

З.І. СИЗОВА, В.М. ГОРБАЧ, К.О. МОЗУЛЬ

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна  
(Майдан Свободи 4, Харків 61022)

## ЛОКАЛЬНА МАГНІТНА АНІЗОТРОПІЯ АМОРФНОГО СПЛАВУ НА ОСНОВІ Со

УДК 539

*Досліджувалися намагніченість, початкова магнітна сприйнятливість і магнітострикція багатокомпонентного аморфного сплаву на основі Со. Визначені постійна обміну  $\alpha$  і температура Кюрі  $T_C$  сплаву. За допомогою методу, ґрунтованого на теорії стохастичної магнітної структури для аморфних феромагнетиків, по кривих намагнічування розраховані кореляційне поле  $H_\ell$ , поле  $H_a$  і ефективна константа  $K_{\text{eff}}$  локальної магнітної анізотропії, а також стохастичні характеристики локальної анізотропії – середньоквадратична флуктуація поля  $\sqrt{DH_a}$  і кореляційний радіус  $r_\ell$ . Вивчено характер температурної поведінки досліджуваних магнітних характеристик. Результати дослідження магнітострикції дозволяють зробити висновок про одноіонне походження локальної магнітної анізотропії сплаву.*

*Ключові слова:* аморфний сплав, намагніченість, локальна магнітна анізотропія, кореляційний радіус, температура Кюрі.

### 1. Вступ

Магнітні параметри магнітовпорядкованих аморфних сплавів, навіть макроскопічно ізотропних, є випадковими функціями координат, тобто випадковим чином змінюються від точки до точки. Зокрема, магнітна анізотропія може змінюватися як за величиною, так і за напрямом. Флуктуації саме напруженості осі анізотропії призводять до утворення стохастичної магнітної структури (СМС). Метод, що базується на теорії СМС [1–6], дозволяє вивчати стохастичні характеристики локальної магнітної анізотропії (середньоквадратичну флуктуацію і кореляційний радіус поля анізотропії) шляхом експериментального дослідження кривих намагнічування аморфного магнетика.

Відомо, що ряд аморфних сплавів на основі Со належать до класу магнітом'яких матеріалів і використовуються, зокрема, для створення високоякісних датчиків магнітного поля і струму [7]. Властивостями, що визначають "м'якість"

аморфного сплаву як магнітного матеріалу, являються магнітна анізотропія і магнітострикція. Так, сплави  $\text{Co}_{72}\text{Fe}_3\text{P}_{16}\text{B}_6\text{Al}_3$  і  $\text{Co}_{81}\text{Fe}_{4,5}\text{Si}_{4,5}\text{B}_{10}$ , завдяки відсутності магнітострикції, виявляють такі магнітом'які властивості: коерцитивна сила  $H_c = 2,8 \text{ А/м} = 0,035 \text{ Е}$ , індукція насичення  $B_s = 1,0 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$ , максимальна магнітна проникність  $\mu_{\text{max}} = 2,8 \cdot 10^5$ .

Для сплаву  $(\text{Co}_{0,4}\text{Ni}_{0,6})_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$  константа магнітострикції дорівнює нулю при кімнатній і азотній температурах. Аморфні сплави серії  $(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ , залежно від швидкості охолодження при загартуванні, мають величину  $\lambda_s$  в інтервалі  $-2 \cdot 10^{-7} - +1 \cdot 10^{-7}$ . Відповідна температура компенсації на  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  нижча за кімнатну.

Величина магнітострикції також залежить від вмісту як перехідних, так і металоїдних елементів. Зокрема, у сплаві  $\text{Fe}_{77}\text{P}_{16}\text{B}_6\text{Al}_3$  величина  $\lambda_s$  змінюється від  $2,6 \cdot 10^{-6}$  до  $16 \cdot 10^{-6}$  при зміні відношення Р:В від 4 до 2,3.

Метою даної роботи було дослідження магнітних властивостей багатокомпонентного аморфно-

го сплаву Co-Fe-Ni-Cr-P-B, у тому числі характеристик і природи його локальної магнітної анізотропії.

## 2. Об'єкт дослідження. Зразки

Об'єктом дослідження служив аморфний феромагнітний сплав на основі Co<sup>1</sup>. Окрім Co, досліджуваний сплав містить перехідні метали Fe, Ni, Cr і металоїди – P і B. Вміст перехідних елементів у сплаві (у вагових %) за даними, отриманими на рентгенівському мікроаналізаторі MAP – 1 та електронному мікроскопі TESSAN VEGA3, такий: Co – 83,6; Fe – 6,0; Ni – 0,5; Cr – 1,7.

