

А. М. ПОВОЛОЦКАЯ^{1,2}, канд. техн. наук

*А. Н. МУШНИКОВ*², канд. техн. наук

¹ Институт физики металлов УрО РАН (Екатеринбург, Россия)

² Институт машиноведения УрО РАН (Екатеринбург, Россия)

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХСЛОЙНОГО МАТЕРИАЛА «СТАЛЬ 15 – СТАЛЬ 12Х18Н9Т» И СОСТАВЛЯЮЩИХ ЕГО СТАЛЕЙ ПРИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ ДВУХОСНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Аннотация

В работе представлены результаты изучения эволюции магнитных характеристик двуслойного материала, имеющего в своем составе различающиеся по магнитной твердости слои, при двухосном симметричном растяжении. Эксперименты по двухосному деформированию выполнены на оригинальной двухосной испытательной машине, позволяющей определять физические свойства материалов в процессе упругопластического деформирования независимо по двум осям. Показано, что в качестве информативного параметра для оценки напряжений и деформаций исследованного двуслойного материала может быть использована его коэрцитивная сила, монотонно изменяющаяся во всем диапазоне упругопластического двухосного деформирования.

Ключевые слова: упругопластическая деформация, двухосное симметричное растяжение, двуслойный материал, коэрцитивная сила.

В настоящее время во многих отраслях промышленности все более широкое применение находят композиционные материалы, в частности, слоистые, имеющие в своем составе слои с различными физическими, в том числе магнитными, свойствами. Деформационное поведение таких материалов имеет свою специфику по сравнению с однородными материалами. Известен ряд публикаций, например, [1-3], в которых представлены экспериментальные результаты по изучению характера поведения магнитных характеристик многослойных материалов при силовом воздействии, однако исследования во всех этих работах ограничиваются рассмотрением простого случая одноосного нагружения. Работ, анализирующих эволюцию магнитных свойств двуслойных материалов в условиях двухосного нагружения, авторами не обнаружено. В силу этого, представляет интерес изучение влияния плоского напряженно-деформированного состояния на магнитные характеристики слоистого композита, имеющего в своем составе слои различной магнитной жесткости.

Объектом исследования был двухслойный составной материал «магнитотвердая сталь – магнитомягкая сталь». В качестве магнитотомягкого слоя была использована отоженная листовая низкоуглеродистая сталь марки

15 толщиной 6 мм. В качестве магнитотвердого слоя – листовая метастабильная аустенитная сталь 12Х18Н9Т, подвергнутая холодной прокатке с обжатием 50 %, с 12 мм до 6 мм. В результате прокатки содержание ферромагнитного α' -мартенсита деформации в этой стали составляло примерно 80 %. Магнитные характеристики сталей в исходном состоянии: сталь 15 – коэрцитивная сила $H_c = 2,7$ А/см, остаточная индукция $B_r = 0,27$ Тл, максимальная относительная магнитная проницаемость $\mu_{\max} = 510$; сталь 12Х18Н9Т – $H_c = 11,6$ А/см, $B_r = 0,11$ Тл, $\mu_{\max} = 53$.

Для исследований влияния напряжений и деформаций при плоском напряженном состоянии на магнитные характеристики из каждой стали были изготовлены крестообразные образцы. В центре образцов были фрезерованы круговые выборки диаметром 50 мм и галтелями радиусом 5 мм. Толщина центральной части образцов каждой стали составляла 1 мм. При испытаниях составного образца компоненты соединяли плоскими сторонами болтами из неферромагнитной стали. На дополнительно изготовленных разрывных образцах были определены значения механических характеристик: у стали 15 – предел текучести 280 МПа, временное сопротивление 430 МПа, относительное удлинение при разрыве 35 %; у прокатанной стали 12Х18Н9Т – условный предел текучести 1020 МПа, временное сопротивление 1070 МПа, относительное удлинение при разрыве 11 %. Эксперименты с двухосным деформированием проводили на оригинальной двухосной испытательной машине [4]. Нагрузка по каждой оси на составном образце ограничивалась 50 кН, а при испытаниях отдельных компонент – 30 кН. Фотография рабочей зоны с составным крестообразным образцом представлена на рис. 1а.

