

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Державний заклад
«Південноукраїнський національний педагогічний університет
імені К. Д. Ушинського»

ДРАГОМЕРЕЦЬКА ОЛЕНА АНАТОЛІВНА

УДК 669-176 + 539.219.2: 537.624.8 + 537.622.4

**ВПЛИВ ОРІЄНТАЦІЇ КРИСТАЛІВ І ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ НА
КОЕРЦИТИВНУ СИЛУ ДЕЯКИХ СПЛАВІВ ЗАЛІЗА**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Одеса – 2017

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі фізики Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, доцент
Шкатуляк Наталія Михайлівна,
Державний заклад «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського», доцент кафедри фізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Литовченко Петро Григорович,
Інститут ядерних досліджень НАН України, головний науковий співробітник відділу радіаційної фізики;

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Яскевець Іван Іванович,
Інститут фізики НАН України, провідний науковий співробітник відділу електроніки твердого тіла.

Захист відбудеться «12» вересня 2017 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 41.053.07 Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського» за адресою: 65020, м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 26, ауд. 52.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського» за адресою: 65020, м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 36.

Автореферат розісланий «7» серпня 2017 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. Х. Тадеуш

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Коерцитивна сила (H_c) – одна з основних характеристик феромагнетиків суттєво залежить від структури матеріалу. Це робить її перспективною для вивчення структурного стану феромагнітних конструкційних матеріалів. Вимірювання H_c для ефективного контролю втомного стану металу та оцінки внутрішніх напружень у сталях пропонується використовувати багатьма дослідниками [1-4].

Теорія анізотропії деяких магнітних властивостей феромагнітних кристалів була побудована, певною мірою, Н. С. Акуловим [5]. Не зважаючи на те, що механізми виникнення анізотропії коерцитивної сили феромагнітних полікристалічних конструкційних матеріалів і зв'язок цієї анізотропії з механічними та структурними характеристиками з'ясовані не повністю, цей магнітний метод застосовують для оцінки напруженого стану сталевих конструкцій. При цьому вплив кристалографічної текстури на анізотропію коерцитивної сили часто залишається поза увагою дослідників. Але сприятлива кристалографічна текстура може слугувати одним з резервів зміцнення та поліпшення пластичності в титанових сплавах [6] та низьколегованих сталях [7]. У той же час несприятлива кристалографічна текстура є одним з головних структурних станів, який відповідає за шарувато-крихкі руйнування сталей контрольованої прокатки і виробів з них [8].

Тому досить актуальним є дослідження текстури та кореляційних залежностей механічних характеристик і коерцитивної сили, оскільки ці кореляційні залежності уможливають більш ефективне використання вимірювання коерцитивної сили як способу неруйнівного контролю структури матеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертація є частиною експериментальних і теоретичних досліджень процесів формування текстури та анізотропії властивостей у матеріалах, які проводяться кафедрою фізики Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського». Дисертація виконувалась, зокрема, в рамках наукових тем «Дослідження впливу напружено-деформованого стану та текстуроутворення на анізотропію властивостей твердого тіла» (Державний реєстраційний № 0109U000216), а також «Мультимасштабне моделювання процесу пластичної деформації текстурованих полікристалів» (Державний реєстраційний № 0114U000002).

Метою роботи є розробка фізичної моделі зв'язку коерцитивної сили із кристалографічною текстурою, характеристиками міцності та пластичності, залишковими напруженнями решітки та розміром її структурних елементів у деяких сплавах заліза та конструкційних сталях для використання в прогнозуванні їх безпечної експлуатації.

Досягнення зазначеної мети зумовило необхідність вирішення таких **завдань**:

1. Встановити зв'язок анізотропії коерцитивної сили з кристалографічною орієнтацією монокристалів кременистого заліза.
2. Встановити зв'язок кристалографічної текстури з анізотропією коерцитивної сили в полікристалічному сплаві заліза Fe-3%Si.
3. Дослідити вплив ступеня деформації холодною прокаткою та відпалу на

коерцитивну силу сплаву заліза Fe-3%Si і встановити зв'язок коерцитивної сили з характеристиками текстури, розмірами і формою зерен.

4. Знайти закономірності впливу текстури на коерцитивну силу конструкційних феромагнітних і аустенітно-нестабільних сталей.

5. Розробити фізичну модель зв'язку коерцитивної сили з кристалографічною орієнтацією кристалів, напруженнями решітки та формою і розміром кристалітів деяких конструкційних сталей для встановлення закономірностей взаємозв'язку коерцитивної сили з характеристиками міцності та пластичності.

Об'єкт дослідження. Кристалографічна текстура, мікроструктура, анізотропія коерцитивної сили, механічні характеристики при одноосьовому розтязї у сплавах на основі заліза після деформації прокаткою і відпалу.

Предмет дослідження. Монокристали та полікристали кременистого заліза Fe-3%Si, зразки низьколегованої сталі 10Г2 після гвинтової екструзії та подальшої прокатки, зразки низьколегованої сталі 09Г2С, теплостійкої сталі 15Х5М і нержавіючої сталі 08Х18Н10Т після тривалої експлуатації, аустенітно-нестабільні сталі різного хімічного складу.

Методи дослідження. Рентгенівський аналіз текстури і субструктури кристалічних тіл, металографічний аналіз, методи механічних випробувань полікристалів, неруйнівний метод вимірювання коерцитивної сили за допомогою коерцитиметрів, комп'ютерне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Запропоновано фізичну модель виникнення анізотропії коерцитивної сили при накладанні зовнішнього магнітного поля в різних кристалографічних напрямках за рахунок різної роботи намагнічування кристалів у текстурованому полікристалі.

2. Встановлено, що при деформації холодною прокаткою полікристалів сплаву Fe-3%Si збільшується коерцитивна сила в 2 рази, при незмінному характері анізотропії. Це може бути пов'язано з залишковими напруженнями після прокатки.

3. Показано, що після дорекристалізаційного відпалу прокатаних листових зразків полікристалів сплаву Fe-3%Si з текстурою, при якій в площині листа розташовано сімейство кристалографічних площин $\{001\}$, анізотропія коерцитивної сили зумовлена не текстурою та пружними напруженнями, а формою і розмірами зерен після прокатки внаслідок особливостей динаміки доменної структури.

4. Уперше досліджено кристалографічну текстуру та анізотропію коерцитивної сили циліндричних зразків зі сталей 15Х5М і 08Х18Н10Т після різних термінів їх експлуатації. Встановлено, що в сталі 15Х5М має місце анізотропія коерцитивної сили: її величина в осьовому і кільцевому напрямках склала 6,84 і 6,14 А/см, відповідно. Показано, що ця анізотропія обумовлена величиною роботи по переорієнтації вектора намагніченості від напрямку легкого намагнічування $\langle 100 \rangle$ до накладення поля, до напрямку важкого намагнічування $\langle 110 \rangle$ при накладенні магнітного поля внаслідок магнітної кристалографічної анізотропії.

5. Встановлено, що текстура циліндричних зразків зі сталі 08Х18Н10Т відрізняється від звичайної текстури прокатки аустенітних сталей наявністю текстури зсуву $\{hkl\} \langle 110 \rangle$ і двійникових орієнтувань, площини яких $\{332\}$ паралельні бічній циліндричній поверхні. Показано, що метод вимірювання коерцитивної сили виявився більш чутливим до зміни фазового складу нержавіючої

сталі порівняно з рентгенівським фазовим аналізом, оскільки виявлено наявність магнітної фази і анізотропію коерцитивної сили в текстурованих циліндричних зразках зі сталі 08X18H10T, на відміну від рентгенівського фазового аналізу.

6. Структура аустенітно-нестабільних сталей після гарячої прокатки складається з аустенітної і мартенситної фаз, частка яких і текстура залежить від хімічного складу сталі. Величина коерцитивної сили та її анізотропія в цих аустенітно-нестабільних сталях визначається кількістю мартенситної фази і характером її текстури.

7. Уперше проведено дослідження механічних властивостей, коерцитивної сили та текстури зразків циліндричної форми сталі 09Г2С, які вирізані в різних кристалографічних напрямках, після тривалої експлуатації. Знайдено значущі кореляційні зв'язки коерцитивної сили H_c з механічними характеристиками: межею міцності σ_m , умовною межею плинності $\sigma_{0,2}$, відносним подовженням ε з коефіцієнтами надійності апроксимації не менше 0,96. Показано, що причиною анізотропії коерцитивної сили в цих матеріалах є магнітна кристалографічна анізотропія, обумовлена характером текстури.

Практичне значення отриманих результатів дослідження:

1. Запропонована модель виникнення анізотропії коерцитивної сили внаслідок різної величини роботи перемагнічування кристалів при переході від напрямку легкого намагнічування до інших напрямків намагнічування може бути використана для розвитку теорії намагнічування з урахуванням кристалографічної текстури.

2. Встановлено, що ізотропний вплив пружних напружень, які виникають у процесі прокатки полікристалів сплаву Fe-3%Si, та анізотропний вплив форми та розміру зерен на коерцитивну силу після відпалу можуть бути використані при розробці неруйнівного методу контролю структурного стану сталі за коерцитивною силою.

3. Результати дослідження текстури, механічних характеристик і коерцитивної сили зразків сталей 09Г2С, 15Х5М і 08Х18Н10Т циліндричної форми після тривалої експлуатації розширюють сукупність даних зі зв'язку механічних і магнітних характеристик різних конструкційних сталей. Це може бути використано для прогнозування терміну безпечної експлуатації цих матеріалів.

4. Знайдено кореляційні зв'язки коерцитивної сили з механічними характеристиками сталі 09Г2С, які можуть бути використані для контролю напружено-деформованого стану сталі в процесі експлуатації.

5. Встановлена залежність величини коерцитивної сили та її анізотропії в аустенітно-нестабільних сталях від хімічного складу, кількості мартенситу та характеру його текстури буде використана для розробки нових ПНП-сталей із заданими властивостями.

6. Виявлена висока чутливість коерцитивної сили до фазового складу аустенітних сталей типу 08Х18Н10Т після зовнішніх впливів буде використана для розробки неруйнівного методу контролю фазового складу за виміром коерцитивної сили.

Особистий внесок здобувача. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертантка брала участь у постановці та обґрунтуванні задач, аналізі

результатів, проведені досліджень текстури, мікроструктури, а також в обговоренні отриманих експериментальних даних, їх обробці та підготовці наукових праць до публікацій.

