

Горкунов Э. С., Субачев Ю. В., Поволоцкая А. М., Задворкин С. М.
ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУСЛОЙНОГО ФЕРРОМАГНЕТИКА, СОСТАВЛЕННОГО ИЗ КОМПОНЕНТОВ С МАГНИТОСТРИКЦИЕЙ РАЗНЫХ ЗНАКОВ, ПРИ УПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Изучено влияние упругой деформации одноосным растяжением (сжатием) на характер поведения ряда магнитных характеристик армко-железа и никеля, обладающих магнитострикцией разных знаков, и двуслойного материала, составленного из них. Измерения магнитных характеристик проведены как в условиях замкнутой магнитной цепи, так и с применением накладных преобразователей вдоль и поперек направления приложения нагрузки. Полученные результаты объяснены с точки зрения формирования магнитной анизотропии, наведенной действием нормальных напряжений. Сопоставлены результаты измерений гистерезисных и магнитострикционных свойств исследуемых материалов. Установлены магнитные параметры исследованных материалов, монотонно изменяющиеся с ростом приложенных напряжений.

Ключевые слова: *растягивающие и сжимающие напряжения, упругое деформирование, магнитострикция, коэрцитивная сила, двуслойный материал.*

Изделия и элементы конструкций из композиционных материалов (КМ), имеющие в своем составе компоненты с различными физико-механическими свойствами, находят широкое применение. Однако проблема диагностики деталей машин и элементов металлоконструкций, изготовленных из таких материалов, до сих пор не решена, в том числе из-за неполного понимания роли магнитоупругого эффекта в формировании магнитных свойств КМ, а также вклада каждого компонента в его магнитные характеристики. Различия в механических свойствах составляющих КМ под действием приложенной нагрузки приводят к различному напряженному состоянию

каждого из компонентов. Когда составляющие КМ представляют собой, к примеру, сплавы на основе железа (стали), возможна такая ситуация, когда при одной и той же деформации магнитоэлектрики компонентов будут иметь противоположные знаки. В такой постановке задачи вклад отдельных компонентов в магнитные свойства КМ в литературе рассмотрен не был.

В связи с этим в настоящей работе был рассмотрен простой случай – модельный двуслойный материал, составленный из компонентов, заведомо обладающих магнитоэлектрикой противоположных знаков: армко-железа, магнитоэлектрика которого в ненагруженном состоянии в некотором интервале приложенных магнитных полей положительна, и никеля, магнитоэлектрика которого отрицательна. Цель работы состояла в следующем: изучить закономерности поведения магнитных характеристик рассматриваемого двуслойного материала, а также его отдельных компонентов, в условиях одноосного растяжения (сжатия) с целью выявления характера наведенной таким силовым воздействием магнитной анизотропии; оценить вклад каждого компонента в формирование магнитных характеристик двуслойного образца и определить параметры, применимые для оценки действующих упругих деформаций.

На рис. 1 приведены зависимости магнитных характеристик (коэрцитивной силы, остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости), измеренных в условиях замкнутой магнитной цепи, от величины приложенных напряжений для образцов из армко-железа, никеля и составного образца Fe-Ni. Под действием сжимающих напряжений магнитная проницаемость армко-железа существенно снижается, а магнитная проницаемость никеля увеличивается. Вследствие этого в составном двуслойном образце происходит перераспределение магнитного потока преимущественно в сторону составляющей из никеля, поэтому именно она вносит основной вклад в магнитные свойства двуслойного образца.

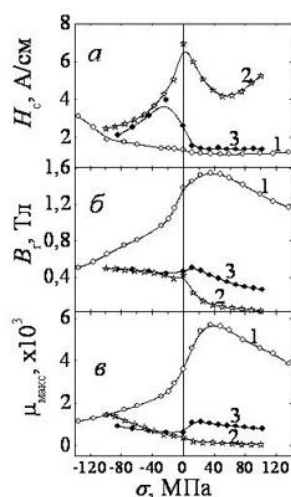


Рис. 1. Зависимости от приложенных напряжений значений коэрцитивной силы – *a*; остаточной индукции – *б*; максимальной магнитной проницаемости – *в*; измеренные в условиях замкнутой магнитной цепи. Кривые 1 – для образца из армо-железа, кривые 2 – для образца из Ni, кривые 3 – для составного образца

Под действием растягивающих напряжений магнитные характеристики составного образца принимают промежуточные значения между значениями магнитных характеристик материалов слоев и более близкие по величине к значениям, полученным для Ni. На характер поведения кривых $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$, $\mu_{\max}(\sigma)$ составного образца при растяжении оказывают влияние оба составляющих слоя: вклад Fe обусловлен высокой магнитной проницаемостью, на порядок превышающей магнитную проницаемость Ni, а вклад никеля объясняется тем, что его поперечное сечение в составном образце превышает сечение армо-железа в 4 раза.

Установлен характер изменения магнитострикции составного образца Fe–Ni при увеличении приложенных растягивающих и сжимающих напряжений. Отмечено, что на деформационное поведение полевых зависимостей магнитострикции составного образца, измеренных со стороны одной составляющей, существенное влияние оказывает вторая, удаленная от измерительного устройства составляющая. В частности, это влияние проявляется в наличии в слабых полях особенностей в виде нехарактерных положительных

или отрицательных участков при максимальных растягивающих и сжимающих напряжениях при измерениях магнитострикции составного образца соответственно со стороны никеля и армо-железа (рис. 2 и 3).

