

В. А. САНДОВСКИЙ, Е. М. ФАЙНШМИДТ

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ В ОДНОРОДНОМ ПЕРЕМЕННОМ ПОЛЕ ПРИ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Представлено описание установки для измерения магнитной проницаемости стальных образцов при их растяжении в пределах упругой деформации. Приведена методика измерения, включающая теоретические расчеты и результаты экспериментов. С помощью графической интерпретации проанализирована зависимость составляющих магнитной проницаемости от величины нагрузки, амплитуды и частоты перемагничивающего поля, а также структуры материала образцов.

Ключевые слова: магнитная проницаемость, напряженность магнитного поля, упругая деформация, доменная стенка, амплитуда.

Введение. Исследованию магнитных свойств сталей посвящено множество как отечественных, так и зарубежных публикаций. Так в работе [1] рассматривалась связь упругих и частично пластических растягивающих напряжений с возникающей при этом анизотропией начальной магнитной проницаемости при измерениях параметров вдоль и поперек действующей механической нагрузки. Исследованию влияния упругой деформации на обратимую магнитную восприимчивость ферромагнитных сталей посвящена работа [2]. В работе [3] было показано, что магнитная проницаемость, так же как и коэрцитивная сила, зависят от величины напряжений, возникающих при упругой деформации, причем указанные зависимости в значительной мере определяются структурой исследуемых сталей. В работе [4] приведены экспериментальные данные по изменению петель гистерезиса под воздействием упругих напряжений (от -125 до $+125$ МПа) применительно к образцам трубной стали, содержащим 2 % марганца, а в работе [5] на таких же образцах исследовались изменения намагниченности, как обратимой, так и необратимой, при нагружении их в пределах от -125 до $+125$ МПа для случаев, когда начальная точка находится на коммутационной кривой. Исследования по изменению намагниченности, проведенные путем опытов по измерению амплитуды и интенсивности скачков Баркхаузена, отражены в работе [6]. В работе [7] было исследовано изменение дифференциальной магнитной проницаемости в зависимости от степени растяжения и сжатия в больших, малых и средних магнитных полях. Результаты измерений степени магнитострикции в зависимости от напряжений, а также изменения петли гистерезиса под нагрузкой от -226 до $+238$ МПа приведены в работе [8].

Исследования магнитных свойств образцов, описанные в упомянутых и многих других работах этого направления, выполнялись в постоянных магнитных полях, при этом не были приведены пояснения некоторых экспериментально установленных фактов, которые могли бы быть объяснены на основе результатов измерений в переменных полях.

В настоящей статье рассматривается возможность получения дополнительной информации, которая позволит объяснить результаты, полученные при исследовании взаимосвязей магнитных свойств сталей с различной структурой и механических явлений, возникающих при нагрузках в пределах упругой деформации. Такие возможности открываются при измерениях магнитной проницаемости в динамическом режиме, т.е. в переменном поле, для чего используется методика, включающая как теоретические расчеты, так и экспериментальные данные.

Экспериментальная установка. Для измерения магнитной проницаемости стальных образцов при их растяжении была создана экспериментальная установка, структурная схема

которой показана на рис. 1, а. Синусоидальный сигнал с генератора 1 поступает на усилитель 2. Через соленоид 4 проходит синусоидальный ток частотой 20 Гц, поступающий с выхода усилителя. Измерительная катушка 3, внутри которой находится образец 5 (цилиндрический стержень), размещена внутри соленоида 4. Поле в соленоиде однородно и не превышает 9 А/см. Вихретоковые приборы работают в малых полях, поэтому результаты исследований могут быть использованы в вихретоковой аппаратуре. Последовательно с обмоткой соленоида включен резистор 6, опорный сигнал которого поступает на один из входов фазометра 8. На другой его вход поступает измеряемый сигнал катушки 3. Этот же сигнал поступает и на вольтметр 7. Фазометром 8 измеряется фазовый угол φ , определяющий разность фаз между опорным сигналом и сигналом измерительной катушки. Частотомер 9 измеряет частоту сигнала.