Усі результати, що складають основний зміст дисертації, отримано особисто автором, а саме:

1. Проведено рентгенівські та металографічні дослідження зразків сталі.
2. Виконано математичну обробку результатів та встановлено основні закономірності формування текстури досліджених сплавів заліза.
3. Проаналізовано результати механічних випробувань і визначено величини меж міцності, плинності та відносного подовження зразків.
4. Проведено вимірювання коерцитивної сили.
5. Встановлено істотні кореляційні зв'язки та знайдено відповідні рівняння регресії між параметрами текстури, механічними характеристиками та коерцитивною силою досліджуваних сплавів заліза.
6. Запропоновано фізичну модель анізотропії коерцитивної сили, яка полягає в тому, що анізотропія коерцитивної сили за відсутності зовнішніх напружень виникає унаслідок обумовленої кристалографічною текстурою різної величини роботи перемагнічування кристалів при переході від напрямку легкого намагнічування до напрямів важкого намагнічування.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на таких конференціях: Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА-2013 (Львів, Україна, 2013); XI Міжнародній щорічній конференції молодих науковців і аспірантів «Фізико-хімія і технологія неорганічних матеріалів» (Москва, Ін-т металургії імені А. А. Байкова РАН, 2014); VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Механіка, ресурс і діагностика матеріалів і конструкцій» (Єкатеринбург, Росія, 2014); Міжнародній конференції «Розвиток інформаційно-ресурсного забезпечення освіти і науки в гірничо-металургійній галузі та на транспорті» (Дніпропетровськ, Україна, 2014); Міжнародній конференції «Деформація та руйнування матеріалів і наноматеріалів» (Москва, Ін-т металургії імені А.А. Байкова РАН, 2015); IX International Conference on Topical Problems of Semiconductor Physics (Truskavets, Ukraine, 2016); Міжнародній конференції «Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості та транспорту 2016» (Дніпропетровськ, Україна 2016); Міжнародних наукових читаннях імені чл.-кор. АН СРСР І. А. Оди́нга «Механічні властивості сучасних конструкційних матеріалів», (Москва, Ін-т металургії імені А. А. Байкова РАН, 2016).

Обґрунтованість та достовірність одержаних результатів обумовлена використанням сучасних методів рентгенівського текстурного експерименту і методів визначення анізотропії властивостей, що вивчаються, використанням сучасних методів математичного моделювання фізичних процесів, порівнянням експериментальних даних з відповідними теоретичними й експериментальними даними відомими з літератури, сучасною обробкою результатів, відповідністю висновків загальноприйнятим уявленням.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано в 13

наукових працях. У тому числі в реферованих наукових міжнародних журналах опубліковано 5 статей, одна з яких надрукована у виданні, яке індексується базою даних Scopus. Додатково результати дисертаційної роботи висвітлені в 8 тезах і матеріалах міжнародних наукових конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 110 найменувань. Робота викладена на 134 сторінках і включає 47 рисунків і 15 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано доцільність, актуальність теми та вибір об'єктів досліджень. Сформульовано мету і задачі досліджень, відображено наукову новизну одержаних результатів та їх практичну цінність. Сформульовано положення, які виносяться автором на захист. Відображено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** наведено огляд літературних джерел щодо сучасного стану досліджень магнітних властивостей. Відмічено, що причини та механізми виникнення анізотропії є різними для конкретних феромагнітних конструкційних матеріалів, але не повністю з'ясовані. У загальному випадку анізотропія коерцитивної сили визначається кристалографічною магнітною анізотропією, внутрішніми пружними напруженнями, що виникають при наявності дефектів кристалічної решітки, анізотропією розміру та форми зерен при деформації. Однак, оскільки в даний час загальна теорія магнітного структурного аналізу відсутня, то основним методом отримання інформації про структуру за даними вимірювання магнітних характеристик є встановлення кореляційних залежностей між магнітними параметрами, структурою і механічними властивостями для кожного типу сталі [10]. Так, експериментально знайдено [10] зв'язки з коефіцієнтами кореляції не менше 0,8 коерцитивної сили зі щільністю дислокацій, розміром зерна, кількістю включень в сталях, внутрішніми напруженнями, що припадають на одиницю довжини, та шириною міждоменної границі, величиною пластичної деформації, орієнтацією напрямку зовнішнього поля по відношенню до осі легкого намагнічування. Хоча в цитованих вище роботах згадується про анізотропний метал, мова йде, перш за все, про спрямованість напружень. Однак текстурні ефекти залишаються дослідженими недостатньо.

Дослідженню анізотропії коерцитивної сили та її зв'язку з механічними властивостями у конструкційних сталях присвячено значно меншу кількість досліджень. Із цієї точки зору заслуговує уваги робота [11], в якій проведено комплексне дослідження впливу текстурних і структурних факторів на коерцитивну силу сталі 05кп. Встановлена лінійна кореляція величини коерцитивної сили H_c у НП і ПН з полюсною щільністю і розширенням відповідних дифракційних ліній з ростом ступеня деформації. У роботі [12] досліджено текстуру та коерцитивну силу в трубі з феритної низьковуглецевої сталі при проведенні випробувань на втому і міцність при руйнуванні після циклічних навантажень гідравлічним тиском. Виявлено, що коерцитивна сила та інтенсивність текстури зростають у ділянках труби, найбільш деформованих при руйнуванні після циклічних навантажень гідравлічним тиском. Показано, що на основі контролю коерцитивної сили в трубі до випробування може бути зроблений прогноз про можливий осередок руйнування.

Таким чином, дослідження зв'язку текстури і супутніх орієнтаційних ефектів напружень і розмірів кристалітів з коерцитивною силою залишається актуальним.

У **другому розділі** описано матеріали та методи дослідження:

- монокристали Fe-3%Si, які було отримано методом рекристалізації при 800°C після критичної деформації розтягом тонкої (0,2 мм) пластини. Кристали мали розміри $\approx (10 \times 6)$ см;

- плоскі полікристали кременистого заліза Fe-3%Si товщиною 2,5 мм з рівноосьовими зернами (середній розмір ~ 22 мкм). У полікристалах Fe-3%Si коерцитивну силу вимірювали в напрямку прокатки (НП), діагональному напрямку (ДН, тобто в НП + 45°) і поперечному напрямку ПН. Далі вихідні полікристали прокатали в напрямку прямої прокатки при кімнатній температурі малими обтисненнями ($\sim 3-5\%$) на лабораторному прокатному стані до товщини 1,5 мм. На наступному етапі було відрізано частину зразку, яку піддавали прокатці в напрямку, зміненому на 90° (поперечна прокатка), до кінцевої товщини 1,17 мм. Після прямої і поперечної прокатки вимірювали H_c у зазначених вище напрямках. Потім прокатані листи для зняття наклепу піддавали дорекристалізаційному відпалу протягом 1 години при 450°C. Після відпалу знову виміряли коерцитивну силу в зазначених вище напрямках листів;

- зразки аустенітно-нестабільних сталей різного хімічного складу (табл. 1) після аустенітизації протягом 1 години при температурі 1100°C, витягнувши з печі, піддавали прокатці з обтисненням 50% за один прохід і 71% за два проходи на лабораторному стані з подальшим природним охолодженням на повітрі. Коерцитивну силу вимірювали в напрямку прокатки (НП), діагональному напрямку (ДН, тобто в НП + 45°) і поперечному напрямку (ПН).

Таблиця 1

Хімічний склад аустенітно-нестабільних сталей

№ сталі	Масова частка в %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Mo
1	0,22	0,34	1,62	8,90	8,10	0,018	0,013	< 0,1
2	0,31	2,0	1,78	8,60	0,16	0,029	0,012	< 0,1
3	0,17	0,60	0,20	16,60	6,60	0,016	0,019	< 0,1

- циліндричні заготовки із низьколегованої сталі 10Г2. Заготовки піддавали інтенсивному пластичному деформуванню методом гвинтової екструзії (ГЕ). Деформування було проведено екструзією за 2 проходи через матрицю з гвинтовим каналом. Після ГЕ зі сталі були вирізані зразки товщиною 5 мм для подальшої прокатки уздовж осі ГЕ і перпендикулярно її осі, а також відповідні зразки для текстурних досліджень. Прокатку проводили при кімнатній температурі на лабораторному стані малими обтисненнями ($\approx 3-5\%$) до 56 і 80% деформації за товщиною, що відповідало 0,82 та 1,6 істинної відносної логарифмічної деформації (ϵ);

- зразки циліндричної форми сталей 15Х5М та 08Х18Н10Т, які піддавали довготривалій експлуатації. H_c вимірювали в тангенціальному (кільцевому) напрямку ($H_c \perp$) і подовжньому (осьовому) напрямку ($H_c \parallel$) не менше 5 разів на різних ділянках циліндричних зразків. За величину коерцитивної сили у

відповідному напрямку приймали середнє арифметичне значення;

- циліндричні зразки сталі 09Г2С після тривалого використання. Коерцитивну силу вимірювали через кожні 15° від подовжнього (осьового) напрямку (НП) до тангенціального (кільцевого) напрямку (ПН). У цих же напрямках проводили механічні випробування на одноосьовий розтяг і визначали механічні характеристики: межу міцності σ_B , умовну межу плинності $\sigma_{0,2}$, відносне подовження $\varepsilon = \Delta l/l$;

- механічні випробування на одноосьовий розтяг проводили на установці 1246-Р, швидкість переміщення активного захвату 2 мм/хв. Механічні характеристики визначали за стандартними методиками;

- коерцитивну силу вимірювали неруйнівним методом за допомогою магнітного аналізатора КРМ-Ц-МА і магнітного коерцитиметру (структуроскопу) КРМ-Ц-К2М шляхом накладання приставного електромагніту, що намагнічує, на поверхню плоского або циліндричного зразка у відповідному напрямку. Вищезазначені прилади попередньо намагнічують зразок до насичення, розмагнічують його до нуля, так, отримаємо повну петлю магнітного гістерезису з оцінкою величини коерцитивної сили. Максимальна похибка не перевищує 2%;

- текстуру всіх зразків досліджували рентгенівським методом з побудовою зворотних полюсних фігур напрямку нормалі (ЗПФ НН) напрямку прокатки (ЗПФ НП), діагональному напрямку (тобто у НП + 45°) та поперечному напрямку (ЗПФ ПН). За даними ЗПФ НН та ЗПФ НП розраховували функцію розподілу орієнтацій (ФРО) в просторі ідеальних орієнтувань;

- мікроструктуру всіх зразків досліджували за допомогою металографічних мікроскопів МІМ-7 і НЕОФОТ-32, використовуючи Веб-камеру E-TREK DEM 200 для виведення зображення структури на монітор комп'ютера.

У **третьому розділі** представлено результати дослідження анізотропії коерцитивної сили монокристалів і текстурованих полікристалів сплаву Fe-3%Si. У монокристалах Fe-3%Si коерцитивну силу вимірювали в напрямку $[100]$ (H_{c001}), і напрямках, відхилених від $[100]$ на кути 45° (H_{c110}) і 90° (H_{c010}), що лежать у площині монокристалів (110) . Усереднені результати вимірювання H_c у монокристалах Fe-3%Si орієнтування $(001)[110]$, представлені у табл. 2. Мінімальне значення H_c спостерігається у напрямках $[100]$ та $[010]$ (вісь легкого намагнічування заліза), максимальна величина H_c має місце в напрямку осі середнього намагнічування, яка збігається з кристалографічним напрямком $[110]$. Таким чином, причиною анізотропії коерцитивної сили у досліджених монокристалах є кристалографічна складова. Це означає, що анізотропія виникає внаслідок різної роботи переорієнтації векторів намагніченості доменів при накладанні зовнішнього магнітного поля.

