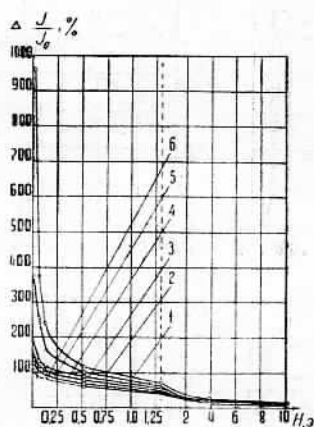


Рис. 2. Относительное изменение намагниченности с полем при различных σ :
1 — 0; 2 — 0,33; 3 — 0,87;
4 — 1,5; 5 — 2,0;
6 — 2,5 кг/мм².

Пунктир — перемена масштаба.

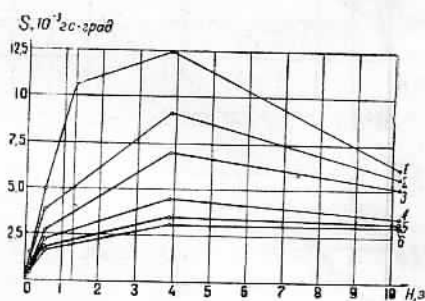


Рис. 3. Зависимость ТМГ от поля при различных нагрузках:
1 — 0; 2 — 0,33; 3 — 0,87; 4 — 1,5; 5 — 2,0;
6 — 2,5 кг/мм².

На рис. 2 изображен график зависимости относительного изменения намагниченности $\frac{I - I_0}{I} = \frac{\Delta I}{I_0}$ (в %) образцов никеля за температурный цикл при различных значениях упругосжимающих усилий от величины внешнего магнитного поля. Здесь I_0 — исходное значение намагниченности и I_1 — значение намагниченности в конце цикла. Из хода приведенных графиков видно, что относительная величина гистерезиса, выражаемая $\frac{\Delta I}{I} \cdot 100\%$, с ростом поля убывает и оказывается незначительной уже в поле, равном 10 э. По мере роста упругосжимающих усилий относительная величина ТМГ также убывает, несмотря на возрастание роли процессов смещения.

Для более полной характеристики ТМГ представляется целесообразным оценивать его величину площадью S , ограниченной ветвями нагрева и охлаждения, выражая ее произведением гаусс $\times$ градус, что эквивалентно в определенном масштабе среднему изменению намагниченности за цикл. На рис. 3 приведены графики такой зависимости от поля при различных сжимающих нагрузках. Из этих кривых следует, что с ростом поля абсолютное значение ТМГ увеличивается, достигая

