



Estimation of Mechanical Stresses in Steels Using Electromagnetic Methods

Eduard GORKUNOV¹, Mitko MIHOVSKI², Aleksandr MUSHNIKOV¹

¹ Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

² Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
e-mail: nntdd@abv.bg

Abstract

The article presents the magnetoelastic effects for the formation of magnetic textures under the action of elastic stresses in ferromagnetic materials. Based on data on the magnetostructure and the analysis of the hysteresis curves, the physical assumptions for the use of magnetic parameters for estimating the operating stresses in structural steels are considered. The estimation of uniaxial compressive stresses is not a complicated task, but there are problems with the estimation of tensile stresses in low-alloy steels, related to the inhomogeneity of the dependences of the magnetic characteristics on the applied tensile stresses. Examples of this ambiguity are given and the ways to solve them are shown, using the anisotropy of the coercive force and the parameters of the magnetic strength spectra. The ways of estimating the mechanical stresses in multilayer ferromagnetic materials by using the characteristics of the differential magnetic permeability μ_{diff} are considered. The influence of the complex stress state on the magnetic characteristics of the materials is discussed.

Keywords: elastic deformations, acting stresses, magnetic control methods

Оценка на механични напрежения в стомани с използване на електромагнитни методи

Едуард ГОРКУНОВ, Митко МИХОВСКИ, Александр МУШНИКОВ

Увод

Изучаването на влиянието на еластични и пластични деформации на процесите на пренамагнитване на ферромагнитни материали има както теоретично, така и практическо значение. Познаването на законите на промяна на магнитните характеристики в условията на еластично деформиране в практиката позволява да се използват магнитоеластичните явления за създаване на нови видове преобразуватели, като по този начин се реализират нови възможности за измервателната техника и за безразрушителния контрол [3-6].

Изучаването на магнитоеластичното влияние в конструктивен ферромагнитен материал позволява да се реши задачата за оценка на механичните напрежения във всеки елемент на конструкцията и в перспектива резултатите да се използват за моделни изследвания на механиката на бъдещи деформации и разрушаване, както и за оценка на ресурса на отделните елементи и на цялата конструкция.

Изследванията на механичното състояние започва през XIX век от Вилари [7]. Той установява, че, при въздействие на опънови и натискови напрежения, се появяват промени в магнитната проникваемост μ на ферромагнитен материал, чиито характер зависи от намагнитването.

1. Основи на магнитоакустичните явления

Основата на магнитоакустичните ефекти е явлението магнитострикция, открито през 1842 г. от Д. Джаул. Магнитострикцията е свойство на всички вещества – както на феромагнитни, така и на диамагнитни и парамагнитни. Във феромагнитна магнитострикцията $\lambda = \Delta l/l$ (където $\Delta l/l$ е относителното удължение) достига до 10^{-2} . За сплави на основата на желязо магнитострикцията λ е от порядъка на 10^{-6} . В диамагнитни и парамагнитни материали λ е от порядъка на $10^{-7} \div 10^{-5}$. В бисмута е от порядъка на 10^{-4} .

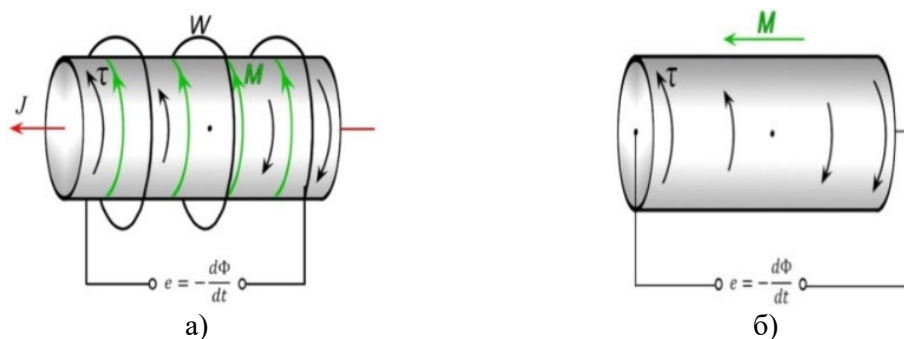
Магнитострикцията се използва в ултразвуковата техника и хидроакустиката за създаване и приемане на ултразвукови вълни в широк честотен диапазон [8].

Обратен ефект на магнитострикцията е магнитоеластичността. Магнитоеластичните преобразуватели работят на основата на промяна на магнитното състояние при намагнитване с постоянен или променлив ток и под действие на еластични деформации. Използват се за запомняне на информация, за измерване на магнитно поле, за магнитни усилватели, за измерване на неелектрически величини, на деформации, на ниво на течност и др. [1,2].

2. Магнитоеластични ефекти в преобразувателите

2.1. Видове ефекти

Ефект на Вилари. Свързан е с промяна на намагнитеността (ΔM) на феромагнитна или на генериране на електродвижеща сила (e) в бобина с индуктивност (w) в посока на действие на механичната деформация (надлъжна или напречна).



Фиг. 1. Схема на работата на преобразувател с използване на ефекта на Вилари а) и ефекта на Вертхайм б), при усукване

Ефект на Вертхайм. Ефект, който се проявява при усукване τ на намагнитен прът (M). Между двата края на пръта се генерира електродвижеща сила (прав ефект). При подаване на променлив ток на намагнитения прът в него възникват деформации на усукване (обратен ефект) (фиг. 1/б).

Ефект на Гилмен. Леко деформиран феромагнитен прът се изправя, ако се разположи в магнитно поле.

Ефект на Видеман (1859). При циркулярно намагнитване с ток J възникват деформации на усукване τ , които предизвикват генериране на електродвижеща сила в бобина с индуктивност w (прав ефект) и обратен ефект на Матеуги.

2.2. Физична природа на магнитострикцията

При намагнитване на феромагнитни се наблюдава промяна на неговата форма и размери, възникват еластични деформации. При оценка на общото енергетично

състояние трябва да се отчитат четири вида различни енергии във феромагнетика [9,10]. Магнитострикцията възниква при температура под точката на Кюри (T_c) при действието на обменни и магнитни сили.

Обменната енергия се представя със зависимостта:

$$E_{обм} = -2 \sum_{ij} A_{ij} (\vec{S}_i \vec{S}_j), \quad (1)$$

където A_{ij} са обменните интеграли за атоми i и j , които зависят от отклоненията на константите на решетката спрямо ефективния радиус r , φ_{ij} е ъгъл между векторите на спиновите моменти S_i и S_j .

Енергията на кристалографската анизотропия се представя с израза:

$$E_K = K_0 + K_1 \alpha^2, \quad (2)$$

където K_i е константа на анизотропията, α е ъгъл между посоката на намагнитеността и кристалографската посока.

Енергията на магнитострикционните деформации се представя с израза:

$$E_\lambda = \frac{E \lambda_s^2}{2}, \quad (3)$$

където E е модул на Юнг, λ е магнитострикцията при насищане.

Магнитоеластичната енергия при изотропна магнитострикция се записва във вида:

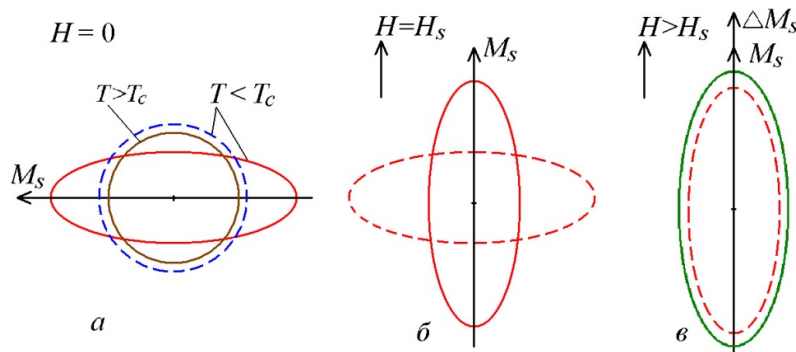
$$E_\sigma = -\frac{3}{2} \lambda_s \sigma \cos^2 \varphi, \quad (4)$$

където σ са действащите напрежения, φ е ъгълът, който отчита посоката на намагнитване и посоката на действащите сили.

Под действие на тези 4 вида енергии, се извършват промените на обема и формата на феромагнитният материал.

2.3. Спонтанна (обемна) магнитострикция

Да разгледаме магнитострикцията на желязо. Ако охладим сфера, която се намира в парамагнитно състояние, с температура по-висока от точката на Кюри ($T > T_c$), магнитните моменти се намират в хаотично състояние. В момент на преминаване на точката на Кюри ($T \sim T_c$) възниква обменна енергия (обменното взаимодействие на електроните се съпътства с това, че спиновите моменти на електроните се подреждат успоредно един на друг и възниква спонтанна самопроизволна намагнитеност). Парамагнитната сфера променя своя радиус (фиг. 2). Това води до промени на обема $\Delta V/V$, тоест до появата на спонтанна (обемна) магнитострикция.