Таблиця 2

Коерцитивна сила в різних кристалографічних напрямках площини (001) монокристалів кременистого заліза Fe-3%Si

Коерцитивна сила, А/см		
H_{c100}	H_{c110}	H_{c010}
0,45	0,55	0,4

Далі представлено результати дослідження коерцитивної сили та текстури в полікристалах сплаву Fe-3%Si у вихідному стані та після прямої і поперечної прокатки. Результати дослідження текстури полікристалічного сплаву Fe-3%Si у вигляді ЗПФ показано на рис. 1.

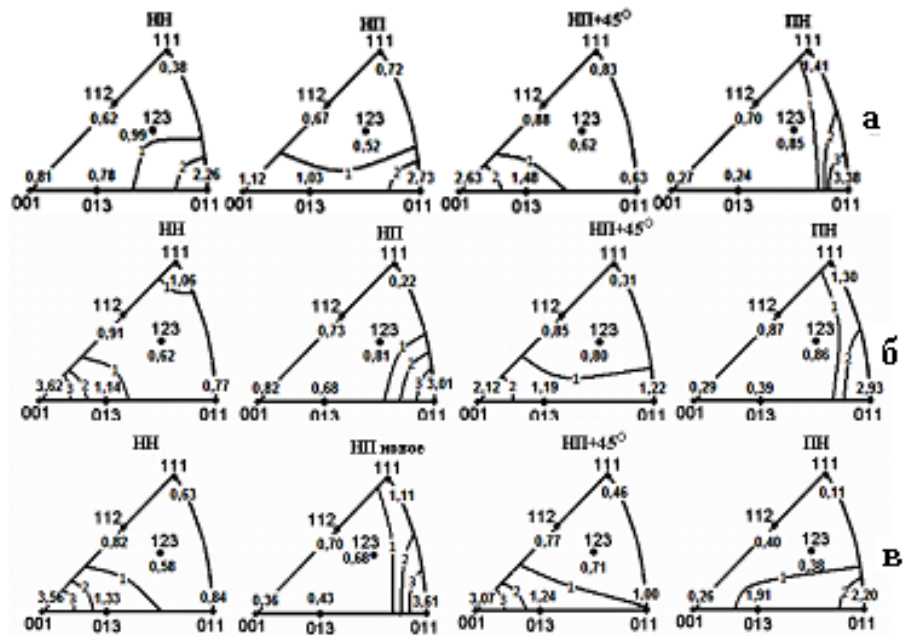


Рис. 1. ЗПФ листових зразків сплаву Fe-3%Si до прокатки (а), після прямої (б) та поперечної прокатки (в).

Текстура обробленого листового зразка описується за допомогою ідеальних орієнтацій $\{011\} \langle 100 \rangle + \{011\} \langle 533 \rangle$ з приблизно однаковим об'ємним вмістом. Після прямої прокатки до 1,5 мм за товщиною розвивається обмежена осьова текстура, яка може бути описана як сукупність ідеальних орієнтацій $\{001\} \langle 110 \rangle + \{111\} \langle 110 \rangle$ з наближеним вмістом 77 і 23% за об'ємом, відповідно. Після поперечної прокатки в листі сформувалася текстура Госса $\{001\} \langle 110 \rangle$, яка є оптимальною для магнітних властивостей.

Результати вимірювання H_c у сплаві Fe-3%Si наведено в табл. 3 і 4.

Таблиця 3

Коерцитивна сила H_c зразку сплаву Fe-3%Si до прокатки

Тип текстури	Коерцитивна сила H_c , А/см		
	H_{cHP}	H_{cDN}	H_{cPH}
$\{011\} \langle 100 \rangle + \{011\} \langle 533 \rangle$	2,04	2,31	2,40

Аналіз літературних джерел показав, що в листі сплаву Fe-3%Si з текстурою Госса максимальне значення H_c може спостерігатися як під кутом 55° до НП (напрямок складного намагнічування $[111]$), так і в ПН. Це пояснюється різною взаємодією та характером руху магнітних доменів при різній величині поля, що намагнічує матеріал.

У першому наближенні було оцінено енергію W_k магнітної кристалографічної анізотропії у досліджуваному полікристалічному зразку сплаву Fe-3%Si до прокатки за допомогою співвідношення

$$W_k \approx K_1(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2), \quad (1)$$

де K_1 – константа анізотропії; α_1 , α_2 і α_3 – напрямні косинуси намагніченості, відносно осей куба.

Вираз

$$\psi = (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2), \quad (2)$$

є функцією магнітної анізотропії. У результаті розрахунку функції Ψ були отримані значення 0,173; 0,312; 0,315 для НП, ДН та ПН, відповідно. Проведений нами кореляційний аналіз показав істотну лінійну кореляцію з коефіцієнтом достовірності апроксимації $R^2=0,95$ між значеннями функції Ψ і H_c . Таким чином, характер анізотропії коерцитивної сили може бути пояснений впливом енергії магнітної кристалографічної анізотропії.

Таблиця 4

Коерцитивна сила H_c в прокатаних і відпалених листах сплаву Fe-3%Si

Тип текстури	Коерцитивна сила H_c , А/см					
	до відпалу			після відпалу		
	$H_{cНП}$	$H_{cДН}$	$H_{cПН}$	$H_{cНП}$	$H_{cДН}$	$H_{cПН}$
Пряма прокатка {001}<110>+ {111}<110>	4,5	4,7	4,9	2,4	2,6	2,7
Поперечна прокатка {001}<110>	4,6	5,2	5,7	2,4	2,6	2,9

Після прокатки (але до відпалу), величина H_c значно зросла порівняно з її значенням у зразку до прокатки (табл. 4). Можна зробити висновок, що збільшення H_c сплаву було викликано залишковими внутрішніми напруженнями, що виникли під час прокатки. Анізотропія H_c також має місце. Після відпалу величина H_c зменшилася майже в два рази порівняно з $H_{c_деформ.}$ після прокатки. Між значеннями H_c до і після відпалу є істотна лінійна кореляція з коефіцієнтом достовірності в даному випадку не менше 0,95. Це означає, що вплив залишкових пружних напружень, обумовлених прокаткою, на коерцитивну силу є ізотропним. Анізотропія H_c , яку ми спостерігали, не може бути пояснена впливом лише кристалографічної магнітної складової. Функція анізотропії Ψ , розрахована за формулою (2) з урахуванням відповідного об'ємного вмісту зазначених орієнтувань (табл. 4), показала максимум у НП і ПН, а мінімум – у ДН. Аналогічні результати отримано і для зразка після поперечної прокатки. Це не відповідає експериментальним значенням коерцитивної сили у табл. 4. Зробимо оцінку впливу розміру зерен (рис. 2) після прокатки сплаву Fe-3%Si на анізотропію H_c .

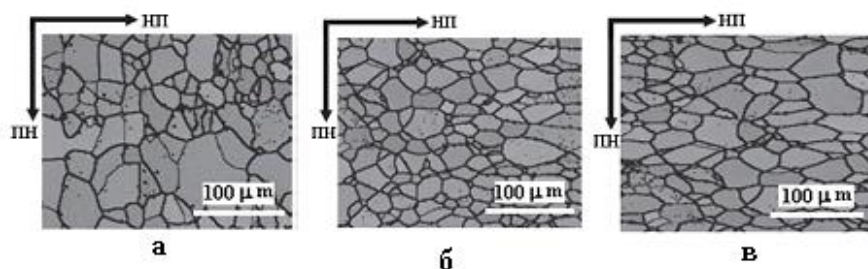


Рис. 2. Мікроструктура зразків сплаву Fe-3%Si: а – лист до прокатки; б, в – відповідно, після прямої і поперечної прокатки.

Залежність H_c від розміру зерна d_3 має вигляд:

$$H_c = (A/d_3) + B, \quad (3)$$

Сумарна деформація після прямої прокатки становила близько 40%, і близько 53% після поперечної прокатки. Так, істинна відносна логарифмічна деформація (ε_{icm}) склала 0,5 і 0,76 для прямої і поперечної прокатки, відповідно. З огляду на це деформацію вважаємо однорідною. Застосовуючи принцип Тейлора-Полані, ми припускаємо, що кожне зерно деформується так само, як і весь зразок в цілому.

У зразку до прокатки мікроструктура представлена рівноосьовими зернами із середнім розміром приблизно 22 мкм (рис. 2, а). Після прямої прокатки зерна прийняли форму еліпсоїдів, витягнутих у НП і сплюснутих у НН. Середня довжина зерен у НП склала приблизно 55 мкм після прямої прокатки $\varepsilon_{icm}=0,5$ (рис. 2, б). Середній розмір зерна склав при цьому приблизно 29 мкм у напрямку під 45° до НП, а в ПН середній розмір зерна не змінився, тобто залишився рівним 22 мкм.

Після поперечної прокатки зерна стають ще більш сплюсненими в НН. Середня довжина зерна в новому НП склала 27 мкм, а в старому НП (тобто в новому ПН) залишилася приблизно рівною 55 мкм) і 34 мкм під кутом 45° до НП (рис. 2, в).

Проведений нами кореляційний аналіз для відповідних напрямків у листових зразках показав наявність тісної лінійної кореляції між значеннями H_c і величиною $1/d_3$. Відповідні рівняння регресії мають вигляд:

- для відпаленого листового зразка після прямої прокатки

$$H_c = (11,1/d_3) + 2,2; \quad (4)$$

- для відпаленого листового зразка після поперечної прокатки

$$H_c = (26,5/d_3) + 3,4. \quad (5)$$

Коефіцієнти достовірності апроксимації склали близько 0,95.

Так, виникнення анізотропії коерцитивної сили після прокатки полікристалів сплаву Fe-3%Si з текстурою, при якій кристалографічні площини {001} лежать паралельно площині прокатки, можна віднести, в основному, до впливу форми і розміру зерен внаслідок характеру динаміки доменної структури в процесі намагнічування у різних напрямках.

У **четвертому розділі** представлено результати дослідження анізотропії коерцитивної сили та текстури у деяких конструкційних сталях.

Встановлено, що структура досліджуваних аустенітно-нестабільних сталей складається з фаз аустеніту і мартенситу. Оцінку кількісного вмісту фаз проводили шляхом аналізу полюсної щільності на ЗПФ НН аустеніту та мартенситу (рис. 3, 4), оскільки, як відомо, сума інтегральної інтенсивності ліній кожної фази пропорційна об'ємній долі фаз в опромінюваному об'ємі зразка. Точність такої оцінки досить велика (похибка $\approx 5\%$) [9].