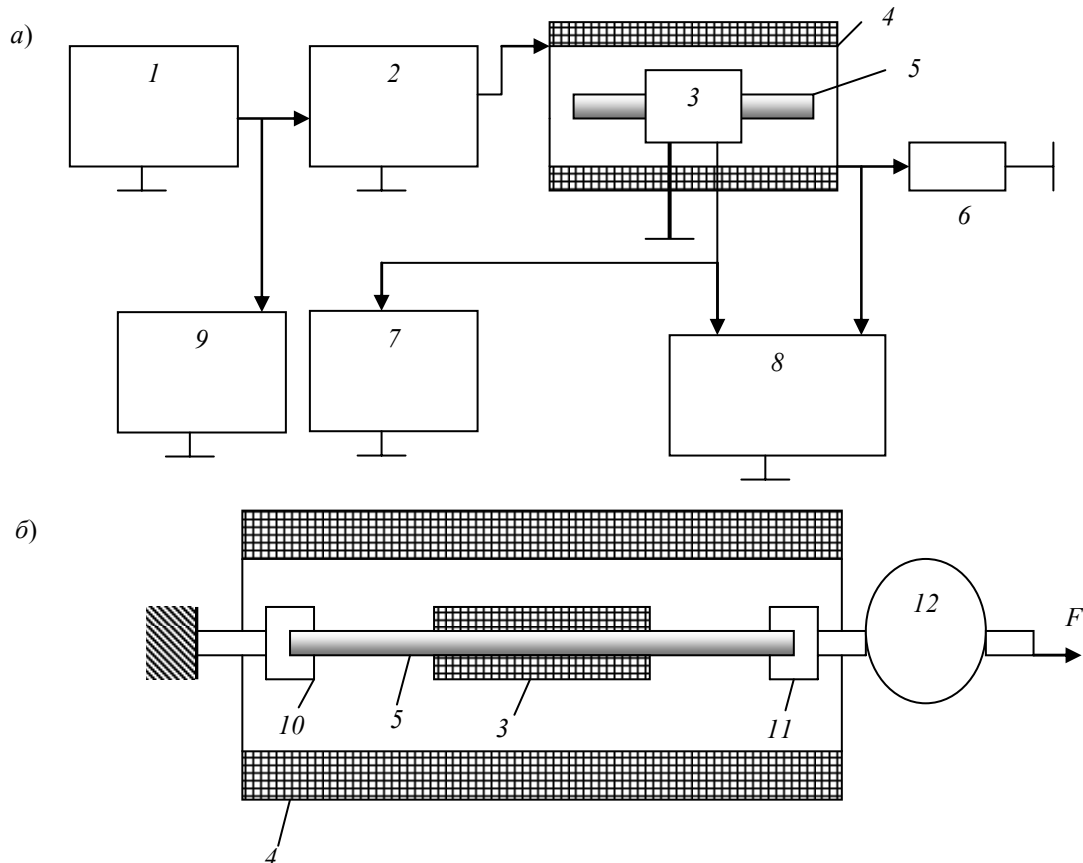


Рис. 1

Погрешность измерения магнитной проницаемости зависит от погрешности используемых приборов — вольтметра 7 и фазометра 8. Суммарная погрешность измерения не превышает 2 %.

Размещение образца в соленоиде показано на рис. 1, б, где 10 и 11 — захваты, выполненные из немагнитной стали, 12 — динамометр. Растягивающая нагрузка F прикладывается к образцу с помощью винтового пресса (на рисунке не показан).

Методика измерения. По показаниям вольтметра 7 измеряется напряжение U_1 на катушке 3, помещенной в соленоид без образца. Затем устанавливается образец (см. рис. 1) и определяется амплитуда сигнала U_a , соответствующая сигналу катушки с образцом. При этом на индикаторе фазометра считывается показание величины угла φ . Промежуточная величина U_2 рассчитывается по формуле

$$U_2 = U_a (\cos \varphi + j \sin \varphi). \quad (1)$$

Далее в расчетах используется относительное напряжение $U = U_2 / U_1$.

