

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

САВЧУК ОЛЕНА СЕРГІЇВНА

УДК 669-176 + 539.422.33+539.424+539.4.011.24

**ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЇ НА СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ, МЕХАНІЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ ТА ПРОЦЕСИ РУЙНУВАННЯ
СПЛАВІВ ЗАЛІЗА ТА ТИТАНУ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Одеса – 2019

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,
старший науковий співробітник
Хижун Олег Юліанович,
Інститут проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича НАН України, завідувач відділу
спектроскопії поверхні новітніх матеріалів;

доктор фізико-математичних наук, професор
Вікулін Іван Михайлович,
Одеська національна академія зв'язку
імені О. С. Попова, професор кафедри фізики
оптичного зв'язку

Захист відбудеться «14» травня 2019 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 «10» квітня 2019 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. Х. Тадеуш

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дисертацію присвячено визначенню фізико-математичних моделей впливу різного виду деформації (гвинтова екструзія, знакозмінний вигин, ударний вигін, довготривала знакозмінна деформація при експлуатації арматурних канатів захисних оболонок АЕС) на текстуру, механічні властивості, параметр пошкоджуваності, фрактальність структури та характер руйнування типових конструкційних сплавів заліза з вуглецем (зокрема 10Г2, Ст20К, 08кп з ОЦК граткою, 05Х18Н10 з ГЦК граткою) і комерційно чистого титану ВТ1-0 з ГЦУ граткою.

Розуміння фізичної природи впливу різних чинників на кристалічні тіла є тією основою, на якій можливо їх ефективне практичне використання. Одним з головних структурних станів полікристалічних тіл є кристалографічна текстура. У полікристалічних металевих матеріалах текстура є причиною анізотропії фізико-механічних властивостей. Однак ефекти текстури рідко враховуються в інженерній практиці.

Сьогодні швидко зростає інтерес до отримання так званих об'ємних ультрадрібнозернистих (УДЗ) матеріалів, які володіють підвищеною міцністю та одночасно доброю пластичністю. Однією з перспективних технологій отримання УДЗ матеріалів є гвинтова екструзія, при здійсненні якої деформація не є однорідною за перетином деформованого металу. Це може привести до неоднорідності текстури за перетином зразка та виникненню певної анізотропії після гвинтової екструзії, що є практично невивченим.

Іншим прикладом є знакозмінна деформація при правці (випрямленні) листового та рулонного металу на роликівих правильних машинах, що дозволяє зменшити внутрішнє напруження металу і надати йому необхідні площинні характеристики. При правці виникають і накопичуються неконтрольовані мікротріщини, мікропори. Кристалографічна текстура також повинна впливати на розподіл мікроскопічних пошкоджень структури, що накопичуються при знакозмінному вигині. Однак цей вплив не досліджено.

Для характеристики накопичення пошкоджень використовують так званий параметр пошкоджуваності ω . Параметр пошкоджуваності інтерпретується як відносне скорочення ефективної площі поперечного перерізу $S_0 - S$, що несе навантаження внаслідок накопичення пошкоджень.

$$\omega = (S_0 - S)/S_0$$

При такій інтерпретації параметр пошкоджуваності для одновісного розтягу може бути отриманий зі змін модуля пружності.

Параметр пошкоджуваності $0 \leq \omega \leq 1$ характеризує сукупність мікроструктурних змін у матеріалі, викликаних появою та накопиченням мікрodefektів під час експлуатаційних навантажень. Але відсутність достатнього фізичного обґрунтування моделей (кінетичних рівнянь) породжує неоднозначність в експериментальних оцінках параметра пошкоджуваності ω в залежності від способу його визначення для одного і того ж зразка досліджуваного матеріалу.

Експериментальне дослідження закономірностей формування

кристалографічної текстури, її зв'язку з фрактальністю структури, аналіз пошкоджуваності, зростання і поширення тріщин в матеріалах різної природи є актуальним як у фундаментальних, так і в прикладних аспектах. Результати таких досліджень можуть послужити основою розробки методів прогнозування міцності і довговічності твердих тіл.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертація є частиною експериментальних і теоретичних досліджень процесів формування текстури і анізотропії фізико-механічних властивостей, які ведуться на кафедрі фізики Державної установи «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського». Дисертація виконувалась, зокрема, в рамках наукової теми «Мультимасштабне моделювання процесу пластичної деформації текстурованих полікристалів» (Державний реєстраційний № 0114U000002).

При виконанні цих науково-дослідних робіт автором досліджені закономірності формування кристалографічної текстури, мікроструктури і анізотропії фізико-механічних характеристик, фрактальної розмірності поверхонь руйнування та діаграм навантаження з часом при випробуваннях на ударний вигин, феромагнітних та аустенітних конструкційних сплавів заліза з вуглецем, титанового сплаву, деформованих прокаткою, знакозмінним вигином, а також розроблені фізико-математичні моделі, які дозволяють визначити параметр пошкоджуваності та його анізотропію, описувати зміни фізико-механічних властивостей та їх анізотропію в залежності від виду та ступеня деформації, зв'язувати характер руйнування з фрактальною розмірністю поверхонь руйнування.

Метою роботи є дослідження впливу деформації певних типових сплавів заліза з вуглецем, що мають об'ємно центровані кубічні (ОЦК) та гранецентровані кубічні (ГЦК) ґрати, а також комерційного титану з гексагональними щільно упакованими (ГЦУ) ґратами, на їх кристалографічну текстуру, фрактальність структури, пошкоджуваність і встановлення фізико-математичних моделей зв'язку їх кількісних характеристик з характером руйнування.

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

1. Встановити вплив деформації інтенсивної пластичної деформації (ПД) гвинтовою екструзією (ГЕ) на неоднорідність текстури сплаву заліза з вуглецем марки 10Г2 з ОЦК ґраткою.
2. Встановити зв'язок текстури та параметру пошкоджуваності ω при випробуваннях на одновісний розтяг після знакозмінного вигину (ЗВ) сплаву заліза з вуглецем марки 08кп з ОЦК ґраткою.
3. Встановити зв'язок текстури та параметру пошкоджуваності ω при випробуваннях на одновісний розтяг після знакозмінного вигину (ЗВ) сплаву заліза з вуглецем марки 05Х18Н10 з ГЦК ґраткою.
4. Встановити зв'язок текстури та параметру пошкоджуваності ω при випробуваннях на одновісний розтяг після знакозмінного вигину (ЗВ) комерційного титану з ГЦУ ґраткою ВТ1-0, що є основою багатьох титанових сплавів.
5. Встановити зв'язок фрактальної розмірності поверхонь руйнування з

характером руйнування типових металів дротів арматурних канатів захисних оболонок енергоблоків електростанцій (АЕС).

6. Знайти зв'язок величин фрактальної розмірності поверхонь руйнування та відповідних діаграм навантаження з часом при випробуваннях на ударний вигин (УВ) з величиною ударної в'язкості та текстурою сплаву заліза з вуглецем Ст20К.

Об'єкт дослідження. Процеси формування кристалографічної текстури, мікроструктури, її фрактальності, анізотропії механічних характеристик та параметра пошкоджуваності при пластичній деформації у сплавах на основі заліза та титану.

Предмет дослідження. Зразки сплавів заліза з вуглецем марок 10Г2 після гвинтової екструзії, 08кп, 5Х18Н10Ю, а також комерційного титану після знакозмінного вигину; зразки сплаву заліза з вуглецем марки Ст20 з фрагменту судини тиску після закінчення періоду її планової експлуатації та ударних випробувань по Шарпі, металеві дроти обірваних в процесі експлуатації арматурних канатів захисних оболонок енергоблоків АЕС.

Методи дослідження. Рентгенівський аналіз текстури кристалічних тіл, металографічний та фактографічний аналіз, методи механічних випробувань полікристалів, комп'ютерний фрактальний аналіз, комп'ютерне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Уперше досліджено неоднорідність кристалографічної текстури сплаву заліза з вуглецем марки 10Г2 після гвинтової екструзії. Показано, що має місце градієнт текстури по перерізу зразка після ГЕ. Встановлено, що вісь екструзії у зразку поступово обертається навколо напрямку $\langle 111 \rangle$ від напрямку $\langle 113 \rangle \langle 110 \rangle$. При цьому спостерігаються різні компоненти текстури зсуву типу $\{110\} \langle uvw \rangle$ у різних шарах зразка. У даному випадку мається на увазі, що площини $\{110\}$ є площинами зсуву.

2. Уперше досліджено вплив малоциклового знакозмінного вигину (ЗВ) і кристалографічної текстури на анізотропію параметру пошкоджуваності ω листів сплаву 08кп при подальших одновісних випробуваннях на розтяг. Показано, що має місце анізотропія механічних властивостей і параметру ω . Параметр ω має мінімальне значення після трьох циклів ЗВ. Встановлено, що параметр ω збільшується зі збільшенням інтенсивності «крихких» компонентів типу $\{001\}$, паралельних площині прокатки в текстурі після ЗВ. Параметр ω зменшується з ростом інтенсивності «в'язких» компонентів, таких як $\{110\}$, $\{112\}$, $\{111\}$, паралельних площині прокатки в текстурі після ЗВ.

3. Уперше досліджено вплив малоциклового знакозмінного вигину (ЗВ) і кристалографічної текстури на анізотропію параметру пошкоджуваності ω листів сплаву 05Х18Н10 при подальших одновісних випробуваннях на розтяг. Встановлено, що під час ЗВ в листах формуються різні комбінації вихідної текстури прокатки, компонентів текстури зсуву $\{001\} \langle 110 \rangle$ і двійникових орієнтацій. Показано, що роль двійникування збільшується при збільшенні числа циклів ЗВ, що підтверджується металографічними даними. Має місце анізотропія параметру ω і механічних властивостей як у вихідному листі, так і в листах після ЗВ. Анізотропія зменшується зі збільшенням числа циклів ЗВ і є мінімальною

після 5 циклів ЗВ. Анізотропія обумовлена, головним чином, текстурою, сформованою в сталевих листах, що підтверджується результатами кореляційного та регресійного аналізу.

4. Уперше досліджено вплив малоциклового знакозмінного вигину (ЗВ) і кристалографічної текстури на анізотропію параметру пошкоджуваності ω листів гексагонального титану при подальших одновісних випробуваннях на розтяг. Оцінено величину параметра ω при розтягу під дією напруженості умовної межі плинності та границі міцності. Параметр ω збільшується при збільшенні числа циклів ЗВ. Анізотропія параметра ω і механічних властивостей обумовлена, головним чином, кристалографічною текстурою. Це підтверджено знайденими сильними кореляційними зв'язками та відповідними рівняннями регресії анізотропії параметру ω та механічних властивостей з кристалографічною текстурою.

5. Уперше за допомогою комплексних досліджень фрактальних розмірностей зламів, характеру пошкодження їх поверхонь, параметру пошкоджуваності ω , механічних властивостей встановлено, що ймовірною причиною передчасних руйнувань дротів типових арматурних канатів захисних оболонок АЕС є фретинг-корозія. Виявлено, що за нижчої пластичності металу дроту і меншої його пошкоджуваності реалізується крихке руйнування, якому відповідає більша фрактальна розмірність.

6. Уперше проведено зіставлення фрактальних розмірностей зламів D_f і фрактальних розмірностей D_c діаграм $P(\tau)$ зміни зусилля P з часом τ при випробуваннях на ударний вигин (УВ) при $+50^\circ\text{C}$, -50°C і кімнатній температурах зразків Шарпі, вирізаних під різними кутами до НП зі сплаву Ст20К, та текстури. Встановлено подібність закономірностей зміни відповідних фрактальних розмірностей D_f і D_c . Показано, що максимальні значення фрактальних розмірностей діаграм $P(\tau)$ і поверхонь руйнування (зламів) відповідають крихкому руйнуванню та мінімальній ударній в'язкості, а мінімальна фрактальна розмірність відповідає в'язкому характеру руйнування та максимальній ударній в'язкості. Встановлено, що найбільші значення фрактальної розмірності, знайдені для зразків, вирізаних під кутом 45° до НП, є обумовленими впливом орієнтувань $\{001\}\langle 110\rangle$, які є основним компонентом текстури металів і сплавів з ОЦК ґраткою.