Текстура фази аустеніту сталей № 1 після прокатки на 50% (рис. 3, а) має риси подібні текстурі металів і сплавів з ГЦК граткою. Основна відмінність полягає у наявності відносно інтенсивного максимуму в полюсі $\langle 332 \rangle$. Цей максимум, який присутній і на інших ЗПФ НН фази аустеніту досліджуваних сталей після прокатки (рис. 3), пов'язаний з двійникуванням. Наявність двійників підтверджується на наших знімках мікроструктури (рис. 3, ж).

У табл. 5 представлено вміст фаз мартенситу α' та аустеніту γ у відсотках, який отримано за допомогою аналізу полюсної щільності на ЗПФ НН на рис. 3 і 4.

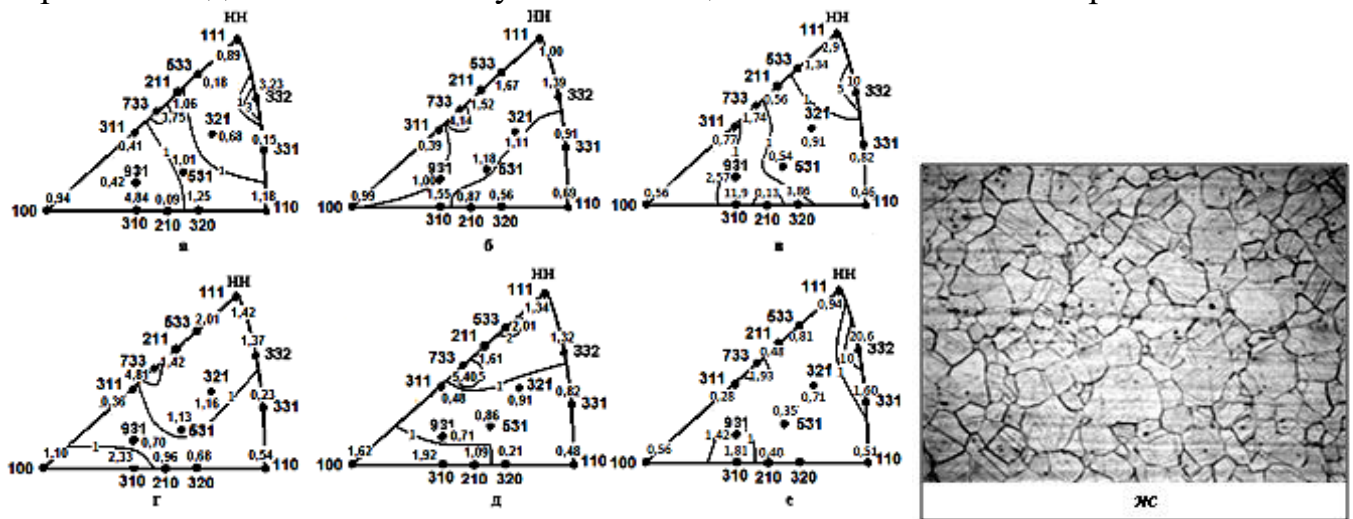


Рис. 3. ЗПФ НН фази аустеніту сталей 1, 2, 3. а, б, в – після прокатки на 50%; г, д, е – після прокатки на 71%, (ж) – типова мікроструктура сталей.

Текстура фази мартенситу сталі № 1 після деформації на 50% може бути описана як $\{001\}\langle 100\rangle + \{110\}\langle 100\rangle + \{111\}\langle 110\rangle$ (рис. 4, а). Перший з вищевказаних компонентів, пов'язаний з динамічною рекристалізацією, зникає після ступеня деформації на 71% сталі № 1 (рис. 4, г). Розрахунки за співвідношенням (2) показали, що характер кристалографічної магнітної анізотропії відповідає показаному в табл. 6 характеру анізотропії коерцитивної сили для сталі № 1.

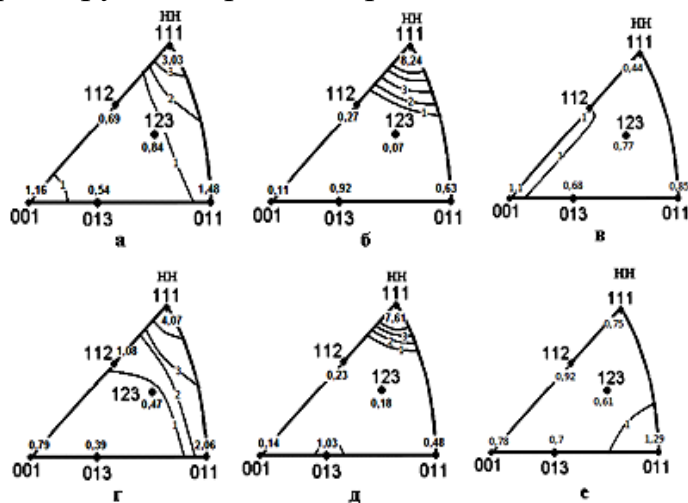


Рис. 4. ЗПФ НН фази мартенситу сталей 1, 2, 3. а, б, в – після прокатки на 50%; г, д, е – після прокатки на 71%, відповідно.

Таблиця 5

Вміст фаз аустеніту γ та мартенситу α' в сталях після гарячої прокатки

Сталь	$\varepsilon=50\%$			$\alpha', \%$	$\gamma, \%$	$\varepsilon=71\%$			$\alpha', \%$	$\gamma, \%$
	ΣP_{hkl}					ΣP_{hkl}				
	α'	γ	$(\gamma + \alpha')$			α'	γ	$(\gamma + \alpha')$		
№1	7,73	20,09	27,82	27,8	72,2	8,87	20,22	29,09	30,5	69,5
№2	10,25	18,98	29,23	35,1	64,9	9,68	20,78	30,46	31,8	68,2
№3	4,84	39,00	43,84	11,0	89,0	5,05	40,00	45,05	11,2	88,8

Результати вимірювання коерцитивної сили представлені в табл. 6.

Таблиця 6

Коерцитивна сила у зразках аустенітно-нестабільних сталей після гарячої прокатки

№ зразка сталі	Ступінь деформації, %	Коерцитивна сила, H_c , А/см			$H_{c \text{ ср.}}$, А/см
		НП	45°	ПН	
1	50	15,3	13,3	10,5	12,4
	71	18,3	16,8	12,8	16,0
2	50	54,9	54,9	54,8	54,9
	71	54,8	54,7	54,8	54,8
3	50	0,7	0,7	0,9	0,8
	71	0,8	0	0	0,3

Текстура фази мартенситу сталі № 2 (рис. 4, б) може бути описана як дуже сильна текстура $\{111\}\langle 110 \rangle$. Розрахунок за співвідношенням (2) показав, що при такій текстурі кристалографічна магнітна анізотропія мінімальна. Має місце виникнення пружних напружень і подрібнення кристалів в процесі деформаційного мартенситного перетворення в сталі № 2. У результаті внесок всіх вищезазначених факторів зумовив високе значення коерцитивної сили в сталі № 2 і мінімальну анізотропію (табл. 6).

При прокатці сталі № 3 інтенсивність текстури мартенситу порівняно зі сталями № 1 і № 2 мінімальна (рис. 4, в). Це проявляється також при вимірюванні коерцитивної сили, яка мінімальна в сталі № 3 (табл. 6).

Далі наведено результати наших досліджень текстури низьколегованої сталі 10Г2 на двох стадіях деформації. На першому етапі зразки піддавали гвинтовій екструзії. На другому етапі зразки після гвинтової екструзії піддавали холодній прокатці як уздовж, так і поперек осі екструзії. Експериментальні результати представлені на рис. 5. В процесі гвинтової екструзії в сталі 10Г2 формується подвійна осьова текстура з напрямками $\langle 110 \rangle$ і $\langle 100 \rangle$ паралельними її осі (рис. 5, а, б) унаслідок активації механізму деформації кручення, індукованого вихровим рухом (рис. 6, в, г) фрагментів роздроблених зерен, в певній мірі подібним турбулентному потоку рідини.

Встановлено, що високе значення $H_c=8$ А/см після гвинтової екструзії обумовлене подрібненням зерна до ≈ 4 мкм.

У процесі прокатки після гвинтової екструзії формується типова текстура прокатки сталі $\{001\} \langle 110 \rangle + \{112\} \langle 110 \rangle + \{111\} \langle 110 \rangle$. Прокатка зразка вздовж осі гвинтової екструзії сприяє значному подовженню зерен у НП (рис. 5, к), та зменшенню коерцитивної сили до 5,7 А/см. Прокатка зразка поперек осі гвинтової екструзії сприяє більш інтенсивному формуванню орієнтувань з площинами $\{001\}$ паралельними площині прокатки (рис. 5, в, г) і меншому подовженню зерен (рис. 5, л, м). Анізотропія H_c після прокатки сталі поперек осі гвинтової екструзії обумовлена, в основному, анізотропією магнітної кристалічної енергії.

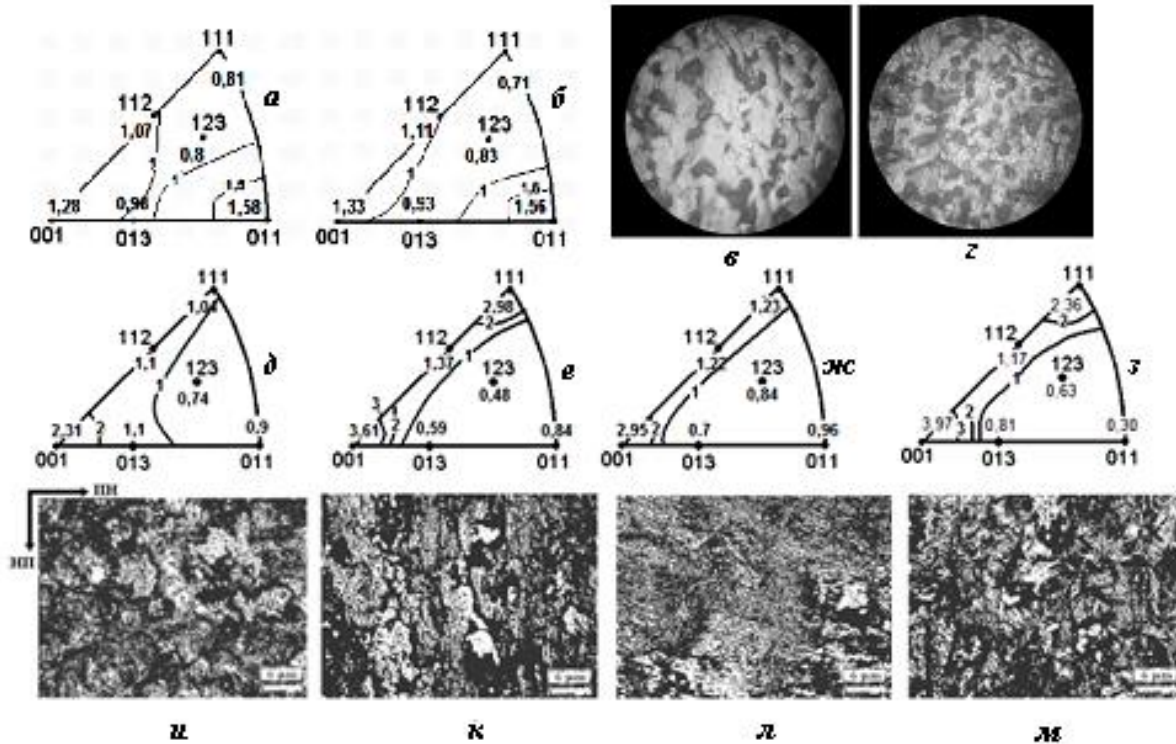


Рис. 5. ЗПФ та мікроструктура сталі 10Г2. (а-г) – після гвинтової екструзії: а, г – вздовж; б, г – поперек осі гвинтової екструзії. (д-м) – прокатка після гвинтової екструзії: д, е, и, к – прокатка вздовж; ж, з, л, м – прокатка поперек осі гвинтової екструзії.