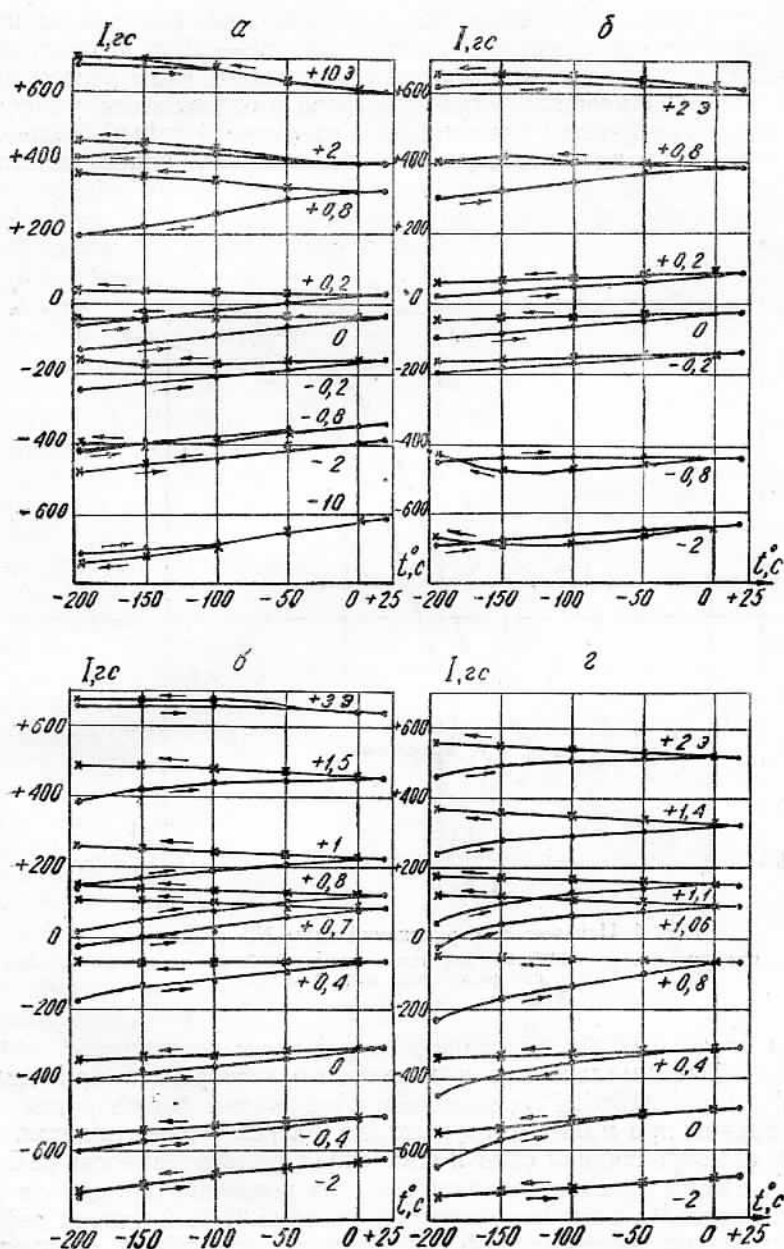


Рис. 4. ТМГ пермаллоя-65, подвергнутого растяжению.
a — 0; *б* — 8,0; *в* — 22,5; *г* — 45 кг/мм².

максимума. Дальнейшее увеличение поля приводит к монотонному уменьшению ТМГ. Как видно из приведенного рисунка, абсолютная величина ТМГ с увеличением σ уменьшается во всем интервале применяемых полей.

Увеличение роли процессов смещения может быть достигнуто и на образцах с положительной магнитострикцией путем их растяжения. На рис. 4 (а, б, в, г) представлены графики температурного изменения намагниченности для образцов пермаллоя-65, подвергнутых растягивающим нагрузкам. Исходные состояния при этом брались на нижней спинке магнитного гистерезиса при температуре -183°C . Сопоставление данных ТМГ при различных нагрузках показывает, что с ростом нагрузки площади, ограниченные ветвями нагрева и охлаждения, уменьшаются, достигая наименьших значений при нагрузке 8 кг/мм^2 . Далее с ростом σ эти площади возрастают и оказываются наибольшими при 45 кг/мм^2 .