Для вимірювання намагніченості зразок виготовлявся у вигляді паралелепіпеда, складеного з 4-х квадратів з розмірами сторони 1 мм. Квадрати були вирізані зі стрічки досліджуваного сплаву завтовшки 30 мкм і завширшки 16 мм.

Для дослідження магнітострикції зі стрічки вирізувалися зразки прямокутної форми розміром 5 мм × 10 мм. При вимірюванні магнітної сприйнятливості ділянка стрічки навивалася на кінець керамічної соломки, в якій знаходилися дроти термопар.

## 3. Методика вимірювань

Для дослідження намагніченості використовувався маятниковий магнітометр [8]. Був застосований нульовий (компенсаційний) метод. Питома намагніченість обчислювалася за формулою:

$$\sigma = C \frac{i_k}{mH}, \quad (1)$$

де  $C$  – динамічна постійна магнітометра,  $i_k$  – компенсаційний струм,  $m$  – маса зразка.

Динамічна постійна магнітометра:

$$C = \frac{\sigma_0 m_0}{i_{k0}} H \quad (2)$$

визначалася за допомогою еталонного нікелевого зразка.

Магнітне поле створювалося електромагнітом. Максимальне поле становило 10,6 кЕ. Зразок розташовувався в площині, паралельній магнітному полю.

<sup>1</sup> Стрічка, з якої виготовлялися зразки, була отримана з Харківського фізико-технічного інституту

Вимірювання магнітної сприйнятливості проводилося в малих полях (до 100 Е), що створюються соленоїдом, в інтервалі температур 293–573 К на балістичній установці [8].

Оскільки зміна намагніченості в малих полях пропорційна зміні магнітного поля ( $\chi$  не залежить від поля), то температурний хід намагніченості відтворює температурний хід початкової сприйнятливості.

Температура Кюрі досліджуваного сплаву визначалася по кривій температурної залежності початкової сприйнятливості в малих полях шляхом екстраполяції ділянки найбільш різкого спаду сприйнятливості до осі температур.

Для вимірювання магнітострикції використовувався метод дротяних тензодатчиків [9]. Відносна зміна довжини зразка, яка дорівнює відносній зміні довжини дроту тензодатчика, обчислювалася за формулою:

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{1}{c} \frac{\Delta R}{R}, \quad (3)$$

де  $c$  – тензочутливість датчика,  $R$  – опір робочого датчика (використовувалися стандартні датчики з опором  $99,5 \pm 0,3$  Ом),  $\Delta R$  – зміна опору датчика, яка визначається по відхиленню нульового показника із співвідношення:

$$\Delta R = \frac{10^{-2}}{a_{\text{ет}}} a, \quad (4)$$

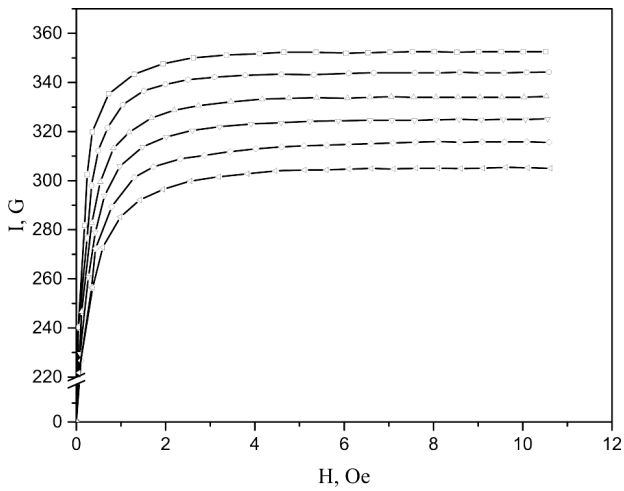
$a_{\text{ет}}$  – відхилення при зміні опору магазину, включеного послідовно з робочим датчиком, на 0,01 Ом,  $a$  – відхилення при зміні опору робочого датчика на  $\Delta R$ . Чутливість установки до відносної деформації становила  $8 \cdot 10^{-7}$ .