Далі представлено результати дослідження текстури та коерцитивної сили зразків циліндричної форми з теплостійкої сталі 15Х5М та нержавіючої сталі 08Х18Н10Т після їх тривалої експлуатації. Встановлено, що текстура зразків сталі 15Х5М являє собою комбінацію текстур прокатки $\{001\}\langle 110\rangle$ та кручення $\{110\}\langle 100\rangle$ (рис. 6).

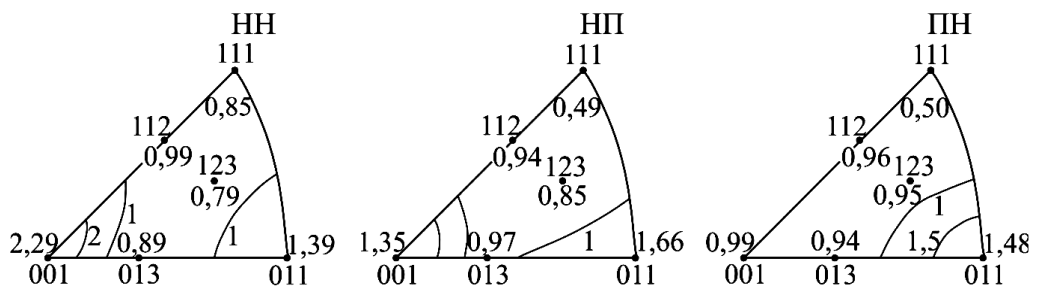


Рис. 6. Текстура циліндричних зразків сталі 15Х5М після тривалої експлуатації.

Коерцитивна сила сталі 15Х5М в осьовому напрямку перевищує її значення в кільцевому напрямку приблизно в 1,11 рази, як і відношення P_{110} в осьовому напрямку в 1,12 рази більше, ніж у кільцевому напрямку. Це свідчить про те, що анізотропія H_c у зразках сталі 15Х5М обумовлена, в основному, магнітною кристалографічною анізотропією.

Текстура зразків циліндричної форми зі сталі 08Х18Н10Т після тривалої експлуатації відрізняється від звичайної текстури прокатки нержавіючих сталей наявністю текстури кручення типу $\{hkl\}\langle 110\rangle$ і двійникових орієнтувань з кристалографічними напрямками $\langle 332\rangle$ перпендикулярними бічній поверхні циліндричного зразка (рис. 7)

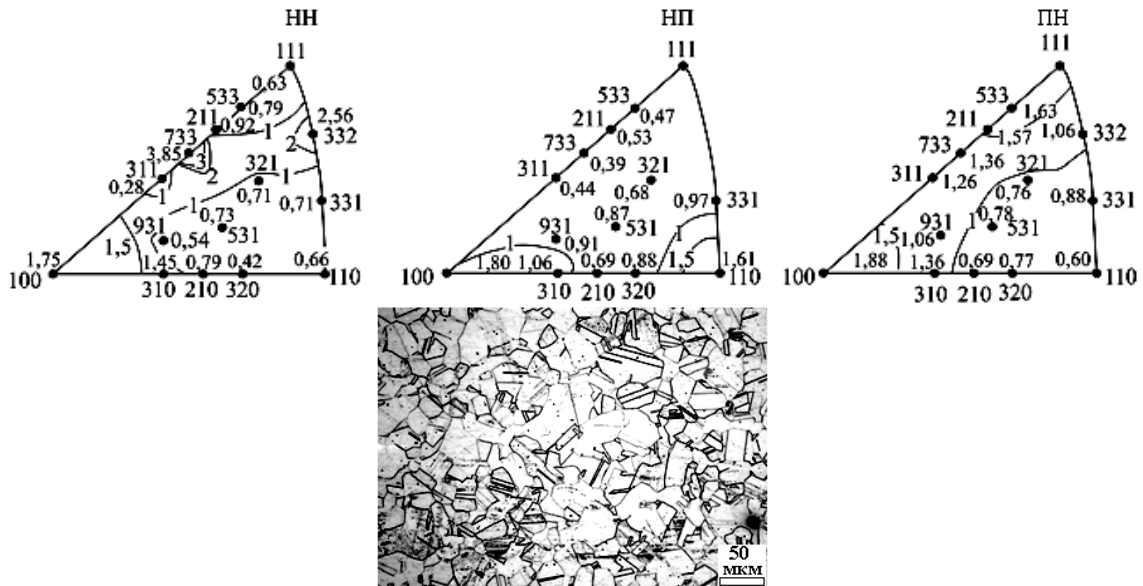


Рис. 7. Текстура та мікроструктура циліндричних зразків зі сталі 08X18N10T.

Коерцитивна сила має значення 1,15 і 0,94 А/см в осьовому та кільцевому напрямках, відповідно, хоча рентгенівський фазовий аналіз не зафіксував наявності магнітної фази. Це обумовлено тим, що кристали мартенситу занадто малі.

Так метод вимірювання коерцитивної сили має більшу структурну чутливість порівняно з рентгенівським фазовим аналізом. Анізотропія H_c у сталі 08X18N10T може бути пояснена так: виходячи з експериментальної текстури зразків зі сталі 08X18N10T (рис. 7), можна припустити, що деформаційне мартенситне перетворення відбувалось за схемою Курдюмова-Закса типу $\{110\}_\gamma \parallel \{110\}_\alpha$. У цьому випадку з осьовим напрямком циліндричного зразка буде збігатися напрямок $\langle 111 \rangle$, а з кільцевим напрямком співпадатиме напрямок $\langle 112 \rangle$. При накладанні зовнішнього магнітного поля вздовж напрямку $\langle 111 \rangle$ здійснюватиметься робота з переорієнтації вектора намагніченості кристалів від напрямку $\langle 100 \rangle$ (до накладання магнітного поля) до напрямку $\langle 111 \rangle$. Відповідно, при накладанні поля в кільцевому напрямку здійснюватиметься робота з переорієнтації вектору намагнічування від $\langle 100 \rangle$ до $\langle 112 \rangle$. Оскільки напрямок $\langle 111 \rangle$ є напрямком найважчого намагнічування, то й робота з переорієнтації вектора намагніченості від $\langle 100 \rangle$ до напрямку $\langle 111 \rangle$ є більшою порівняно з роботою з переорієнтації вектору намагніченості від $\langle 100 \rangle$ до $\langle 112 \rangle$. Отже і H_c буде більша при накладенні зовнішнього магнітного поля уздовж осі циліндричного зразка, ніж при накладенні магнітного поля у кільцевому напрямку.

Далі представлено встановлені закономірності анізотропії H_c і знайдено зв'язки коерцитивної сили з текстурними характеристиками та механічними властивостями низьколегованої сталі 09Г2С після тривалого використання.

Результати механічних випробувань і вимірювань коерцитивної сили H_c представлено в табл. 7.

Отже, анізотропія механічних властивостей і коерцитивної сили має місце. Мінімальні значення характеристик міцності σ_B , $\sigma_{0.2}$ і H_c спостерігаються в осьовому (повздовжньому) напрямку (НП). Їх максимальні значення є в ДН (тобто у

НП+45°), а в кільцевому напрямку (ПН) вони займають проміжне значення. Відносне подовження ε показує протилежну динаміку.

Таблиця 7

Механічні властивості і коерцитивна сила зразків циліндричної форми сталі 09Г2С

Кут з напрямком осі, град.	Межа міцності σ_B , МПа	Умовна межа плинності $\sigma_{0.2}$, МПа	Відносне подовження, $\varepsilon = \Delta l/l$, %	Коерцитивна сила H_c , А/см
0	400±2,0	255±1,4	31,0±0,4	5,9±0,12
15	405±2,2	258±1,8	30,2±0,4	6,1±0,12
30	416±2,3	265±2,1	28,8±0,4	6,3±0,12
45	425±2,2	272±2,3	28,0±0,4	6,5±0,12
60	421±2,0	268±2,0	28,4±0,4	6,5±0,12
75	417±2,0	266±1,5	29,4±0,4	6,4±0,12
90	415±1,8	260±2,5	30,0±0,4	6,2±0,12

Аналіз показав, що мають місце істотні лінійні кореляційні зв'язки між величиною коерцитивної сили H_c та механічними характеристиками σ_B , $\sigma_{0.2}$ і ε . Відповідні рівняння регресії з високими значеннями коефіцієнтів достовірності апроксимації R^2 мають вигляд

$$\sigma_B = 38,2H_c + 174,8; R^2 = 0,92; \quad (6)$$

$$\sigma_{0.2} = 26,1H_c + 99,6; R^2 = 0,93; \quad (7)$$

$$\varepsilon = -4,6H_c + 58,0; R^2 = 0,89. \quad (8)$$

Проведений металографічний аналіз показав, що досліджувана сталь має типову ферит-перлітну мікроструктуру із середнім розміром зерен 22 мкм (рис. 8).

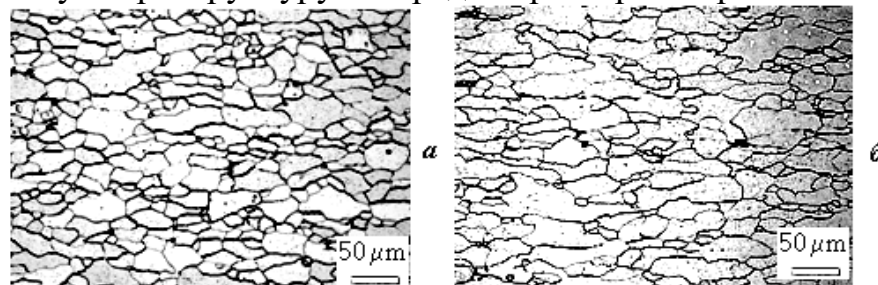


Рис. 8. Ферит-перлітна структура сталі 09Г2С: (а, б) були сфотографовані з НП і ПН напрямків.

