

05

ТЕРМОУПРУГОСТЬ И ГИСТЕРЕЗИС МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СПЛАВАХ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ.

II. ФЕРРОУПРУГИЙ ГИСТЕРЕЗИС ПРИ ДЕФОРМАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВОВ НА МЕДНОЙ ОСНОВЕ В МАРТЕНСИТНОМ СОСТОЯНИИ

© В. Приб, Х. Штекманн

1st Memory Alloys GmbH, Berlin, Deutschland
(Поступило в Редакцию 8 февраля 1996 г.)

Представлены результаты исследования ферроупругого гистерезиса при полных и неполных циклах деформации растяжение-сжатие монокристаллов сплавов на медной основе. Внутренняя структура ферроупругого гистерезиса характеризуется наличием диагонали, описывающей глобальное равновесие мартенситных вариантов, на которой лежат полученные в неполных циклах точки поворота от внутренней упругости к внутренней текучести. Эта диагональ не имеет наклона и практически совпадает с осью деформации для нулевого напряжения. Найдена сильная зависимость ферроупругого гистерезиса от ориентировки монокристаллических образцов и полное отсутствие температурной зависимости. Впервые экспериментально показано подобие до деталей ферроупругого и ферромагнитного гистерезиса. Именно на этом основании назван исследуемый в работе гистерезис ферроупругим. Определены, экспериментально измерены и рассчитаны количественные и качественные характеристики и параметры ферроупругого гистерезиса, такие как диссипативная энергия и ее параболическая зависимость от ферроупругой деформации, коэффициент ферроупругости, механическая коэрцитивная сила.

Введение

Специфическим признаком сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ), обусловленным термоупругими мартенситными превращениями, является наличие двух механизмов деформации: нормальное октаэдрическое скольжение (нормальная пластичность) и квазипластическая деформация, обусловленная либо напряжением, вызывающим мартенситное превращение при деформировании аустенита (псевдоупругость) [1], либо напряжением, вызывающим перегруппировку мартенситных вариантов различной ориентации при деформировании мартенсита (ферроупругость) [2].

Именно эта специфика определяет уникальные механические свойства сплавов, такие как эффект памяти формы, сверхупругость, высокое демпфирование. Несмотря на многочисленные исследования этих эффектов, изучение собственно деформации мартенсита остается до сегодняшнего дня недостаточным, что связано прежде всего с трудностями анализа сложных деформационных циклов, предполагающих изменение знака деформации в полном цикле на одном и том же образце.

В предлагаемой работе представлены результаты детального исследования ферроупругого гистерезиса сплавов на медной основе. Ферроупругая деформация монокристаллов представляет собой наиболее выгодный и эффективный путь изучения гистерезисного поведения, поскольку в этом случае отсутствуют фазовые и межкуристаллитные границы и тепловые эффекты превращения, а вклад в гистерезис можно ожидать только от взаимодействия вариантов реакции и мартенситных доменов в процессах переориентировки мартенситной фазы.

Экспериментальная процедура

Плавка и выращивание монокристаллов, так же как термообработка сплавов (табл. 1) описаны в части I¹. Образцы для механических испытаний с размером рабочей части $2 \times 2.5 \times 36$ мм и общей длиной около 70 мм вырезали из выращенных монокристаллов вдоль их оси, термообрабатывали и полировали. Изотермические механические испытания проводили со скоростью деформации $2.5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ на специально сконструированной для этой цели в Берлинском техническом университете машине. Испытательная машина позволяла снимать полные петли ферроупругого гистерезиса при приложении к образцу внешнего растягивающего и сжимающего напряжения, проводить одновременно наблюдение поверхности образца в световом микроскопе и измерение электросопротивления образцов в процессе деформации (результаты по световой микроскопии и измерению электросопротивления в данной работе не приведены).

Рабочая часть была ограничена со всех сторон, чтобы исключить боковые смещения образца во время сжимающей деформации. Форма образца не оказывала при этом большого влияния на качество кривых

Таблица 1. Состав сплавов (at.%), ориентировка и температуры перехода (K) исследованных образцов

Номер сплава	Cu	Al	Zn	Mn	$[hkl]_{B2}$	α	M_s	M_f	A_s	A_f
1	68.8	15.2	16.6	-	100	45	289.5	286.4	290.7	293.0
2	68.8	15.2	16.6	-	113	30	332.0	324.2	328.2	336.0
3	68.8	15.2	16.6	-	111	~ 90	324.1	308.0	312.0	328.1
4	68.6	20.7	-	10.7	110	-	300.0	287.0	308.0	322.0

¹ См. в настоящем выпуске "I. Гистерезис термического свободного от напряжений превращения".