Магнитные свойства образцов в процессе упругопластического деформирования определяли с помощью приставного магнитного устройства (ПМУ) с намагничивающей и измерительной обмотками. Для единообразного расположения ПМУ под различными углами на образцы были наклеены трафареты с угловой шкалой (см. рис. 1а). Выбранная система координат показана на рис. 1б. Координатные оси x и y являются осями приложения нагрузок. Угол α поворота ПМУ отсчитывался от горизонтальной оси x (рис. 1б). Измерения магнитных характеристик проводили при варьировании угла α от 0° до 360° с шагом 15° .

Результаты, полученные при испытаниях отдельного слоя из стали 15 в виде полярных диаграмм, представлены на рис. 2. Как видно из рис. 2а, в исходном состоянии стали 15 в ней отсутствует анизотропия коэрцитивной силы H_c . На начальном этапе деформирования H_c уменьшается, а затем увеличивается, что связано с особенностями проявления магнитоупругого эффекта в сталях. При дальнейшем увеличении приложенной нагрузки происходит монотонное возрастание H_c примерно на 20 % относительно минимального значения коэрцитивной силы. После снятия нагрузки коэрцитивная сила несколько возрастает, что обусловлено изменением уровня остаточных напряжений в результате пластической деформации. Следует отметить изотропию (в пределах погрешности измерений) полярных диаграмм

H_c , из чего можно сделать вывод о том, что на эволюцию коэрцитивной силы стали при двухосном растяжении превалирующее влияние оказывают инвариантные характеристики напряженного состояния.

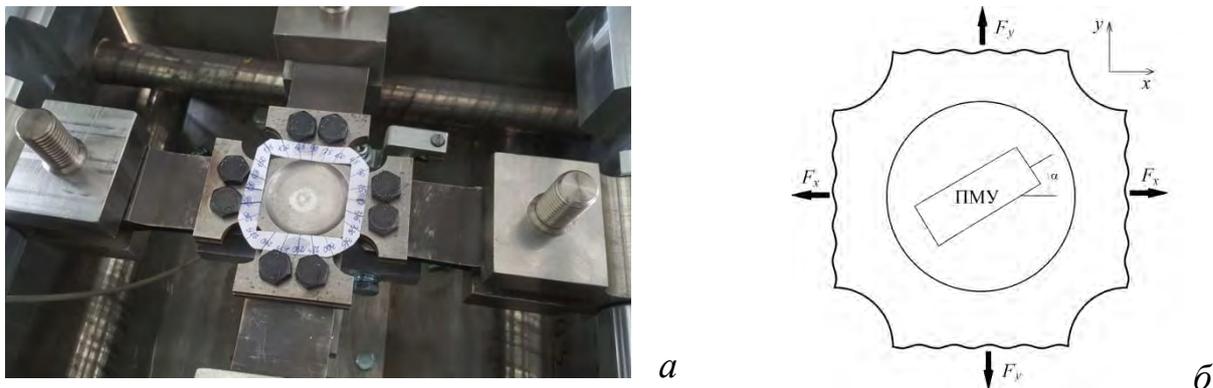


Рис. 1. Фотография рабочей зоны испытательной машины с установленным двухслойным крестообразным образцом (а) и схема установки ПМУ в рабочей зоне образца под углом α к оси x

Полярные диаграммы остаточной индукции B_r и максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{макс}}$ при разных приложенных эквивалентных напряжениях (рис. 2б и 2в) качественно подобны, отличаются лишь численные значения этих параметров. На диаграммах хорошо заметна анизотропия B_r и $\mu_{\text{макс}}$ в исходном состоянии стали 15. Максимальные значения зафиксированы вдоль координатных осей x и y , а минимальные – под углом 45° к ним. В процессе нагружения анизотропия этих характеристик усиливается, причем неоднократно меняются направления, вдоль которых наблюдаются экстремальные значения B_r и $\mu_{\text{макс}}$. В состоянии материала после снятия нагрузки направления, вдоль которых наблюдаются максимальные и минимальные значения B_r и $\mu_{\text{макс}}$, те же, что и в исходном состоянии, а анизотропия этих параметров значительно усилилась. Такое поведение B_r и $\mu_{\text{макс}}$ обусловлено, вероятно, тем, что на их эволюцию большее влияние оказывают компоненты тензора напряжений, а не инварианты напряженного состояния.