Практичне значення отриманих результатів дослідження:

1. Знайдені закономірності формування текстури та її неоднорідності після гвинтової екструзії можуть бути використані для розробки нових технологій, які дозволяють створювати в листах оптимальну структуру, що спроможна збільшити міцність при добрій пластичності.

2. Знайдені закономірності впливу знакозмінного вигину на текстуру та параметр пошкоджуваності при подальших випробуваннях на одновісний розтяг сплаву 08кп (якісна низьколегована конструкційна сталь) можуть бути використані для розробки технології поліпшення формозміни сплаву при обробці тиском, що є актуальним у автомобілебудуванні.

3. Результати дослідження впливу знакозмінного вигину на текстуру та анізотропію механічних властивостей і параметру пошкоджуваності сплаву

05X18H10 (типова нержавіюча сталь), застосовуваної в автомобільній, нафтопереробній і консервній промисловостях, можуть бути використані для поліпшення технології виготовлення листової та рулонної нержавіючої сталі.

4. Результати дослідження впливу малоциклового знакозмінного вигину (ЗВ) і кристалографічної текстури на анізотропію параметру пошкоджуваності ω листів комерційного титану при подальших одновісних випробуваннях на розтяг можуть бути використані для створення технології підвищення терміну експлуатації сплавів на основі титану.

5. Результати дослідження зв'язку фрактальної розмірності зламів дротів типових арматурних канатів захисних оболонок АЕС з параметрами пошкоджуваності та механічними властивостями можуть бути використані для удосконалення методики дослідження тривалості безпечної експлуатації канатів захисних оболонок АЕС.

6. Результати зіставлення фрактальних розмірностей зламів D_f та фрактальних розмірностей D_c діаграм зміни зусилля з часом при випробуваннях на ударний вигин зразків зі сплаву Ст20К та зв'язку з текстурою можуть бути використані для удосконалення методики визначення температури крихкості конструкційних матеріалів з урахуванням текстури.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі наукових праць за темою дисертації, підготовці зразків для дослідження їх фізичних властивостей, проведенні досліджень текстури, мікроструктури, участі в аналізі результатів. Здобувач брав активну участь в обговорюванні отриманих експериментальних даних, їх обробці, аналізі та в підготовці наукових праць до публікацій.

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

1. Проведено рентгенівські та металографічні дослідження зразків досліджуваних матеріалів: сплаву 08кп, сплаву 05X18H10, титану ВТ1-0 після різного числа знакозмінного вигину, сплаву 10Г2 після гвинтової екструзії та подальшої прокатки.

2. Виконано математичну обробку результатів та встановлено основні закономірності формування текстури досліджених сплавів заліза та титану.

3. Проаналізовано результати механічних випробувань і визначено величини меж міцності, плинності та відносного подовження зразків.

4. Проведено визначення параметрів пошкоджуваності при випробуваннях на одновісний розтяг після знакозмінного вигину.

5. Встановлено значущі кореляційні зв'язки та знайдено відповідні рівняння регресії між параметрами текстури, механічними характеристиками та параметрами пошкоджуваності досліджуваних сплавів заліза та титану.

6. Визначено фрактальні розмірності зламів дротів типових арматурних канатів захисних оболонок АЕС та встановлено зв'язки фрактальної розмірності з крихким та в'язким характером руйнування дротів.

7. Визначено фрактальні розмірності та проведено зіставлення фрактальних розмірностей поверхонь руйнування зламів D_f та фрактальних розмірностей D_c діаграм навантаження за часом $P(\tau)$ при випробуваннях на ударний вигин (УВ) при + 50°C, -50°C і кімнатній температурах зразків Шарпі, вирізаних під різними

кутами до НП зі сплаву Ст20, та текстури.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на таких конференціях: Міжнародній конференції «Topical Problems of Semiconductor Physics» (Truskavets, Ukraine, 2016); Міжнародних наукових читаннях імені чл.-кор. АН СРСР І. А. Одингга «Механічні властивості сучасних конструкційних матеріалів» (Москва, Ін-т металургії імені А. А. Байкова РАН, 2016); Міжнародній конференції «Фізика, Електроніка, Електротехніка» (Суми, Україна, 2017);); Міжнародних наукових читаннях імені чл.-кор. АН СРСР І. А. Одингга «Механічні властивості сучасних конструкційних матеріалів» (Москва, Ін-т металургії імені А. А. Байкова РАН, 2018).

Обґрунтованість та достовірність одержаних результатів обумовлені 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 10 наукових працях. У тому числі в реферованих наукових міжнародних журналах опубліковано 5 статей, дві з яких надруковані у виданнях, які індексуються базою даних Scopus. Додатково результати дисертації висвітлені в 5 тезах і матеріалах міжнародних наукових конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 133 найменувань. Робота викладена на 149 сторінках і включає 53 рисунка і 11 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 текстури та її опису. Текстура є головною причиною анізотропії властивостей полікристалічного матеріалу. Проведено огляд основних типів текстури в металах і сплавах з ГЦК, ОЦК та ГЦУ ґратками. Розглянуто методи дослідження текстури та її опису за допомогою прямих та обернених полюсних фігур (ОПФ), а також трьохвимірної функції орієнтацій кристалів (ФРО).

Проаналізовано опис накопичення пошкоджень у матеріалі в рамках класичної теорії Качанова – Работнова, згідно з якою поточний стан внутрішнього пошкодження зразка може бути представлено за допомогою єдиного скалярного параметра (параметра пошкоджуваності) ω , який являє собою монотонно зростаючу функцію часу $0 \leq \omega \leq 1$ [1,2]. Параметр пошкоджуваності інтерпретується як відносне скорочення внаслідок розподілених всередині зразка мікродефектів ефективної, площі поперечного перерізу, що несе навантаження

[3]. Визначений у такий спосіб параметр пошкоджуваності являє собою чисто геометричну характеристику поточного стану пошкодження, і його зміна визначається властивостями матеріалу і історією зовнішнього навантаження. Така інтерпретація ω дозволяє його оцінювати непрямыми методами за зміною структурно-чутливих властивостей, наприклад, за зміною модуля пружності, за результатами тестів на одновісний розтяг.

Вищезазначені ідеї були розширені далі в рамках термодинаміки незворотних процесів для опису складного напруженого стану [4]. Основою цих моделей пошкоджуваності є заміна звичайної напруженості на ефективні технічні. При цьому розроблено три основні моделі, основані на використанні еквівалентної деформації [5], еквівалентної додаткової енергії [6] та еквівалентної пружної енергії [7].

Згідно з гіпотезою еквівалентної деформації ω може бути визначена через модуль Юнга

$$\omega = 1 - E/E_0, \quad (1)$$

де E_0 і E модулі пружності непошкодженого та пошкодженого матеріалу відповідно.

Якщо використовувати модель еквівалентної пружної енергії, то можна визначити ω як тензор четвертого рангу [8]. Однак для одновісного розтягу не рівний нулю буде лише один компонент тензора ω

$$\omega = 1 - \sqrt{E/E_0}. \quad (2)$$

Для одновісного розтягу пошкоджуваність може бути отримано зі змін пружних характеристик, з огляду на представницький елемент об'єму ортотропної симетрії. Ще Качанов (1974) шляхом мікромеханічного аналізу показав, що навіть при високій щільності взаємодіючих тріщин ефективні пружні властивості залишалися ортотропними з хорошою точністю [9]. Тому оцінка пошкодження по (2) є кращою за порівняння з (1) при аналізі анізотропії пошкодження листового матеріалу.

Було показано [10], що модель Леметра, яка заснована на використанні еквівалентної деформації [5] дає більш високі значення ω в порівнянні з моделями, які засновані на енергетичному підході і дають дуже схожі чисельні значення.

Далі проаналізовано вплив фрактальності структури на характер руйнування.

Фрактальними (тобто дробовими) є об'єкти, що є самоподібними на різних масштабах, та в яких зв'язок між довжиною L та лінійною мірою l описується формулою

$$L \propto l^{1-D}, \quad (3)$$

де величина D є дробовою, яка перевищує топологічну розмірність простору та має назву фрактальна розмірність або розмірність Хаусдорфа-Безиковича [11].

Фракталами є також комірчасті дислокаційні структури сильно деформованих металів [2]. Тому структура границь зерен у металевих полікристалах значно впливає на механічні властивості [12-15]. Однак не всі дослідження з використанням ударної в'язкості узгоджуються. Наприклад, в

роботах [16-17] автори вказують, що поверхні руйнування виявляють, по суті, постійне значення характеристик.

Таким чином, у науковій літературі мають місце певні протиріччя щодо зв'язку фрактальної розмірності з фізико-механічними властивостями полікристалічних матеріалів. Тому вивчення фрактальності структури та характеру руйнування не є закінченим і потребує подальших досліджень.

У **другому розділі** описано матеріали та методи дослідження. Матеріалами для дослідження послуговували сплав заліза з вуглецем 10Г2 після гвинтової екструзії (ГЕ), сплави 08кп, 05Х19Н10 і комерційний титан марки ВТ1-0 у стані поставки та після подальшої деформації знакозмінним вигином, зразки сплаву Ст20К, вирізані з фрагменту оболонки судини тиску діаметром 2,2 м і товщиною 12 мм після закінчення терміну її планової експлуатації, зразки дротів типових канатів захисних оболонок АЕС зі сплаву марки 85 після експлуатаційного руйнування.

Хімічний склад досліджуваних матеріалів був визначений за допомогою рентгенівського флуоресцентного спектрометра СЕР-01 «ElvaxLight» та аналізатора вуглецю ГОУ-1.

Кристалографічну текстуру досліджували рентгенівським методом з побудовою ОПФ з нормуванням по Моррісу.

Сплав заліза з вуглецем 10Г2 піддавали деформації гвинтовою екструзією (ГЕ). Для дослідження неоднорідності текстури сплаву 10Г2 після ГЕ використовували синхротронне жорстке рентгенівське випромінювання та зйомку прямих полюсних фігур методом на проходження на німецькому синхротроні (DESY, Hamburg) з подальшим розрахунком трьохвимірних функцій розподілу орієнтацій (ФРО). Текстуру зразків сплаву 10Г2 після (ГЕ) досліджували через кожний мм перетину зразку по товщині.

При дослідженні текстури після знакозмінного вигину отримували ОПФ з двох протилежних поверхонь листів в напрямку нормалі (НН) до площини прокатки.

Фрактальну розмірність зображень діаграм залежності навантаження від часу при ударних випробуваннях, а також двовимірних зображень зламів визначали методом накладання квадратних сіток з різною довжиною сторін квадратів («boxmethod»). При цьому використовували комп'ютерний програмний засіб NarFA.

Механічні випробування досліджуваних сплавів заліза з вуглецем 08кп з ОЦК ґраткою, Х18Н10 з ГЦК ґраткою та титану з ГЦУ ґраткою у початковому стані та після деформування знакозмінним вигином (ЗВ) проводили на розривній машині 250N5A WN: 143331 з силовим датчиком ID: 0 WN: 805506 20 kN при кімнатній температурі для зразків, вирізаних в НП, ДН і ПН.

Параметри пошкоджуваності ω зразків досліджуваних матеріалів оцінювали з використанням симетричного тензора пошкоджуваності другого порядку ω . При одноісному розтягу лише один компонент (рівняння (2)) цього тензора не рівний нулю. Оцінювали пошкоджуваність, спричинену напруженнями на рівні границь плинності $\sigma_{0,2}$ і міцності σ_B .