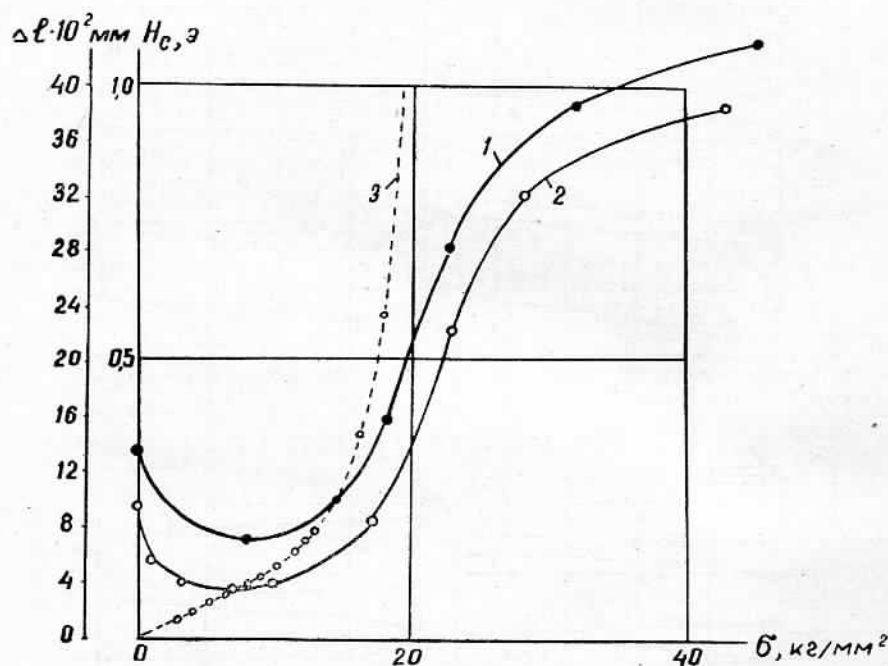


Рис. 5. Изменение коэрцитивной силы H_c с нагрузкой.
1 — при температуре -183° , 2 — при температуре $+20^\circ\text{C}$, 3 — кривая деформации при растяжении пермаллоя-65.

При различных растягивающих нагрузках с исследуемых образцов пермаллоя-65 снимались петли магнитного гистерезиса при температурах $+20$ и -183°C . Под влиянием растяжения форма петли изменяется, причем при малых нагрузках (до 8 кг/мм^2) она сужается, далее, с ростом σ , коэрцитивная сила и остаточная намагниченность резко возрастают, а сама петля становится близкой к прямоугольной. На рис. 5 изображен ход H_c в зависимости от σ (кривые 1, 2) и кривая деформации растяжения пермаллоя-65 (3). Из хода кривой 3 следует, что линейный ход удлинения имеет место до нагрузок $8-10 \text{ кг/мм}^2$, после чего наступают пластические деформации. На рис. 6 представлена зависимость величины ТМГ от поля при различных значениях растягиваю-

ших нагрузок. Величина ТМГ оценивается абсолютным изменением намагниченности $\Delta I = I - I_0$ за температурный цикл. Из приведенных данных видно, что в области высоких положительных и отрицательных полей, где намагничивание осуществляется путем вращения векторов I_s , ТМГ практически отсутствует. В полях, где преобладают процессы смещения, имеет место ТМГ. При некотором значении поля величина ТМГ достигает максимума. Как это следует из графиков рис. 6, величина ТМГ существенно изменяется от величины приложенной нагрузки: с ростом приложенной нагрузки ТМГ убывает вплоть до $\sigma = 8 \text{ кг/мм}^2$. Дальнейшее возрастание σ приводит к пластическим деформациям, что ведет к росту ТМГ. Таким образом, изучение влияния механических напряжений на величину ТМГ на образцах никеля и пермаллоя, подвергнутых соответственно сжатию и растяжению, показало, что упругие напряжения, создающие условия для преимущественного протекания намагничивания путем процессов смещения, приводят не к росту, а к уменьшению ТМГ; напряжения, лежащие за пределами упругих деформаций, вызывают возрастание ТМГ.

Установленные закономерности могут быть качественно объяснены на основе современных представлений о механизме процессов, протекающих в ферромагнетиках при их техническом намагничивании. Из всех исследованных причин, которые могут вызвать необратимые смещения (скачки) отдельных участков доменных перегородок, наличие которых обуславливает явление гистерезиса, рассмотрим неоднородности внутренних напряжений.

Процесс намагничивания определяется в основном величиной и распределением градиентов граничной энергии γ [9], которая, в свою очередь, определяется величиной и распределением градиентов внутренних напряжений в решетке однородного материала. Сильные градиенты σ_i создают высокие энергетические барьеры γ , ограничивающие обратимость смещений в процессе намагничивания, что подтверждается многочисленными опытными фактами. Создание однородных по всему образцу внешних напряжений вызовет перераспределение напряжений в материале, видоизменяя тем самым «геометрию» градиента граничной энергии в направлении смещения.