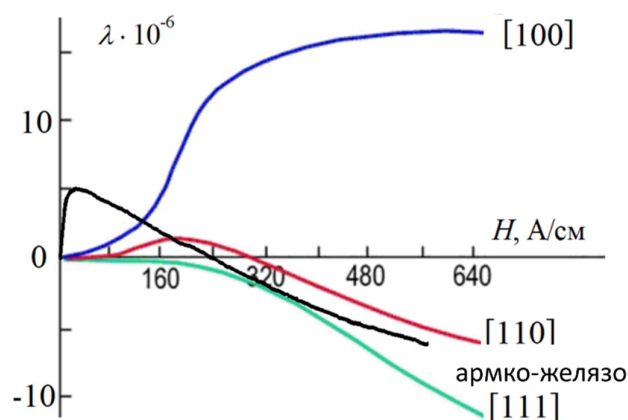
Фиг. 2 Магнитострикционни ефекти в еднодомени кристали с форма на сфера.

Сферата при това въздействие вече е феромагнитна и размерът ѝ нараства. При преминаване на точката на Кюри T_c настъпва фазовия преход от II ред. С появата на спонтанна магнитострикция във феромагнитните материали възникват еластични вълни, които се използват при контрола. Например, с използване на надлъжни вълни от електромагнитните преобразуватели се контролира дебелината на горещ метал при локално охлаждане с вода [11].

2.4. Енергия на кристалографската анизотропия.

Едновременно с възникването на спонтанна магнитострикция при $T < T_c$, в действие влизат магнитните сили на решетката, в резултат на които феромагнитната сфера се превръща в елипсоид (фиг. 2а).

Колкото по-ниска е температурата, толкова по-силно се проявява анизотропията на магнитните сили. За различни кристалографски посоки на желязото магнитострикцията ще бъде различна и при реални промени на намагнитване (фиг. 3)



Фиг. 3. Магнитострикция в монокристал на желязо за различни кристалографски посоки [10] и в поликристално армко желязо.

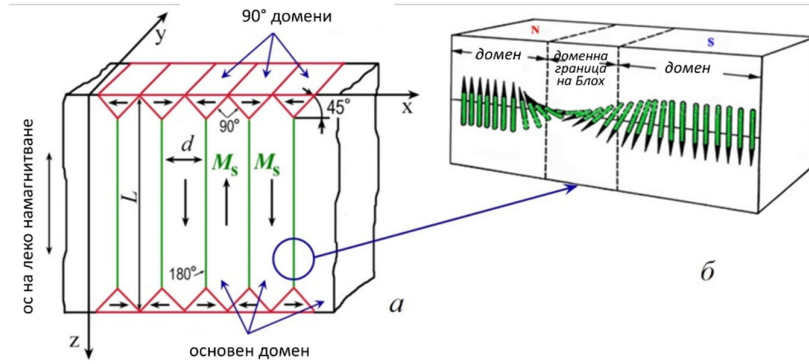
Физическите свойства на поликристал, в това число и магнитострикцията, са свързани със свойствата на отделни частици, които са включени в него. Ако частиците са с малки размери в сравнение с размера на поликристалното тяло и ориентацията им е хаотична, то свойствата на поликристала са изотропни, а кривата на магнитострикцията, например за армко-желязо, ще бъде близка към кристалографската посока [10] (фиг. 3). λ при слаби полета на намагнитване е положителна, а с увеличение на полето е отрицателна.

2.5. Линейна магнитострикция и магнитострикция на парапроцеса.

Да поставим елипсоид (фиг. 2а) в нарастващо магнитно поле H . Векторът на намагнитеността M започва да се смесва и елипсоидът променя своята форма и положение в пространството (линейна магнитострикция, фиг. 2б).

С увеличаване на полето линейната магнитострикция нараства и достига до насищане λ_s при напрегнатост на полето H_s . При поле на насищане $H > H_s$ в областта на парапроцесите намагнитеността получава нарастване ΔM_s и елипсоидът незначително променя своя обем (фиг. 2в).

Разглежданият от нас случай, за случая на еднородно състояние е моделен. В реални феромагнити при температури $T < T_c$ се образува многодоменна структура, която е показана на фиг. 4 [12].



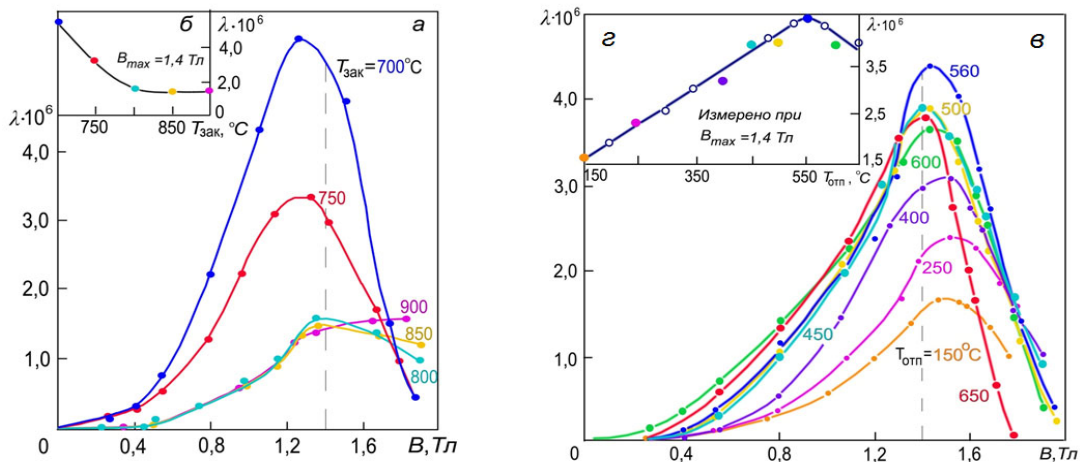
Фиг. 4. Структура на успоредни 180° и затварящи 90° домени в магнитоосен кристал а) и схема на преходния слой на 180° доменна граница б) [13].

Феромагнитът се разбива на отделни магнитни домени, всеки от които се намагнитва до насищане. В желязото се образуват успоредни 180° и затварящи 90° домени и възниква енергия на магнитната деформация. Схематична картина на промяната на ориентацията на магнитните домени в 180° доменна граница на Блох (преходен слой между домовете) е представен на фиг. 4б. С появата на 90° домени възниква енергия на магнитоотрицателна деформация.

При намагнитване се променя обемът на домовете и посоката на намагнитване за всеки един от тях, но не се променя енергията. На магнитоотрицателната деформация влияят само промените на обема на 90° домени. Магнитоотрицателната деформация на 180° домени практически не се отчита, тъй като е незначителна.

3. Влияние на стареенето на метали върху магнитно-напрегнато състояние

Промяната на структурното състояние при външни въздействия (деформация, термообработка) се съпровожда с промяната на всички споменати по-горе енергии, съответно на доменната структура на феромагнита, която се отразява и на магнитоеластичните характеристики (фиг. 5) [14].

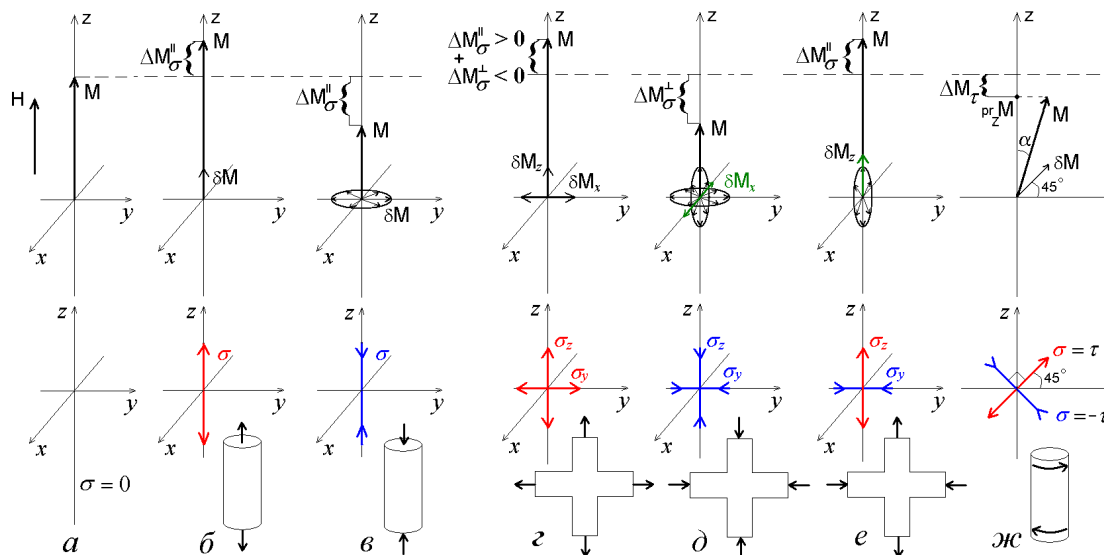


Фиг. 5. Влияние на термичната обработка на стомани при закаляване (а, б) и отпусък (в, г) на λ на стомана 34XN3M и при определяне стойностите на магнитната индукция

Манитострикцията е чувствителна към структурните промени при термична обработка. Следователно λ може да се използва при безразрушителен контрол на структурата на феромагнитни материали.

3.1. Формиране на магнитна текстура.

Действието на еластичните деформации се съпровожда с формиране на нова магнитна текстура, което определя процесите на намагнитване и пренамагнитване на феромагнетика.