У **третьому розділі** представлено результати дослідження впливу виду

деформації на текстуру, мікроструктуру, механічні властивості та пошкодженість сплавів заліза з вуглецем та титану.

Показано, що при гвинтовій екструзії сплаву 10Г2 має місце градієнт текстури, а саме, перехід від орієнтировок куба $\{001\}\langle 100\rangle$ і кручення типу $\{110\}\langle uvw\rangle$ на периферії (рис. 1, а) до компонентів пресування $\{111\}\langle uvw\rangle$ (γ – волокно) у центрі зразка (рис. 1, в). При цьому вісь екструзії поступово обертається навколо напрямку $\langle 111\rangle$ від напрямку $\langle 113\rangle$ до напрямку $\langle 110\rangle$ у різних шарах зразка (рис. 2)

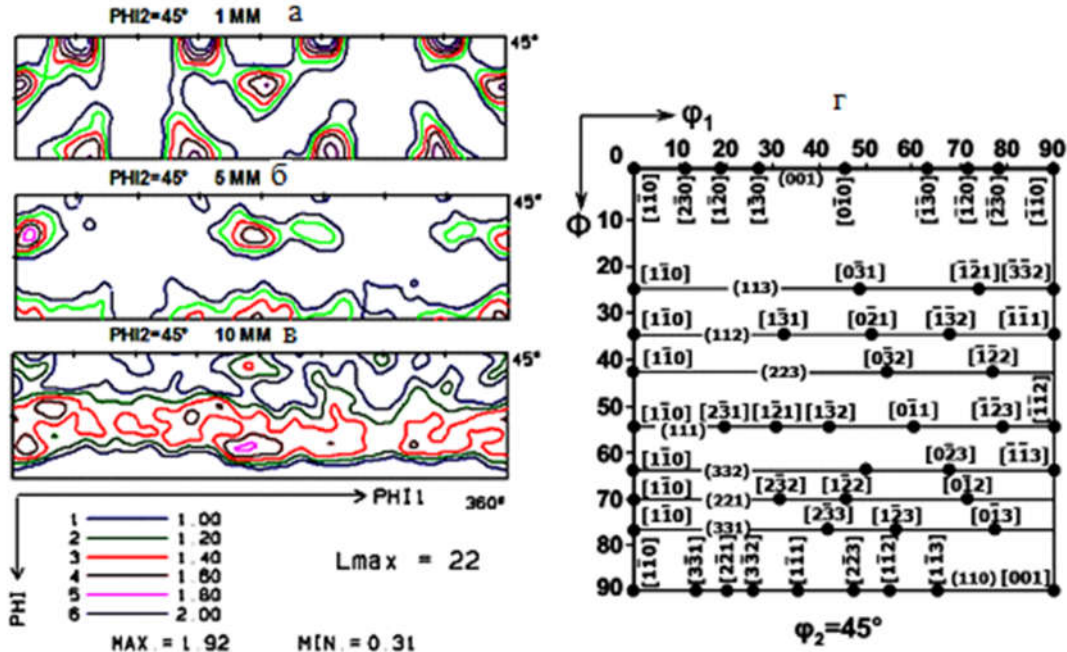


Рис. 1. Перерізи ФРО $\phi_2 = 45^\circ$ сплаву 10Г2 після ГЕ. а, б, в відповідають перерізам зразка уздовж його діаметра 1 мм, 5 мм, 10 мм від поверхні зразка; г – мапа ФРО для перерізу $\phi_2 = 45^\circ$, що передає основні компоненти текстури.

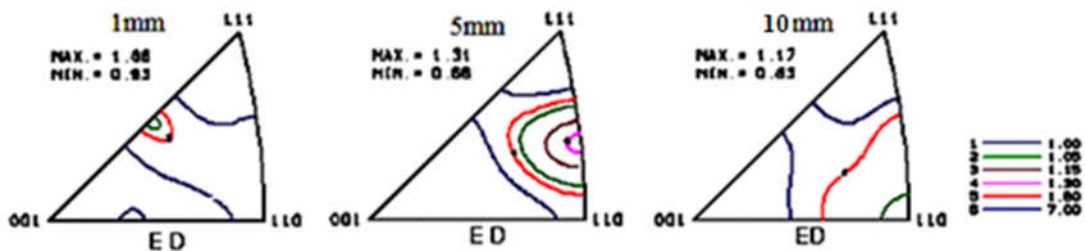


Рис.2. ОПФ напрямку вісі гвинтової екструзії, розраховані з ФРО у різних перерізах вздовж діаметра зразка сплаву 10Г2 після ГЕ. ED – вісь екструзії.

Далі представлено результати дослідження впливу знакозмінного вигину на механічні властивості при одновісному розтягу та параметр пошкодженості. Встановлено, що має місце анізотропія параметру пошкодженості ω та механічних властивостей при одновісних випробуваннях на розтяг після деформації знакозмінним вигином у листах сплавів заліза з вуглецем 08кп з ОЦК ґраткою (рис. 3). Мінімальні значення коефіцієнта анізотропії $k = (F_{max} - F_{min}) / F_{min}$, % спостерігалися після 5 циклів ЗВ. А саме, $k = 3,9$; $3,8$; $4,5$ і $3,2$ % відповідно для σ_B , $\sigma_{0,2}$, $\Delta l/l_0$ та ω .

Кристалографічна текстура (рис.4) може бути описана як $\{001\}\langle 110\rangle + \{112\}\langle 110\rangle + \{001\}\langle 100\rangle$. Перші два з цих компонентів є типовими текстурами

деформації ОЦК металів і сплавів. Останній компонент, ймовірно, сформувався в процесі термічної обробки при температурі, вищій від температури поліморфного перетворення.

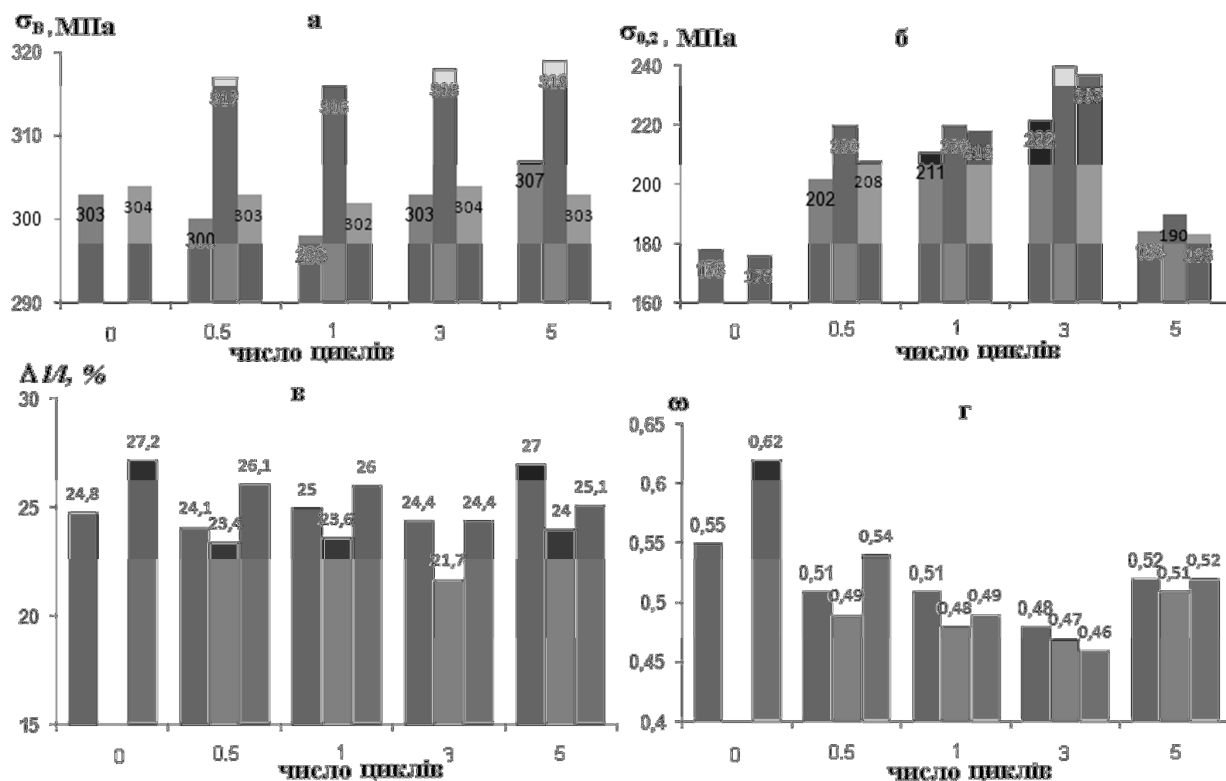


Рис.3. Анізотропія після знакозмінного вигину сплаву 08kp

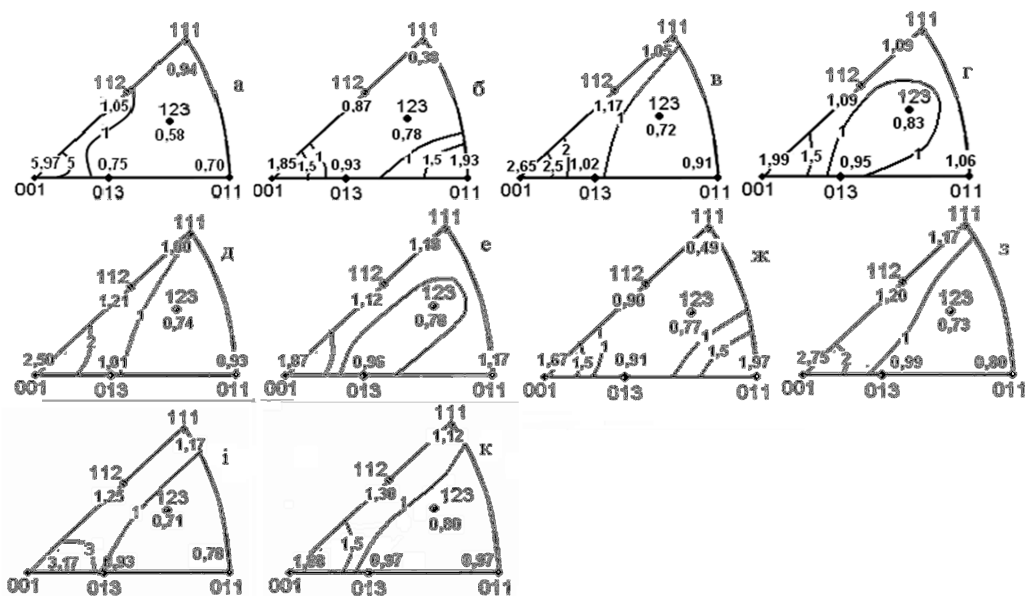


Рис. 4. ОПФ листів сплаву 08kp в початковому стані (а, б знято у НН і НП, відповідно) та після деформації 0,5; 1; 3 і 5 циклів ЗВ (в - к знято у НН); в, д, ж, і, відповідають сторонам листа, підданим розтягувальній деформації на попередньому етапі; г, е, з, к відповідають сторонам листа, підданим стиску, відповідно.

Були встановлені значущі кореляційні зв'язки між усередненими за напрямками в листах ω_{cp} і усередненими по обидві сторони значеннями листів

величин полюсної густини P_{001} , P_{110} , P_{112} , P_{111} на ОПФ НН. Наприклад, існує сильна лінійна кореляція параметра пошкоджуваності ω_{cp} з полюсною густиною P_{001} . Відповідне рівняння регресії з коефіцієнтом надійності апроксимації $R^2 = 0,90$ має вигляд

$$\omega_{cp} = 0,026P_{001} + 0,434. \quad (4)$$

Оскільки кристалографічні площини типу $\{001\}$ є основними площинами відколу (розщеплення) ОЦК металів і сплавів, то пошкоджуваність збільшується зі збільшенням інтенсивності "крихких" компонентів у текстурі сплаву.