На коерцитивну силу та її анізотропію мають вплив кристалографічна текстура, форма і розмір зерен, а також пружні напруження, як зазначено вище.

Мікроструктура на рис. 8 не може бути основною причиною анізотропії коерцитивної сили, тому що розміри зерен у НП та ПН практично однакові.

Результати дослідження текстури представлені на рис. 9.

Аналіз обчисленої нами ФРО (рис. 9, ж) у просторі ідеальних орієнтацій з двох ЗПФ: НН і НП (рис. 9, а, г) показав, що текстура сталі може бути описана за допомогою комбінації ідеальних орієнтацій $\{100\} \langle 010 \rangle$, $\{100\} \langle 011 \rangle$, $\{100\} \langle 013 \rangle$, $\{110\} \langle 110 \rangle$, $\{110\} \langle 111 \rangle$, $\{110\} \langle 001 \rangle$ з об'ємними частками 0,20; 0,12; 0,11; 0,18; 0,14; 0,25, відповідно.

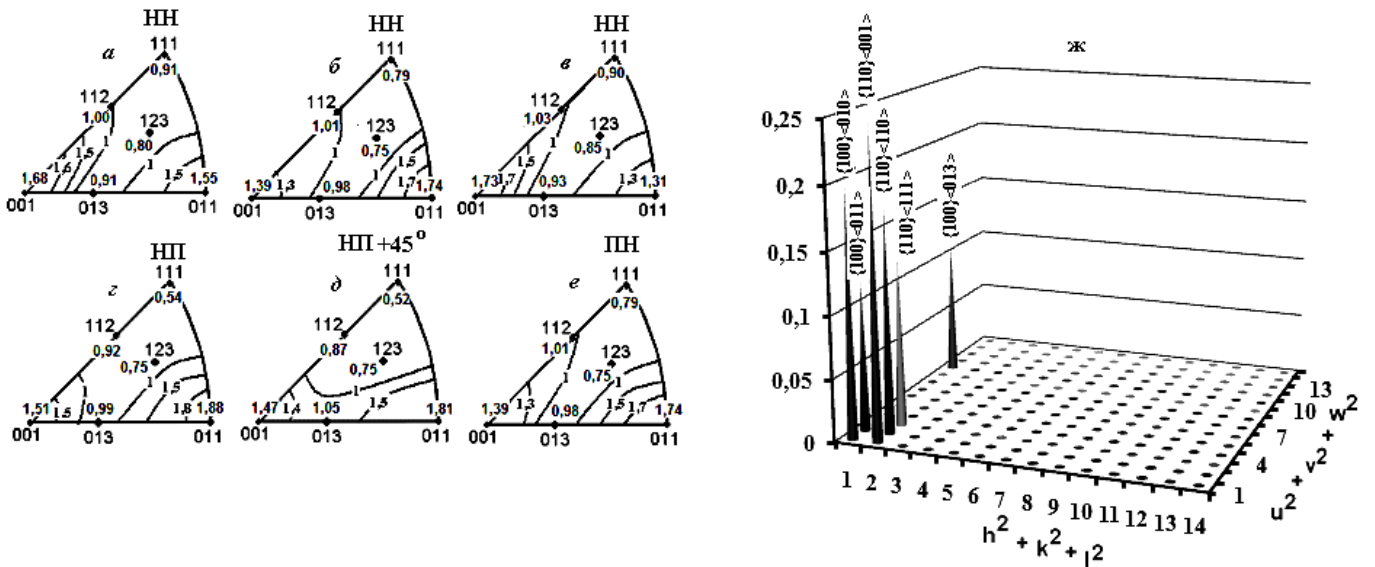


Рис. 9. Експериментальні ЗПФ (а-е) і ФРО в просторі ідеальних орієнтацій (ж) зразка сталі 09Г2С після довготривалої експлуатації.

На наступному етапі ми оцінили роль вищезазначеної кристалграфічної текстури у спостережуваній анізотропії H_c сталі 09Г2С. З цією метою знайдено у першому наближенні орієнтаційну залежність функції кристалграфічної магнітної анізотропії Ψ за співвідношенням (2). Для цього виразили напрямні косинуси зазначених вище ідеальних орієнтувань в явному вигляді (табл. 8).

Розрахункові числові значення функції магнітної анізотропії Ψ для ідеальних орієнтацій наведені в табл. 9.

Кореляційний аналіз показав, що між розрахунковими числовими значеннями функції ψ анізотропії магнітної кристалічної енергії для вищезазначеної комбінації ідеальних орієнтувань з відповідним об'ємним вмістом (табл. 9), з одного боку, та експериментальними значеннями H_c (табл. 7), з іншого боку, має місце істотна лінійна кореляція.

Таблиця 8

Ідеальні орієнтації та їх напрямні косинуси

$\{hkl\}\langle uvw \rangle$	α_1	α_2	α_3
$\{100\}\langle 010 \rangle$	$\cos\varphi$	$\sin\varphi \cdot \sin 90^\circ$	$\sin\varphi \cdot \cos 90^\circ$
$\{100\}\langle 011 \rangle$	$\cos(\varphi+45^\circ)$	$\sin(\varphi+45^\circ) \cdot \sin 90^\circ$	$\sin(\varphi+45^\circ) \cdot \cos 90^\circ$
$\{100\}\langle 013 \rangle$	$\cos(\varphi+18.43^\circ)$	$\sin(\varphi+18.43^\circ) \cdot \sin 90^\circ$	$\sin(\varphi+18.43^\circ) \cdot \cos 90^\circ$
$\{110\}\langle 110 \rangle$	$\cos(\varphi+90^\circ)$	$\sin(\varphi+90^\circ) \cdot \sin 45^\circ$	$\sin(\varphi+90^\circ) \cdot \cos 45^\circ$
$\{110\}\langle 111 \rangle$	$\cos(\varphi+54.7^\circ)$	$\sin(\varphi+54.7^\circ) \cdot \sin 45^\circ$	$\sin(\varphi+54.7^\circ) \cdot \cos 45^\circ$
$\{110\}\langle 001 \rangle$	$\cos \varphi$	$\sin\varphi \cdot \sin 45^\circ$	$\sin\varphi \cdot \cos 45^\circ$

Таблиця 9

Розрахункові числові значення функції Ψ магнітної анізотропії

Кут з НП, °	0	15	30	45	60	75	90
Ψ	0,09	0,16	0,21	0,24	0,23	0,19	0,15

Відповідне рівняння регресії з коефіцієнтом достовірності апроксимації $R^2=0,91$ має вигляд

$$\Psi = 0,23H_c - 1,23. \tag{9}$$

Так, спостережувана анізотропія коерцитивної сили в сталі 09Г2С може бути пояснена, впливом магнітної кристалографічної складової.

Кореляційні залежності (6)-(8) можуть бути використані для контролю механічних характеристик сталі 09Г2С за даними виміру H_c у процесі її експлуатації.

ВИСНОВКИ

1. Анізотропія коерцитивної сили в монокристалах, а також у полікристалах сплаву Fe-3%Si до прокатки з текстурою типу $\{011\} \langle 100 \rangle + \{011\} \langle 533 \rangle$ обумовлена впливом магнітної кристалографічної складової.

2. Після деформації прямою холодною прокаткою в полікристалічному сплаві Fe-3%Si формується текстура типу $\{001\} \langle 110 \rangle + \{111\} \langle 110 \rangle$ з об'ємним вмістом 77 і 23%, відповідно. Після подальшої холодної прокатки в поперечному напрямку формується текстура Госса $\{001\} \langle 110 \rangle$. Анізотропія коерцитивної сили обумовлена, в основному, впливом форми та розміру зерен.

3. Структура аустенітно-нестабільних сталей після гарячої прокатки складається з аустеніту і мартенситу, частка яких і текстура залежить від хімічного складу сталі. Величина коерцитивної сили та її анізотропія в цих аустенітно-нестабільних сталях визначається кількістю мартенситу і характером його текстури.

4. При гвинтовій екструзії низьколегованої сталі 10Г2 завдяки вихровому руху фрагментів роздроблених зерен, формується подвійна аксіальна текстура з напрямками $\langle 110 \rangle$ і $\langle 100 \rangle$ паралельними осі екструзії. Коерцитивна сила зростає до 8 А/см внаслідок подрібнення зерна до 4 мкм. При подальшій деформації прокаткою зразка сталі 10Г2 уздовж осі гвинтової екструзії переважно розвиваються компоненти текстури з площинами $\{111\}$ паралельними площині прокатки. При цьому зерна значно подовжуються в НП, що сприяє зменшенню коерцитивної сили до 5,7 А/см. При подальшій деформації зразка прокаткою упоперек осі гвинтової екструзії більш інтенсивно формуються орієнтування з площинами $\{001\}$ паралельними площині прокатки. При цьому анізотропія коерцитивної сили обумовлена, в основному, впливом магнітної кристалографічної складової.

5. У зразках циліндричної форми теплостійкої сталі 15Х5М з ОЦК граткою сформувалась комбінація текстури прокатки сталі $\{001\} \langle 110 \rangle$ і текстури кручення $\{110\} \langle 100 \rangle$. Анізотропія коерцитивної сили обумовлена, значною мірою, кристалографічною магнітною анізотропією.

6. Текстура циліндричних зразків сталі 08Х18Н10Т з ГЦК граткою відрізняється від звичайної текстури прокатки нержавіючих сталей наявністю текстури кручення $\{hkl\} \langle 110 \rangle$ і двійникових орієнтувань $\{332\}$. Мартенситна фаза не виявляється за допомогою рентгенівського фазового аналізу. Наявність анізотропії коерцитивної сили свідчить про її більшу структурну чутливість порівняно з рентгенівським фазовим аналізом.

7. У сталі 09Г2С встановлено істотні кореляційні зв'язки (з коефіцієнтами достовірності апроксимації не менше 0,96) коерцитивної сили з межею міцності, умовною межею плинності та відносним подовженням. Основною причиною анізотропії коерцитивної сили є кристалічна магнітна анізотропія, обумовлена текстурою.

8. Анізотропія коерцитивної сили виникає унаслідок різної роботи з переорієнтації векторів намагніченості кристалітів, що були орієнтовані у напрямку легкого намагнічування перед накладанням зовнішнього магнітного поля, до відповідного кристалографічного напрямку, який внаслідок впливу текстури співпадає з напрямком прикладеного зовнішнього магнітного поля.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Брехаря Г. П. Магнитный контроль по коэрцитивной силе сталей 09Г2С, 0, 3 пс при деформационных статических нагружениях / Г. П. Брехаря, В. И. Сухомлин, В. И. Волох // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 59. – С. 56-64.