Теоретически данная задача решена в учебниках по электротехнике (см., например, работу [9]). Согласно [9] относительное напряжение измерительной катушки с цилиндром внутри, помещенной в однородное переменное поле,

$$U = j\eta^2 \frac{2\mu I_1(\beta t)}{\beta t I_0(\beta t)}. \quad (2)$$

Здесь $j = \sqrt{-1}$; $t = \sqrt{j}$; $\eta = d / d_1$, где d — диаметр образца; d_1 — диаметр внутренней полости измерительной катушки; I_0, I_1 — модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков соответственно; $\beta = R\sqrt{2\pi f \mu \mu_0 \sigma}$, $R = d/2$; f — частота тока соленоида; μ — магнитная проницаемость; μ_0 — магнитная постоянная; σ — удельная электрическая проводимость материала образца; при этом предполагается, что магнитная проницаемость комплексна, т.е.

$$\mu = \mu_1 + j\mu_2, \quad (3)$$

где $\mu_1 = \text{Re } \mu$, $\mu_2 = \text{Im } \mu$.

Для определения составляющих магнитной проницаемости μ запишем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \text{Re} U (\text{теория}) &= \text{Re} U (\text{эксперимент}); \\ \text{Im} U (\text{теория}) &= \text{Im} U (\text{эксперимент}), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

которая решается с помощью компьютерной программы с использованием процедуры минимизации функционала по методу деформируемого многогранника Нелдера — Мида [10]. При этом определяются вещественная μ_1 и мнимая μ_2 составляющие магнитной проницаемости.

Проблемы, связанные с корректностью такого подхода к решению подобных задач электродинамики, подробно обсуждаются в работе [11]. В этой работе показано, что в дополнение к формальным требованиям к решению таких задач может быть использована дополнительная информация, позволяющая исключить ошибки при выборе корней системы уравнений (4). Кроме того, в компьютерной программе предусмотрена индикация точности решения или погрешность определения соответствующего параметра. Для проверки правильности решения системы найденные значения μ_1 и μ_2 в соответствии с выражением (3) подставляются в уравнение (2), и сигнал U рассчитывается с использованием компьютерной программы. Результаты расчетов при этом действительно точно соответствуют экспериментальным измерениям.

Результаты измерений. Для измерений использовались образцы цилиндрических стержней диаметром 5 мм и длиной 170 мм с резьбой на концах для закрепления в захватывающих приспособлениях. Перемагничивание образцов осуществлялось в однородном синусоидальном поле частотой 20 Гц. В соответствии с вышеописанной методикой измерялись значения составляющих μ_1 и μ_2 магнитной проницаемости каждого из образцов при их последовательном нагружении.

На рис. 2 показаны результаты измерений μ_1 и μ_2 для исходного образца из стали Ст.3, которая относится к низколегированным и содержит 0,14—0,22 % углерода, 0,3—0,6 % марганца и не более 0,3 % никеля. Результаты измерений при напряженности магнитного поля амплитудой $H_m = 2,2$ А/см (малое поле) показаны на рис. 2, а, а при $H_m = 8,8$ А/см — на рис. 2, б.

Если составляющая μ_1 в основном определяет величину магнитной проницаемости, то составляющая μ_2 отображает временную информацию, которая характеризует магнитную вяз-

кость данного материала. В обоих случаях наблюдается хорошо выраженный максимум магнитной проницаемости (по модулю) в области нагрузки $P = 100 \dots 140$ МПа.

Если допустить, что магнитная проницаемость в переменных перемагничивающих полях является результатом колебаний доменных стенок, то можно полагать, что амплитуда этих колебаний достигает максимума при нагружении образцов в указанном интервале. Тогда увеличение магнитной проницаемости во втором случае (см. рис. 2, б), где значение H_m значительно больше, также, по-видимому, объясняется именно этой причиной. Следовательно, механические напряжения, создаваемые в образцах при растяжении, могут существенно влиять на амплитуду колебаний доменных стенок. Это влияние наиболее существенно в критической области, где увеличение магнитной проницаемости при повышении напряжений резко сменяется ее уменьшением. По-видимому, данное явление обусловлено тем, что в указанной области 90° -ные доменные границы практически исчезают, уступая место 180° -ным.