Фиг. 6. Схематично представяне на влиянието на механичното напрежение върху намагнитеността при различни схеми на натоварване $\lambda > 0$

- а) – без натоварване, $\sigma = 0$, б) – с натоварване на $\sigma > 0$, в) – натиск $\sigma < 0$,
г) – двустранен опън, д) – двустранен натиск, е) – двустранен опън-натиск, ж) – усукване.

Да разгледаме отделните видове натоварване и тяхната комбинация върху резултатната намагнитеност на материал с положителна манитострикция $\lambda > 0$ (фиг. 6). При отсъствие на натоварване размагнитеното състояние векторите на магнитните домени във феромагнита са ориентирани хаотично и сумата на магнитния момент $M = 0$. Под действие на магнитното поле H векторите на магнитните моменти на домовете се ориентират по оста z и резултатната намагнитеност се променя по хистерезисната крива, като $M \neq 0$.

При въздействие на опън ($\sigma_z > 0$) се формира магнитна структура с преимуществена ориентация на магнитните моменти на домовете по посока на приложения товар. За достигане на зададена величина на M е необходимо да се приложи по-слабо магнитно поле, спрямо това на ненатоварения образец.

По този начин, при намагнитване в поле H , недостатъчно за насищане H_{max} , при прилагане на опънови напрежения резултатната намагнитеност ще е с ΔM по-голяма, отколкото намагнитеността в ненатоварено състояние (фиг. 6б). В този случай, при престрояване на домовете, възниква преимуществена ориентация на векторите на намагнитеност от типа „ос на леко намагнитване“ и процесите на пренамагнитване в посока на действие на напреженията се облекчават.

При процесите на натискови напрежения, съосни на магнитното поле ($\lambda\sigma_2 < 0$), се формира магнитна структура от типа „равнина на леко намагнитване“. Векторите на магнитните домени $\vec{\delta M}$ се стремят да се ориентират в равнини, перпендикулярни на посоката на натоварване (фиг. 6в). При намагнитване с поле H , след прилагане на натоварването, резултатната намагнитеност ще с $\Delta M_{\sigma}''$ по-малка, отколкото при намагнитване в ненатоварено състояние, което затруднява процесите на пренамагнитване.

При двуосен опън, когато една от посоките на натоварване съвпада с посоката на пренамагнитване (фиг. 6з), опънните напрежения способстват за формиране на текстури от типа на „ос на леко намагнитване“ по осите y и z . Едната пречатства ориентирането на векторите на магнитния момент на домените в посока на полето, а втората способства за достигане на тази ориентация. Резултатът от промяна на намагнитеността се определя от величината на приложеното поле и стойностите на напреженията σ_y и σ_z . Когато $\sigma_y = \sigma_z$ влиянието върху магнитните характеристики ще е по-малко в сравнение с едноосен опън.

Вследствие на двуосен натиск (фиг. 6д) натисковите напрежения спомагат за формиране на текстура от типа „равнина на леко намагнитване“ в равнината x_y и x_z . Фактически се получава „ос на леко намагнитване“, перпендикулярна на посоката на магнитното поле. За сметка на преимущественото разпределение на посоките на векторите δM по оста x , резултатната намагнитеност се намалява с $\Delta M_{\sigma}^{\perp}$.

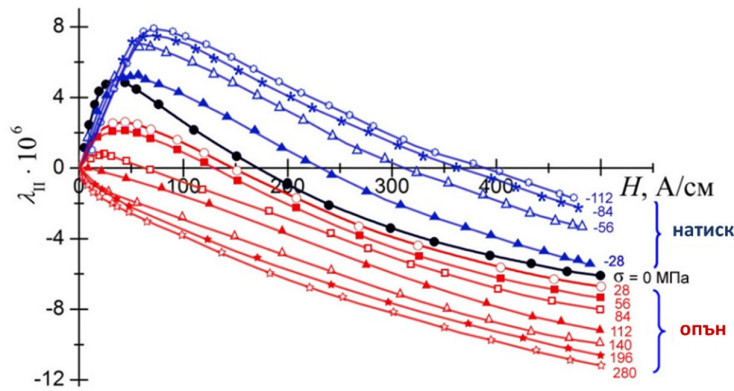
Ако напреженията по двете оси са равни и една от силите се прилага по оста на намагнитване (фиг. 6 е), то „оста на най-лекото намагнитване“, създавано от опънови напрежения, ще лежи в „равнината на най-леко намагнитване“, което се създава в резултат на действието на натисковите усилия. При $\sigma_z > 0$ се получава $\Delta M_z' > 0$, а при $\sigma_z < 0$, съответно, $\Delta M_z^{\perp} < 0$. Следователно промяната на намагнитеността зависи, преди всичко, от натоварването, което е насочено по посока на намагнитването (фиг. 6б и фиг. 6в).

Тангенциалните напрежения τ , които възникват при усукване, са еквивалентни на взаимно перпендикулярни опънови и натискови напрежения, които действат едновременно и са разположени под 45° към оста на образеца (фиг. 6ж). Формирането на магнитна текстура е като за случая, показан на фиг. 6е. Векторите на магнитните домени $\vec{\delta M}$ се стремят да се ориентират под ъгъл 45° спрямо оста на образеца, по посока на опънните усилия. След намагнитване в магнитното поле H векторът на резултатната намагнитеност ще бъде под ъгъл α към посоката на приложено магнитно поле. Ъгълът α се променя от 0° до 45° и зависи от H и τ . Очевидно, в този случай, проекцията на вектора на резултатната намагнитеност на оста z ($rg_z M$) ще бъде по-малка от величините на резултатната намагнитеност в ненатоварено състояние с ΔM_{τ} . Колкото по-голямо е усукването τ , толкова по-малка е $rg_z M$.

За материал с $\lambda < 0$ механичните напрежения ще окажат противоположно влияние на описаната по-горе преимуществена ориентация на магнитните моменти на домените.

3.2. Магнитострикция в различни стомани

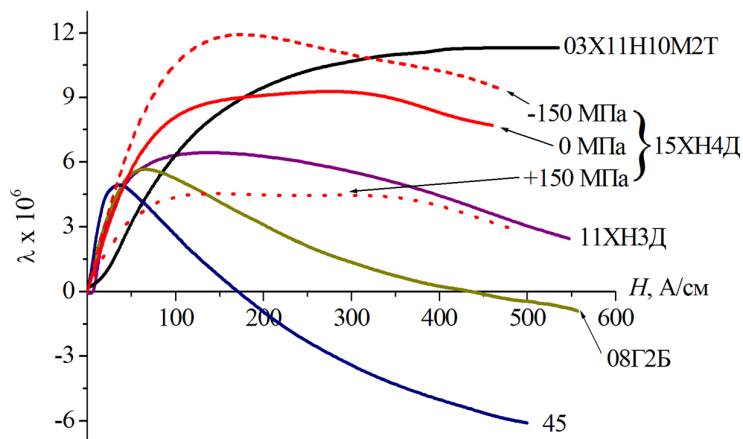
Промените в доменната структура влияят на поведението на магнитострикцията. За стомани магнитострикцията намалява при опън, а нараства при натиск. На фиг. 7 е представена зависимостта на надлъжната магнитострикция при различни стойности на приложени напрежения (опън и натиск) за стомана 45 [15]. Полето H в работната част на образеца се измерва с помощта на потенциометър, а индукцията – със специална бобина с компенсация на въздушната междина. Магнитострикцията се измерва по класическа мостова схема с термокомпенсация на основата на тензорезистори.



Фиг. 7. Зависимост на магнитострикцията при еластичен опън и натиск за стомана 45.

Стомана 45 без натоварване има положителна магнитострикция при напрегнатост на магнитното поле от 0 до 180 А/см и отрицателна при по-силни полета. При опън положителният участък се намалява и става отрицателен при $\sigma > 100$ МПа.

Зависимостите $\lambda = F(H)$ от повишаването на степента на легиране на стоманата са представени на фиг. 8. В легираните стомани преходът на магнитострикцията към отрицателна стойност протича в по-силни магнитни полета. За стомана 08Г2Б полето е 3 пъти по-голямо в сравнение със стомана 45. При ниво на сумарно легиране повече от 5% $\lambda = F(H)$ е положителна и достига до насищане. Това е свързано с нарастване на енергията на магнитострикционната деформация в легираните стомани.