Для виміру температурної залежності лінійної деформації в низькотемпературній області використовувався рідкий азот. Проміжні температури встановлювалися шляхом зміни струму в нагрівальній печі і вимірювалися термопарою мідь-константан.

## 4. Результати вимірювань. Обробка й аналіз результатів

### 4.1. Намагніченість

Для визначення стохастичних характеристик локальної магнітної анізотропії проводилися виміри намагніченості в інтервалі температур 220–395 К.



**Рис. 1.** Польова залежність намагніченості зразка при різних температурах.  $T$ , К: 1 – 295; 2 – 315; 3 – 333; 4 – 351; 5 – 368; 6 – 386

При цьому в інтервалі температур 295–395 К вимірювалися ізотерми намагніченості для ряду температурних точок. Деякі з отриманих кривих намагнічування наведені на рис. 1. Характер кривих намагнічування не змінюється при зміні температури, в усіх випадках досягається насичення в полях  $\sim 5$  кЕ.

Для визначення величини намагніченості насичення при  $T = 0$  К криві намагнічування перебудувалися в координатах залежності  $I$  від оберненого поля (рис. 2) і знаходилися значення  $I_s$  при різних температурах.

На рис. 3 наведена залежність  $I_s(T^{3/2})$ , яка є лінійною, тобто підкорюється закону Блоха:

$$I_s(T) = I_s(0)(1 - BT^{3/2}). \quad (5)$$

Отримане шляхом екстраполяції значення  $I_s(0)$  дорівнює 447 Гс.

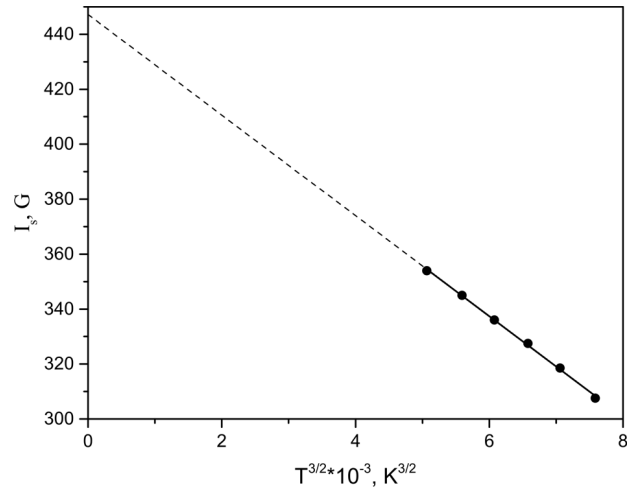
$$\text{Константа } B = (4,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-3/2}.$$

Знаючи  $I_s(0)$  і  $B$ , можна розрахувати постійну обміну  $\alpha$  із співвідношення:

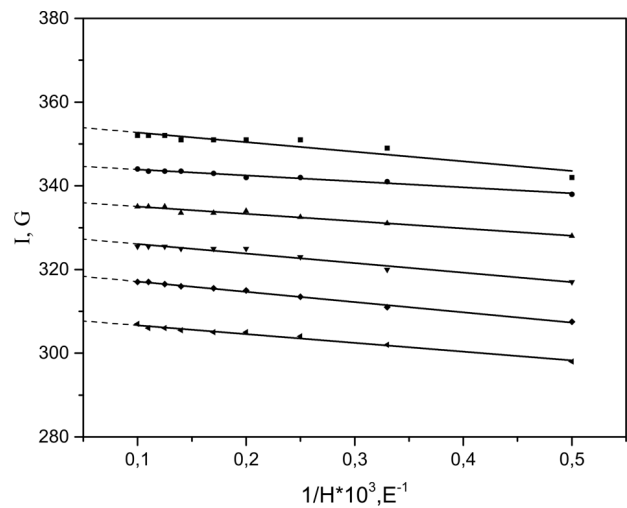
$$\alpha = \left( \frac{2,612g\mu_B}{VI_s(0)} \right)^{2/3} \frac{k_B}{4\pi g\mu_B I_s(0)} [10], \quad (6)$$

де  $g = 2$ ,  $\mu_B$  – магнетон Бора,  $k_B$  – стала Больцмана.

$$\text{Отримане значення } \alpha = (4,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-12} \text{ см}^2.$$



**Рис. 2.** Залежність намагніченості від оберненого поля.  $T$ , К: 1 – 295; 2 – 315; 3 – 333; 4 – 351; 5 – 368; 6 – 386



**Рис. 3.** Температурна залежність намагніченості насичення

Інформацію про характеристики локальної магнітної анізотропії було також отримано з кривих намагнічування.

