

Л. В. КИРЕНСКИЙ и З. М. ПАТЮКОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОГО ГИСТЕРЕЗИСА ТЕРМОУПРУГОГО ЭФФЕКТА В НИКЕЛЕ И НИКЕЛЬ-КРЕМНИСТЫХ СПЛАВАХ

Открытое более 100 лет назад Томсоном явление возникновения термоэлектродвижущей силы (т.э.д.с.) в цепи, состоящей из деформированного и недеформированного металла при наличии градиента температуры в ней, до сих пор привлекает внимание исследователей. За последние 10—15 лет интерес к нему возрос в связи с возможностью изучения при помощи эффекта Томсона пластических деформаций в металлах.

В ферромагнетиках это явление обладает некоторыми интересными особенностями, связанными с наличием в них спонтанной намагниченности. Например, в обычных металлах т.э.д.с., наведенная упругой деформацией, после снятия напряжений также исчезает [1]. В ферромагнитных же металлах и сплавах под влиянием упругих напряжений с происходит изменение доменной структуры, которая после снятия с не восстанавливается [2, 3]. Эта необратимость изменения доменной структуры приводит к тому, что в ферромагнетиках ряд магнитных и электрических свойств (намагниченность [4], гальваноупругий эффект [5] и др.) обнаруживают упругий гистерезис.

Неоднозначность хода кривых т.э.д.с. при наложении и снятии нагрузки в железных и никелевых проволоках наблюдал еще Бахметьев в конце XIX в. [6], однако подробных исследований в этом направлении он не проводил.

В настоящей работе изучалось явление гистерезиса упругой т.э.д.с. в никеле и никель-кремнистых сплавах с содержанием Si от 0,5 до 4% (вес.) как в отсутствие внешнего магнитного поля, так и при условии предварительного намагничивания образца.

Подробное описание экспериментальной установки дано в работе одного из авторов [7].

Результаты наблюдений

Кривые т.э.д.с. при плавном циклическом изменении растягивающих нагрузок для $H = 0$ и для различных значений магнитного поля, включаемого до начала растяжения, приведены в статье [7]. Было установлено, что при наложении и последующем снятии напряжений величина т.э.д.с. не восстанавливается (упругий гистерезис термоупругого эффекта). После снятия нагрузки наблюдается «остаточная» т.э.д.с. Если повторить цикл нагрузка — разгрузка, исходя из состояния остаточного эффекта, то т.э.д.с. изменяется по замкнутой кривой, описывая петлю упругого гистерезиса, при этом нисходящие ветви (при разгрузке) для обоих циклов практически совпадают. После размагничивания образца в разгруженном состоянии остаточный эффект полностью исчезает и восстанавливается первоначальный ход кривой т.э.д.с.

Предварительное наложение магнитного поля не изменяет общего характера гистерезиса вплоть до полей, близких к техническому насыщению, где гистерезис полностью исчезает. Остаточный же эффект с ростом поля уменьшается очень быстро (рис. 1), поэтому при повторном цикле нагрузка — разгрузка, уже начиная с поля 36 Ое и выше, кривые изменения т.э.д.с. совпадают с первым циклом. Не остается постоянной также величина т.э.д.с. $\Delta\epsilon$, т. е. разность значений ϵ , соответствующих точкам

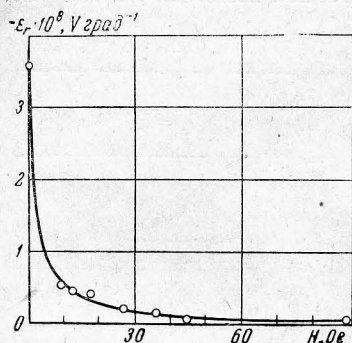


Рис. 1

Рис. 1. Изменение величины остаточного эффекта т. э. д. с. (ϵ_r) в зависимости от поля