Була встановлена сильна лінійна кореляція між ω_{cp} та полюсною густиною «в'язких» компонентів у текстурі сплаву $P_{cp} = (P_{110} + P_{112} + P_{111})_{cp}$, усередненою по всім ОПФ НН. Відповідне рівняння регресії з коефіцієнтом надійності апроксимації $R^2 = 0,99$ має вигляд

$$\omega_{cp} = -0,454P_{cp} + 0,996. \quad (5)$$

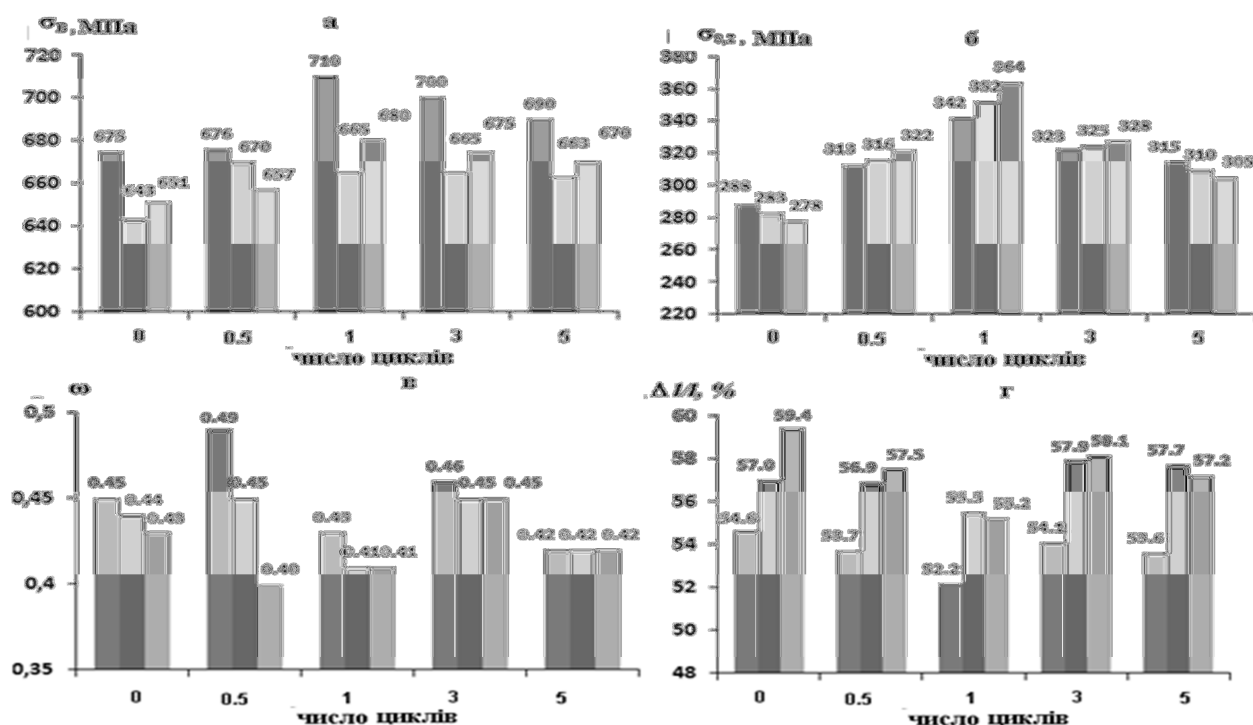


Рис. 5. Залежність межі міцності на розрив, умовної межі плинності, рівномірного подовження і параметру пошкоджуваності ω від кількості циклів ЗВ сплаву 05X18Н10. Тобто пошкоджуваність при випробуваннях на одновісний розтяг після ЗВ зменшується зі збільшенням інтенсивності «в'язких» компонентів у текстурі сталі.

Далі представлено результати наших досліджень впливу знакозмінного вигину (ЗВ) на властивості сплаву заліза з вуглецем Х18Н10.

На рис. 5 представлено механічні властивості та параметр пошкоджуваності після різної кількості циклів ЗВ. Видно, що має місце анізотропія механічних властивостей і параметра пошкоджуваності ω . Мінімальне значення k ($k = (F_{max} - F_{min})/F_{min}$, %) спостерігається після 5 циклів ЗВ (рис. 5). Характер анізотропії міцності на розтяг не змінюється зі збільшенням числа циклів ЗВ. У всіх випадках межа міцності у НП має більш високе значення, ніж у ПН, а у діагональному

напрямку має проміжне значення. Ймовірно, проявляється ефект механічної текстури, а саме, переважне подовження зерен у НП.

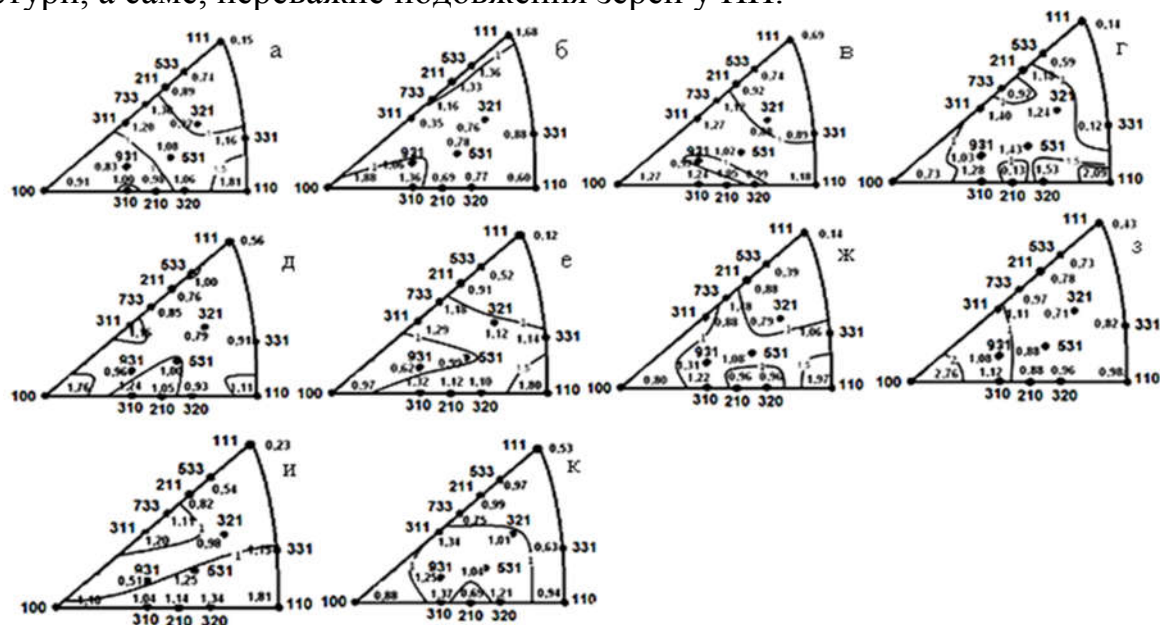


Рис. 6. Експериментальні ОПФ досліджуваної сталі; (а, б) - початковий стан, відповідно ОПФ (НН) і ОПФ (НП); (в-к) - ОПФ (НН) після ЗВ: (в, г); (д, е); (ж, з); (і, к) - після 0,5; 1; 3; і 5 циклів ЗВ, відповідно.

На рис. 6 наведено відповідні ОПФ. Видно, що в зразку досліджуваного сплаву 05X18N10 в стані поставки сформувалась типова текстура прокатки ГКЦ металів і сплавів (рис. 6 а, б).

Після різного числа циклів спостерігаються текстурні перетворення з формуванням різних компонентів текстури зсуву В - $\{hkl\}\langle 110\rangle$; С - $\{001\}\langle 110\rangle$ (рис. 6, б, д, е, з), а також двійникових орієнтацій (рис. 6, а, б, и, к). Кількість двійникових орієнтацій зі збільшенням числа циклів ЗВ збільшується, оскільки роль двійників, як відомо, посилюється при деформації матеріалів з низькою енергією дефектів упаковки, до якої належить досліджуваний сплав 05X18N10, що підтверджується знімками мікроструктури. На рис. 6 видно, що орієнтації $\langle 110\rangle$ мають найвищі значення полюсної густини на ОПФ НН. Нами встановлено значущі кореляції усереднених за напрямками листів значень межі міцності σ_B , умовної межі плинності $\sigma_{0,2}$, відносного рівномірного подовження $\Delta l/l$ і параметру пошкоджуваності ω при одновісних випробуваннях на розтяг після ЗВ з величинами полюсної густини P_{110} , усередненими по обидва боки листів. Відповідні рівняння регресії і коефіцієнти надійності апроксимації представлені співвідношеннями

$$\sigma_B^{cp} = -292,6(P_{110cp})^2 + 884,6P_{110cp} + 12,9; R^2 = 0,94 \quad (6)$$

$$\sigma_{0.2}^{cp} = -463,2(P_{110cp})^2 + 1362,0P_{110cp} - 667,8; R^2 = 0,81 \quad (7)$$

$$(\Delta l / l)_{cp} = 32,5(P_{110cp})^2 - 99,6P_{110cp} + 131,1; R^2 = 0,66 \quad (8)$$

$$\omega_{cp} = -0,43(P_{110cp})^2 + 1,43(P_{110cp}) - 0,73; R^2 = 0,61 \quad (9)$$

Далі представлено результати наших досліджень закономірностей впливу малоциклового знакозмінного вигину (ЗВ) і кристалографічної текстури на анізотропію механічних властивостей і коефіцієнт пошкоджуваності ω листів комерційного титану ВТ1-0 при випробуваннях на одновісний розтяг зразків, вирізаних в різних напрямках листів титану після різної кількості циклів знакозмінного вигину.