2. Безлюдько Г. Я., Елкина Е. И., Соломаха Р. Н. Коэрцитиметрия как основной метод неразрушающего контроля усталости и как приоритетный метод в диагностическом наборе / Г. Я. Безлюдько, Е. И. Елкина, Р. Н. Соломаха. – URL: http://www.snr-ndt.com/files/ECNDT2010_1_cm_basic_method.pdf

3. Матюк В. Ф. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии / В. Ф. Матюк, В. Н. Кулагин // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – № 3, С. 4-14.

4. Горкунов Э. С. Оценка внутренних напряжений в трубной стали контролируемой прокатки группы прочности Х70 / Э. С. Горкунов, С. М. Задворкин, Л. С. Шершнева. – URL: <http://book.uraic.ru/project/conf/txt/008/2009/dok/175-24.04.09.doc>.

5. Akulov N. S. Das Gesetz ferromagnetischer Anisotropie regulärer Kristalle / N. S. Akulov // ZS. f. Phys. – 1930. – Bd. 59. – S. 254.

6. Бецофен С. Я. Текстурное упрочнение в титановых сплавах: влияние критических напряжений в разных системах скольжения и двойникования / С. Я. Бецофен, Е. Б. Рубина // Металлы. – 1994. – №: 4. – С. 114-121.

7. Влияние кристаллографической текстуры на склонность к слоисто-хрупкому разрушению низколегированных малоперлитных сталей / В. В. Усов, Н. М. Шкатуляк, В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина, А. В. Бернацкий, А. П. Мусиенко, О. Н. Щербаков // Изв. АН СССР. Металлы. – 1990. – № 1. – С. 120-125.

8. Формирование микроструктуры и микротвердости горячекатаных IF-сталей после холодной осадки и отжига / В. З. Куцова, В. Г. Иванченко, Т. В. Котова, А. П. Плошенко // Металознавство та термічна обробка металів. – 2015. – № 4. – С. 75-82.

9. Dickson M. J. The Significance of Texture Parameters in Phase Analysis by X-ray Diffraction / M. J. Dickson // J. Appl. Cryst. – 1969. – Vol. 2, No. 4. – P. 176-180.

10. Попов Б. Е. Теория и практика магнитной диагностики стальных металлоконструкций / Б. Е. Попов, В. Ф. Мужижский, Г. Я. Безлюдько, В. М. Долинский, Е. А. Левин – URL: <http://www.nio12.ru/stati/teoriya-i-praktika-magnitnoj-diagnostiki-stalnyx-metallokonstrukcij/>

11. Анизотропия коэрцитивной силы и текстура деформируемой стали / Л. М. Лобанов, В. А. Нехотящий, М. Д. Рабкина, В. В. Усов, Н. М. Шкатуляк, Е. Н. Ткачук // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 10. – С. 19-24.

12. Coercive Force, Texture, and Fracture in a Low Carbon Steel Tube / V. V. Usov,

H.-G. Brokmeier, N. M. Shkatulyak, M. D. Rabkina, V. A. Nekhotyaschi // Russian Metallurgy (Metally). – Vol. 2012, No. 5. – P. 389–395.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Dragomeretskaya E. A. Effect of texture on mechanical and magnetic properties of steel from the petroleum distillation column / E. A. Dragomeretskaya // Computer modelling & new technologies (Scopus). – 2016. – Vol. 20, №. 4. – P. 48-51. – URL: http://www.cmnt.lv/upload-files/ns_54art07_CMNT2004_Dragomeretskaya.pdf

2. Dragomeretskaya E. A. Texture and coercive force of the metal of furnace tube coils / N. M. Shkatulyak, E. A. Dragomeretskaya, V. V. Usov, M. D. Rabkina, A. L. Palienko // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2016. – Issue 1. – pp. 29-37. – DOI: 10.17804/2410-9908.2016.1.029-037. – URL: <http://dream-journal.org>

3. Dragomeretskaya E. A. Effect of Alternating Bending and Texture on Anisotropic Damage and Mechanical Properties of Stainless Steel Sheets / V. V. Usov, N. M. Shkatulyak, E. A. Dragomeretskaya, E. S. Savchuk, D. V. Bargan G. V. Daskalitsa // Mechanics, Materials Science & Engineering. – 2016. – Vol. 6. – P. 56-61. – URL: <https://issuu.com/mmsejournal/s/n6doc>

4. Dragomeretskaya E. A. Effect of the Strain Kind on the Texture and Microstructure of Low-Alloyed Steel / N. M. Shkatulyak, V. V. Usov, E. S. Savchuk, E. A. Dragomeretskaya, D. V. Bargan // International Journal of Metals. – 2016. – P. 1-8. – URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5021749>

5. Dragomeretskaya E. A. Anisotropy of coercive force of single crystals and sheets of silicon iron with different texture / N. M. Shkatulyak, E. A. Dragomeretskaya, V. V. Usov // International Journal of Electromagnetics, (IJEL). – 2015. – Vol. 1, №. 1. – P. 1-11. – URL: <http://airccse.com/ijel/papers/1115ijel01.pdf>

6. Драгомерецкая Е. А. Кристаллографическая ориентация кремнистого железа и анизотропия коэрцитивной силы / В. В. Усов, Н. М. Шкатуляк, Е. А. Драгомерецкая // Ресурс и диагностика мат-лов и конструкций : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. (27-30 мая 2014 р., г. Екатеринбург, Россия). – Екатеринбург, 2014. – URL: <http://www.imach.uran.ru/conf/mp2014/mp4.htm>

7. Драгомерецька О. А. Текстура та її зміни під дією знакозмінного згину сплаву магнію ZE10 / Н. М. Шкатуляк, О. А. Драгомерецька, С. В. Санькова // ЕВРИКА-2013 : матеріали Міжнар. конф. студ. і молодих науковців з теор. та експер. фізики (15-17 травня 2013р., м. Львів). – Львів : Вид-во Львівського на. ун-ту ім. Івана Франка, 2013. – С. 14.

8. Драгомерецкая Е. А. Природа анизотропии коэрцитивной силы в кремнистом железе после деформации и отжига / Е. А. Драгомерецкая // Физико-химия и технология неорганических материалов : материалы XI Международ. конф. молод. ученых и аспирантов (16-19 октября 2014р., г. Москва, Россия). – М : ИМЕТ РАН, 2014. – С. 113-114. – URL: http://files.imetran.ru/2014/Sbornik_MolUch2014.pdf

9. Драгомерецкая Е. А. Анизотропия коэрцитивной силы в монокристаллах и текстурованных листах сплава железа / Н. М. Шкатуляк, В. В. Усов, Е. А. Драгомерецкая // Развитие информ.-ресурс. обеспеч. образования и науки в горно-металлург. отрасли и на транспорте : материалы міжнар конф. (27-28 вересня

2014р., м. Дніпропетровськ). – Д. : НГУ, 2014. – С. 138-147. <http://sci-forum.net.ua/DIRPSEMMTS2014/>

10. Драгомерецкая Е. А. Влияние горячей прокатки на текстуру аустенита и мартенсита ПНП - сталей с различным химсоставом / Н. М. Шкатуляк, Е. А. Драгомерецкая, В. В. Усов // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сборник материалов VI Междунар. конф. (10-13 ноября 2015 г., г. Москва, Россия). – М. : ИМЕТ РАН, 2015 – С. 210-212. – URL: http://files.imetran.ru/SbornikDFMN/Sbornik_DFMN2015.pdf

11. Dragomeretskaya E. A. Texture and magnetic properties of trip-steels / E. A. Dragomiretskaya, N. M. Shkatulyak, V. V. Usov // Topical Problems of Semiconductor Physics : Materials of IX International Conference (May 16-20, 2016, Truskavets, Ukraine). – Truskavets, 2016. – P. 43-45.

12. Драгомерецкая Е. А. Влияние химсостава на текстуру и анизотропию коэрцитивной силы горячекатаных аустенитно-нестабильных сталей / Н. М. Шкатуляк, Е. А. Драгомерецкая, В. В. Усов // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта : Збірник наук. праць міжнар. конф. (26-27 травня 2016 р., м. Дніпропетровськ). – Дніпропетровськ, 2016. – С. 143-150. – URL: <http://okmm.nmu.org.ua/ua/2016/Shkatulyak.pdf>

13. Драгомерецкая Е. А. Текстура, механические свойства и коэрцитивная сила стального резервуара / Н. М. Шкатуляк, Е. С. Савчук, Е. А. Драгомерецкая // Механические свойства современных конструкционных материалов : сборник материалов междунар. науч. чтений им. чл.-кор. РАН И. А. Одингга (6-7 сентября 2016 г., г. Москва, Россия). – М. : ИМЕТ РАН, 2016. – С. 147-148 http://files.imetran.ru/2016/oding/sbornik_oding_2016.pdf

АНОТАЦІЯ

Драгомерецька О. А. Вплив орієнтації кристалів і залишкових напружень на коерцитивну силу деяких сплавів заліза. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Державний заклад «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського», Одеса, 2017.

Дисертацію присвячено розробці фізичної моделі зв'язку коерцитивної сили H_c із характеристиками міцності та пластичності, кристалографічною текстурою, залишковими напруженнями решітки та розміром її кристалітів у деяких сплавах заліза та конструкційних сталях для використання у прогнозуванні їх безпечної експлуатації. Завдяки високій структурній чутливості H_c та можливості її виміру неруйнівним методом за допомогою портативних коерцитиметрів, це є перспективним для вивчення структурного стану феромагнітних матеріалів. Не зважаючи на те, що механізми виникнення анізотропії H_c феромагнітних конструкційних матеріалів і її зв'язок з механічними та структурними характеристиками з'ясовані не до кінця, магнітний метод застосовують для оцінки напруженого стану сталей конструкцій. При цьому часто залишається поза увагою вплив на H_c кристалографічної текстури, яка може бути як резервом

підвищення міцності матеріалу (текстурне зміцнення), так і джерелом виробничих втрат при утворенні фестонів при штампуванні чи глибокій витяжці. Але дані про роль і внесок кристалографічної текстури в анізотропію H_c феромагнітних полікристалічних конструкційних матеріалів дуже скудні.

У цій роботі за допомогою неруйнівного метода за допомогою портативних коерцитиметрів визначено коерцитивну силу у різних напрямках у монокристалах, а також полікристалах сплаву Fe-3%Si. Встановлено, що анізотропія коерцитивної сили в них обумовлена впливом магнітної кристалографічної складової. Знайдено закономірності впливу виду та ступеня деформації холодною прокаткою та відпалу на коерцитивну силу полікристалів сплаву Fe-3% Si. Показано, що після подальшої прямої та поперечної холодної прокатки сплаву анізотропія H_c обумовлена, в основному, впливом форми і розміру зерен. Встановлено кореляційні зв'язки та відповідні рівняння регресії коерцитивної сили на характеристики текстури та розміри зерен сплаву з коефіцієнтами надійності апроксимації не менше 0,95.