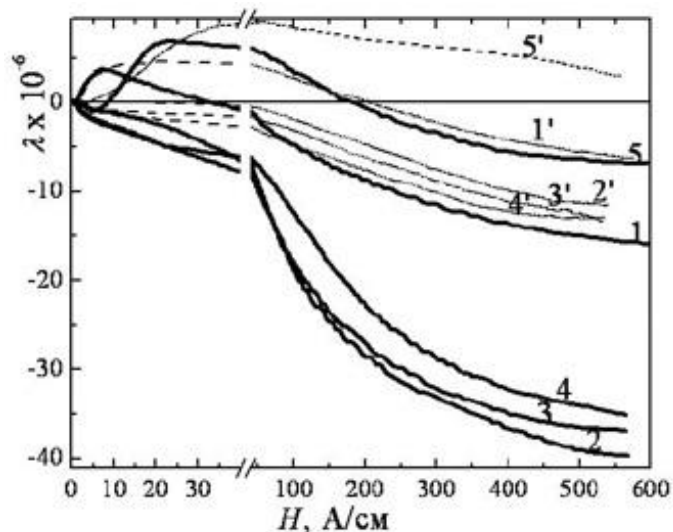


Рис. 2. Полевые зависимости магнитострикции при различных значениях приложенных напряжений. Кривые 1–5 – для двуслойного образца, измерения со стороны слоя из Fe, кривая 1 – $\sigma = 0$; 2 – 34; 3 – 57; 4 – 102; 5 – (–85) МПа. Кривые 1'–5' – для образца из армо-железа, кривая 1' – $\sigma = 0$; 2' – 35; 3' – 59; 4' – 99; 5' – (–135) МПа

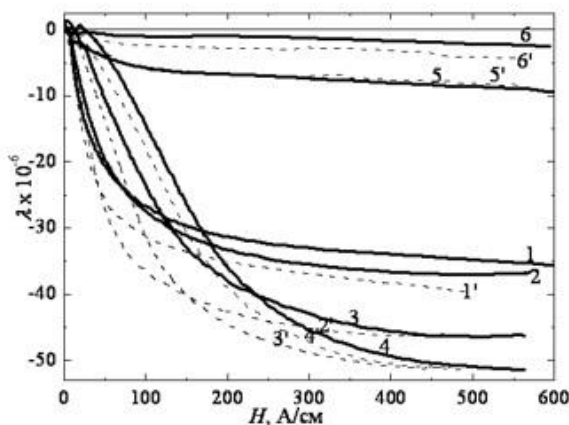


Рис. 3. Полевые зависимости магнитострикции при различных значениях приложенных напряжений. Кривые 1–6 – для двуслойного образца, измерения со стороны слоя из Ni, кривая 1 – $\sigma = 0$; 2 – 23; 3 – 68; 4 – 102; 5 – (–44); 6 – (–85) МПа. Кривые 1'–6' – для образца из Ni, кривая 1' – $\sigma = 0$; 2' – 25; 3' – 62; 4' – 100; 5' – (–50); 6' – (–88) МПа

На рис. 4 приведены зависимости от приложенных напряжений относительных значений коэрцитивной силы и среднеквадратичных значений напряжений магнитных шумов Баркгаузена U , измеренных на составном образце с использованием накладных преобразователей вдоль и поперек оси приложения нагрузки как со стороны слоя из Ni, так и со стороны слоя из армо-железа. Как видно из рис. 4, к напряжениям сжатия наиболее чувствительна коэрцитивная сила, измеренная приставным датчиком со стороны материала с отрицательной магнитострикцией, а к растягивающим одноосным напряжениям – коэрцитивная сила, измеренная со стороны компонента с положительной магнитострикцией. В то же время значения U , измеренные как вдоль, так и поперек направления нагружения, при расположении датчика со стороны составляющей из Ni имеют достаточно высокую чувствительность во всем интервале приложенных напряжений, а значит, для оценки напряженного состояния двуслойного материала, составляющие которого обладают магнитострикцией разных знаков, предпочтительнее использовать данный параметр в качестве информативного, при этом расположение датчика должно быть со стороны слоя, обладающего отрицательной магнитострикцией.

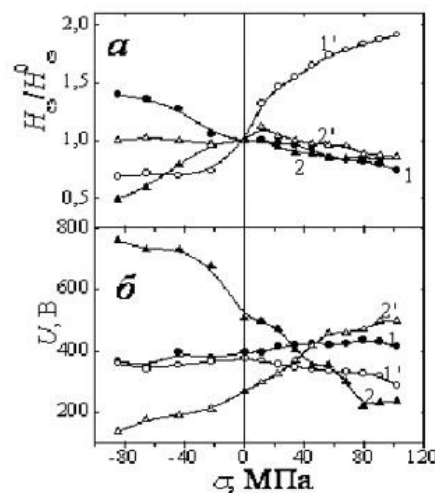


Рис. 4. Зависимости $H_{c3}/H_{c3}^0(\sigma)$ – а и U – б, от величины приложенных напряжений, полученные в полузакнутой магнитной цепи, для составного образца. Кривые 1, 2 – измерения вдоль направления оси приложения нагрузки, 1', 2' – поперек. Кривые 1, 1' – измерения со стороны армо-железа, кривые 2, 2' – со стороны никеля

При выполнении настоящей работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы УрО_25П (проекты № 12-П-1-1027 и № 12-Т-1-1010), междисциплинарного проекта № 12-М-123-2045, гранта РФФИ № 13-01-00732.