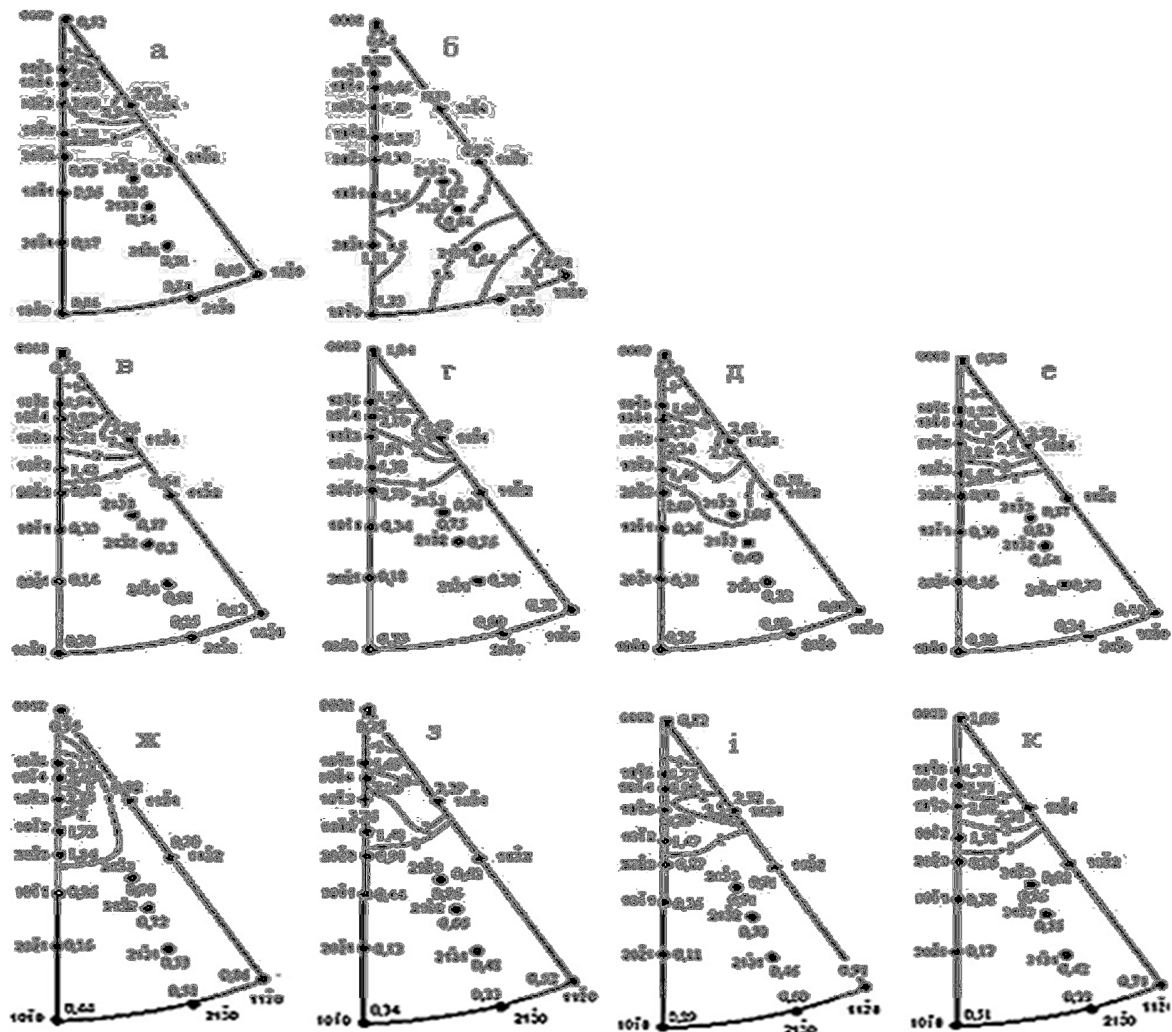


Рис. 7. ОПФ титанових листів: а, б відповідають НН і НП у початковому стані; в - к відповідають НН після знакозмінного вигину під час циклів 0,5 (в, г), 1 (д, е), 3 (ж, з) і 5 (і, к); в, е, з, к відповідають стороні листів, підданих розтягу на першій стадії деформації; г, д, ж, і відповідають стороні листів, підданих стиску на першій стадії деформації.

На рис. 7 представлено ОПФ НН та ОПФ НП листа титану в початковому стані, а також ОПФ НН після різної кількості циклів ЗВ. На рис. 8 можна спостерігати анізотропію механічних властивостей та параметру пошкоджуваності ω . Всі вивчені нами титанові листи мають текстуру подвійного базисного типу з відхиленням базисних полюсів до ПН. Однак кут відхилення і полюсна густина змінюються в залежності від кількості циклів ЗВ (рис. 7). Такі зміни текстури на різних етапах ЗВ вказують на процеси деформації шляхом ковзання і двійникування.

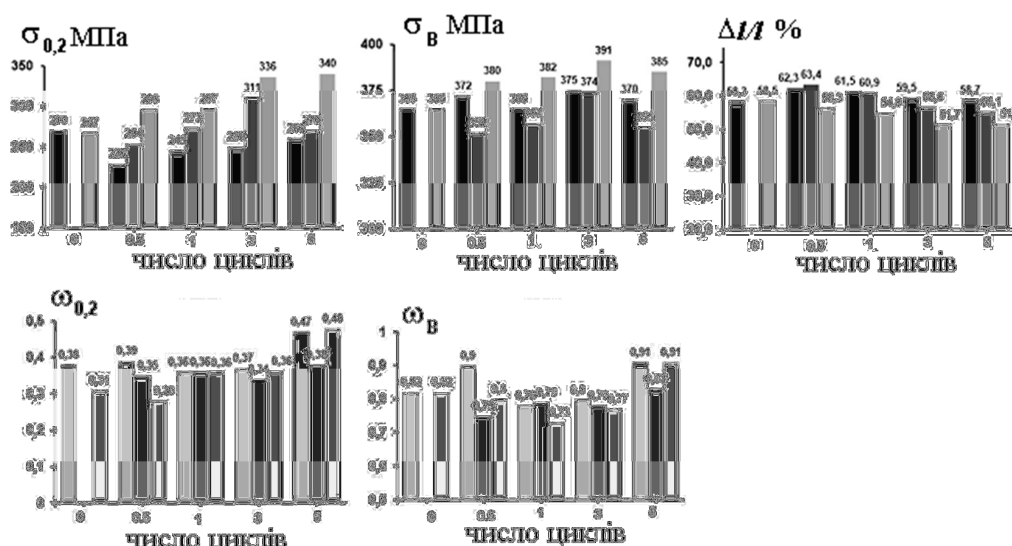


Рис. 8. Залежність межі міцності на розрив σ_B , умовної межі плинності $\sigma_{0,2}$, відносного подовження $\Delta l/l$, а також параметра пошкоджуваності ω від кількості циклів ЗВ титанових листів.

Проаналізував спостережувану анізотропію механічних властивостей титанових листів та її зміни (рис. 7) у зв'язку з кристалографічною текстурою після відповідних циклів ЗВ (рис.8), аналіз показав, що при збільшенні кількості циклів ЗВ існують значущі нелінійні (квадратичні) кореляції значень σ_B , $\sigma_{0,2}$, $\sigma_B \Delta l/l$, $\omega_{0,2}$ та ω_B з відповідними величинами усередненої полюсної густини P_{cp} у НП, ДН та ПН. Ми отримали наступні рівняння регресії, які разом з відповідними коефіцієнтами надійності апроксимації показано в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати кореляційного та регресійного аналізу

Напрямок у листі титану	Рівняння регресії	Коефіцієнт надійності апроксимації R^2
НП	$\sigma_B = -46,1P_{cp}^2 + 171,5P_{cp} + 218,6$	0,66
	$\sigma_{0,2} = 82,4P_{cp}^2 - 248,4P_{cp} + 393,9$	0,89
	$\varepsilon = -20,5P_{cp}^2 + 77,5P_{cp} - 10,3$	0,89
	$\omega_{0,2} = 2,5P_{cp}^2 - 10,8P_{cp} + 12,0$	0,72
	$\omega_B = 4,3P_{cp}^2 - 18,8P_{cp} + 21,4$	0,89
ДН	$\sigma_B = 42,1P_{cp}^2 - 175,8P_{cp} + 535,7$	0,94
	$\sigma_{0,2} = 64,8P_{cp}^2 - 243,3P_{cp} + 393,9$	0,95
	$\Delta l/l = 13,2P_{cp}^2 - 72,5P_{cp} + 155,5$	0,78

Продовження таблиці 1

Напрямок у листі титану	Рівняння регресії	Коефіцієнт надійності апроксимації R2
ДН	$\omega_{0,2} = -0,16P_{cp}^2 + 0,74P_{cp} - 0,50$	0,75
	$\omega_B = -0,28P_{cp}^2 + 1,40P_{cp} - 0,91$	0,84
ПН	$\sigma_B = -65,2P_{cp}^2 + 379,4P_{cp} - 163,8$	0,73
	$\sigma_{0,2} = 71,5P_{cp}^2 - 287,2P_{cp} + 557,0$	0,90
	$\Delta l / l = 1,9P_{cp}^2 - 20,4P_{cp} + 95,8$	0,95
	$\omega_{0,2} = 0,29P_{cp}^2 - 1,33P_{cp} + 1,84$	0,75
	$\omega_B = 1,4P_{cp}^2 - 7,5P_{cp} + 10,8$	0,81

У четвертому розділі представлено вплив текстури структури та її фрактальної розмірності на характер руйнування дротів сталевих канатів захисних оболонок енергоблоків АЕС. Встановлено, що після експлуатаційного розриву дротів канатів захисних оболонок АЕС меншим значенням параметра пошкоджуваності ω та показникам пластичності (відносного подовження δ , звуження ψ) відповідає більша фрактальна розмірність їх зламів, і навпаки (табл. 2). Досліджували два фрагмента дротів $\varnothing \sim 5$ мм з арматурних канатів (АК) умовно 1 і 2 довжиною 500 – 550 мм. Термін експлуатації АК1 – 15 років. Термін експлуатації АК2 – 5 років. Для досліджень обрано два каната з різним терміном експлуатації (умовно АК1 і АК2 ділянки умовно «зліва» та «справа» від місця розриву), а також неушкоджена частина дротів, яку умовно названо «ціла».

Таблиця 2

Середні величини механічних характеристик металу дротів досліджуваних АК

Канат	Ділянка	σ_B	$\sigma_{0,2}$	D	ω	δ	ψ
		МПа				%	
АК1	«зліва»	1664,4	1469,0	1,11	0,13	1,1	10,8
	«справа»	1741,6	1530,4	1,08	0,39	2,3	15,7
	«ціла»	1806,0	1586,2	–	0,59	5,2	37,2
АК2	«зліва»	1785,0	1544,4	1,07	0,53	4,2	34,2
	«справа»	1695,1	1370,2	1,10	0,49	3,2	13,1
	«ціла»	1754,3	1456,9	–	0,84	6,3	46,8
ТУ У 00191046.014-95		1670,0	1401,3*	–	–	4,0	–

* значення отримано розрахунком, оскільки у ТУ У 00191046.014-95 вказано лише клас міцності 1400 та зусилля, що відповідає умовній границі плинності $P_{0,2} = 27500$ Н для дроту діаметром 5 мм.

Нами було встановлено, що передчасне руйнування при тривалій експлуатації канатів захисних оболонок АЕС може відбуватися внаслідок

зародження та поширення корозійних тріщин за рахунок фретинг-корозії канату АК1 та канату АК2.

Далі представлено результати дослідження сплаву Ст20К після випробувань на одновісний розтяг. Має місце анізотропія механічних характеристик (табл. 3). Нами встановлено, що спостережувана анізотропія механічних характеристик сплаву Ст20К (межа міцності σ_B , плинності $\sigma_{0,2}$ та відносьне подовження δ) (табл. 3) обумовлено кристалографічною текстурою (рис. 10).

Таблиця 3

Механічні властивості сплаву Ст20К, вирізані в різних напрямках

Кут з НП, град.	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_A , МПа	$\delta = \Delta l/l$, %
0	255	400	31,0
15	258	405	30,2
30	265	416	28,8
45	271	425	28,0
60	270	424	28,4
75	266	418	29,4
90	265	415	30,0

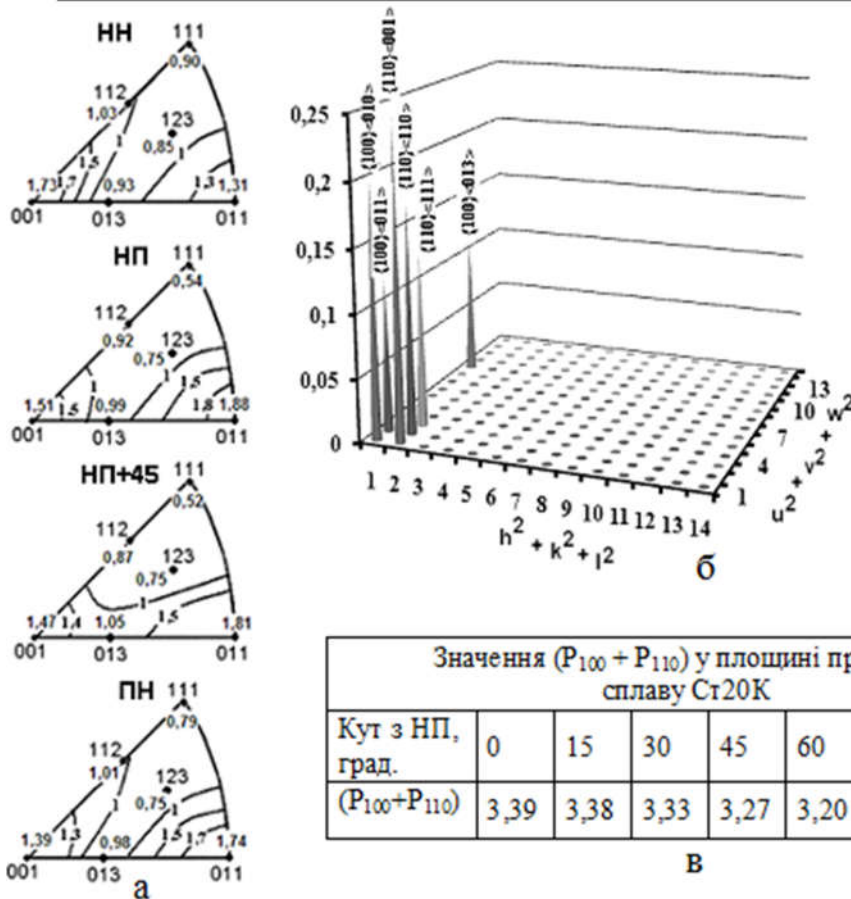


Рис. 9. ОПФ сплаву Ст20К (а), тривимірна ОПФ (б) у просторі ідеальних орієнтацій, розрахована на базі ОПФ НН та ОПФ НП, та комбінації ідеальних орієнтацій типу $\{100\} \langle hkl \rangle + \{110\} \langle hkl \rangle$ з різним об'ємним вмістом, визначених аналізом ФРО.