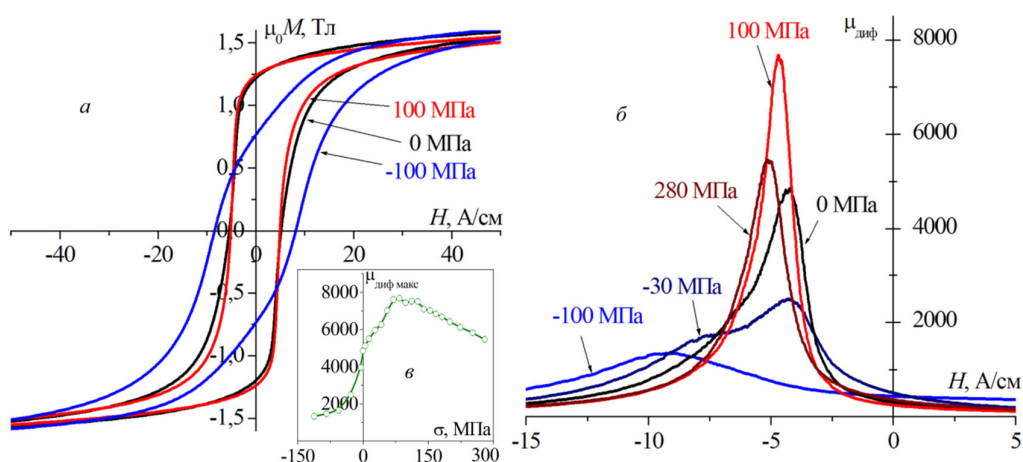
Фиг. 8. Зависимости $\lambda = F(H)$ за стомани с различен химичен състав

Действието на опъновите напрежения в легираните стомани, както и при стомана 45, води до понижаване на магнитострикцията. При това стойностите на магнитострикцията преминават от положителни в отрицателни при определена стойност на опъновите напрежения. При легираните стомани λ е положителна, независимо от приложените напрежения (до 250 МПа) [16].

4. Процеси на намагнитване. Примери за оценка на еластични напрежения

Промяната на механичното напрегнато състояние се съпътства с промяна на всички видове енергии във феромагнетика, които влияят на промяната на процесите на пренамагнитване в материала. В практиката, за оценка на действащите напрежения във феромагнетика се изисква да се определи структурочувствителния параметър, който монотонно се променя от механичните напрежения и има висока чувствителност.

На фиг. 9а е показано как различни по знак напрежения променят хистерезисните криви. При опън хистерезисните криви са по-близки до „правоъгълни“, при натиск са по-наклонени. За промените в напрегнатото състояние на материала може да се следи и по промяната на диференциалната магнитна проницаемост $\mu_{\text{диф}}$. Тези зависимости са представени на фиг. 9б и характеризират процесите на подвижност на доменните граници.



Фиг. 9. Хистерезисни криви (а) и зависимост на $\mu_{\text{диф}}$ (б) за стомана 45, в зависимост от приложените напрежения на опън и натиск.

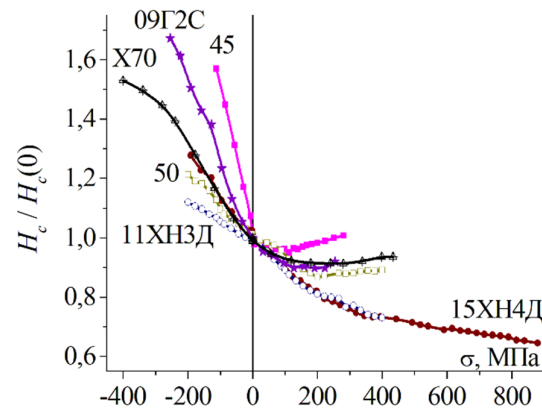
Опъновите напрежения формират структура от няколко от типа „ос на леко намагнитване“ (фиг. 9), при това височината на максимума в $\mu_{\text{диф}}$ се повишава, а местоположението на максималната стойност на магнитната проницаемост $H_{\mu_{\text{диф макс}}}$ се променя незначително. Действително при началото на еластичен опън (80÷100 МРa) се наблюдава намаляване на стойностите на H_c (фиг. 10), след което H_c се увеличава.

Формирането на минимума на зависимостта $H_c(\sigma)$ се определя от следните два фактора. При опън 80÷100 МРa се променя знакът на магнитострикцията и положителната част на зависимостта $\lambda = F(\sigma)$ изчезва (фиг. 7). Това води до промени на текстурата, свързани от преход от „ос на леко намагнитване“ в „плоскост на леко намагнитване“. Вторият фактор е свързан с хипотезата на С. Вонсовски [17], че при определени условия могат локално да се облекчат процесите за пренамагнитване за сметка на компенсиране в някои области на микронапреженията, предизвикани от действащите напрежения.

При тези условия се увеличава подвижността на доменните граници и пренамагнитването се осъществява с по-големи скокове на Баркхаузен. Вторият фактор е официално потвърден в работи [18-20], където за различна термична обработка и пластично деформирани образци от желязо и стомана е показано, че величината на

приложените напрежения, при които H_c е минимална, корелират със средната стойност на вътрешните напрежения.

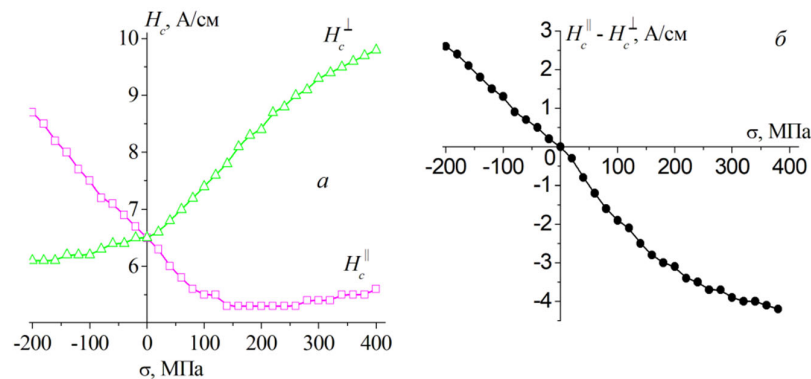
При натиск се формира текстура „плоскост на лекото намагнитване“ и процесите на пренамагнитване се затрудняват (фиг. 6). Максимумът на $\mu_{\text{диф}}$ се премества в областта на силните магнитни полета (фиг. 9б), а коерцитивната сила се увеличава (фиг. 10). За процесите на пренамагнитване по-видимо ще е характерно пренамагнитване с малки скокове на Баркхаузен. Формирането на подобни максимуми на зависимостта $H_c(\sigma)$ може да се наблюдава и за други нисколегирани стомани (фиг.10) [14, 21, 22].



Фиг. 10. Относителни изменения на H_c при еластично едноосно деформирано състояние за стомани с различна степен на легиране.

Отсъствието на монотонност в промяната на H_c при едноосно натоварване на опън не позволява да се използва за оценка на действащите едноосни напрежения.

При повишаване на степента на легиране на стомани магнитострикцията при опън не преминава в отрицателната област. Оказва се, че зависимостите са монотонни. Действително (фиг. 10), с повишаване на степента на легиране на стомани 11ХНЗД, 15ХН4Д закономерността $H_c(\sigma) = F(\sigma)$ е монотонна за целия диапазон на промяна на σ . От фиг. 10 следва също, че стоманите с различна степен на легиране, структурно състояние и фазови зависимости се различават с различна чувствителност на H_c към промяната на еластичните деформации.



Фиг. 11. Надлъжни (H_c^{\parallel}) и напречни (H_c^{\perp}) коерцитивни сили (а) и тяхната разлика (б) в зависимост от едноосни напрежения в стомана X70

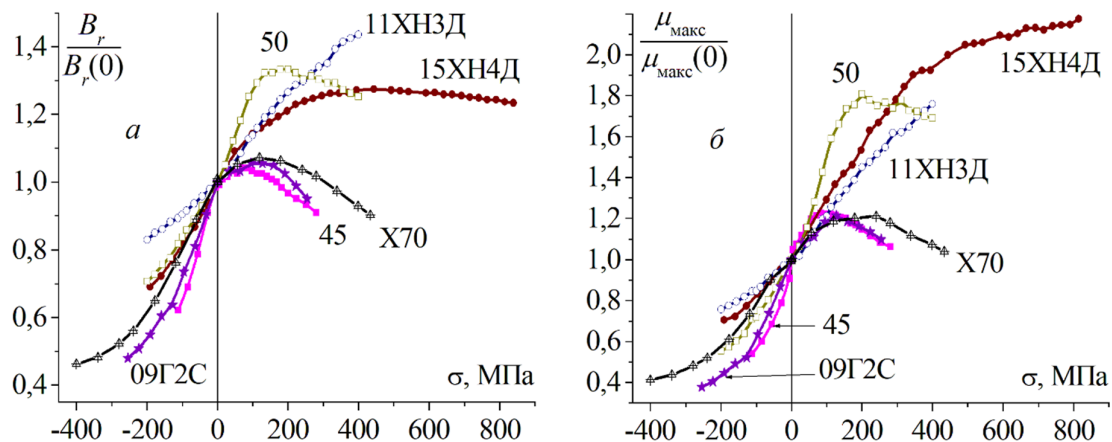
Под действие на σ на опън на феромагнетик в перпендикулярна посока се появяват сили на натиск и се оказва, че при опън H_c , измерена в перпендикулярна посока, трябва да се променя подобно на H_c при натиск. На фиг. 11 са представени резултати на промяна на H_c по две взаимоперпендикулярни посоки.

Възникващите напрежения на натиск водят до монотонно нарастване на H_c , измерена в посока, перпендикулярна на действащото напрежение на опън. Зависимостта на коерцитивната сила в перпендикулярна посока на натисковите напрежения са променя незначително.

Ако зависимостта при едноосно напрегнато състояние е известна (за опън и натиск), то величината на натисковите напрежения може да бъде оценена по H_c , измерена по посока на натисковите усилия, а величината на опъново напрежение по H_c , измерена перпендикулярно към посоката на опън.