растяжения–сжатия, как при стандартных испытаниях, поскольку напряжение мартенситной текучести значительно меньше напряжения пластической текучести.

Экспериментальные результаты

1) Форма и внутреннее строение петли ферроупругого гистерезиса. Испытания на растяжение–сжатие в мартенситном состоянии показывают, что между пределами текучести при растяжении ($\sigma > 0$) и сжатии ($\sigma < 0$) на диаграммах напряжение–деформация (рис. 1) имеется гистерезис. Общие черты его следующие: симметричная относительно оси деформации (ось нулевого напряжения) форма петли гистерезиса, которая в идеализированном представлении может рассматриваться как параллелограмм, составленный из двух треугольников или из двух треугольников и одного внутреннего параллелограмма (исследованный в части III скрытый внутренний гистерезис); независимость параметров гистерезиса от температуры (как показывают испытания, при разных температурах в интервале от 230 К до температур обратного превращения); подобие до деталей петель ферроупругого (рис. 2, а, б) и ферромагнитного гистерезисов.

Исследованная в неполных циклах внутренняя структура петли ферроупругого гистерезиса может быть охарактеризована наличием следующих особенностей: “внутренней” упругости при “входе” в петлю гистерезиса со стороны растяжения либо сжатия; “внутренней” границы текучести растяжения либо сжатия; горизонтально расположенной короткой диагонали петли гистерезиса, лежащей близко к оси деформации (ось нулевого напряжения), которая является местом точек пересечения линейно экстраполированных линий “внутренней” упругости и “внутренней” текучести; подобием неполных и главной петель гистерезиса, обусловленным параллельностью их линий упругости и текучести при достаточно больших амплитудах деформации.

Обнаруженная внутри петли гистерезиса диагональ соответствует глобальному механическому равновесию смеси M^+ (соответствует монодомену мартенсита растяжения) и M^- (монодомен сжатия) вариантов мартенсита под действием внешнего напряжения в отсутствие химического вклада в баланс движущих сил, поскольку эти варианты не отличаются ни в термодинамическом (нет разницы в их энтропии), ни в симметрийном смысле (различие в макросимметрии имеет место только при выделении одного из кристаллографических направлений через приложение одноосного внешнего напряжения).

Отсутствие какого бы то ни было наклона этой диагонали указывает на безразличное равновесие мартенситных вариантов, тогда как метастабильное, описываемое линиями текучести равновесие реализуется в результате взаимодействия мартенситных вариантов между собой или со структурными дефектами (блокировка внутренних мартенситных границ дефектами). Об этом можно судить из анализа ориентационной зависимости гистерезиса. В идеальном случае, когда имеет место “легкая ось деформирования”, образец 1 не показывает ни упрочнения, ни определяемого им, как можно видеть из приведенных диаграмм, гистерезиса.