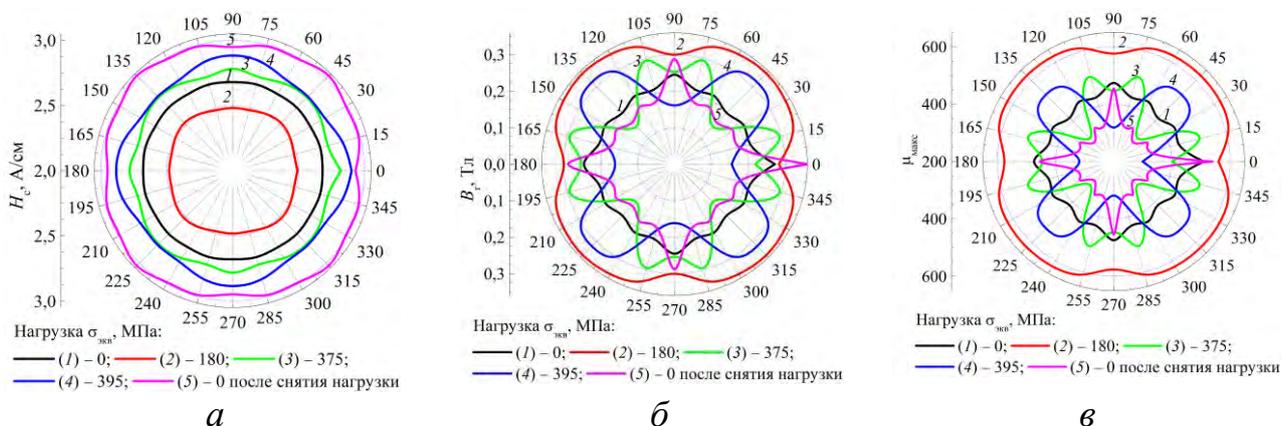


Рис. 2. Влияние симметричного двухосного растяжения на коэрцитивную силу (а), остаточную индукцию (б) и максимальную относительную магнитную проницаемость (в) стали 15

Полярные диаграммы коэрцитивной силы холоднокатаной стали 12Х18Н9Т при разных эквивалентных напряжениях показаны на рис. 3а. Как видно, прокатка не привела к анизотропии коэрцитивной силы – величина H_c при различных значения угла α изменяется в пределах $\pm 1\%$. Приложенные напряжения слабо влияют на величину H_c – максимальное и минимальное значения отличаются всего на 8%. Вероятно, этот факт объясняется «суперпозицией» остаточных и приложенных напряжений. Можно отметить тенденцию к увеличению коэрцитивной силы вдоль направления прокатки и ее уменьшению в поперечном направлении в условиях симметричного двухосного растяжения при приближении к пределу текучести.

Полярная диаграмма остаточной индукции стали 12Х18Н9Т в исходном состоянии (рис. 3б) тоже свидетельствует об изотропии этой характеристики, как и коэрцитивной силы. Однако в условиях двухосного растяжения проявляется анизотропия B_r – при максимальной нагрузке в направлении, поперечном прокатке, B_r на 12% больше, чем вдоль направления прокатки. Минимальные значения B_r наблюдаются под углами примерно 20° , 160° , 200° и 340° к направлению прокатки. Полярная диаграмма максимальной магнитной проницаемости стали 12Х18Н9Т в исходном состоянии (рис. 3в) имеет более сложный вид, чем аналогичные диаграммы для H_c и B_r , – величина μ_{\max} вдоль направления прокатки и под углами 45° к ней заметно меньше, чем в поперечном направлении. Кроме того, имеются локальные максимумы μ_{\max} под углами примерно 25° к направлению прокатки. Полярная диаграмма μ_{\max} после снятия нагрузки имеет форму, близкую к эллипсоидальной, с короткой осью вдоль направления прокатки и длинной – в поперечном направлении.