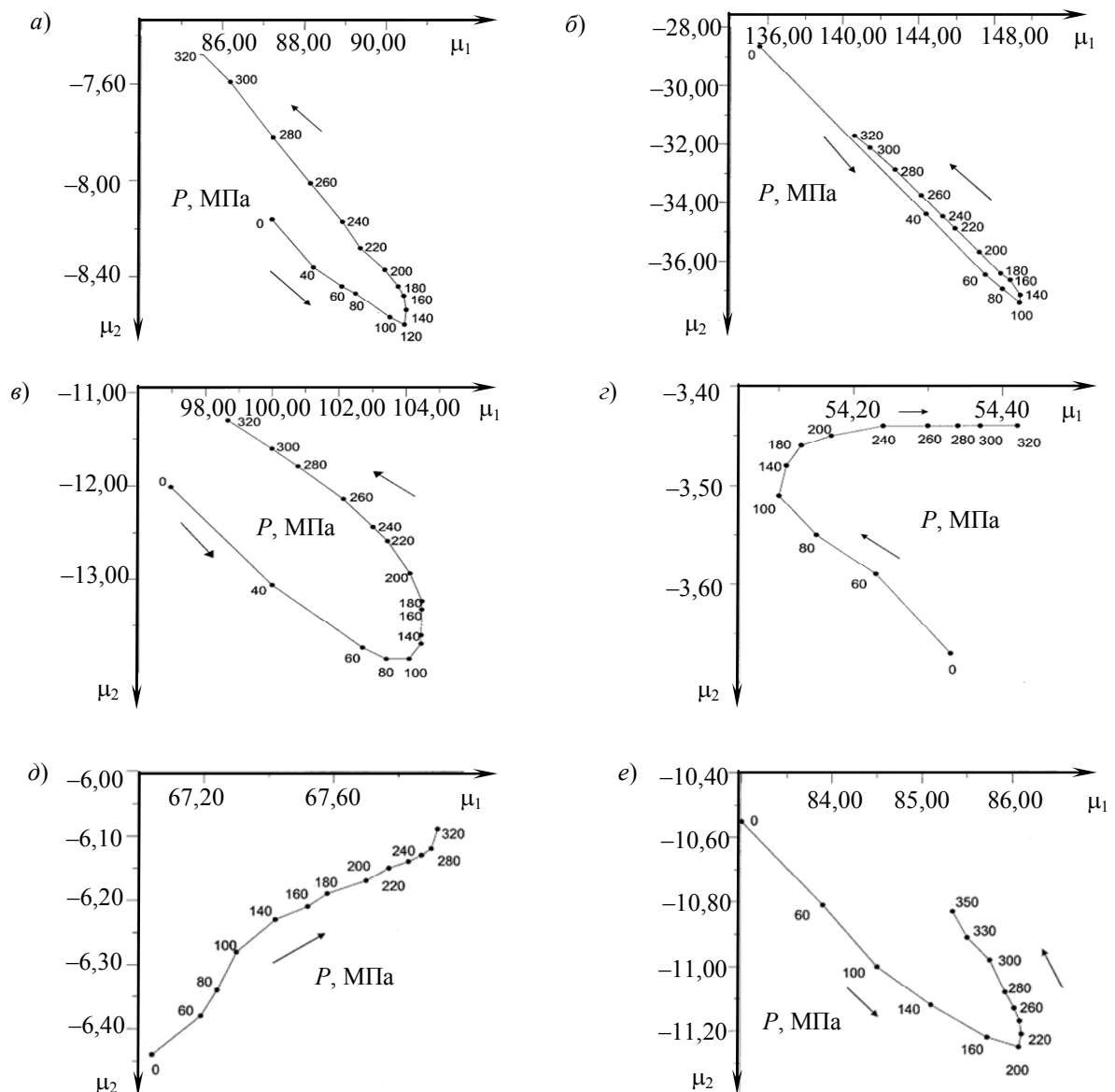


Рис. 2

Чтобы показать влияние химического состава сталей на изменение магнитной проницаемости образца при его растяжении, выберем образец из стали, отличающейся по химическому составу.