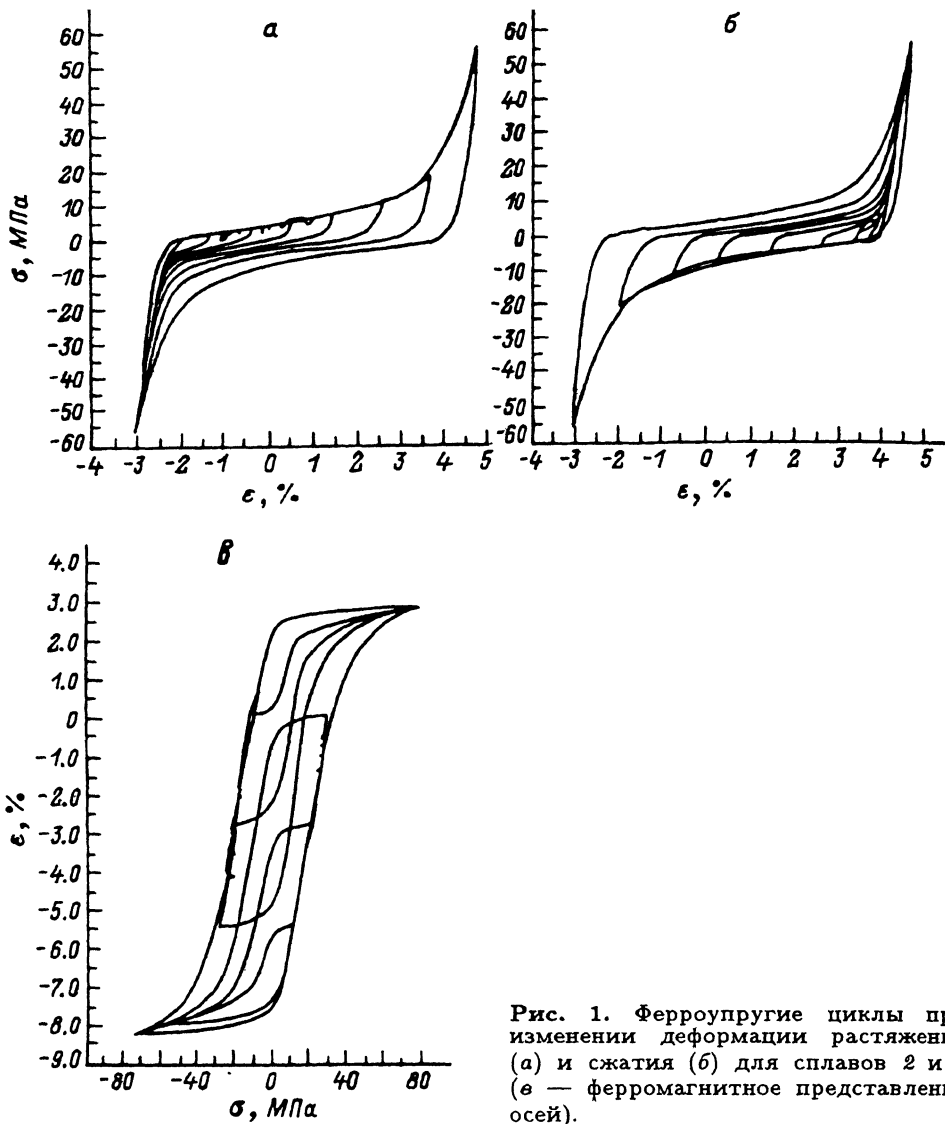


Рис. 1. Ферроупругие циклы при изменении деформации растяжения (а) и сжатия (б) для сплавов 2 и 4 (в — ферромагнитное представление осей).

2) Количественные параметры гистерезиса. Петлю ферроупругого гистерезиса можно описать следующими параметрами: шириной гистерезиса $\Delta\sigma$ (амплитудой напряжения между линиями текучести растяжения-сжатия); длиной гистерезиса $\Delta\epsilon$ (амплитудой деформации между линиями упругости); коэффициентом упрочнения в энергетическом представлении:

$$k_{\sigma}^f = \frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\epsilon} \approx \frac{\Delta\sigma}{\rho\Delta\epsilon}, \quad (1)$$

где ρ — плотность сплава (последнее уравнение верно для идеализированной петли гистерезиса); диссипированной в одном замкнутом цикле

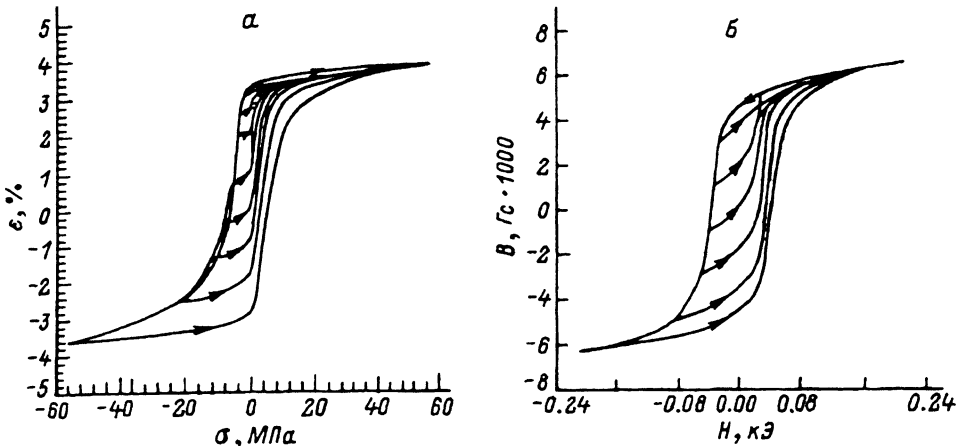


Рис. 2. Ферроупругий и ферромагнитный гистерезис.