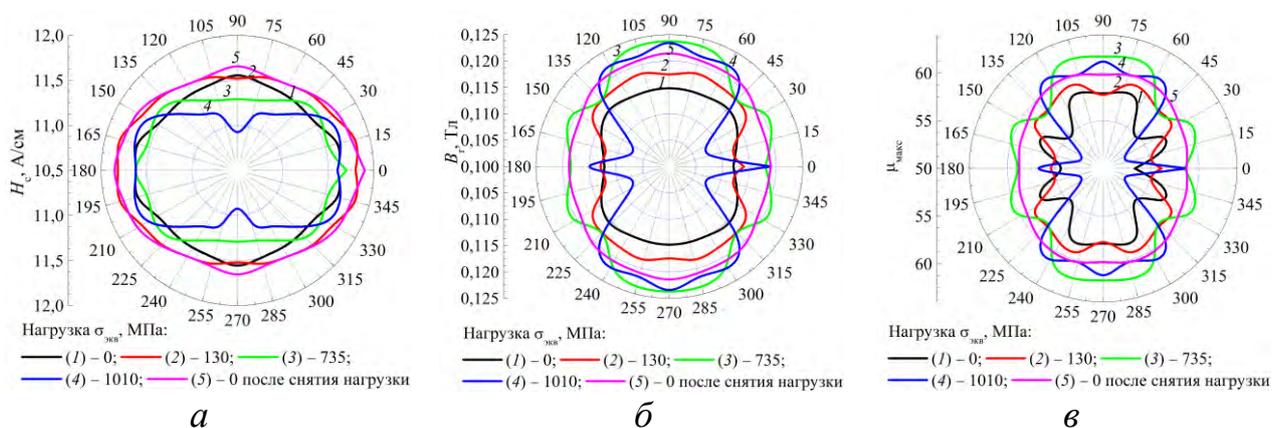


Рис. 3. Влияние симметричного двухосного растяжения на коэрцитивную силу (а), остаточную индукцию (б) и максимальную относительную магнитную проницаемость (в) холоднокатаной стали 12Х18Н9Т. Направление прокатки – горизонталь

На основании результатов, приведенных на рис. 3, можно сделать такой же вывод относительно влияния симметричного двухосного растяжения на магнитные параметры стали 12Х18Н9Т с мартенситом деформации – коэрцитивная сила реагирует главным образом на инвариантные параметры напряженного состояния, а остаточная индукция и, особенно, максимальная

магнитная проницаемость – на компоненты тензора напряжений. Следует также отметить, что полученные данные свидетельствуют о большей эффективности $\mu_{\text{макс}}$ как параметра диагностики напряженного состояния холоднодеформированных метастабильных сталей аустенитного класса.

Полярные диаграммы коэрцитивной силы составного образца «сталь 15 – сталь 12Х18Н9Т» приведены на рис. 4а. Величина H_c этого образца в исходном состоянии примерно равна среднеарифметическому значению коэрцитивных сил его компонент. Но при этом зафиксирована значительная анизотропия коэрцитивной силы составного образца – величины H_c вдоль направления прокатки стали 12Х18Н9Т и в поперечном направлении различаются примерно на 10 %. В процессе двухосного симметричного растяжения коэрцитивная сила составного образца монотонно увеличивается, а ее анизотропия исчезает. После снятия нагрузки с составного образца его коэрцитивная сила заметно уменьшилась по сравнению с деформированным состоянием при максимальной нагрузке, но с сохранением изотропии этого параметра. Возможно, на характер эволюции коэрцитивной силы составного образца сказывается преимущественно состояние магнитомягкой компоненты, в которой началась пластическая деформация, в то время как магнито жесткая компонента даже при максимальной нагрузке находится на стадии упругой деформации.