Крива намагнічування аморфного феромагнетика описується співвідношенням:

$$I(H) = I_s[1 - 2d_m(H)]^{1/2}. \quad (7)$$

Тут  $d_m$  – відносна дисперсія флуктуацій поперечних компонент намагніченості, точний вираз для

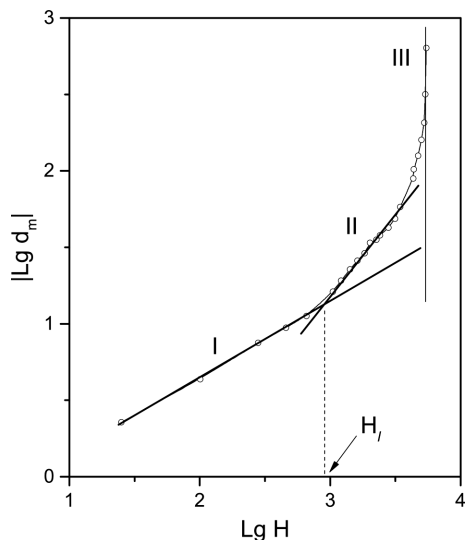


Рис. 4. Польова залежність відносної дисперсії флуктуацій намагніченості при  $T = 350$  К

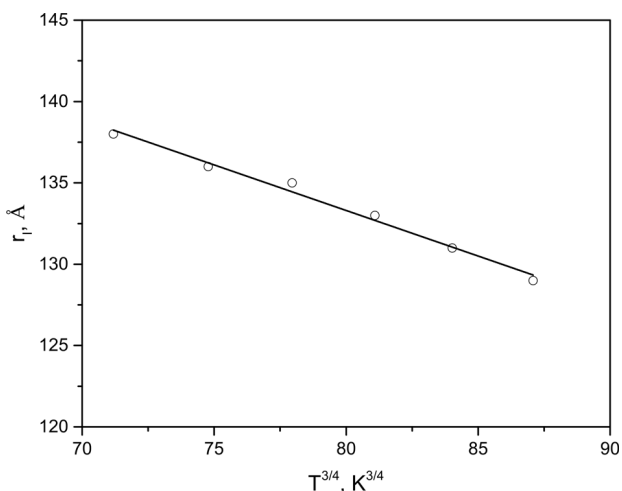


Рис. 5. Температурна залежність кореляційного радіуса локальної магнітної анізотропії

якої отриманий у роботі [3]:

$$d_m = \frac{DH_a^2}{2H^{1/2}(H_\ell^{1/2} + H^{1/2})^3} \quad (8)$$

У цьому виразі  $\sqrt{D}H_a$  – середньоквадратична флуктуація поля локальної анізотропії, що характеризує амплітуду його просторових флуктуацій,  $H_\ell = \alpha I/r_\ell^2$  – кореляційне поле, що містить інформацію про кореляційний радіус локальної ані-

зотропії  $r_\ell$ , який характеризує протяжність флуктуацій.

Як видно з (8), в області  $H \ll H_\ell$   $d_m \sim H^{-1/2}$ , а в області  $H \gg H_\ell$   $d_m \sim H^{-2}$  поблизу  $H \approx H_\ell$  відбувається зміна залежності.

Для визначення кореляційного радіуса і середньоквадратичної флуктуації поля анізотропії криві намагнічування перебудовувалися в логарифмічному масштабі:  $|\log d_m| = f(\log H)$ . Відносна дисперсія стохастичної магнітної структури  $d_m$  обчислювалася з виразу (7).

На рис. 4 наведено криву  $|\log d_m| = f(\log H)$  для 350 К (такий же характер кривих при інших температурах). На кривій спостерігається три прямолінійні ділянки, що відповідають різним інтервалам магнітних полів: ділянка I відповідає полям  $H \ll H_\ell \ll 4\pi I_s$ , ділянка II –  $H_\ell \ll H \ll 4\pi I_s$ , ділянка III –  $H_\ell \ll 4\pi I_s \ll H$ .

