

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Я. С. ШУР и Ф. Н. ДУНАЕВ

О МАГНИТНОЙ ТЕКСТУРЕ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ В МЯГКИХ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПОСЛЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 18 III 1950)

1. Экспериментально было показано (^{1,2}), что термомеханическая обработка, состоящая в охлаждении ферромагнетика от высоких температур в присутствии односторонних напряжений, приводит к возникновению магнитной текстуры, т. е. преимущественной ориентации намагниченности доменов I_s вдоль (или под небольшими углами) некоторых направлений в образце. Характер этой текстуры определяется соотношением знаков односторонних внешних напряжений, прикладываемых к образцу при его охлаждении, и магнетострикции λ данного материала.

Экспериментально также установлено (³), что магнитные свойства мягких магнитных материалов зависят от магнитной текстуры, возникновение которой приводит к появлению анизотропии магнитных свойств.

Однако на основании до сих пор накопленных опытных данных нельзя указать, каков истинный механизм процессов, протекающих при термомеханической обработке, и какова природа возникающей при этом магнитной текстуры и ее связь с магнитными свойствами у различных ферромагнетиков.

По этому вопросу можно лишь высказать ряд предположений. Во-первых, можно допустить, что если в процессе охлаждения ферромагнетика при переходе через точку Кюри приложены односторонние напряжения, то I_s зарождающихся доменов будет ориентирована в соответствии с соотношением знаков λ и напряжений. Если при этом точка Кюри θ° достаточно высока, то произойдет рассасывание магнетострикционных напряжений, возникающих ниже θ° , вместе с появлением спонтанной намагниченности. При этом направления в образце, вдоль которых были ориентированы I_s доменов во время охлаждения, будут являться направлениями легкого намагничивания. Во-вторых, возможно, что односторонние напряжения, прикладываемые к ферромагнетiku, независимо от значений θ° , создают в нем ориентированные остаточные напряжения, которые и приводят к магнитной текстуре, характер которой также будет определяться соотношением знаков λ и напряжений. И, наконец, в-третьих, можно полагать, что под действием внешних напряжений, прилагаемых при высокой температуре, происходит перестройка кристаллической решетки, например, из кубической решетка становится тетрагональной, что и приводит к анизотропии магнитных свойств.

Эффект, производимый термомеханической обработкой, изучен на малом числе ферромагнетиков и недостаточно подробно, что и вызывает необходимость дальнейшего всестороннего изучения этого явления.

В настоящей работе приведены данные о влиянии термомеханической обработки на магнитные свойства новых ферромагнитных материалов, а также более подробные сведения о ранее исследованных,

при этом особое внимание уделено уточнению характера магнитной текстуры, возникающей в результате этой обработки, и зависимости магнитных свойств от этой текстуры.

2. Исследование проводилось на образцах кремнистого железа (3,5% Si), 56-пермаллоя (56% Ni, 1% Mo), Си-пермаллоя (72% Ni, 9% Си, 38% Mo) и перминдюра (49% Fe, 49% Co, 2% V) в форме узких полосок: длина 300 мм, сечение 0,4—0,6 мм². Все эти материалы

обладают положительной λ и различными θ° . Термомеханическая обработка растяжением производилась в специальной установке⁽²⁾, в которой охлаждение до комнатной температуры в присутствии нагрузки σ_A проводилось для образцов кремнистого железа и 56-пермаллоя от 600°, Си-пермаллоя от 500° и перминдюра от 700°.

После каждой обработки, проводимой при различных σ_A , с образца снимались кривые намагничивания $4\pi J(H)$ и магнитострикции $\lambda(H)$ в присутствии раз-

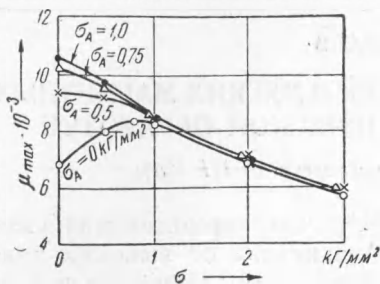


Рис. 1

личных растягивающих нагрузок σ , вплоть до таких σ , после снятия которых магнитные свойства оставались такими же, как до наложения нагрузки.

Перед каждым измерением образец тщательно размагничивался. В некоторых случаях перед измерением $\lambda(H)$ образец размагничивался при той же нагрузке, при которой производилось его измерение. Съемка кривых $4\pi J(H)$ и $\lambda(H)$ производилась в одной и той же установке без перемонтировки образца. При этом кривые $4\pi J(H)$ снимались коммутационным дифференциальным баллистическим методом, $\lambda(H)$ измерялись методом оптического рычага⁽⁴⁾.