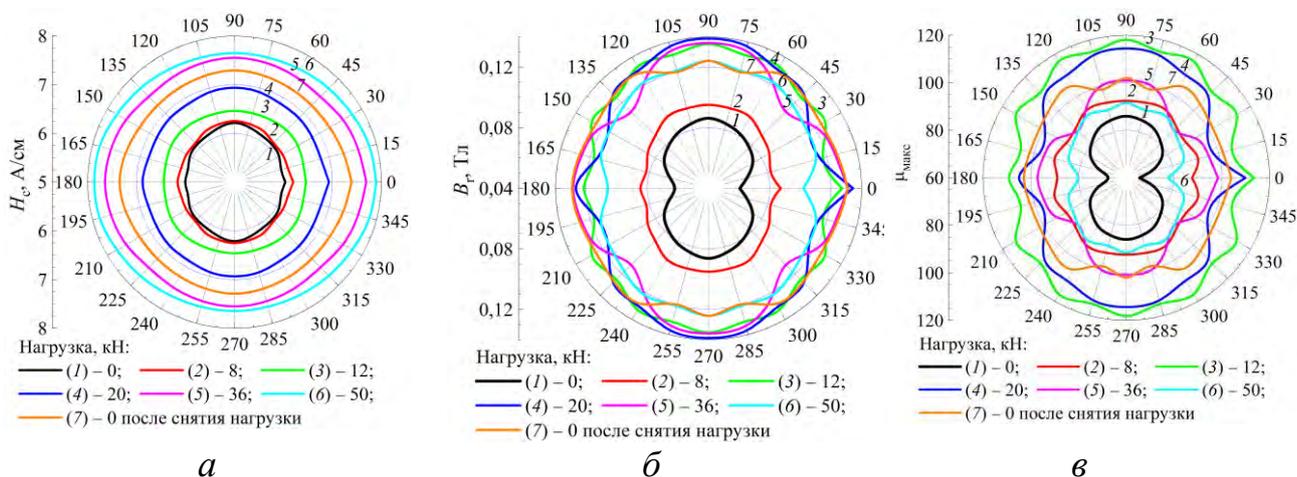


Рис. 4. Влияние симметричного двухосного растяжения на коэрцитивную силу (а), остаточную индукцию (б) и максимальную относительную магнитную проницаемость (в) составного материала «сталь 15 – сталь 12Х18Н9Т». Направление прокатки стали 12Х18Н9Т – горизонталь

Полярные диаграммы B_r и $\mu_{\text{макс}}$ составного образца в исходном состоянии качественно подобны диаграмме коэрцитивной силы – минимальные значения этих характеристик наблюдаются в направлении прокатки стали 12Х18Н9Т, максимальные – в поперечном направлении (рис. 4б и 4в). В условиях двухосного растяжения анизотропия B_r и $\mu_{\text{макс}}$ несколько уменьшается, особенно в случае остаточной индукции. После снятия нагрузки с составного образца величина B_r примерно на том же уровне, что и под действием максимальной нагрузки, а максимальная магнитная проницаемость увеличилась в среднем примерно на 17 %.

Следует отметить, что в отличие от коэрцитивной силы, увеличение приложенной нагрузки слабо влияет на остаточную индукцию, а максимальная магнитная проницаемость при этом изменяется немонотонно. Эти обстоятельства обуславливают неэффективность использования остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости для диагностики напряженного состояния исследованного образца и аналогичных по составу слоистых композитов.

Таким образом, на основе проведенных испытаний на упругопластическое симметричное двухосное деформирование модельного двухслойного материала, составленного из компонент с различной магнитной твердостью (магнитомягкий слой – сталь 15, магнито жесткий слой – сталь 12Х18Н9Т, подвергнутая холодной прокатке на 50 %), а также его отдельных компонент определены закономерности эволюции магнитных характеристик (коэрцитивной силы, остаточной индукции, максимальной магнитной проницаемости) от действующих нагрузок. Установлено, что коэрцитивная сила составного материала во всем диапазоне упругопластического деформирования демонстрирует монотонный характер изменения и может быть использована для оценки изменений напряженно-деформированного состояния изделий из исследованного композита в условиях двухосного симметричного растяжения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по темам № 124020600045-0 и «Диагностика» № 122021000030-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горкунов, Э. С.** Влияние упругой деформации на гистерезисные свойства двухслойного ферромагнетика, составленного из компонентов, обладающих магнитострикцией разных знаков / Э. С. Горкунов, Ю. В. Субачев, А. М. Поволоцкая, С. М. Задворкин // Дефектоскопия. – 2014, № 8. – С.42-56.
2. **Горкунов, Э. С.** Использование магнитного структурно-фазового анализа для диагностики состояния композиционного материала –сталь 08Х18Н10Т – сталь Ст3” и составляющих его компонент, подвергнутых пластической деформации / Э. С. Горкунов, С. М. Задворкин, Е. А. Путилова и др. // Дефектоскопия. – 2012, № 6. – С.30-43.
3. **Gorkunov, E. S.** Magnetic Evaluation of the Structural and Phase Changes in Individual Layers of Multilayer Products // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2017, Is. 2. – P.6-27.
4. **Mushnikov, A. N.** Experimental Facility for Studying the Physical Properties of Materials in a Plane Stress State / A. N. Mushnikov [and all] // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2022, Iss. 4. – P.50-60.

Контакты:

povolotskaya@imp.uran.ru (Поволоцкая Анна Моисеевна)

mushnikov@imach.uran.ru (Мушников Александр Николаевич)

УДК 535.016:535.321.9:681.7.064.3