Кореляційне поле  $H_\ell$  визначалося по перетину ділянок I і II із спільного рішення рівнянь, що описують їх. Було встановлено, що величина кореляційного поля  $H_\ell$  в інтервалі 295–394 К не виявляє залежності від температури і дорівнює

$$H_\ell = (870 \pm 90) \text{ Е.}$$

Величина кореляційного радіуса, вчисленого за формулою

$$r_\ell = \left( \frac{\alpha I_s}{H_\ell} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

становить при кімнатній температурі  $(138 \pm 5) \text{ \AA}$ , тобто відповідає довгим кореляціям, і слабо убиває з підвищенням температури до значення  $129 \text{ \AA}$  при 386 К. На рис. 5 наведена температурна залежність  $r_\ell$ . Оскільки ця залежність зумовлена зміною  $I_s$  з температурою, то вона є лінійною в координатах  $r_\ell, T^{3/4}$ .

Поле локальної анізотропії  $H_a$  також визначалося із залежностей  $|\log d_m| = f(\log H)$ . При цьому виявилось, що нахил лінійної ділянки I відповідає теоретичному значенню – тангенс кута нахилу рівний  $a_1 = (0,47 \pm 0,03) \approx 1/2$ , тоді як нахил ділянки II менший, ніж передбачається теорією:  $a_2 = (1,11 \pm 0,06) < 2$ . Причиною того, що нахил ділянки II менше 2, може служити присутність у виразі закону наближення намагніченості до насичення для цієї ділянки члена  $\sim 1/H$  [3], який може

бути пов'язаний з присутністю немагнітних включень. Поблизу них створюється розмагнічуюче поле, що перешкоджає зміні напрямку частини спінів, в досліджуваному сплаві роль таких включень можуть відігравати атоми металоїдів.

Для визначення поля локальної анізотропії було вибрано ділянку I. Ця ділянка описується рівнянням:

$$-\log d_m = a_1 \log H + b_1, \quad (10)$$

де

$$a_1 = 1/2, \quad b_1 = \log 2 + 3/2 \log H_\ell - \log (DH_a^2). \quad (11)$$

Звідси

$$\log (DH_a^2) = \log 2 + 3/2 \log H_\ell - b_1. \quad (12)$$

Отримане значення середньоквадратичної флуктуації осі локальної анізотропії  $\sqrt{DH_\ell}$  дорівнює

$$\sqrt{DH_a} = (290 \pm 69) \text{ E}.$$

Для випадку рівноімовірної просторової флуктуації напрямів осі локальної анізотропії  $D = 1/15$  і поле локальної анізотропії

$$H_a = (1100 \pm 200) \text{ E}.$$

Ефективна константа одновісної локальної анізотропії обчислюється з формули:

$$H_a = \frac{2K_{\text{eff}}}{I_s} [8]. \quad (13)$$

$K_{\text{eff}}$  має порядок  $10^5 \text{ ерг} \cdot \text{см}^{-3}$ , як і для сплавів на основі Fe і Fe-Ni, досліджених раніше [11], і зменшується з температурою пропорційно  $T^{3/2}$  (рис. 6).

#### 4.2. Початкова магнітна сприйнятливість. Температура Кюрі

Той факт, що константа анізотропії змінюється приблизно так само, як самочинна намагніченість знайшов своє відображення в характері температурної поведінки початкової сприйнятливості  $\chi_0$ , яка досліджувалася з метою визначення температури Кюрі сплаву. Початкова сприйнятливість, зумовлена процесами обертання вектора намагніченості

$$\chi_0^{\text{BP}} \sim I_s^2 / K,$$

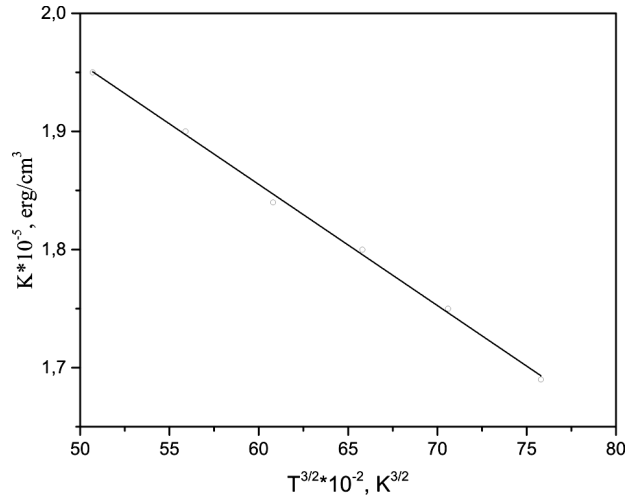


Рис. 6. Температурна залежність ефективного параметра локальної магнітної анізотропії

а зумовлена процесами зміщення доменних меж –  $\chi_0^{\text{CM}} I_s / K^{1/2}$ , [9].