3. В качестве иллюстрации основных закономерностей, установленных при этих измерениях, на рис. 1—4 приведены значения максимальной проницаемости μ_{\max} (рис. 1 и 3) и кривые $\lambda'(H)$ (рис. 2 и 4) при различных нагрузках σ , соответственно, для образцов кремнистого железа (рис. 1 и 2) и Си-пермаллоя (рис. 3, 4), прошедших термомеханическую обработку при различных σ_A *. Из рис. 1 видно, что в кремнистом железе после охлаждения без нагрузки ($\sigma_A = 0$) с ростом σ μ_{\max} вначале возрастает, достигает максимума при $\sigma = 0,8$ кг/мм² и затем убывает. После охлаждения под растяжением с ростом σ величина μ_{\max} только убывает. Абсолютные значения μ_{\max} образца, прошедшего термомеханическую обработку, измеренные без растяжения, выше чем у образца, не подвергнутого этой обработке даже при оптимальных условиях его растяжения.

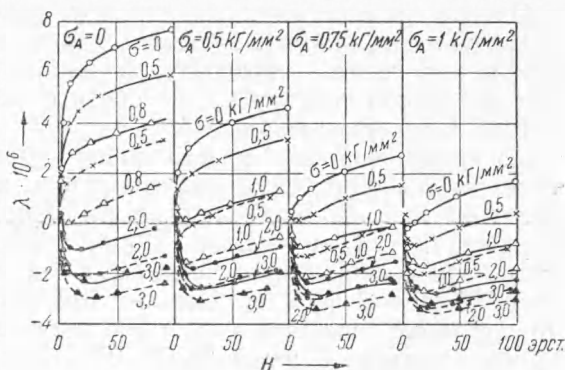


Рис. 2

* Пунктирные кривые на рис. 2 сняты после размагничивания при тех же σ , при которых производилось измерение. Этим достигалось большее соответствие кривых $4\pi J(H)$ и $\lambda(H)$.

Кривые рис. 2 показывают, что вследствие термомеханической обработки λ всегда уменьшается и тем больше, чем выше σ_A , причем при $\sigma_A = 1 \text{ кг/мм}^2$ в начальном участке полей λ становится отрицательной. У всех образцов, прошедших любую обработку, под действием растяжения λ всегда уменьшается и при некоторой σ становится отрицательной; так, у образца, охлажденного без нагрузки, это происходит при $\sigma = 2 \text{ кг/мм}^2$.

Если производить размагничивание при той же нагрузке, при которой производится измерение ($\sigma_{\text{раз}} = \sigma$), то λ еще сильнее уменьшается; в частности, у образца, не прошедшего термомеханической обработки, при $\sigma_{\text{раз}} = \sigma = 0,8 \text{ кг/мм}^2$ в начальном участке полей она становится равной нулю.

Аналогичные закономерности наблюдаются и на образцах Си-пермаллой. Как видно из рис. 3, зависимость μ_{max} от σ имеет тот же общий характер, что и на рис. 1, однако здесь при $\sigma_A = 0,5 \text{ кг/мм}^2$ на кривой $\mu_{\text{max}}(\sigma)$ еще обнаруживается максимум. Из кривых рис. 4 видно, что под действием термомеханической обработки λ убывает и тем больше, чем выше σ_A , и при $\sigma_A = 1,8 \text{ кг/мм}^2$ она в интервале полей 15—100 эрст. становится отрицательной.

В сплаве 56-пермаллой термомеханическая обработка до $\sigma_A = 1,5 \text{ кг/мм}^2$ вызывает лишь рост μ_{max} и уменьшение λ . При $\sigma_A > 1,5 \text{ кг/мм}^2$ величина μ_{max} начинает падать, а λ попрежнему только уменьшается.