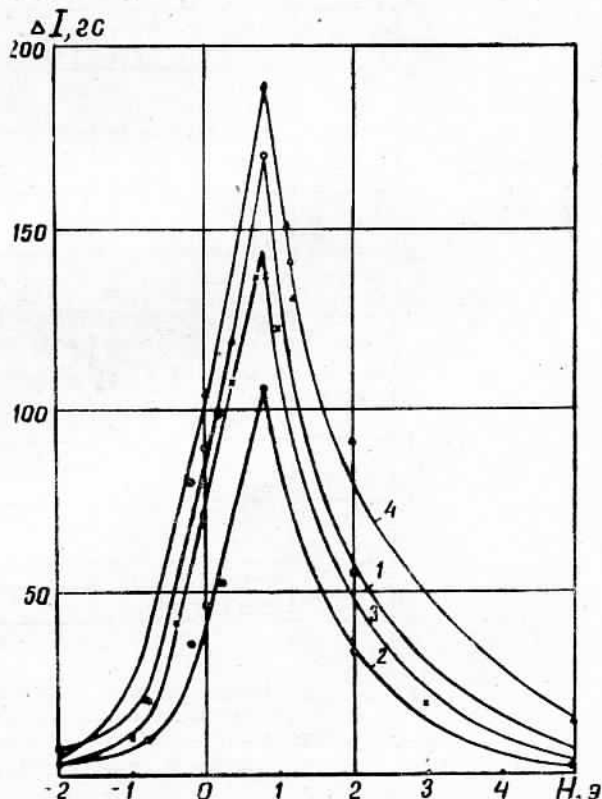


Рис. 6. Зависимость величины ТМГ пермаллоя-65 от поля при растягивающих нагрузках.
1 — $\sigma = 0$; 2 — $\sigma = 8,0$; 3 — $\sigma = 22,5$; 4 — $\sigma = 45 \text{ кг/мм}^2$.

Выражение градиента граничной энергии можно представить в следующем виде:

$$\frac{d\gamma}{dx} = 2 \sqrt{\frac{A}{a}} \frac{\frac{2}{3} \lambda_s \frac{d(\sigma_i + \sigma_0)}{dx}}{\sqrt{\frac{3}{2} \lambda_s (\sigma_i + \sigma_0) + b\kappa}},$$

где A — интеграл обмена, a — постоянная решетки, λ_s — магнитоstriction насыщения, b — постоянная, κ — константа магнитной анизотропии, σ_i и σ_0 — внутренние и внешние напряжения.

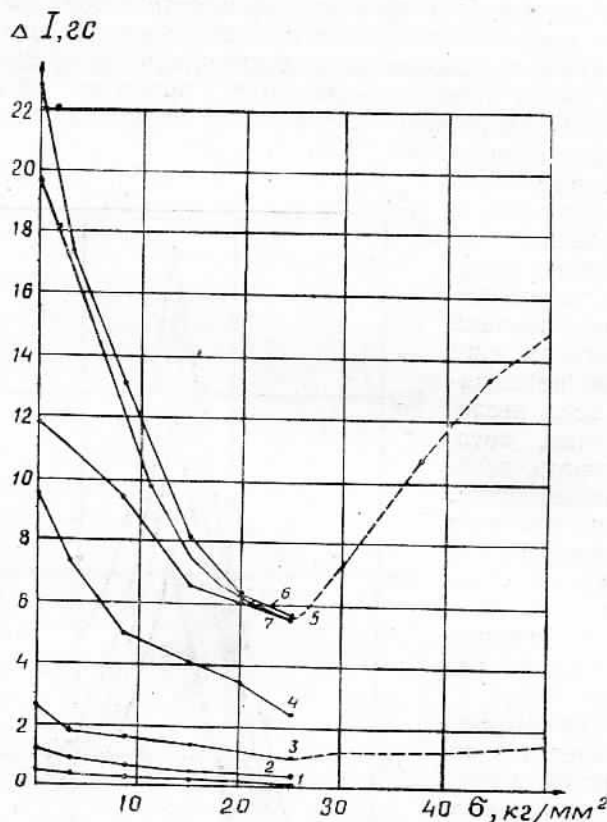


Рис. 7. Зависимость среднего изменения намагниченности за цикл от нагрузки:

1 — $H_e = 0,013$; 2 — $H_e = 0,065$; 3 — $H_e = 0,13$; 4 — $H_e = 0,52$;
5 — $H_e = 1,3$; 6 — $H_e = 3,9$; 7 — $H_e = 10,24$ э.

Внешние однородные напряжения создают, с одной стороны, условия для преимущественного протекания намагничивания, обусловленного процессами смещения; с другой стороны, внешние упругие напряжения создают условия, при которых увеличивается фактор обратимости явления, выражающийся в том, что амплитудные значения градиента граничной энергии уменьшаются с ростом σ . Этим можно объяснить убывание ТМГ сжатого никеля и растянутого пермаллоя-65 для нагрузок, лежащих ниже предела текучести (рис. 7, сплошные кривые, а также рис. 5, 6). Как видно из рис. 7, уменьшение ТМГ для никеля име-

ет место для нагрузок, не превышающих $2-2,5 \text{ кг/мм}^2$, а для пермаллоя (рис. 5, 6) $8,0-10,0 \text{ кг/мм}^2$. Дальнейшее увеличение нагрузок, превосходящих указанные значения, вызывает в образцах пластические деформации, которые не только разрушают магнитную текстуру [14], но и приводят к увеличению внутренних неоднородностей, что, естественно, сопряжено с возникновением в этих местах большого градиента граничной энергии. Этим можно объяснить возрастание абсолютной величины ТМГ при нагрузках, превышающих $\sigma = 2,5 \text{ кг/мм}^2$ для никеля (рис. 7, пунктир) и $8-10 \text{ кг/мм}^2$ для пермаллоя-65.

Таким образом, односторонние механические напряжения независимо от знака магнитострикции всегда приводят к уменьшению ТМГ. Это уменьшение может идти как за счет снижения роли смещения границ, так и за счет уменьшения градиента граничной энергии. Указанная закономерность справедлива для нагрузок, не превышающих предела текучести. Выше этого предела в образце возникают резкие неоднородности, что ведет к увеличению градиента граничной энергии и к возрастанию ТМГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. С. Шур, В. И. Дрожжина. ЖЭТФ, 17, 607, 1947.
2. Я. С. Шур, Н. А. Баранова. ЖЭТФ, 90, 183, 1950.
3. Я. С. Шур, Н. А. Баранова, В. А. Зайкова. ДАН, 81, 557, 1951.
4. I. L. Spook. Nature, June, 5, 161, 887, 1948.
5. Л. В. Киренский и др. Изв. АН СССР, сер. физ., XXI, 9, 1957.
6. F. Foerster, H. Wetzel. Z. Metallkunde, 33, 115, 1941.
7. К. Вотруба. Изв. АН СССР, сер. физ., XXI, 9, 1957.
8. С. В. Вонсовский. УФН, 46, 759, 1951.
9. С. В. Вонсовский, Я. С. Шур. Ферромагнетизм. Гостехиздат, 1948.
10. Н. А. Баранова, Я. С. Шур. ДАН, 44, 825, 1954.
11. А. И. Дрокин, В. А. Ильюшенко. ЖЭТФ, 29, 3, 9, 1955.
12. А. И. Дрокин. ЖЭТФ, 28, 2, 1955.
13. Р. М. Бозорт. Ферромагнетизм, ИЛ, 1956.
14. М. В. Дехтяр. Изв. АН, сер. физ., XI, 6, 1947.

Институт физики СО АН СССР
г. Красноярск