Якщо константа анізотропії швидше убиває з температурою, ніж самочинна намагніченість, то при підході до точки Кюрі, де  $K$  вже мало, а  $I_s$  ще значно, повинен спостерігатися максимум на кривій  $\chi_0(T)$  з подальшим різким спадом в точці Кюрі (ефект Гопкінсона). Для досліджуваного сплаву залежність  $\chi_0(T)$  не виявляє максимуму (рис. 7). Плавний характер кривої може бути пов'язаний з просторовими флуктуаціями поля анізотропії і обміну.

Температура Кюрі визначалася шляхом екстраполяції ділянки різкого зменшення  $\chi_0$  до осі  $T$  і виявилася рівною

$$T_C = (565 \pm 2) \text{ K}.$$

#### 4.3. Магнітострикція

Ефективна локальна магнітна анізотропія в аморфному феромагнетикі може бути за своєю природою “кристаллографічною”, тобто одноіонною, зумовленою впливом на магнітоактивний атом (іон) неоднорідного електричного поля іонів, що оточують його, і наведеною пружними напруженнями або іншими неоднорідностями речовини.

Для з'ясування питання про те, чи дає внесок у локальну магнітну анізотропію цього сплаву анізотропія магнітопружного походження, були про-

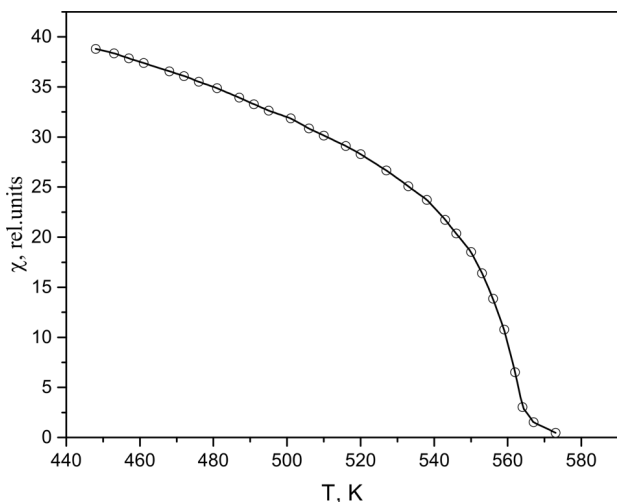


Рис. 7. Температурна залежність початкової магнітної сприйнятливості

**Магнітні характеристики сплаву  
Co-Fe-Ni-Cr-P-B**

№	Параметр	Величина
1	Самочинна намагніченість $I_s$ при 0 К, Гс	$447 \pm 2$
2	Постійна Блоха $B$ , $K^{-3/2}$	$(4,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$
3	Постійна обміну $\alpha$ , $см^2$	$(4,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-12}$
4	Кореляційне поле $H_\ell$ , Е	$870 \pm 90$
5	Кореляційний радіус $r_\ell$ при $T = 295$ К, $\text{Å}$	$138 \pm 5$
6	Середньоквадратична флуктуація поля локальної анізотропії $\sqrt{D}H_a$ , Е	$290 \pm 60$
7	Поле локальної магнітної анізотропії $H_a$ , Е	$1100 \pm 200$
8	Ефективна константа локальної анізотропії $K_{\text{eff}}$ при $T = 295$ К, $\text{Ерг}/\text{см}^3$	$(1,9 \pm 0,4) \cdot 10^5$
9	Температура Кюрі $T_C$ , К	$565 \pm 2$
10	Лінійна магнітострикція $\lambda_s$	$< 8 \cdot 10^{-7}$

ведені дослідження магнітострикції. Магнітострикція вимірювалася при кімнатній і азотній температурах в полях до 6,5 кЕ для напрямів вздовж і поперек прикладеного поля. Виміри показали, що в усіх випадках при чутливості установки до відносного подовження  $8 \cdot 10^{-7}$  зразки не виявляють магнітострикції. Отже, виміряна локальна анізотропія, в основному, одноіонного походження

Основні результати проведених досліджень наведені в таблиці.