Встановлено, що досліджувані аустенітно-нестабільні сталі після гарячої прокатки мають двофазну структуру аустеніту і мартенситу, об'ємні частки та текстура яких залежить від хімічного складу сталі. Величина коерцитивної сили та її анізотропія в досліджуваних аустенітно-нестабільних сталях визначається кількістю мартенситу і характером його текстури. Залишкові пружні напруження, що виникають при мартенситних перетвореннях в процесі прокатки, вносять ізотропний внесок у коерцитивну силу.

Знайдено, що при інтенсивній пластичній деформації сталі 10Г2 за методом гвинтової екструзії коерцитивна сила зростає до 8 А/см внаслідок подрібнення зерна до 4 мкм. При подальшій деформації зразка сталі 10Г2 прокаткою уздовж осі гвинтової екструзії переважно розвивається типова текстура прокатки сталі, при цьому переважають компоненти $\{111\}$, які паралельні площині прокатки. Зерна значно подовжуються в НП, це сприяє зменшенню коерцитивної сили до 5,7 А/см. При подальшій деформації зразка прокаткою упоперек осі гвинтової екструзії більш інтенсивно формуються орієнтування з площинами $\{001\}$ паралельними площині прокатки. Анізотропія H_c обумовлена, в основному, впливом магнітної кристалографічної складової.

Встановлено, що у циліндричних зразках зі сталі 15Х5М після тривалої експлуатації анізотропія коерцитивної сили виникає, в основному, завдяки кристалографічній магнітній анізотропії, яка обумовлена текстурою. Знайдено анізотропію коерцитивної сили в циліндричних зразках із нержавіючої сталі 08Х18Н10Т. Але за допомогою рентгенівського фазового аналізу магнітна фаза не була виявлена. Це свідчить про більшу структурну чутливість коерцитивної сили порівняно з рентгенівським фазовим аналізом.

У сталі 09Г2С встановлено істотні кореляційні зв'язки та відповідні рівняння регресії коерцитивної сили з межею міцності, умовною межею текучості та відносним подовженням з коефіцієнтами надійності апроксимації не нижче 0,89. Основною причиною анізотропії коерцитивної сили є кристалічна магнітна анізотропія, обумовлена текстурою.

Запропоновано фізичну модель, що пояснює виникнення анізотропії

коерцитивної сили, яка викликана магнітною кристалографічною складовою. Анізотропія коерцитивної сили виникає унаслідок різної роботи переорієнтації вектора намагніченості кристалів у зовнішньому магнітному полі, прикладеному в різних кристалографічних напрямках.

Ключові слова: текстура, мікроструктура, напруження, розмір зерен, анізотропія, коерцитивна сила, механічні властивості кореляція, регресія.

ABSTRACT

Dragomeretska O. A. Impact of Crystals and Residual Stresses' Orientation on the Coercive Force of Some Ferroalloys – Manuscript.

The thesis for obtaining Candidate's degree of Physical and Mathematical Sciences by specialty 01.04.07 – Solid State Physics – South Ukrainian National Pedagogical University named after K. D. Ushynsky, Odesa, 2017.

The thesis deals with the development of a physical model of the correlations between the coercive force and the characteristics of strength and ductility, crystallographic texture and residual stresses of the lattice and its structural elements' sizes in some ferroalloys and structural steels for the prediction of their safe operation. The coercive force, due to its high structural sensitivity and possibilities of its measuring by non-destructive method using portable coercimeters is a promising field in studying the structural state of ferromagnetic materials. Despite the fact the mechanisms of the occurrence of coercive force's anisotropy of ferromagnetic structural materials and its relationship with mechanical and structural characteristics are still understudied, the magnetic method is frequently used to estimate the steel's stress state. As a rule, nobody pays attention to the influence of coercive force on the crystallographic texture, which can be both the reserve of material properties increase (texture strengthening) and a source of production losses in case of festoons formation in the process of stamping or deep drawing. But one can find very few data in the scientific literature about the role and contribution of crystallographic texture in the coercive force anisotropy of polycrystalline ferromagnetic structural materials.

In this work, the coercive force in different directions in single crystals and polycrystalline of factory supply alloy Fe-3% Si with the help of the nondestructive method using portable coercimeters has been determined. It has been found that the anisotropy of coercive force is caused by the influence of a crystallographic magnetic component. Some regularities of the kind and deformation degree of cold rolling as well as of annealing effect on coercive force of the alloy Fe-3% Si have been found. The coercive force anisotropy is mainly caused by the shape and size of the grains after further direct and transverse cold rolling of alloy. Some linear correlations and corresponding regression equations of the coercive force on texture characteristics and grains sizes have been revealed. The approximation reliability coefficients are not less than 0.95.

It has been also found that austenitic-unstable steels after hot rolling have dual phase structure of austenite and martensite, whose volume components and texture depend on the chemical composition and deformation degree. The magnitude of the coercive force and its anisotropy in the austenitic-unstable steels is determined by the amount of martensite and the character of its texture. The residual elastic stresses arising during the martensitic transformations in the process of rolling make an isotropic contribution to the

coercive force.

Besides, it has been determined that the value of coercive force of the steel 10G2 has increased to 8 A/cm due to grain refinement to 4 microns after severe plastic deformation by the method of twist extrusion. Components of the texture, at which {111} planes lie parallel to the rolling plane are formed mainly due to further rolling extruded steel sample 10G2 along the extrusion axis. At this, grains are significantly elongated in the rolling direction that helps reducing the coercive force in the rolling direction to 5.7 A/cm. During the subsequent rolling of the sample transversely to the extrusion the orientations with {001} planes parallel to the rolling plane axis are more intensively formed. The coercive force anisotropy is mainly influenced by a crystallographic magnetic component.

The coercive force anisotropy in cylindrical samples made of heat resistant steel 15Cr5M after long use occurs mainly due to crystallographic magnetic anisotropy, which is primarily caused by the texture. The anisotropy of coercive force has been found in cylindrical samples made of heat resistant stainless steel 08Cr18N10T while the magnetic phase has not been found by X-ray diffraction analysis. This indicates the greater structural sensitivity of the coercive force compared to the X-ray phase analysis.

Some significant linear correlations and corresponding regression equations of the coercive force on the tensile strength, yield strength and elongation with the approximation reliability coefficients not lower than 0.89 have been found in the steel 09G2S cut out from the petroleum distillation column after long use. The main reason for the coercivity anisotropy is crystal magnetic anisotropy determined by the texture. The physical model that explains the emergence of coercive force anisotropy caused by magnetic crystallographic component has been presented in the work. The coercive force anisotropy appears due to the different reorienting work of magnetization vector of crystals in the external magnetic field applied in different crystallographic directions.

Keywords: texture, microstructure, stress, grain size, anisotropy, coercivity, mechanical properties, correlation, regression.

АННОТАЦИЯ

Драгомерецкая Е. А. Влияние ориентации кристаллов и остаточных напряжений на коэрцитивную силу некоторых сплавов железа. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Государственное учреждение «Южноукраинский национальный педагогический университет имени К. Д. Ушинского», Одесса, 2017.

Диссертация посвящена разработке физической модели связи коэрцитивной силы с характеристиками прочности и пластичности, кристаллографической текстурой и остаточными напряжениями, формой и размерами зерен в некоторых сплавах железа и конструкционных сталях для прогнозирования их безопасной эксплуатации. Коэрцитивная сила, благодаря ее высокой структурной чувствительности, является перспективной для изучения структурного состояния ферромагнитных материалов. Несмотря на то, что механизмы возникновения анизотропии коэрцитивной силы ферромагнитных материалов и связь этой анизотропии с механическими и структурными характеристиками выяснены не до конца, магнитный метод применяют для оценки напряженного состояния стальных

конструкций. При этом часто остается без внимания влияние кристаллографической текстуры, которая может быть как резервом повышения свойств материала, так и источником брака.

В работе определяется коэрцитивная сила в разных направлениях в монокристаллах и поликристаллах сплава Fe-3%Si с использованием коэрцитиметров. Установлено, что анизотропия коэрцитивной силы в них обусловлена влиянием кристаллографической магнитной составляющей. Найдены закономерности влияния вида и степени деформации холодной прокаткой и отжига на коэрцитивную силу поликристаллов сплава Fe-3%Si. Показано, что после прямой и поперечной холодной прокатки поликристаллов сплава анизотропия коэрцитивной силы обусловлена, в основном, влиянием формы и размера зерен. Установлены корреляционные связи и найдены соответствующие уравнения регрессии коэрцитивной силы на характеристики текстуры и размеры зерен сплава с коэффициентами надежности аппроксимации не менее 0,95.

Установлено, что аустенитно-нестабильные стали после горячей прокатки имеют двухфазную структуру аустенита и мартенсита. Количество аустенита и мартенсита зависит от химического состава и степени деформации. Величина коэрцитивной силы и ее анизотропия в изученных аустенитно-нестабильных сталях определяется количеством мартенсита и характером его текстуры.

Найдено, что при интенсивной пластической деформации стали 10Г2 методом винтовой экструзии коэрцитивная сила возрастает до 8 А/см в результате измельчения зерна до 4 мкм. При дальнейшей деформации образца стали 10Г2 прокаткой вдоль оси винтовой экструзии преимущественно развиваются компоненты текстуры с плоскостями $\{111\}$ параллельными плоскости прокатки, что способствует уменьшению коэрцитивной силы до 5,7 А/см. При прокатке поперек оси винтовой экструзии формируется текстура $\{001\}$ параллельно плоскости прокатки. Анизотропия коэрцитивной силы обусловлена влиянием магнитной кристаллографической составляющей.

Установлено, что анизотропия коэрцитивной силы в стали 15Х5М после длительной эксплуатации обусловлена кристаллографическим фактором. Метод измерения коэрцитивной силы оказался более чувствительным к изменению фазового состава нержавеющей стали 08Х18Н10Т по сравнению с рентгенофазовым анализом и позволил выявить магнитную фазу и анизотропию коэрцитивной силы.

В стали 09Г2С установлены значимые линейные корреляции с коэффициентом не ниже 0,89 и найдены соответствующие уравнения регрессии коэрцитивной силы на пределы прочности, текучести и относительное удлинение. Показано, что основной причиной анизотропии коэрцитивной силы является кристаллическая магнитная анизотропия, обусловленная текстурой. Предложена физическая модель, которая объясняет возникновение анизотропии коэрцитивной силы, вызванной магнитной кристаллографической составляющей. Анизотропия коэрцитивной силы возникает из-за различной работы переориентации вектора намагниченности кристаллов во внешнем магнитном поле, приложенном в разных кристаллографических направлениях.

Ключевые слова: текстура, микроструктура, напряжение, размер зерен, анизотропия, коэрцитивная сила, механические свойства, корреляция, регрессия.