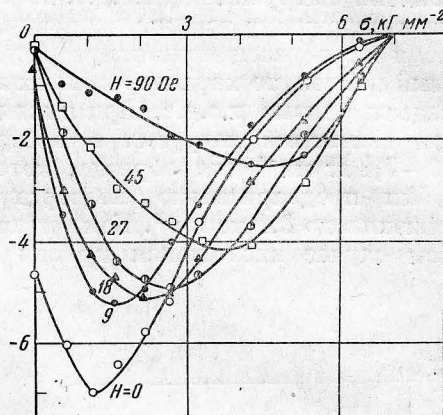


Рис. 2

Рис. 2. Величина $\Delta\epsilon$ (определение $\Delta\epsilon$ дано в тексте) в зависимости от σ при постоянных H

по ординате между восходящей и нисходящей кривыми. Эта величина изменяется как с ростом поля для данной нагрузки, так и с изменением нагрузки при постоянном поле (рис. 2). В последнем случае кривые имеют максимум, смещающийся с ростом поля в сторону более сильных нагрузок и плавно уменьшающийся при этом по абсолютной величине.

На рис. 3 представлено изменение площади петли упругого гистерезиса термоупругого эффекта в зависимости от поля. Площадь максимальна в поле ~ 38 Ое.

Гистерезисные явления т.э.д.с. вызываются теми же причинами, которые ответственны за существование в ферромагнетиках упругого гистерезиса намагниченности, т. е. необратимыми изменениями доменной структуры под действием внешних упругих напряжений. Как известно [8], расположение междоменных границ и ориентация вектора I_s в доменах в значительной мере определяется характером распределения внутренних напряжений. Их перераспределение, которое может быть вызвано действием внешних напряжений, приводит к новым расположениям границ и, следовательно, к новой доменной структуре. Но это распределение может оказаться метастабильным, что вызывает необратимые изменения и приводит к явлениям упругого гистерезиса. Исчезновение в результате размагничивания остаточного эффекта и восстановление первоначального хода кривых т.э.д.с. как раз и говорит о том, что имеем дело с необратимыми изменениями в распределении I_s доменов, а не с эффектами пластической деформации. Подтверждением этого же положения служит и возможность получения «безгистерезисных» кривых термоупругого эффекта. В отсутствие поля для этого достаточно при заданной нагрузке произвести размаг-

ничивание образца, затем переходить к следующей по величине нагрузке и т. д. (в наших опытах размагничивание осуществлялось переменным полем с убывающей до нуля амплитудой). В присутствии внешнего поля также получается «безгистерезисная» кривая термоупругого эффекта, если после наложения каждой заданной нагрузки прокоммутировать намагничивающее поле и после этого взять отсчет т.э.д.с.

Рассмотренные выше кривые упругого гистерезиса характерны тем, что при снятии нагрузки (σ) т.э.д.с. по абсолютной величине всегда больше, чем при наложении той же нагрузки.

Если же образец подвергнут растяжению, превышающему предварительный наклеп, то характер кривых гистерезиса изменяется. На рис. 4, а приведены кривые т.э.д.с. при циклическом изменении нагрузки в пределах $0-7,4 \text{ кг мм}^{-2}$ для образца, который был предварительно подвергнут растяжению до $2,1 \text{ кг мм}^{-2}$. Как видим, в этом случае нисходящая кривая 2