**5. Висновки**

1. Досліджено намагніченість аморфного сплаву Co-Fe-Ni-Cr-P-B. Встановлено, що в інтервалі температур 220–395 К для сплаву виконується закон “3/2” Блоха. Визначено постійну обміну  $\alpha$ . Отримане значення  $\alpha$  за порядком величини узгоджується з даними для інших аморфних сплавів.

2. Методом, ґрунтованим на теорії стохастичної магнітної структури, по кривих намагнічування визначені кореляційне поле  $H_\ell$  і поле локальної магнітної анізотропії  $H_a$ . Показано, що обидві ці характеристики в інтервалі температур 295–395 К не залежать від температури.

3. Вирахувані стохастичні характеристики: кореляційний радіус і середньоквадратична флуктуація поля локальної анізотропії. Отримане значення кореляційного радіуса  $r_\ell \sim 10^2 \text{ Å}$  відповідає довгим кореляціям (неоднорідності на субмікронному рівні). З підвищенням температури спостерігається слабке убування кореляційного радіуса, пов’язане зі зміною самочинної намагніченості.

4. Вирахувано ефективну константу локальної магнітної анізотропії  $K_{\text{eff}}$ , яка за порядком величини становить  $10^5 \text{ ерг} \cdot \text{см}^{-3}$  і зменщується з підвищенням температури пропорційно  $T^{3/2}$ .

5. Виміряно лінійну магнітострикцію сплаву. Встановлено, що при кімнатній і азотній температурах  $\lambda_s < 8 \cdot 10^{-7}$ . Це дозволяє зробити висновок про несуттєвість магнітопружного і перевагу одноіонного внеску в локальну анізотропію дослідженого сплаву.

1. В.А. Игначенко, Р.С. Исаков. *Физика магнитных материалов* (Наука, 1983).
2. В.А. Игначенко, Р.С. Исаков. Магнитная микроструктура наноструктурированных ферромагнетиков. *Изв. АН СССР, сер. физ.* **44**, 1434 (1980).
3. В.А. Игначенко, Р.С. Исаков, Г.В. Попов. Закон приближения намагниченности к насыщению в аморфных ферромагнетиках. *ЖЭТФ* **82**, 1518 (1982).
4. Е.М. Chudnovsky. A theory of two-dimensional amorphous ferromagnet. *J. Magn. Magn. Mater.* **40**, 21 (1983).
5. Е.М. Chudnovsky, W.M. Saslow, P.A. Serota. Ordering in ferromagnets with random anisotropy. *Phys. Rev. B* **33**, 251 (1986).

6. А.П. Шпак, та ін. Стохастичнамагнетнаструктурааморфнихстопів. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології* **6**, 685 (1986).
7. Ф.Е. Люборский. *Аморфные металлические сплавы* (Металлургия, 1987).
8. M. Fähnle, T. Egami. Phenomenological theory of magnetostriction in amorphous ferromagnets. *J. Appl. Phys.* **53**, 2319 (1982).
9. Ю.А. Попков, З.И. Сизова, Ю.А. Николенко. Локальная магнитная анизотропия аморфных сплавов на основе сплавов Ni-Fe. *УФЖ* **35**, 410 (1990).
10. С. Тикадзуми. *Физика ферромагнетизма и практические применения, Т. 2* (Мир, 1987).

Одержано 07.05.18

Z.I. Sizova, V.N. Gorbach, K.A. Mozul

LOCAL MAGNETIC ANISOTROPY  
OF THE Co-BASED AMORPHOUS ALLOY

## S u m m a r y

The magnetization, initial magnetic susceptibility, and magnetostriction of a multicomponent Co-based amorphous alloy have been studied. The exchange constant  $\alpha$  and the Curie temperature  $T_C$  of the alloy are determined. On the basis of a method based on the theory of stochastic magnetic structure for amorphous ferromagnets and using the magnetization curves, the correlation field  $H_\ell$ , the field  $H_\alpha$ , the effective constant of local magnetic anisotropy  $K_{\text{eff}}$ , and the stochastic characteristics of local anisotropy – the mean square field fluctuations and the correlation radius – have been calculated. The temperature behavior of the examined magnetic characteristics is analyzed. The results of magnetostriction research allow a conclusion to be drawn that the local magnetic anisotropy of the alloy has a single-ion origin.