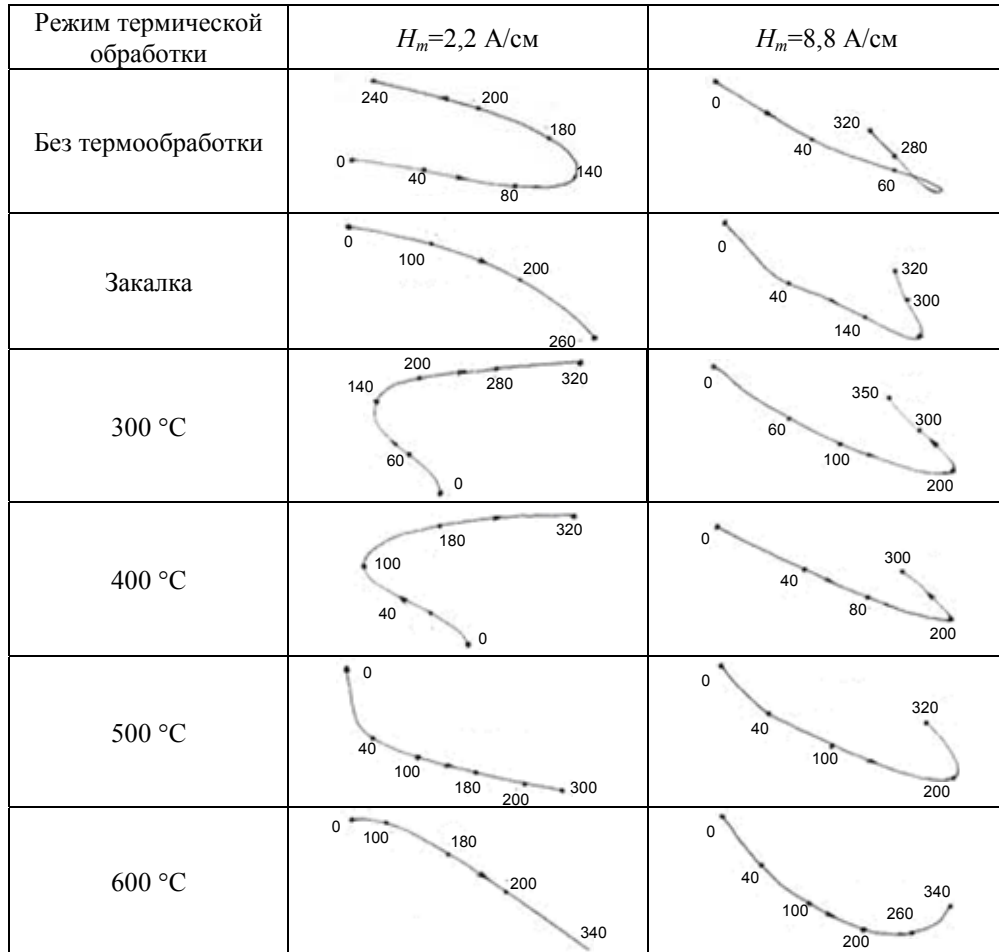
На рис. 2, в показан результат измерения в поле амплитудой $H_m=2,2$ А/см составляющих μ_1 и μ_2 для образца инструментальной стали У8 в исходном состоянии. Эта сталь содержит 0,76—0,83 % углерода и 0,17—0,33 % марганца. На графике хорошо виден максимум магнитной проницаемости в области 80—140 МПа. Однако форма кривой существенно отличается от показанной на рис. 2, а для образца стали Ст.3.

На величину магнитной проницаемости и форму кривых зависимости $\mu(P)$ также существенно влияет структура стали, что демонстрируется приведенными на рис. 2, з, д, е графиками для образцов стали У8 после закалки и отпуска при температуре 300 °С. Так, на рис. 2, з представлен график зависимости, полученной при $H_m=2,2$ А/см для такого образца. После закалки (в течение 1 ч) образец имеет мартенситную структуру. В этом состоянии магнитная проницаемость его материала существенно уменьшается по сравнению с исходным состоянием. Во время нагрева в материале образца происходит распад пересыщенного твердого раствора углерода в железе. В начальной стадии нагружения образца наблюдается уменьшение обеих составляющих магнитной проницаемости: это объясняется тем, что в начальной стадии при увеличении внутренних напряжений увеличивается также и количество дислокаций, что в некоторой степени тормозит увеличение амплитуды колебаний доменных стенок. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к распаду пересыщенного твердого раствора с выделением ферритных зерен (превращение $\gamma \rightarrow \alpha$), которые обладают повышенной магнитной проницаемостью. При этом общая магнитная проницаемость образца несколько повышается.