a — сплав 2, *б* — молибденовый пермаллой ([³], в оригинале [⁴]); *B* — магнитная индукция, *H* — напряженность магнитного поля.

ферроупругой деформации энергией, вычисляемой через заключенную в петле гистерезиса площадь,

$$w_D^f = \frac{\Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon}{\rho}. \quad (2)$$

Все эти параметры собраны для исследованных сплавов в табл. 2.

3) Сравнение с ферромагнитным гистерезисом, ориентационная зависимость и диссипированная энергия. Полное сходство петель ферроупругого и ферромагнитного гистерезиса (рис. 2, *a, б*) удивительно, хотя легко понимаемо, поскольку в обоих случаях речь идет о переориентации доменов фазы низкой симметрии (или низкотемпературной фазы) под действием внешней силы. Это позволяет ферроупругий гистерезис легче понимать и описывать в терминах более развитой теории магнетизма.

Одной из важных характеристик ферроупругого гистерезиса является его ширина, которая для сплавов с ЭПФ может быть представлена как механическая коэрцитивная сила. Можно предполагать, что она связана, как и в ферромагнетиках, с блокировкой мартенситных доменных (двойниковых) границ. Обнаруженная в наших экспериментах независимость ферроупругого гистерезиса от температуры также характерна для ферромагнитного гистерезиса.

Таблица 2. Параметры ферроупругого гистерезиса

Номер сплава	$\Delta\varepsilon_f$	$\Delta\sigma$, МПа	k_σ^f , $\frac{\kappa\text{Дж}}{\text{кг}}$	w_D^f , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
1	0.150	3.4	2.8	63.8
2	0.070	12.0	21.4	105.0
3	0.027	50.0	231.5	168.8
4	0.106	40.0	47.2	530.0

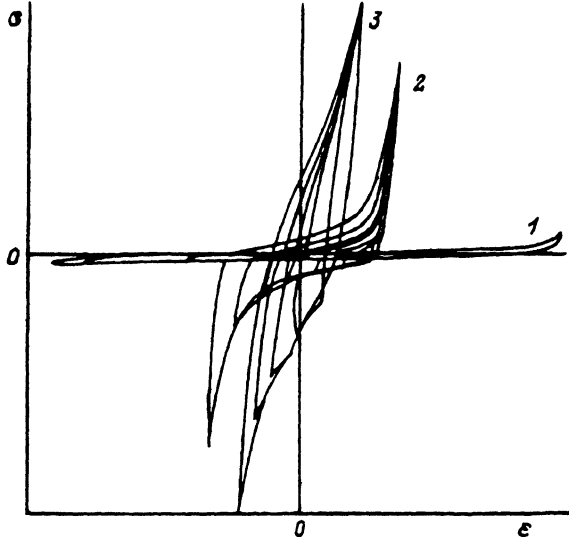


Рис. 3. Зависимость ферроупругого гистерезиса от ориентировки оси деформации.

1-3 — образцы монокристаллических сплавов.

Известна ориентационная зависимость ферромагнитного гистерезиса, которая проявляется в наличии оси легкого намагничивания ферромагнитных сплавов. Действие магнитного поля вдоль этой оси вызывает максимальную намагниченность насыщения при минимальных гистерезисных потерях энергии. Ось легкого ферроупругого деформирования существует, как это показано экспериментально, также и в монокристаллах с данной кристаллографией превращения (система мартенситного сдвига $\{110\}[110]$). Это — ось $[100]_{B2}$. Снятые на различно ориентированных образцах петли ферроупругого гистерезиса очень сильно отличаются друг от друга (рис. 3, табл. 2). Ориентация $[100]_{B2}$ оси растяжения может рассматриваться для этих сплавов как благоприятная, в то время как ориентировка $[111]_{B2}$ — как неблагоприятная, поскольку коэффициент упрочнения и соответственно гистерезис минимальны при максимальной длине гистерезиса для образца 1 и максимальны при минимальной длине гистерезиса для образца 3. Промежуточному случаю соответствует образец 2. Подобная зависимость ширины гистерезиса и мартенситной деформации была уже найдена для поликристаллических образцов NiTi с текстурой [3-5].