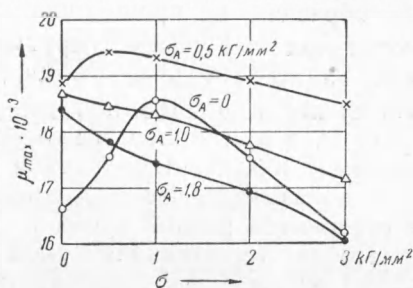


Рис. 3

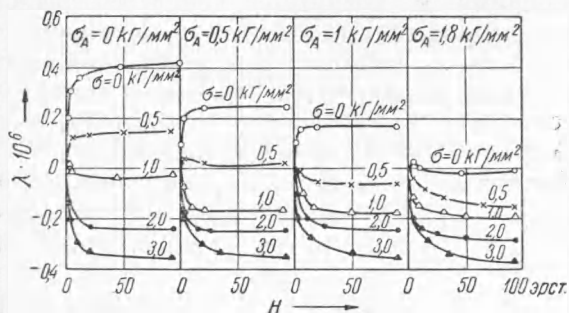


Рис. 4

4. Можно дать следующее объяснение полученным результатам измерений. Падение $\lambda(H)$ после термомеханической обработки при всех нагрузках σ_A показывает, что эта обработка всегда приводит к возникновению магнитной текстуры с преимущественной ориентацией намагниченности вблизи линии растяжения. Относительное уменьшение влияния упругого растяжения с ростом величины σ_A на ход $\lambda(H)$ показывает, что чем выше σ_A , тем магнитная текстура становится все более резко выраженной. Возникновение этой текстуры сопровождается также изменением магнитных свойств, характер которого различен в зависимости от тех изменений физических свойств, которые вызывает эта обработка. Если термомеханическая обработка не приводит к изменению знака λ и не вызывает серьезных искажений кристаллической решетки, тогда μ_{max} в результате этой обработки только возрастает и тем больше, чем резче выражена магнитная текстура (т. е. чем λ меньше). Так, μ_{max} растет по мере увеличения σ_A в кремнистом железе

до $\sigma_A = 1$ кГ/мм² (рис. 1), в Си-пермаллое до $\sigma_A = 0,5$ кГ/мм² (рис. 3), в 56-пермаллое до 1,5 кГ/мм², в перминдюре даже при $\sigma_A > 2$ кГ/мм². Предел нагрузок σ_A , выше которых μ_{\max} начинает падать, в различных материалах может быть вызван различными причинами, которые могут быть не связаны с разрушением магнитной текстуры.

А именно, во-первых, величина μ_{\max} может убывать, если термомеханическая обработка вызывает изменение знака λ . Вообще, изменение знака λ всегда приводит к уменьшению μ_{\max} , например, это явление отчетливо проявляется в кремнистом железе и Си-пермаллое на образцах, не прошедших термомеханической обработки ($\sigma_A = 0$), когда под действием упругих напряжений у них меняется знак λ . Так, из кривых рис. 1 видно, что максимум μ_{\max} при $\sigma_A = 0$ имеет место, когда $\sigma = 0,8$ кГ/мм², при этой же нагрузке и λ равна нулю (рис. 2), а при более высоких σ λ становится отрицательной и μ_{\max} начинает падать. Аналогичное сравнение кривых Си-пермаллоя (рис. 3 и 4) показывает, что μ_{\max} имеет максимум при $\sigma = 1$ кГ/мм², при этом λ становится равной нулю.

После термомеханической обработки кремнистого железа при $\sigma_A = 1$ кГ/мм² μ_{\max} приобретает наивысшее значение, так как при этом λ близка к нулю. При более высоких σ_A величина μ_{\max} начинает падать (2), ибо λ становится отрицательной, и с повышением σ_A она растет по абсолютной величине. Таким образом, в случае кремнистого железа можно принять, что именно изменение знака λ является той причиной, которая устанавливает предел повышения μ при термомеханической обработке.

Во-вторых, величина μ_{\max} может начать убывать, если термомеханическая обработка вызывает, наряду с ориентированными остаточными напряжениями, приводящими к магнитной текстуре, также появление больших градиентов напряжений, препятствующих процессам намагничивания. Следовательно, в данном случае искажения кристаллической решетки приводят к падению μ . При помощи такого механизма можно объяснить следующие опытные факты. В Си-пермаллое при $\sigma = 0$ λ становится отрицательной лишь при $\sigma_A = 1,8$ кГ/мм² (рис. 3), в то время как μ_{\max} начинает убывать уже при σ_A несколько больших 0,5 кГ/мм². Аналогичное явление наблюдается в 56-пермаллое, где при $\sigma_A > 1,5$ кГ/мм² μ_{\max} начинает падать, хотя λ при этом все еще только убывает.

5. Анализируя экспериментальные данные, полученные в данной работе и опубликованные ранее (1,2), о свойствах ферромагнетиков, прошедших термомеханическую обработку, обладающих в исходном состоянии различными θ° и λ , а также отличающихся по механическим свойствам, можно сделать следующие общие выводы. Во всех случаях, независимо от значений θ° , термомеханическая обработка создает магнитную текстуру. Предел повышения μ при этой обработке определяется изменением знака λ и искажением кристаллической решетки, причем роль этих факторов в различных ферромагнетиках различна.

Повидимому, основной причиной возникновения магнитной текстуры при термомеханической обработке являются остаточные ориентированные напряжения.

Уральский государственный университет
им. А. М. Горького

Поступило
24 II 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Я. С. Шур и А. С. Хохлов, ЖЭТФ, **10**, 1113 (1940). ² Я. С. Шур, Изв. АН СССР, сер. физ., **11**, 570 (1947). ³ Я. С. Шур, Изв. АН СССР, сер. физ., **11**, 640 (1947). ⁴ Я. С. Шур и А. С. Хохлов, ЖЭТФ, **16**, 1011 (1946).