В случая на едноосно деформиране, когато не е известно натоварването на материала, като параметър за оценка на действащи напрежения може да се използва H_c , измерена в посока на натоварване на натиск, а величината на опъновите напрежения – по H_c , измерена перпендикулярно на посоката на опън (фиг. 11б). Описаният подход е подходящ за използване за повечето конструкционни стомани [23-29]. Както се вижда от фиг. 11б, зависимостта на разлика в коерцитивните сили от механичното деформиране за стомани X70 не само е монотонна, но и близка до линейна, с коефициенти на корелация 0.98. Трудностите при реализация на метода са свързани с необходимостта да се изпълнят две измервания с един преобразувател в случая на различни посоки. Допълнително е възможно и влияние на изходната структура върху магнитните свойства.

Друг широко използван в практиката на магнито-структурния анализ параметър е остатъчната индукция B_r . Често закономерностите при промяна на B_r (фиг. 12а) са близки по вид към обратните закономерности на промяна на H_c от еластични деформации.



Фиг. 12. Относителни изменения на B_r (а) и μ_{\max}/μ_{\min} ($\sigma = 0$) (б) за различни стомани при еластично деформиране

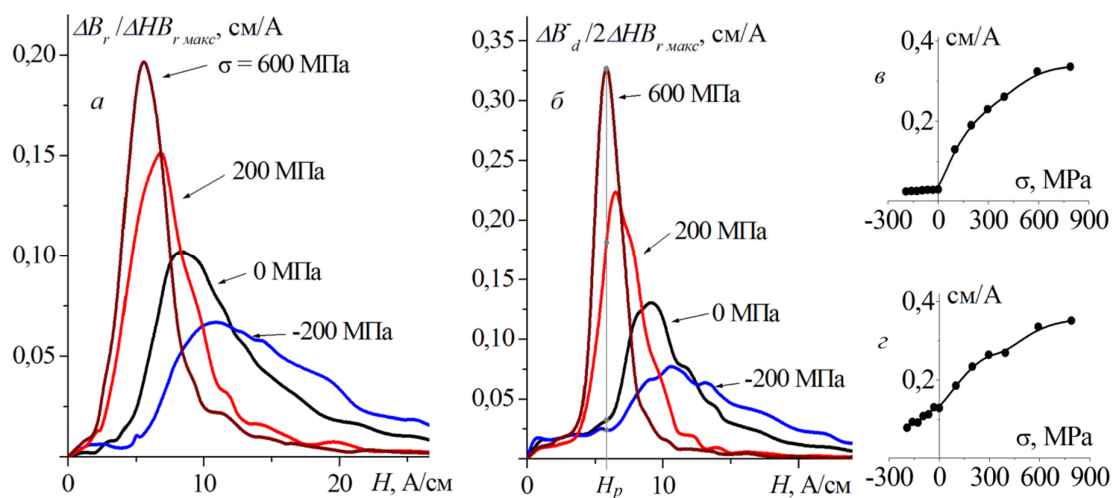
От приведените на фиг. 12а зависимости за $B_r = F(\sigma)$ следва, че за този параметър има същите ограничения както и за H_c . B_r успешно се използва при оценка на σ при натиск, а за опън – само за легирани стомани. За стомана 15ХН4Д при големи стойности на σ (300÷800 МПа) контролът е невъзможен.

Изследванията на μ_{\max} (фиг. 12b), показват, че този параметър има чувствителност към едноосни деформации аналогично на B_r и може да се използва като параметър за контрол.

Измерването на B_r на голям образец със сложна геометрия е трудна задача поради наличие на размагнитващ фактор и на промяната му по време на деформация на материала. B_r се прилага при оценка на твърдост НВ, на временното съпротивление и на удължението на листов прокат [30-32]. Този опит може да се използва и при оценка на напрежение в листов прокат.

За изучаване на разпределението на критичните полета в образца при намагнитване и пренамагнитване се измерват стойностите на B_r по хистерезисната крива $B_r = F(H)$ по низходящата част на хистерезисния цикъл $B_d = F(H)$. Зависимостите се получават чрез диференциране на тези зависимости по H . Те отразяват особеностите на критичните полета и тяхното разпределение за даден феромагнетик и се наричат зависимости на магнитна якост [33]. Областите под кривите характеризират относителните обеми на феромагнетика, който е намагнетизиран (първичен спектър на магнитна якост) или ремагнетизиран (вторичен спектър) в поле с дадена сила H . Позициите на максимумите на кривите съответстват на магнитни полета, в които протичат най-интензивните процеси на необратимо намагнитване или размагнитване.

Фиг. 13 показва промените на спектрите на магнитната якост на стомана 15XН4Д при изпитване на опън и натиск [34]. Положението на максимумите превишават незначително стойностите на H_c при съответните еластични напрежения. При натиск се наблюдава преместването на максимумите към по-висока стойност на H . С увеличаване на опъновите напрежения, максимумът се премества към областта на по-слаби полета, височината се увеличава, а ширината намалява.



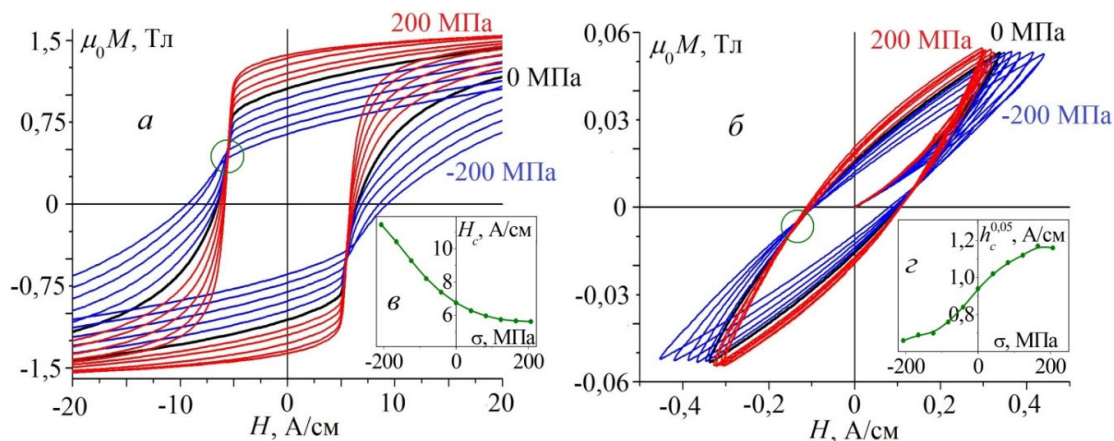
Фиг. 13. Първичен (a) и вторичен (б) спектър на магнитната якост за стомана 15XН4Д и деформационните зависимости на получаваните в тях параметри (c, d)

Да илюстрираме този подход за оценка на напреженията при опън в областта на $\sigma = 600 \div 800$ МПа за стомана 15XН4Д, където контролът на напреженията е невъзможен (фиг. 12). Вземаме максимума на полето H_p при $\sigma = 600$ МПа като базова точка за анализа. Сравняваме зависимости за H_p от σ и получаваме еднозначна зависимост от вида $\Delta B_d / 2\Delta H B_{r, \max} = F(\sigma)$ (фиг. 13c).

В този пример използваният параметър има висока чувствителност към опънови напрежения, а по-слабо зависи от натисковите напрежения. Като се променят

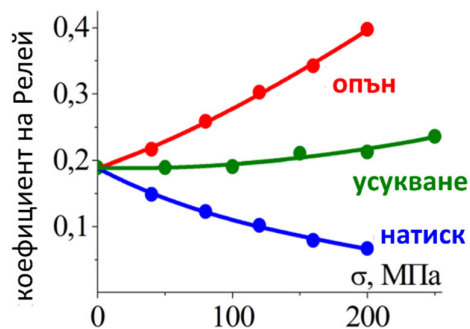
стойностите на H_r може да се подберат параметрите за определяне на σ в необходимия диапазон.

За легирана стомана 11ХНЗД на фиг. 14а,б е показана промяната на пределни и частни цикли на хистерезисната крива при едноосен натиск и опън. Вижда се, че хистерезисните криви, определени при различни стойности на σ , са чувствителни към действащите напрежения. Има област, в които те се пресичат. В тези области индукцията има слаба чувствителност към σ [37,38]. Следователно в тези области на индукцията магнитоеластичните характеристики ще са слабо чувствителни към деформация.



Фиг. 14. Хистерезисни криви на стомани 11ХНЗД (а – пределна, б – при $B_{\max}=0,05$ Тл) и съответстващите стойности на коерцитивната сила (ν , ε)

Аналогично, за целите на контрола параметрите на граничните хистерезисни криви може да се разглеждат като параметри на частични криви на хистерезиса, получени при пренамагнитване в полета при недостатъчно насищане [39]. На фиг. 14 се вижда, че действащите напрежения по различен начин влияят на процесите на пренамагнитване в слаби и силни полета. По-подробно този ефект са наблюдава при H_c . Стойностите на $H_c = F(\sigma)$ в силни полета (фиг. 14в) и в слаби полета (фиг. 14г) практически са противоположни. Следователно величината на намагнитващото поле влияе върху закономерностите на магнитоеластичните параметри и на чувствителността на този параметър към еластичните деформации.