Проведений нами аналіз ФРО (рис. 9, б) показав, що текстура може бути

описана комбінацією ідеальних орієнтацій типу $\{100\} \langle hkl \rangle + \{110\} \langle hkl \rangle$ з різним об'ємним вмістом (рис. 9, в). Відповідні рівняння регресії з високими коефіцієнтами надійності апроксимації мають вигляд

$$\sigma_{0,2} = -641,7P_{100+110}^2 + 4150P_{100+110} - 6439; R^2 = 0,99 \quad (10)$$

$$\sigma_B = -1026 \cdot P_{100+110}^2 + 6637P_{100+110} - 10308; R^2 = 0,99 \quad (11)$$

$$\delta = 145,7P_{100+110}^2 - 947,4P_{100+110} - 1567; R^2 = 0,99 \quad (12)$$

Відомо, що оцінку опору конструкційних матеріалів крихкому руйнуванню зазвичай проводять шляхом випробування при різних температурах серії зразків Шарпі на ударну в'язкість (КCV). В результаті будують графік залежності величини ударної в'язкості від температури і встановлюють критичну температуру переходу матеріалу з в'язкого в крихий стан (T_x). Як відомо, цій температурі відповідає вид зламу, в якому частка крихкої і в'язкої складової знаходиться у співвідношенні «50:50». Далі представлено результати нашого дослідження сплаву Ст20К при випробуваннях на ударну в'язкість. Випробування на ударний вигин були проведені у різних напрямках, а саме, у НП, ДН (тобто (НП+45°) і ПН. Інформативність результатів випробувань на ударну в'язкість можна підвищити не тільки шляхом застосування сучасних методик і високошвидкісних систем реєстрації діаграм зміни зусилля з часом руйнування [2], але й дослідженням взаємозв'язку значень ударної в'язкості і фрактальної розмірності діаграм залежності прикладеного навантаження від часу руйнування.

Результати фрактографічного аналізу зламів представлені на рис. 10. Нами встановлено, що у всьому діапазоні температур випробувань (-50 ... +50°C) метал у всіх напрямках руйнується за механізмом квазісколу. Зі збільшенням температури випробування частка в'язкої складової у квазісколі зростає. На рис. 11 представлено діаграми $P(\tau)$, що відображають залежність прикладеного зусилля P від часу τ руйнування зразків при випробуваннях на ударну в'язкість зразків Шарпі. Результати дослідження фрактальної розмірності зламів (D_f) (рис. 11) і (D_c) відповідних діаграм $P(\tau)$ (рис. 12), а також питома енергія руйнування показано у табл. 4.

Таблиця 4

Фрактальна розмірність зламів, діаграм $P(\tau)$ і середня питома енергія руйнування $W_{\text{пит.}}$

t, °C	Кут с НП, °			D_f ср	Кут с НП, °			D_c ср	Кут с НП, °			$W_{\text{пит.}}$ ср, Дж/см
	0	45	90		0	45	90		0	45	90	
	ФР D_f				ФР D_c				Е уд, Дж/см			
-50	1,59	1,64	1,60	1,61	1,25	1,29	1,23	1,26	0,78	0,90	0,96	0,87
+20	1,55	1,59	1,56	1,57	1,23	1,26	1,17	1,22	5,0	13,3	9,88	9,42
+50	1,52	1,55	1,54	1,54	1,12	1,16	1,13	1,14	20,8	47,2	48,0	38,67

З табл. 4 видно, що мінімальні значення фрактальних розмірностей D_c відповідають підвищеній температурі + 50°C, а найнижчі величини ФР зламів мають місце при підвищеній температурі +50°C.

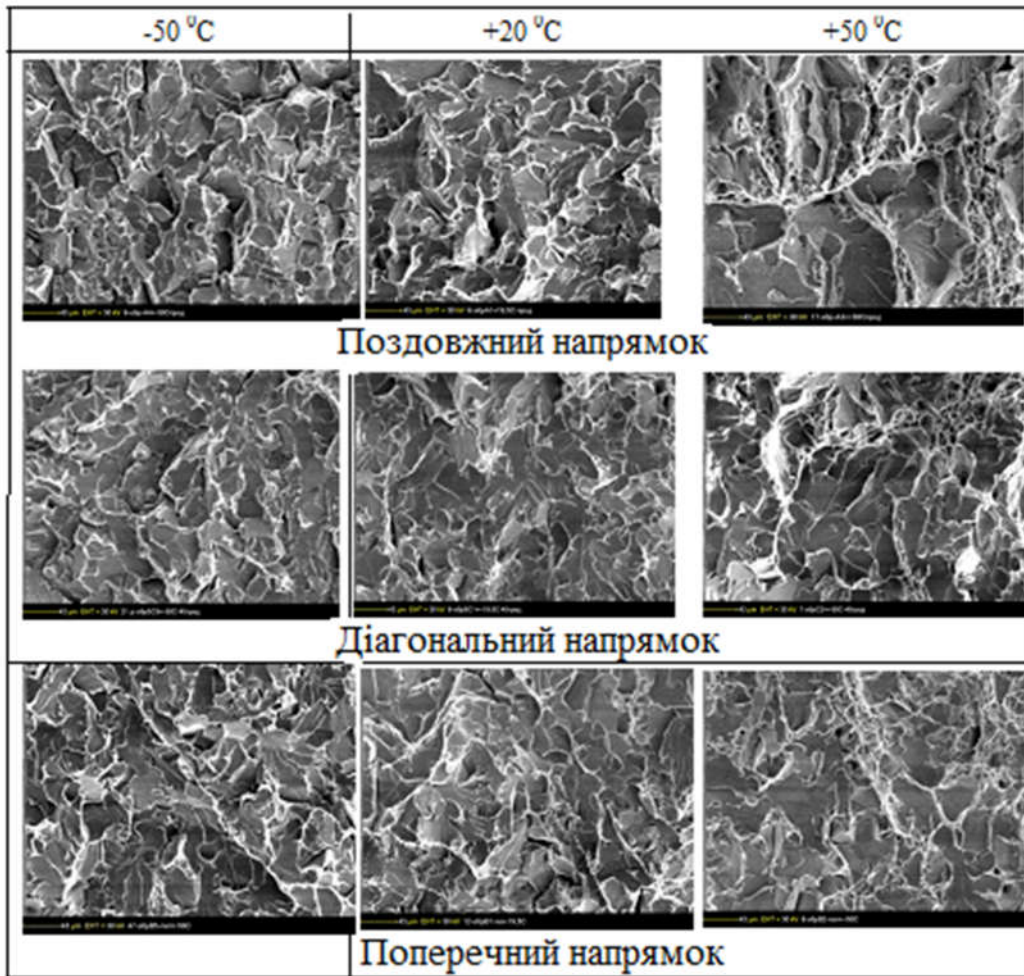


Рис. 10. Фрактограми зламів після ударних випробувань зразків зі сплаву Ст20К

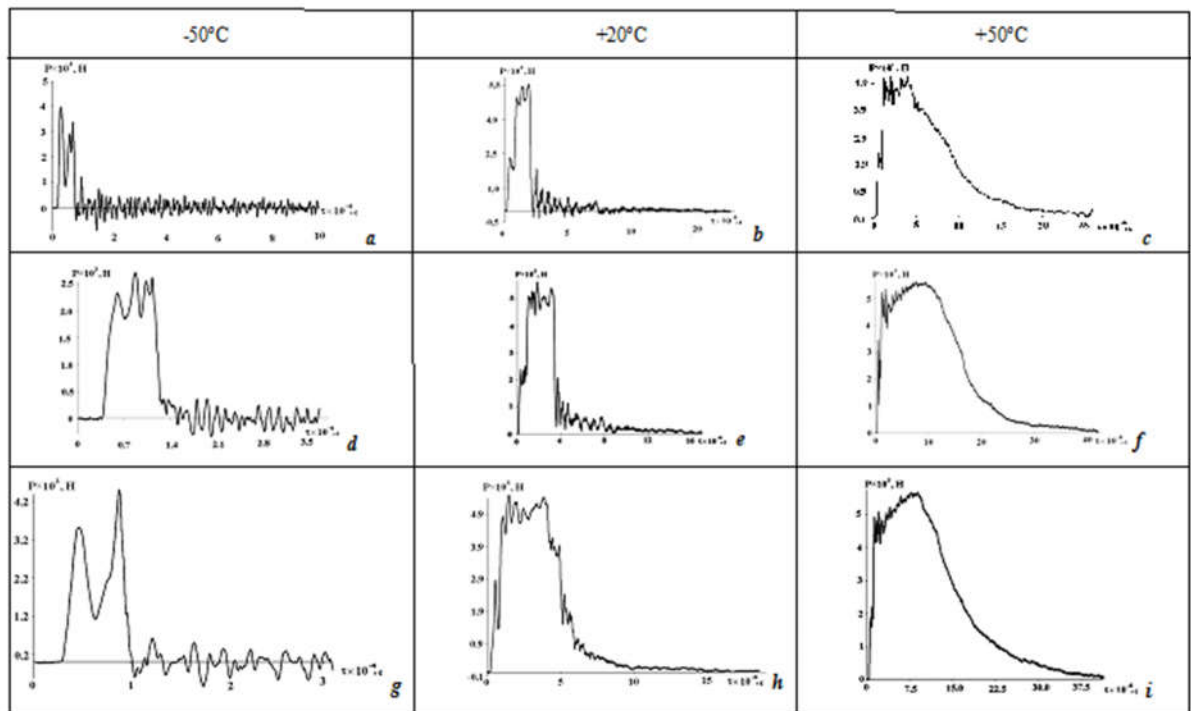


Рис. 11. Діаграми залежності зусилля (P) від часу (τ) при ударних випробуваннях: а-с - НП; d-f - ПН; g-i - НП + 45°.

Аналогічні результати дав раніше (підрозділ 4.3) аналіз фрактальної розмірності відповідних зламів D_f . У той же час ударна в'язкість при температурі

випробувань + 50°C максимальна. Це свідчить про в'язкий характер руйнування.

Максимальні значення як D_c , так і D_f встановлені при зниженій температурі випробувань -50°. При цій же температурі встановлена мінімальна величина ударної в'язкості, що відповідає крихкому характеру руйнування досліджуваних зразків.