Если теперь увеличить амплитуду перемагничивающего поля, то под воздействием растягивающих усилий процесс распада пересыщенного твердого раствора активизируется, и в результате выделяющихся дополнительно ферритовых зерен составляющая μ_1 с увеличением нагрузки будет возрастать. На рис. 2, д показан результат измерения μ_1 и μ_2 при $H_m=4,4$ А/см (среднее поле). С увеличением амплитуды H_m еще в два раза (до 8,8 А/см) магнитная проницаемость снова возрастает, и зависимость от нагрузки приобретает форму, показанную на рис. 2, е. Составляющая μ_1 продолжает возрастать с увеличением нагрузки до максимального значения $P=200$ МПа, а затем начинает резко снижаться. Здесь существенное увеличение амплитуды перемагничивающего поля оказывает подавляющее влияние.

При одинаковом значении амплитуды перемагничивающего поля существенное влияние на изменение магнитной проницаемости имеет структура стали. В таблице показано изменение зависимостей магнитной проницаемости от нагрузки для образцов стали У8, подвергнутых закалке и отпуска при различных температурах. По мере термической обработки изменяется структура стали и соответственно изменяется форма кривых. В области температур отпуска 300—400 °С форма кривых изменяется мало, так как в этой области распад пересыщенного твердого раствора в некоторой степени стабилизируется и структура металла меняется слабо. Сравнивая формы кривых при $H_m=8,8$ А/см (большое поле) и $H_m=2,2$ А/см (малое поле), можно заключить, что в большом поле форма кривых изменяется менее существенно. Это обусловлено тем, что увеличение амплитуды перемагничивающего поля сильнее влияет на магнитную проницаемость, нежели другие рассмотренные выше факторы.

Кроме влияния на магнитную проницаемость амплитуды перемагничивающего поля, представляет интерес также и влияние изменений частоты этого поля. Так, зависимость $\mu(P)$ для образца стали У8 после закалки и отпуска при температуре 300 °С и при измерении в поле амплитудой $H_m=8,8$ А/см на частоте 20 Гц представлена на рис. 2, е, а на рис. 3, а показаны результаты измерений для этого же образца на частоте 30 и 70 Гц соответственно. Сравнительный анализ графиков показывает, что даже небольшое изменение частоты перемагничивания существенно изменяет форму кривых.



Примечание. Цифрами на кривых обозначена нагрузка P , МПа.

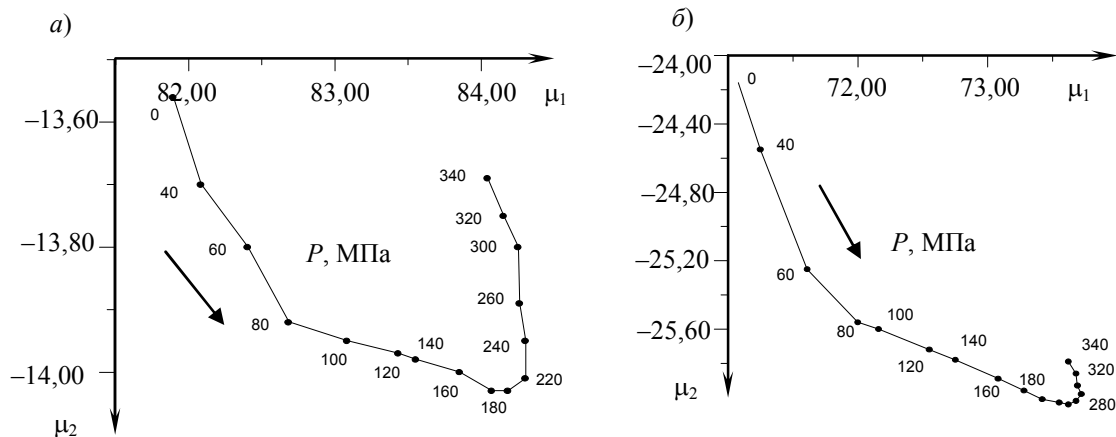


Рис. 3

Обсуждение результатов измерений. Рассмотренные зависимости магнитной проницаемости различных сталей от величины упругих напряжений, вызванных растяжением (как для сталей в исходном состоянии, так и в состояниях закалки и отпуска), демонстрируют примеры и увеличения, и уменьшения магнитной проницаемости. Полученные результаты частично подтверждаются ранее опубликованными работами. Например, немонотонные изменения магнитной проницаемости при увеличении нагрузки могут быть объяснены влиянием упругих напряжений на смещение 90° -ных границ [12]. Другой пример: увеличение магнитной проницаемости с повышением температуры отпуска происходит до тех пор, пока не начнет