Фиг. 15. Влияние на механичното напрежение на коефициента на Релей за стомани 15ХН4Д

Относителната промяна на параметрите по частични цикли на хистерезис в слаби полета могат да бъдат по-информативни спрямо някои магнитни характеристики, получени от хистерезисните криви.

За описване на началната крива на намагнитване и симетрична хистерезисна крива в слаби магнитни полета се използва законът на Релей, съгласно който началният участък на кривата на намагнитване се описва чрез зависимостта

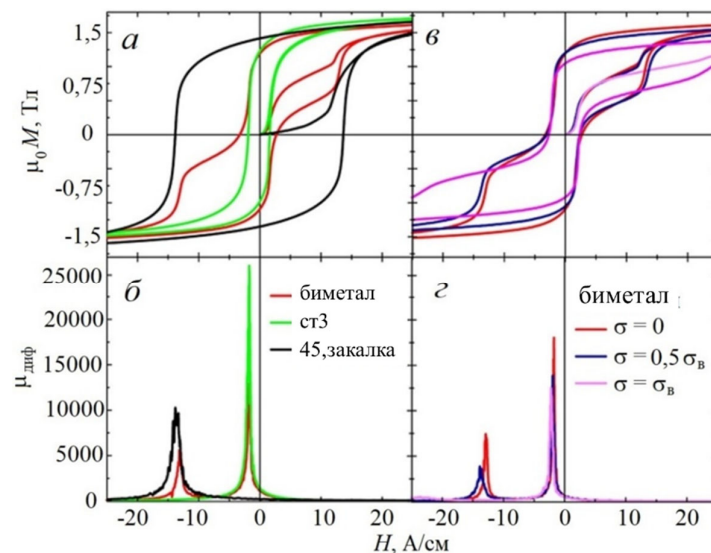
$$M(H) = \chi_{нач} H + bH^2,$$

където $\chi_{нач}$ – е началната възприемчивост, b – коефициент на Релей. За редица стомани коефициентът на Релей $M(H)$ има по-висока чувствителност към опънови и натискови напрежения в сравнение с други хистерезисни параметри [42]. Като коефициент, който се постига чрез пресмятане, обаче, е по-голяма и грешката, която зависи от относителните грешки при определяне на намагнитването и полето.

Коефициентът на Релей за тези стомани може да има екстремум в еластични области при опън. За стомани 15ХН4Д зависимостите са монотонни (фиг. 15), а чувствителността е по-добра в сравнение с H_c (фиг. 10).

5. Оценка на механични напрежения в многослойни изделия

В най-простия случай хистерезисната крива на двуслоен феромагнетик с различна магнитна якост на контролирания материал съществено се отличава от хистерезисната крива за еднороден материал. Обикновено тя има по-сложна форма с промени [43]. На фиг. 16а са представени хистерезисните криви за образец, от отгрята стомана Ст3 ($H_c = 1,8$ А/см) и закалена стомана 45 ($H_c = 13,6$ А/см) [44]. Положението на промените в двуслойните материали съответства на коерцитивните сили на отделните слоеве. Зависимостта на диференциалната магнитна проницаемост, пресметната по низходящата част на хистерезисната крива, е представена на фиг. 16б. Наблюдават се два максимума, положенията на които съответстват на положенията на максимумите на двата материала. Височината на максимумите се определя от стойностите на $\mu_{диф}$, а също така и от пренамагнитващите се обеми (дебелината) на слоевете в биметала.



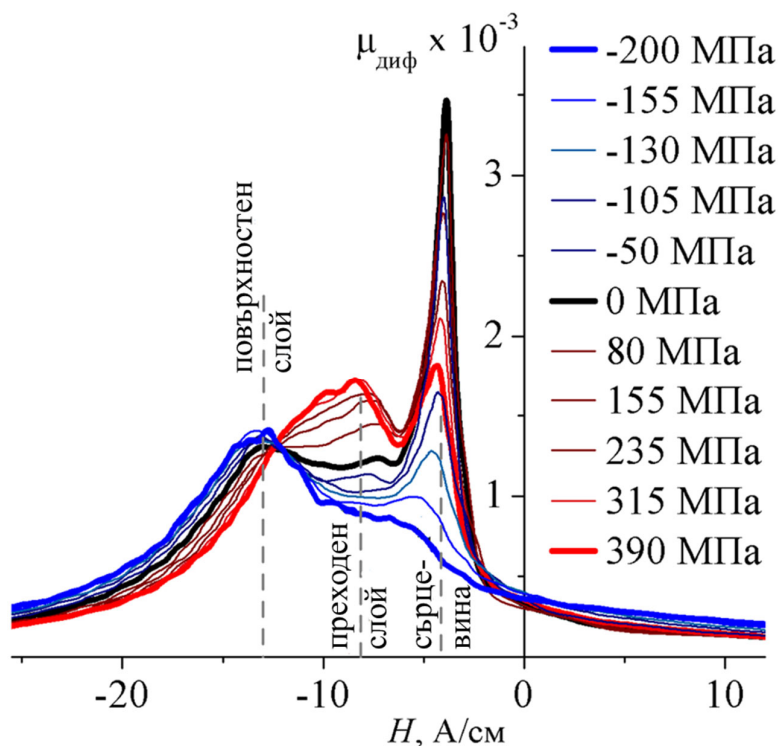
Фиг. 16. Гранични хистерезисни криви (а, в) и зависимости на $\mu_{диф}$ (б, з) за съставен образец и от Ст3 и Ст 45 след нагряване на съставките (а, б), а също така и за биметален образец при едноосен опън (в, з)

В процеса на деформиране промените в хистерезисните криви и максимумите на $\mu_{\text{диф}}$ (фиг. 16б, з) се преместват аналогично както това става в еднослоен материал. На фиг. 16з са показани 3 точки на преместване на $\mu_{\text{диф}}$ при $\sigma = 0.5\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma = \sigma_{\text{в}}$ където $\sigma_{\text{в}}$ е якостта на опън на материалите.

Най-значителни промени в максимумите се наблюдава за магнитотвърдата компонента, която е свързана със слабата зависимост на H_c (а също така $\mu_{\text{диф макс}}$) от механичното напрежение в нисковъглеродни стомани. Разрушаването на биметала се реализира в материала на закалената стомана 45, която има по-малка еластичност, т.е. при едни стойности на деформиране напреженията в закалената стомана са по-високи. Този ефект се използва за прогнозиране на разрушаването на образеца. Преди разрушаването пикът, съответстващ на този слой, изчезва почти напълно, което може да се използва като индикатор за приближаването на напреженията към максимална якост.

Реализацията на тези изследвания се затруднява от факта, че стойностите на $\mu_{\text{диф}}$ се получават на основата на числено диференциране и грешката може да нарасне съществено.

Обсъденият по-горе пример е моделен, тъй като пробата е механично свързана от два различни компонента с ясна граница. На практика такива многослойни системи могат да бъдат получени, например, чрез взривно заваряване, триене или повърхностна обработка. В този случай между основните компоненти ще бъде разположен преходен слой с нехомогенни характеристики. Като пример, фиг. 17 показва зависимостите на диференциалната магнитна пропускливост на стомана 20, уякчени с газово цементиране [45].



Фиг. 17. Влияние на механичните напрежения върху диференциалната магнитна пропускливост на стомана 20 цементирана в масло

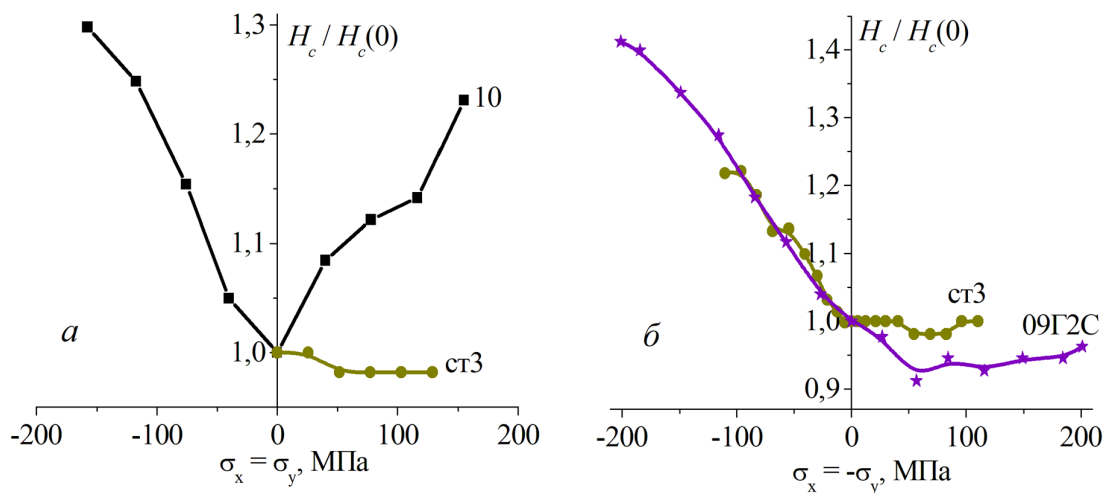
При отсъствие на натоварване ($\sigma = 0$) между максимумите, които съответстват на магнитомекия материал ($H_{\text{диф макс}} = 4.1 \text{ A/cm}$) и на магнитотвърдия цементиран слой ($H_{\text{диф макс}} = 12.3 \text{ A/cm}$), може да се отдели максимум, който съответства на преходния слой. Най-добре този ефект се проявява при изпитване на опън.