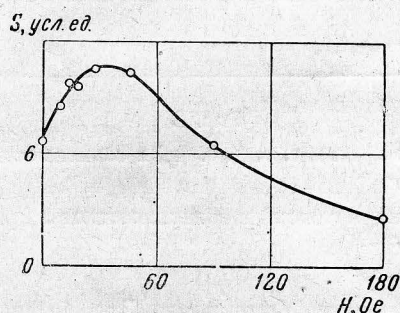


Рис. 3

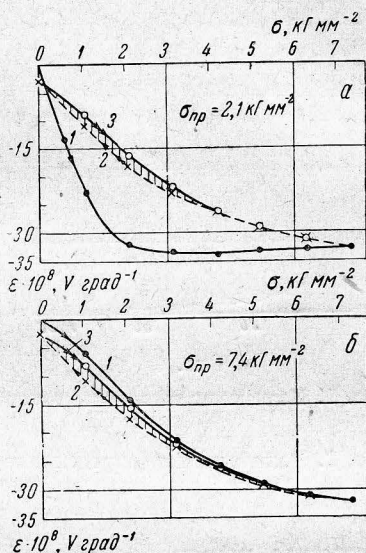


Рис. 4

Рис. 3. Изменение площади петли упругого гистерезиса термоупругого эффекта в зависимости от поля

Рис. 4. Зависимость кривых гистерезиса т. э. д. с. от величины предварительного растяжения образца.

а — $\sigma_{\text{предв}} = 2,1 \text{ кг мм}^{-2}$, $\sigma_{\text{макс}} = 7,4 \text{ кг мм}^{-2}$; б — $\sigma_{\text{предв}} = \sigma_{\text{макс}} = 7,4 \text{ кг мм}^{-2}$

в некотором интервале нагрузок идет ниже восходящей 1, т. е. наблюдается «отрицательный» гистерезис. Если тот же образец после снятия нагрузки размагнитить и повторить измерения, то восстанавливается ход кривых, характерный для упругого гистерезиса (рис. 4, б). Наличие «отрицательного» гистерезиса свидетельствует, по-видимому, о том, что начинает в значительной мере проявляться действие пластической деформации, так как относительное расположение кривых т.э.д.с. при нагрузке и разгрузке (рис. 4, а) становится подобным отмеченному в работе [1] при пластическом растяжении меди и серебра.

Приведенные выше экспериментальные результаты относились к чистому никелю. Добавка кремния приводит к быстрому уменьшению как абсолютной величины упругой т.э.д.с., так и гистерезиса ее. Так, в образцах, содержащих 1% Si, уже в поле 9 Ое упругий гистерезис при чувствительности нашей установки не обнаруживается.

Выводы

1. При циклическом изменении упругих растягивающих напряжений наблюдается упругий гистерезис термоупругого эффекта.

2. Остаточный эффект после размагничивания образца в разгруженном состоянии полностью исчезает и восстанавливается первоначальный ход кривых т.э.д.с.

3. Магнитное поле, включенное до наложения растягивающих напряжений, приводит вначале к росту площади гистерезисной петли (достигающей максимума в поле около 38 Ое) с последующим быстрым убыванием ее с ростом поля. В полях, близких к техническому насыщению, упругий гистерезис т.э.д.с. исчезает.

4. При растяжении образца до нагрузки, превышающей предварительный наклеп, при снятии напряжений наблюдается «отрицательный» гистерезис, вызванный влиянием пластических деформаций.

5. Причиной упругого гистерезиса термоупругого эффекта в ферромагнетиках могут быть необратимые изменения доменной структуры, вызванные влиянием внешних упругих напряжений.

Институт физики Сибирского отделения
Академии наук СССР
Енисейский педагогический институт

Литература

1. К у н и н Н. Ф., Уч. зап. Челябинск. пед. ин-та, 5, 1 (1958).
2. Ш у р Я. С., З а й к о в а В. А., Физика металлов и металловедение, 6, 545 (1958).
3. Сб. «Магнитная структура ферромагнетиков». Изд. Сиб. отд. АН СССР, 1960.
4. Д е х т я р М. В., Ж. эксперим. и теор. физ., 9, 438 (1939).
5. З а й ц е в В. И., Ж. эксперим. и теор. физ., 19, 95 (1949).
6. Б а х м е ть е в П., ЖРФХО, 18, 47, 1886; 21, 264, 1889.
7. П а т ю к о в а З. М., см. настоящий номер журнала, стр. 172.
8. В о н с о в с к и й С. В., Ш у р Я. С., Ферромагнетизм. ОГИЗ, 1948.