сказываться рост внутренних полей рассеяния [13]. Изгиб кривых зависимости μ (см. таблицу) при нагрузках порядка 200 МПа соответствует области минимального значения коэрцитивной силы при растяжении образцов [2].

Однако среди приведенных результатов экспериментальных исследований особый интерес представляет металловедческая сторона вопроса, так как для различных сталей, даже и в исходном состоянии, получены значительно отличающиеся зависимости. Это означает также и существенное различие доменной структуры рассматриваемых сталей.

Представляет интерес также существенная зависимость полученных результатов от амплитуды и частоты перемагничивающего поля, что указывает на энергетическую природу рассматриваемых явлений. Для получения количественных оценок приведенных результатов предполагается дальнейшее изучение рассматриваемых явлений на основе моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орехов Г. Г. Влияние структуры и некоторых видов обработок ферромагнетиков на магнитоупругий эффект // Дефектоскопия. 1980. № 4. С. 86—90.
2. Кулеев В. Г., Атангулова Л. В. Влияние упругих напряжений на обратимую восприимчивость ферромагнитных сталей в разных магнитных состояниях // Физика металлов и металловедение. 1999. Т. 87, № 5. С. 52—57.
3. Буда Г. В., Кулеев В. Г. Влияние упругой деформации на магнитные свойства сталей с различной структурой // Дефектоскопия. 1998. № 11. С. 12—26.
4. Atherton D. L., Ton V. The effects of stress on minor hysteresis loop // IEEE Trans. on Magnetics. 1990. Vol. 26, N 3. P. 1153—1156.
5. Atherton D. L., Ton V. Effect of order of stress and field application changes anhysteresis magnetization // IEEE Trans. on Magnetics. 1990. Vol. 26, N 3. P. 1157—1159.
6. Jagadish Ch., Clapham L., Atherton D. L. Influence of uniaxial elastic stress on power spectrum and pulse height distribution of surface Barkhausen noise in pipeline steel // IEEE Trans. on Magnetics. 1990. Vol. 26, N 3. P. 1160—1163.
7. Makar J. M., Atherton D. L. Effect of uniaxial stress on the reversible and irreversible permeabilities of 2 % Mn pipeline steel // IEEE Trans. on Magnetics. 1990. Vol. 30, N 4. P. 1380—1387.
8. Makar J. M., Atherton D. L. Effect of stress on magnitostriiction of 2 % Mn pipeline steel // IEEE Trans. on Magnetics. 1990. Vol. 30, N 4. P. 1388—1394.
9. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. М.: Госэнергоиздат, 1959. Ч. 3. 194 с.
10. Плис А. И., Сливина Н. А. Лабораторный практикум по высшей математике. М.: Высш. школа. 1994. 416 с.
11. Дякин В. В., Сандовский В. А. Задачи электродинамики в неразрушающем контроле. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 390 с.
12. Киттель Ч., Галт Я. Теория ферромагнитных областей (доменов) // Магнитная структура ферромагнетиков / Под ред. С. В. Вонсовского. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. С. 459—506.
13. Журавлев В. Н., Николаева О. И. Машиностроительные стали: Справочник. М.: Машиностроение, 1981. 391 с.

Сведения об авторах

- Владимир Аронович Сандовский** — д-р техн. наук; Институт физики металлов РАН, отд. неразрушающего контроля, Екатеринбург; E-mail: mar_19@e-sky.ru; sandov@imp.uran.ru
- Евгений Михайлович Файнимидт** — д-р техн. наук, профессор; Нижнетагильский технологический институт Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина; E-mail: nti@ntiustu.ru

Рекомендована Нижнетагильским
технологическим институтом

Поступила в редакцию
18.03.11 г.