Единствено натоварването на натиск води до значително намаляване на височината на максимумите на съставките и на преходния слой. Под действие на опънови сили μ на основата намалява, докато μ на преходния слой не се променя. При $\sigma \approx 400 \text{ МПа}$ практически е сравнима с μ на сърцевината.

Промените на максимумите на μ на повърхностния и на преходните слоеве са монотонни и могат да се използват за определяне на схемата на натоварване и стойностите на приложените механични напрежения. Едновременно регистриране на намаляване на μ на повърхностния слой указва наличие на еластичен опън.

6. Оценка на сложно напрегнато състояние

В реални условия конструкциите са в състояние на сложни натоварвания. На фиг. 18 са приведени зависимостите на относителните промени на H_c за стомани от марки Ст3, 09Г2С и стомана 10 при симетрично ($\sigma_x = \sigma_y$) и асиметрично ($\sigma_x = -\sigma_y$) двуосно натоварване от типа опън / натиск [46, 47]. H_c е определено в посока σ_x на действие на напрежението σ_x .

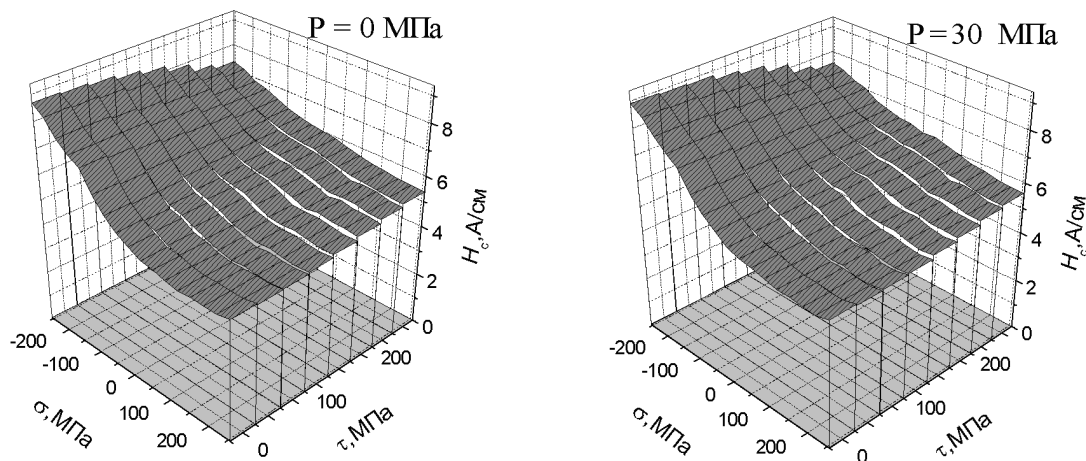


Фиг. 18. Влияние на симетрично (а) и несиметрично (б) двуосно натоварване на коерцитивната сила при различни стомани

Симетричният натиск способства за формиране на текстури „равнина на лесно намагнитване“, в която действат механични напрежения. Това затруднява процесите на пренамагнитване и води до нарастване на H_c (фиг. 18a).

При асиметрично двуосно натоварване се създават условия за формиране на оси и плоскости на леко намагнитване, които лежат в една равнина. В този случай влиянието на напреженията на процесите на пренамагнитване са подобни на тези при едноосно натоварване по посока на магнитните измервания. Така например, при натиск ($\sigma_x < 0$, $\sigma_y > 0$), се наблюдава значително и монотонно нарастване на H_c , а в посока на опън ($\sigma_x > 0$, $\sigma_y < 0$) промяната на H_c е незначителна. Тези процеси са намерили експериментално потвърждение в [48-53] за армко желязо и електротехнически стомани.

В [22, 54, 55] са дадени примери за изследване на триосно напрегнато състояние. Натоварват се кухи цилиндрични образци на опън (натиск), усукване и вътрешно налягане. Това позволява да се получи взаимно независимо изменение на стойностите на главните напрежения, но не могат да се получат условия на обемно триосно натоварване на опън или натиск на образца.



Фиг. 19. Промяна на H_c за стомана 09Г2С от действие на опънови или натискови напрежения σ , усукващи напрежения τ и вътрешно налягане P

При комбинирано изпитване опън (натиск) с усукване, действието на сръзващите напрежения намалява влиянието на нормалните напрежения върху промяната на магнитните характеристики, преди всичко на H_c (фиг. 18). Това се обяснява с факта, че опъновите напрежения се стремят да завъртят векторите на магнитните моменти по оста на образца, а натисковите – в плоскост, перпендикулярна на оста. За сметка на тангенциалните напрежения, векторът на намагнитване ще бъде разположен под някакъв междинен ъгъл. Допълнителното въздействие на вътрешното налягане оказва адаптивно влияние на магнитните характеристики. H_c се увеличава.

Заклучение

В работата е обсъдена природата на магнитоеластичните ефекти с отчитане на основните енергии във феромагнитен материал. Описани са модели за формиране на различни текстури при различни видове еластично деформиране.

На основата на изучаване на магнитострикцията в конструкционни стомани с различна степен на легиране са разгледани възможностите за използване на различни магнитоеластични параметри за безразрушителна оценка на механичните напрежения в тях. Оценката на едноосни натискови напрежения по магнитните характеристики е сравнително лесно решима задача. Проблемът за оценка на опънните напрежения в нисколегираните стомани е в слабата монотонност на магнитните характеристики от степента на деформиране. Обсъдени са основните причини за възникване на тези закономерности, поради частично компенсиране на тези напрежения, а също така със смяната на знака на магнитострикция при деформиране на опън. Показана е възможността за постигане на добри резултати при оценка на напрежения на опън с използване на анизотропията на коерцитивната сила и на магнитната якост.

Изследвана е възможността за оценка на механичното напрегнато състояние в отделни слоеве на многослойни материали по максимумите на магнитната диференциална проникваемост.

Представени са експериментални изследвания по влиянието на двуосните и триосните натоварвания върху промяна на магнитните характеристики на ферромагнитните материали.

Изследванията са представени по научен проект № 20-08-00392 на РФФИ.

Литература

1. Гуманюк М.Н. Магнитоупругие датчики в автоматике. Киев: Техника, 1972, 201 с.
2. Гинзбург В.Б. Магнитоупругие датчики. Москва: Энергия, 1970, 72 с.
3. Горкунов Э.С., Ю.Н. Драгошанский, В.А. Хамитов. Магнитоупругая акустическая эмиссия в ферромагнитных материалах. 2. Влияние упругих и пластических деформаций на параметры магнитоупругой акустической эмиссии. Дефектоскопия, 2001, №12, с. 3–30.
4. Garshelis I. A Study of the inverse Wiedemann effect on circular remanence. IEEE Transactions on Magnetics, 1974, Vol. Mag-10, No. 2, pp. 344–358.
5. Lahyaoui O. et al. Effect of mechanical stress on magnetization and magnetostriction strain behavior of non-oriented Si-Fe steels at different directions and under pseudo-DC conditions. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, pp. 1–14.
6. Клюев В.В. (ред.). Справочник Неразрушающий контроль, том. 6, книга 1, Магнитные методы контроля. Москва: Машиностроение, 2004, с. 19–375.
7. Бозорт Р. Ферромагнетизм. Москва: ИИЛ, 1956, 784 с.
8. Голямина И.П. Ультразвук. Москва: Советская энциклопедия, 1979, 400 с.
9. Вонсовский С.В. Магнетизм. Москва: Наука, 1971, 1032 с.
10. Белов К.П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. Москва: Изд. технико-теоретической литературы, 1957, 280 с.
11. Буденков Г.А., С.Ю. Гуревич. Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля (обзор). Дефектоскопия, 1981, №5, с. 5–33.
12. Ландау Л.Д., Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. Москва: Физматлит, 2005, 656 с.
13. Кандаурова Г.С., Л.Г. Оноприенко. Основные вопросы теории магнитной доменной структуры. Свердловск: УрГУ, 1977, 120 с.
14. Горкунов Э.С. Влияние термической обработки на магнитострикцию конструкционной стали 34ХН2М. Дефектоскопия, 1979, №11, с. 105–108.
15. Горкунов Э.С., Ю.В. Субачев, А.М. Поволоцкая, С.М. Задворкин. Влияние упругой одноосной деформации среднеуглеродистой стали на ее магнитострикцию в продольном и поперечном направлениях. Дефектоскопия, 2013, № 10, с. 40–52.
16. Jus A., P. Nowak, O. Ginko. Assessment of the magnetostrictive properties of the selected construction steel. Acta Physica Polonica A, 2017, Vol. 131, No. 4, pp.1084–1086.
17. Вонсовский С.В. Влияние слабых упругих напряжений на начальную обратимую восприимчивость ферромагнетиков. Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1947, Т. 17, Вып. 12, с. 1094–1105.
18. Ничипурук А.П., Э.С. Горкунов, В.Г. Кулеев, Н.И. Чарикова. Влияние структурных изменений при отпуске на обратимые процессы намагничивания в конструкционных сталях. Дефектоскопия, 1990, № 8, с. 68–75.
19. Ничипурук А.П., Н.И. Носкова, Э.С. Горкунов, Е.Г. Пономарева. Влияние дислокационной структуры, формируемой пластической деформацией, на магнитные и магнитоупругие свойства железа и низкоуглеродистой стали. Физика металлов и металловедение, 1992, №12, с. 81–87.
20. Кулеев В.Г., Т.П. Царькова. Особенности зависимости коэрцитивной силы сталей от упругих растягивающих напряжений после пластических деформаций и термообработки. Физика металлов и металловедение, 2007, Т. 104, № 5. с. 479–486.