Таким чином, крихкому руйнуванню при випробуваннях на ударний вигин зразків Шарпі зі сплаву Ст20К відповідає більша фрактальна розмірність (ФР) діаграм зміни зусилля з часом, а також ФР відповідних зламів, але менша ударна в'язкість, і навпаки. Підвищені значення ФР зламів і ФР діаграм зміни зусилля з часом при випробуваннях на ударний вигин зразків сплаву Ст20К у напрямку НП+45 є обумовленим впливом кристалографічної текстури $\{001\} \langle 110 \rangle$, типової для сплавів з ОЦК ґраткою.

ВИСНОВКИ

1. Градієнт текстури від центру до периферії зразка має місце при гвинтовій екструзії сплаву 10Г2. При цьому вісь екструзії поступово обертається навколо напрямку $\langle 111 \rangle$ від напрямку $\langle 113 \rangle$ до напрямку $\langle 110 \rangle$ у різних шарах зразка.

2. Має місце анізотропія параметру пошкоджуваності та механічних властивостей при одновісних випробуваннях на розтяг після деформації знакозмінним вигином у листах сплавів заліза з вуглецем 08кп з ОЦК ґратами, Х18Н10 з ГЦК ґратами та комерційного титану ВТ1-0 з ГЦУ ґратами. Відповідна анізотропія, обумовлена кристалографічною текстурою, зменшується у межах 3-5 циклів знакозмінного вигину.

3. Меншим значенням параметра пошкоджуваності та показникам пластичності дротів канатів захисних оболонок АЕС відповідає більша фрактальна розмірність їх зламів, і навпаки. Передчасне руйнування при тривалій експлуатації канатів захисних оболонок АЕС може відбуватися внаслідок зародження та поширення корозійних тріщин за рахунок фретинг-корозії.

4. Анізотропія механічних властивостей досліджуваного сплаву Ст20К у площині прокатки обумовлена, головним чином, кристалографічною текстурою металу, що підтверджується даними кореляційного та регресійного аналізу.

5. Крихкому руйнуванню при випробуваннях на ударний вигин зразків Шарпі зі сплаву Ст20К відповідають більші значення фрактальної розмірності як діаграм зміни навантаження з часом, так і фрактальної розмірності відповідних зламів, але менша ударна в'язкість, і навпаки.

6. Спостережувана анізотропія фрактальної розмірності зламів і діаграм зміни навантаження з часом при випробуваннях на ударний вигин, що має місце у площині прокатки сплаву Ст20К, є обумовленою впливом кристалографічної текстури $\{001\} \langle 110 \rangle$, типової для сплавів з ОЦК ґратками.

7. Аналіз фрактальної розмірності діаграм зміни навантаження з часом при випробуваннях на ударний вигин та визначення енергії руйнування при цьому дозволяють підвищити достовірність оцінки схильності сплаву Ст20К до крихкого руйнування.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Днепренко В. Н. Исследование природы формирования дислокационной структуры в различных компонентах текстуры прокатанной меди / В. Н. Днепренко, Л. Н. Ларионов, Е. Н. Стоянова // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 1982. – Т.4, вып. 5. – С. 58-66. – URL: <https://mfint.imp.kiev.ua/ru/toc/v04/i05.html>
2. Усов В. В. Фрактальная природа дислокационной структуры низколегированной стали контролируемой прокатки / В. В. Усов, Н. М. Шкатуляк // *Изв. вузов. Физика.* – 2004. – № 11. – С. 42–48. – URL: <http://sun.tsu.ru/mminfo/000025137/image/11-2004.pdf>
3. Волков И. А. Уравнение состояния вязко-уруго-пластических сред с повреждениями [Текст] / И. А. Волков, Ю. Г. Коротких. –М.: Физматлит, 2008. – 424 с. –URL: <https://books.google.nl/books?isbn=5457967328>
4. Chaboche J.-L. Thermodynamically founded CDM models for creep and other conditions, in: *Creep and damage in materials and structures*, CISM No. 399 (edited by Altenbach H., Skrzypek J. J.), New York: Springer Verlag, 1999. – P. 209-278. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7091-2506-9_5
5. Lemaitre J. Anisotropic damage law of evolution / J. Lemaitre, R. Desmorat, M. Sauzay // *Eur. J. Mech. A/Solids/* – Vol. 19, No. 2.. – 2000. – P. 187-208. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0997753800001613>
6. Luo A. C. J. A large anisotropic damage theory based on an incremental complementary energy equivalence model / A. C. J. Luo, Y. Mou, R. P. S. Han. // *International Journal of Fracture.* – 1995. – Vol. 70, No. 1. – P. 19-34. – <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00018133>
7. Chow C. L. An anisotropic theory of elasticity for continuum damage mechanics / C. L. Chow, J. Wang // *International Journal of Fracture.* – 1987. – Vol. 33, No. 1. – P. 3-16. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00034895>
8. Кінетика розсіяного руйнування металевих конструкційних матеріалів при пружно-пластичному деформуванні / М. І. Бобир, А. П. Грабовський, О. П. Халімон, О. В. Тимошенко, О. М. Масло // *Проблеми прочності.* – 2007. – № 3. – С. 23-34. – URL: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/48064/02-Bobir.pdf?sequence=1>
9. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. –М: Наука, 1974. – 312 с. – URL: <https://lib-bkm.ru/13776>
10. Bobyr M. Phenomenological damage models of anisotropic structural materials / M. Bobyr, O. Khalimon, O. Bondarets // *Journal of mechanical engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute»/* – 2013. – Серія Машинобудування №67. – С. 1-13. – URL: <http://journal.mmi.kpi.ua/old/article/view/37390/34154>
11. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы [Текст] / Б. Мандельброт – М: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с. –URL: https://kpfu.ru/portal/docs/F845951572/Igudesman._Fraktalnaya.geometriya.pdf
12. Fractal dimension of grain boundaries and mechanical properties of the metal of oxygen cylinders / V. V. Usov, M. D. Rabkina, N. M. Shkatulyak, T. S. Cherneva // *Materials Science.* – 2015. – Vol. 50, No. 4. – P. 612-620. – URL: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/13593>

13. Синергетика и фракталы в материаловедении [Текст] / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксагоев. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
14. Usov V. V. Fractal nature of the brittle fracture surfaces of metal / V. V. Usov, N. M. Shkatulyak // Materials Science. – 2005. – Vol. 41, No. 1. – P. 62 – 66. – URL: https://www.researchgate.net/publication/226818869_Fractal_Nature_of_the_Brittle_Fracture_Surfaces_of_Metal
15. Texture, microstructure, and fractal features of the low-cycle fatigue failure of the metal in pipeline welded joints / V. V. Usov, E. E. Gopkalo, N. M. Shkatulyak, A. P. Gopkalo, and T. S. Cherneva // Russian Metallurgy (Metally). – 2015. – Vol. 2015, No. 9. – P. 759–770. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0036029515090128>
16. Wiencek K. Fractal Characterization of Fractured Surfaces of a Steel Containing Dispersed Fe₃C Carbide Phase / K. Wiencek, A. Czarski, T. Skowronek // Materials Characterization. – 2001. – Vol. 46, No. 2-3. – P. 235 – 238. – URL: [doi:10.1016/S1044-5803\(01\)00129-2](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(01)00129-2)
17. Bouchaud E. Fractal dimension of fractured surfaces: a universal value / E. Bouchaud, G. Lapasset, J. Planes // Europhysics Letters. – 1990. – Vol. 13, No. 1. – P. 73–79. – URL: <http://sci-hub.bz/b8e5a456fdd51ab606a445bf304ea675/bouchaud1990.pdf>.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- 1 Savchuk E. S. Anisotropic damage of titanium plates under uniaxial tension after reverse bending / N. M. Shkatulyak, E. S. Savchuk, V. V. Usov // Journal of Materials Research and Technology (Scopus). – 2018. – Vol. 7, No 1. – P. 82–88. DOI: 10.1016/j.jmrt.2017.06.007 – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785417300649>
- 2 Savchuk O. S. On the causes of fractures of reinforcing ropes of the protective shells of power-generating units of nuclear power plants / V. M. Torop, M. D. Rabkina, O. O. Shtofel, V. V. Usov, N. M. Shkatulyak, O. S. Savchuk // Materials Science (Scopus) – 2018. – Vol. 54, No. 2. – P. 240-249. – DOI: 10.1007/s11003-018-0179-y
- 3 Savchuk E. S. 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. – Vol. 2016, ID 5021749. – P. 1-8. – URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5021749>
- 4 Savchuk E. S. Anisotropic Damage of Low-Alloy Steel Plates Under Uniaxial Tension After Alternating Bending / N. M. Shkatulyak, E. S. Savchuk, V. V. Usov // American Journal of Mechanical and Industrial Engineering. – 2016. – No. 1(2). – P. 10-14. DOI: 0.11648/j.ajmie.20160102.11. – URL: <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ajmie>
- 5 Savchuk E. S. 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. Daskalytsa // Mechanics, Materials Science & Engineering. – 2016. – Vol. 6. – P. 56-63. DOI: 10.13140/RG.2.2.35491.04640 – URL: <https://issuu.com/mmsejournal/docs/n6>
- 6 Савчук Е. С. Текстурированные особенности объемных наноструктурных

матеріалів, отриманих винтовою екструзією / Е. С. Савчук, Н. М. Шкатуляк // Фізика, Електроніка, Електротехніка. ФЕЕ: 2017. – Матеріали та програма науково-технічної конференції. – Суми: Сумський державний університет, 182 с. – С. 40. – URL:

<http://elitconf.sumdu.edu.ua/index.php/electronics/fee17/paper/view/2873>

7 Savchuk E. S. Texture and anisotropy of mechanical properties of the metal of the distillation oil column / E. S. Savchuk, V. V. Usov, D. V. Bargan // Topical Problems of Semiconductor Physics: IX International Conf. (Truskavets, May 16–20, 2016 p.): AbstractBook. –Truskavets, 2016. – P. 43-45.

8 Савчук Е. С. Влияние знакопеременного изгиба на поврежденность стали при одноосном растяжении / Н. М. Шкатуляк, Е. С. Савчук, В. В. Усов // Механические свойства современных конструкционных материалов: – Міжнар. наук. читання імені чл.-кор. РАН І. А. Одинг, Москва, 6-7 вересня 2016 р. / Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2016. – С. 148-149 –URL: http://files.imetran.ru/2016/oding/sbornik_oding_2016.pdf

9 Савчук Е. С. Текстура, механические свойства и коэрцитивная сила стального резервуара / Н. М. Шкатуляк, Е. С. Савчук, Драгомерецкая Е.А. // Міжнар. наук. читання імені чл.-кор. РАН І. А. Одинг, Москва, 6-7 вересня 2016 р. / Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2016 р. – С. 147-148 – URL: http://files.imetran.ru/2016/oding/sbornik_oding_2016.pdf

10 Савчук Е.С. Распределение текстуры по сечению трубчатых образцов из нержавеющей стали / В.В. Усов, Н.М. Шкатуляк, Е.С. Савчук // Механические свойства современных конструкционных материалов. – Міжнар. наук. читання імені чл.-кор. РАН І. А. Одинг, Москва, 6-7 вересня 2018 р. / Сборник материалов. –М: ИМЕТ РАН, 2018. –С. 158. –URL: http://files.imetran.ru/2016/oding/ProgramSbornik_Print_A5.pdf

АНОТАЦІЯ

Савчук О. С. Вплив деформації на структурні перетворення, механічні властивості та процеси руйнування сплавів заліза та титану. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.04.07 «Фізика твердого тіла». – Державний заклад «Південноукраїнський національний університет імені К. Д. Ушинського», Одеса, 2019.