Зависимость диссипированной в одном замкнутом цикле энергии w_D^f от ферроупругой деформации (амплитуды цикла) может быть вычислена через эмпирическое выражение для внешнего механического напряжения, описывающего линии ферроупругой текучести,

$$\sigma_f = \sigma_0 + k_\sigma^f \varepsilon_f \quad (3)$$

путем его интегрирования

$$w_D^f = 2 \int \sigma_f d\varepsilon = 2 \int (\sigma_0 + k_\sigma^f \varepsilon) d\varepsilon = 2\sigma_0 \varepsilon + k_\sigma^f \varepsilon^2, \quad (4)$$

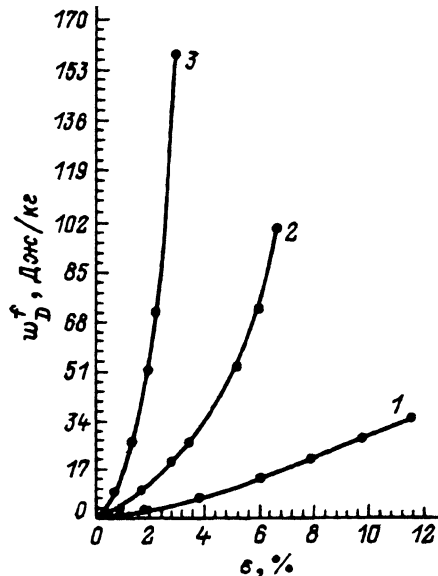


Рис. 4. Зависимость диссипированной энергии в циклах ферроупругой деформации от амплитуды (1-3 — сплавы).

где σ_0 является в общем случае пределом текучести (здесь $\sigma_0 = 0$), $\sigma_0 \epsilon = w_D^p$ соответствует скрытому внутреннему гистерезису (см. часть III). Параболическая зависимость диссипированной энергии от амплитуды ферроупругой деформации показана на рис. 4. Известно также, что необходимая для перегруппировки магнитных доменов энергия намагничивания описывается параболической зависимостью от намагниченности [6].

Из ферроупругого гистерезиса можно отчетливо видеть отсутствие накопления упругой энергии (смещение предела ферроупругой текучести), наблюдаемого как наклон линий текучести, зависящий параболически от деформации терм, соответствующий по форме записи выражению для упругой энергии с некоторым фиктивным модулем k_α^f смеси мартенситных вариантов и описывающий в то же время полную в одном цикле деформации диссипированную энергию. Если нет наклона линии текучести, т.е. нет, согласно термоупругой модели накопления, упругой энергии, то отсутствует также и диссипация энергии и реальная траектория процесса переориентации мартенситных вариантов описывается горизонтальной, отвечающей безразличному глобальному равновесию линией, аналогичной линии Максвелла в теории газов. Экспериментально такой случай имеет место для образца 1.

Основываясь на этом экспериментальном факте трудно, однако, представить реально приводимый в термоупругой модели случай отсутствия диссипированной энергии (нулевая ширина гистерезиса) при большом наклоне линий метастабильного равновесия.

Список литературы

- [1] *Delaey L. et al.* // *Metals Forum*. 1981. N 4. P. 164.
 - [2] *Prieb V.* // *J. de Physique*. IV suppl. 1991. Vol. 11. N 1. P. 4-317.
 - [3] *Cory J.S., McNicolson J.L., Jr.* // *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 58. P. 3282.
 - [4] *Bozorth R.M.* *Ferromagnetism*. Van Nostrand, 1968.
 - [5] *Приб В.Э., Паскаль Ю.И. и др.* *Металловедение и термическая обработка металлов (МиТОМ)*. 1979. № 9. 62 с.
 - [6] *Jiles D.C., Atherton D.L.* // *J. Appl. Phys.* 1984. Vol. 55. P. 2115.
-