21. Горкунов Э.С., Ю.В. Субачев, А.М. Поволоцкая, С.М. Задворкин. Влияние предварительной пластической деформации на поведение магнитных характеристик высокопрочной трубной стали контролируемой прокатки при упругом одноосном растяжении (сжатии). Дефектоскопия, 2015, № 9, с. 49-60.
22. Горкунов Э.С., С.М. Задворкин, А.Н. Мушников, С.В. Смирнов, Е.И. Якушенко. Влияние механических напряжений на магнитные характеристики трубной стали. Прикладная механика и техническая физика, 2014, Т. 55, № 3 (325), с. 181–191.
23. Захаров В.А., М.А. Боровкова, В.А. Комаров, В.Ф. Мужичкий. Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу углеродистых сталей. Дефектоскопия, 1992, № 1, с. 41–46.
24. Мужичкий В.Ф., Б.Е. Попов, Г.Я. Безлюдько. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подземных сооружений и сосудов, работающих под давлением. Контроль. Диагностика, 2000, № 9, с. 48–50.
25. Новиков В.Ф., М.С. Бахарев, В.В. Насонов, Т.А. Яценко. Измерение напряжений в стали с помощью коэрцитиметра. Известия высших учебных заведений. Нефть и газ, 2005, № 2, с. 89–94.
26. Елфимов А.В., А.В. Сальников, И.Н. Бирилло, А.С. Кузьбожев. Экспериментальная проверка определения механических напряжений магнитным методом на трубном стенде из высокопрочной стали. Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов, 2016, № 3 (105), с. 103–109.
27. Бердник М.М., Ю.В. Александров, Р.В. Агинец. Исследование влияния плоского напряженного состояния на изменение магнитных характеристик трубных сталей. Наука в нефтяной и газовой промышленности, 2010, № 3, с. 2–6.
28. Бердник М.М., Ю.В. Александров, Р.В. Агинец. Исследование влияния плоского напряженного состояния на изменение магнитных характеристик трубных сталей. Контроль. Диагностика, 2011, № 1, с. 22–26.
29. Новиков В.Ф., Т.А. Яценко, М.С. Бахарев. Зависимость коэрцитивной силы от одноосных напряжений (часть 2). Дефектоскопия, 2002, №4, с.10-17.
30. Матюк В.Ф., М.А. Мельгуй, А.А. Осипов, В.Б. Кратиров, А.Л. Любарец, С.В. Шептуро. О возможности контроля механических свойств стали 50ХГФА импульсным магнитным методом. Дефектоскопия, 2003, № 9, с. 28–36.
31. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии листового проката сталей в технологическом потоке производства. Неразрушающий контроль и диагностика, 2013, № 2, с. 3–28.
32. Мельгуй М.А. Многопараметровые методы магнитной структуроскопии и приборы для их реализации (обзор). Ч. II. Импульсный магнитный многопараметровый метод и прибор ИМА-М для его реализации. Дефектоскопия. 2015, № 3, с. 11–20.
33. Дерягин А.В., Г.С. Кандаурова, Я.С. Шур. О природе магнитной жесткости в пластически деформированном сплаве марганец–галлий. Физика металлов и металловедение, 1973, Т. 35, №2, с. 286–293.
34. Горкунов Э.С., Е.И. Якушенко, С.М. Задворкин, А.Н. Мушников, Е.В. Мельникова. Влияние упругой деформации сжатием, растяжением, кручением на распределение критических магнитных полей в стали 15ХН4Д. Дефектоскопия, 2010, № 2, с. 3–13.
35. Щербинин В.Е., Э.С. Горкунов. Магнитный контроль качества металлов. Екатеринбург: УрО РАН, 1996, 264 с.
36. Костин К.В., Т.П. Царькова, А.П. Ничипурук, Я.Г. Смородинский. Изменение гистерезисных характеристик трубных сталей при их упругом и пластическом деформировании растяжением. Дефектоскопия, 2011, № 9, с. 25–36.
37. Ronggao C., Sh. Li, Z. Wang, X. Wang. A modified residual stress dependent Jile-Atherton hysteresis model. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, Vol. 465, pp. 578–584.
38. Bulte D.P., R.A. Langman. Origins of the magnetomechanical effect. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, Vol. 251, pp. 229–243.

39. Горкунов Э. С., М. Н. Михеев, Ф. Н. Дунаев. Магнитные и электрические свойства сталей 18ХНВА, 34ХНЗМ, У9А в зависимости от режима термообработки. Дефектоскопия, 1975, №3, с. 119–126.
40. Михеев М.Н., Э.С. Горкунов. О возможных причинах различия процессов перемагничивания в слабых и средних магнитных полях термически обработанных конструкционных сталей. Физика металлов и металловедение, 1981, Т. 51, вып. 4, с. 749–755.
41. Матюк В.Ф., А.А. Осипов. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Часть I. Анализ моделей. Неразрушающий контроль и диагностика, 2011, № 2, с. 3–35.
42. Костин В.Н., Т.П. Царькова, А.П. Ничипурук, В.Е. Лоскутов, В.В. Лопатин, К.В. Костин. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов. Дефектоскопия, 2009, № 11, с. 54–67.
43. Горкунов Э.С. Магнитные методы оценки структурных и фазовых изменений в отдельных слоях многослойных изделий. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2017, № 2, с. 6–27.
44. Горкунов Э.С., С.М. Задворкин, И.Г. Емельянов, С.Ю. Митропольская. Закономерности изменения магнитных характеристик двухслойных изделий из углеродистых сталей в условиях растяжения. Физика металлов и металловедение, 2007, Т. 103, № 6, с. 657–666.
45. Горкунов Э.С. Влияние упругопластического нагружения на магнитные свойства стали 20, упрочненной газовой цементацией. Дефектоскопия, 2011, № 4, с. 3–16.
46. Langman R. Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress. *IEEE Transactions on magnetics*, 1990, Vol. 26, No. 4, pp. 1246–1251.
47. Новиков В.Ф., В.А. Захаров, А.И. Ульянов, С.В. Сорокина, М.Е. Кудряшов. Влияние двухосной упругой деформации на коэрцитивную силу и локальную остаточную намагниченность конструкционных сталей. Дефектоскопия, 2010, № 7, с. 59–68.
48. Pearson J., P.T. Squire, M.G. Maylin, J.G. Gore. Biaxial stress effects on the magnetic properties of pureIron. *IEEE Transactions on magnetics*, 2000, Vol. 36, No. 5, pp. 3251–3253.
49. Kai Y., Y. Tsuchida, T. Todaka, M. Enokizono. Development of system for vector magnetic property measurement under stress. *Journal of Electrical Engineering*, 2010, Vol. 61, No. 7/s, pp. 77–80.
50. Kai Y., Y. Tsuchida, T. Todaka, M. Enokizono. Influence of biaxial stress on vector magnetic properties and 2-D magnetostriction of a nonoriented electrical steel sheet under alternating magnetic flux conditions. *IEEE Transactions on magnetics*, 2014, Vol. 50, No. 4, 6100204.
51. Aydin U., P. Rasilo, D. Singh, A. Lehtikoinen, A. Belahcen, A. Arkkio. Coupled magneto-mechanical analysis of iron sheets under biaxial stress. *IEEE Transactions on magnetics*, 2016, Vol. 52, No. 3, 2000804.
52. Aydin U., P. Rasilo, F. Martin, A. Belahcen, L. Daniel, A. Haavisto, A. Arkkio. Effect of multi-axial stress on iron losses of electrical steel sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, Vol. 469, pp. 19–27.
53. Aydin U., F. Martin, P. Rasilo, A. Belahcen, A. Haavisto, D. Singh, L. Daniel, A. Arkkio. Rotational single sheet tester for multi-axial magneto-mechanical effects in steel sheets. *IEEE Transactions on magnetics*, 2019, Vol. 55, No. 3, 2001810.
54. Горкунов Э.С., Е.И. Якушенко, С.М. Задворкин, А.Н. Мушников. Влияние упругих деформаций на магнитные характеристики хромоникелевых сталей. Физика металлов и металловедение, 2015, Т. 116, № 2, с. 156–164.
55. Александров Ю.В. Особенности применения магнитного метода для оценки напряженного состояния нефтегазопроводов с учетом действия внутреннего давления продукта. Наука в нефтяной и газовой промышленности, 2010, №4, с.7–10.