Дисертацію присвячено визначенню фізико-математичних моделей впливу різного виду деформації (гвинтова екструзія, знаковмінний вигин, ударний вигин, довготривала знаковмінна деформація при експлуатації арматурних канатів захисних оболонок АЕС) на текстуру, механічні властивості, параметр пошкоджуваності, фрактальність структури та характер руйнування типових конструкційних сплавів заліза з вуглецем (зокрема 10Г2, Ст20К, 08кп з ОЦК граткою, 05Х18Н10 з ГЦК граткою, комерційно чистого титану ВТ1-0 з ГЦУ граткою).

Розуміння фізичної природи впливу різних чинників на кристалічні тіла є тією основою, на якій можливе їх ефективне практичне використання.

Структурний стан металевого матеріалу визначає ізоτροпію або анізотропію його властивостей. Одним з головних структурних станів полікристалічних тіл є кристалографічна текстура, яка виникає при будь-яких зовнішніх впливах на метал. У полікристалічних металевих матеріалах текстура є причиною анізотропії фізико-механічних властивостей. Однак ефекти текстури рідко враховуються в інженерній практиці.

Наприклад, в даний час швидко зростає інтерес до отримання так званих об'ємних ультра-дрібнозернистих (УДЗ) матеріалів, які володіють підвищеною міцністю та водночас доброю пластичністю. Однією з перспективних технологій отримання УДЗ матеріалів є гвинтова екструзія, при здійсненні якої деформація не є однорідною за перетином деформованого металу. Це може призвести до неоднорідності текстури за перетином зразка та виникненню певної анізотропії після гвинтової екструзії, що є практично невивченим.

Іншим прикладом є знакозмінна деформація при правці (випрямленні) листового та рулонного металу на роликівих правильних машинах, що дозволяє зменшити внутрішнє напруження металу і надати йому необхідні площинні характеристики. При правці матеріал піддається знакозмінному вигину (ЗВ), при якому, незважаючи на відносно малу пластичну деформацію розтягування і стиснення, відбувається зміна механічних характеристик і структури металу, зокрема кристалографічної текстури. При цьому виникають і накопичуються неконтрольовані мікротріщини, мікропори. Як раніше було показано у роботах В.Н. Днепренка, В. В. Усова та Н. М. Шкатуляк, кожному компоненту текстури притаманна певна дислокаційна структура. Тому кристалографічна текстура також повинна впливати на розподіл мікроскопічних пошкоджень структури, що накопичуються при знакозмінному вигині. Однак цей вплив не досліджено.

Для характеристики накопичення пошкоджень використовують так званий параметр пошкоджуваності ω , що був запропонований ще в ранніх роботах Л.М. Качанова, Ю.Н. Работнова та розвивається й в наш час. Параметр пошкоджуваності інтерпретується як відносне скорочення ефективної площі поперечного перерізу ($S_0 - S$), що несе навантаження внаслідок накопичення пошкоджень. Деградація матеріалу пояснюється як поступове зменшення ефективної площі, яка реально несе розтягувальне навантаження і визначає опірність зразка розтягуванню

$$\omega = (S_0 - S) / S_0$$

При такій інтерпретації параметр пошкоджуваності для одновісного розтягу може бути отриманий зі змін модуля пружності.

Параметр пошкоджуваності $0 \leq \omega \leq 1$ характеризує сукупність мікроструктурних змін у матеріалі, викликаних появою та накопиченням мікрodefektів під час експлуатаційних навантажень. Але відсутність достатнього фізичного обґрунтування моделей (кінетичних рівнянь) породжує неоднозначність в експериментальних оцінках параметра пошкоджуваності ω в залежності від способу його визначення для одного і того ж зразка досліджуваного матеріалу. Тому зв'язок параметра пошкоджуваності зі зміною структурного стану під дією зовнішніх впливів, а також зв'язок фізико-механічних

властивостей з фрактальністю структури та текстурою поки що можна отримати лише на основі відповідного кореляційного та регресійного аналізу, що широко використано у даній роботі.

У даній роботі показано, що має місце градієнт текстури по перетину зразка сплаву 10Г2 від центру до периферії після ГЕ у різних шарах зразка. Встановлено, що вісь екструзії у зразку поступово обертається навколо напрямку $\langle 111 \rangle$ від напрямку $\langle 113 \rangle$ до напрямку $\langle 110 \rangle$. При цьому спостерігаються різні компоненти текстури зсуву типу $\{110\} \langle uvw \rangle$ у різних шарах зразка. У даному випадку мається на увазі, що площини $\{110\}$ є площинами зсуву.

Показано, що має місце анізотропія параметра пошкоджуваності та механічних властивостей при одноісних випробуваннях на розтяг після деформації знакозмінним вигином у листах сплавів заліза з вуглецем 08кп з ОЦК ґратами, Х18Н10 з ГЦК ґраткою та комерційного титану ВТ1-0 з ГЦУ ґраткою. Відповідна анізотропія, обумовлена кристалографічною текстурою, зменшується у межах 3-5 циклів знакозмінного вигину. На основі кореляційного та регресійного аналізу знайдено фізико-математичну модель зв'язку параметрів текстури та пошкоджуваності в залежності від числа циклів знакозмінного вигину.

Встановлено, що після експлуатаційного розриву дротів канатів захисних оболонок АЕС меншим значенням параметра пошкоджуваності ω та показникам пластичності (відносного подовження δ , звуження ψ) відповідає більша фрактальна розмірність їх зламів, і навпаки. Передчасне руйнування при тривалій експлуатації канатів захисних оболонок АЕС може відбуватися внаслідок зародження та поширення корозійних тріщин за рахунок фретинг-корозії.

Показано, що анізотропія механічних властивостей досліджуваного сплаву Ст20К у площині прокатки обумовлена, головним чином, кристалографічною текстурою металу, що підтверджується даними кореляційного та регресійного аналізу.

Встановлено, що крихкому руйнуванню при випробуваннях на ударний вигин зразків Шарпі зі сплаву Ст20К відповідають більші величини як фрактальної розмірності діаграм зміни навантаження з часом, так і фрактальної розмірності відповідних зламів, але менша ударна в'язкість і навпаки. Показано, що підвищені значення фрактальної розмірності зламів і діаграм зміни навантаження з часом при випробуваннях на ударний вигин мають місце для зразків сплаву Ст20К, вирізаних у діагональному напрямку, обумовлені впливом кристалографічної текстури $\{001\} \langle 110 \rangle$, типової для сплавів з ОЦК ґратами.

Ключові слова: текстура, анізотропія, механічні властивості, пошкоджуваність, фрактальність, мікроструктура, кореляція, регресія.

ABSTRACT

Savchuk O. S. Effect of deformation on structural transformations, mechanical properties and destruction processes of alloys of iron and titanium. – Qualifying scientific work on the manuscript.

Thesis for 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. Ushinsky, Odessa, 2018.

Thesis is devoted to the finding of the physical and mathematical models of the influence of different types of deformation (twist extrusion, alternating bending, impact bending, long-time changeable deformation during operation of reinforcing ropes of protective shells of the Nuclear Power Plant – NPP) on the texture, mechanical properties, the parameter of damage, fractality of the structure and the nature of the destruction of typical construct alloys of iron with carbon (in particular 1513, DC01, St45-8 with BCC lattices, 8XCrNi18-10 with FCC lattice, commercial titanium VT1-0 with HPP lattice).

Understanding the physical nature of various factors influence on crystalline bodies is the basis on which their effective practical use is possible. The texture is the cause of the anisotropy of physical and mechanical properties in polycrystalline metallic materials. However, texture effects are rarely taken into account in engineering practice.

For example, there is now a growing interest in obtaining so-called volumetric ultra-fine-grained (UFG) materials that have high strength and, at the same time, good plasticity. One of the promising technologies for obtaining UFG materials is a twist extrusion, in which the deformation is not homogeneous through the cross-section of deformed metal. The appearance of certain anisotropy after twist extrusion caused by the heterogeneity of the texture through the sample cross-section can to appearance, which is practically uninvestigated.

The alternating bending deformation at the straightening of the sheet and roll metal on roller-straightened machines, which reduces the internal stresses of the metal and gives it the necessary plane characteristics is another example.

Take place a change of mechanical characteristics and structure of the metal, in particular, of the crystallographic texture, during the alternating bending despite the relatively small plastic strain of stretching and compression. The uncontrolled microcracks, micropores arise and accumulate at this.

As was earlier shown in the works of V. N. Dneprenko, V. V. Usov and N. M. Shkatulyak, each texture component has a specific dislocation structure. Therefore, the crystallographic texture should also effect on the distribution of microscopic damages, which accumulated in the metal during the alternating bending. However, this effect has not been investigated.

The so-called damage parameter ω is used to characterize of damages accumulation. The damage parameter ω is interpreted as a relative reduction of the effective loading bearing capacity the cross-sectional area S_0-S as a result of accumulation of damages. The degradation of the material is explained as a gradual decrease of the effective area, which actually carries the tensile load and determines the resistance of the sample to stretching

$$\omega = (S_0 - S)/S_0 .$$

At such interpretation the damage parameter for uniaxial tension can be obtained from changes of the elastic modulus.

The damage parameter $0 \leq \omega \leq 1$ characterizes a set of micro structural changes in

the material caused by the appearance and accumulation of micro defects during operational loads. But the lack of sufficient physical grounding of the models (of kinetic equations) gives rise to ambiguity of the experimental estimates of the damage parameter ω , depending on the method of its determination for the same sample of the investigated material. Therefore, the connection between the damage parameter with a change in the structural state under the external influence, as well as the connection of physical and mechanical properties with the texture and fractality of the structure, can still be obtained only on the basis of the correlation and regression analysis that we widely have used in this work.

In this work it is shown that after twist extrusion takes place the texture gradient through the cross-section of the X10Mn2 alloy from the center to the periphery of the sample. It has been established that the extrusion axis in the sample gradually rotates around the direction $\langle 111 \rangle$ from the direction $\langle 113 \rangle$ to the direction $\langle 110 \rangle$. In this case, different torsion texture components of the $\{110\} \langle uvw \rangle$ in different sample layers are observed. In this case, we mean that the planes $\{110\}$ are torsion planes.

It was shown that the anisotropy of the parameter of damage and mechanical properties take place at tests on tensile strength after a previous deformation by the alternating bending in sheets of alloys DC01, St45-8 with BCC lattices, 8XCrNi18-10 with FCC lattice and commercial titanium VT1-0 with HPP lattice. The corresponding anisotropy, due to the crystallographic texture, decreases within 3-5 cycles of alternating bending.

It was established that a smaller values of plasticity characteristics (relative lengthening δ , contraction ratio ψ) as well as of the damage parameter ω corresponds to the larger value of destruction surfaces fractal dimension of wires of protective ropes of the NPP, and vice versa. Premature destruction during prolonged operation of the ropes of protective shells of the NPP can occur due to the origin and development of corrosion cracks due to fretting corrosion.

It is shown that the anisotropy of the mechanical properties of the investigated alloy St45-8 in the rolling plane is due mainly to the crystallographic texture of the metal, which is confirmed by the data of correlation and regression analysis.

It has been established that the larger values of fractal dimension of the load change diagrams over time, as well as the fractal dimension values of the corresponding surfaces destruction at the Charpy tests, but less impact strength are corresponded to the brittle fracture, and vice versa. In this case, the crystallographic texture $\{001\} \langle 110 \rangle$ typical for alloys with BCC lattices caused increased values of the fractal dimension of surfaces destructions as well as the increased values of the fractal dimension of the load change diagrams over time in the tests on the impact bend for St45-8 alloy samples that were cut out in the diagonal direction in the rolling plane.

Keywords: texture, fractality, anisotropy, microstructure, damage, mechanical properties, correlation, regression.

Підписано до друку 05.04.2019 р. Формат 60x88/16.
Папір офсетний. Обсяг 1 друк. арк. Наклад 100 прим.
Надруковано в інформаційно-видавничому центрі
Університету Ушинського
65020, м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 26