

Міністерство освіти і науки України  
Державний заклад «Південноукраїнський національний педагогічний  
університет імені К. Д. Ушинського»

**ДЯЧОК ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 539.21+669.176

**РОЗВИТОК ПОШКОДЖЕНЬ В ТЕКСТУРОВАНИХ ПОЛІКРИСТАЛАХ  
 $\alpha$ -ЗАЛІЗА З ФЕРИТНО-МАРТЕНСИТНОЮ СТРУКТУРОЮ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Одеса – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фізики в Державному закладі «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського», Міністерство освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**БРЮХАНОВ Аркадій Олексійович**,  
Державний заклад «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського»,  
професор кафедри фізики

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**ВІКУЛІН Іван Михайлович**,  
Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова,  
завідувач кафедри фізики оптичного зв'язку;

доктор фізико-математичних наук, доцент  
**БАЛАБАЙ Руслана Михайлівна**,  
Державний вищий навчальний заклад «Криворізький державний педагогічний університет», професор  
кафедри фізики та методики її навчання.

Захист дисертації відбудеться «12» вересня 2017 року о 16<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 41.053.07 при Державному закладі «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського» за адресою: вул. Старопортофранківська, 26, м. Одеса, Україна, 65020, ауд. № 52.

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

Автореферат розісланий «7» серпня 2017 року

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О. Х. Тадеуш

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Структурні зміни в полікристалах, що протікають при зовнішніх впливах на них, відображаються на їх текстурі і відповідно, на анізотропії властивостей полікристалів. Це проявляється, зокрема, в процесі пластичної деформації полікристалів, при якій відбуваються інтенсивне ковзання, двійникування або дифузійна повзучість. Вивчення текстур деформації дозволяє отримати інформацію про внесок різних деформаційних механізмів в загальну формозміну конструкційних матеріалів та обумовлену текстурою анізотропію їх властивостей. Тому в методах сучасної фізики твердого тіла вивчення механізмів пластичної деформації на основі аналізу текстур розглядається як самостійний напрямок – «текстурний метод аналізу» пластичної деформації твердих тіл. Більшість матеріалів, в яких «ефект текстури» проявляється найбільш відчутно, використовується у вигляді листів, які в процесі виготовлення деталей піддаються деформаціям вигину, глибокої витяжки, розтягу, стисненню, термомеханічній обробці, зварюванню тощо. Найбільш широко листові матеріали застосовуються на транспортних засобах, чисельність яких на сьогоднішній день ставить серйозні екологічні, енергетичні та матеріаломісткі проблеми. Тобто зменшення ваги транспортних засобів актуально в їх виробництві, особливо у виробництві автомобілів, як найбільш численного транспортного засобу.

Сплави заліза, є основою виробництва транспортних засобів. Для зниження їх ваги розроблені спеціальні види сталей з високими питомими характеристиками механічних властивостей. До них відноситься група сталей (сталі DC за європейською класифікацією) з структурою твердого розчину марганцю (Mn) і кремнію (Si) в  $\alpha$ -залізі. Інша перспективна група сталей – це сталі з подвійною структурою (сталі DP за європейською класифікацією), в якій одночасно присутня м'яка феритна фаза та тверда мартенситна, перша з якій забезпечує високу пластичність, а друга – міцність. Вміст фаз контролюється хімічним складом та умовами термічної обробки.

З точки зору поліпшення здатності до формозміни листів зі структурою  $\alpha$ -заліза необхідні дослідження, які дозволяють встановити закономірності пластичної текучості металу при деформаціях розтягу, стиску, вальцюванням, штампуванням тощо. Текстурний стан листів, які піддаються деформації чи термомеханічній обробці, істотно впливає на весь процес зміни структури і відповідно властивостей кінцевого продукту. Саме тому текстура у багатьох дослідженнях твердих тіл слугує потужним інструментом для опису процесів пластичної деформації і термічної обробки. Роль, яку відіграє текстура в процесі формування анізотропії властивостей полікристалів, може бути ще і додатковим резервом покращення якості напівфабрикатів та кінцевої продукції за головними параметрами.

Для використання «ефекту текстури» потрібні надійно встановлені теоретичні механізми формування текстури в полікристалі при різних видах деформації, які в свою чергу були побудовані на основі результатів досліджень структур полікристалів і зв'язку з макровластивостями під впливом дій на полікристал зовнішніх полів. Для моделювання технологічних процесів виготовлення деталей

пресуванням, прокаткою, іншими засобами потрібно знати параметри текстури, що висвітлюють її вплив на характеристики міцності і пластичності.

Ідея інтегрального математичного опису структурно-орієнтаційного стану матеріалу, що була запропонована в Університеті Ушинського, була практично реалізована для металів і сплавів з гексагональною структурою при прогнозуванні параметрів міцності виробів складної форми і є перспективною при проектуванні технологічних процесів виготовлення деталей із листових полікристалів з решіткою  $\alpha$  – заліза.

На сьогодні є потреба враховувати процеси утворення і розвитку структурних неоднорідностей на мікро- і мезорівнях при моделюванні технологічних процесів виготовлення деталей методами об'ємної деформації. Головним проявом неоднорідності структури є пошкодження матеріалу на мікро- та нанорівнях, які, в свою чергу зв'язані зі структурою полікристала, його текстурою, анізотропією властивостей, характеристиками міцності, пластичності і пружності. Суттєвим є і вибір характеристик текстури, достатніх для врахування впливу таких неоднорідностей в процесах деформування.

Тому проблема прихованого руйнування в полікристалах конструкційних матеріалів у вигляді пор та пустот та їх взаємозв'язку зі змінами пружних, пластичних та інших властивостей є актуальною.

**Зв'язок з науковими програмами.** Дисертація є частиною експериментальних і теоретичних досліджень процесів формування текстури та анізотропії властивостей у матеріалах, які ведуться 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 дослідження** є вивчення зв'язку текстурного стану та анізотропії пружних і механічних властивостей листів з однофазною та двофазною структурами  $\alpha$ -заліза з процесами утворення та розвитку в них пошкоджень на стадіях прихованого руйнування при відпалі та деформації.

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

- на основі аналізу літературних даних вивчити стан і результати досліджень прихованого руйнування кристалів до появи тріщин;
- для відокремлення впливу текстури і мікропошкоджень структури на пружні властивості текстурованих листів  $\alpha$  – заліза провести теоретичні дослідження анізотропії модуля Юнга і його середнього значення в площині головних ідеальних орієнтувань текстур  $\alpha$  – заліза;
- методом послідовних відпалів вивчити процеси заліковування дефектів з метою знаходження умов одержання полікристалів заліза з мінімальним рівнем мікропошкоджень;
- вивчити зміну текстурних характеристик в листах  $\alpha$  – заліза зі структурою суміші фериту і мартенситу при деформації розтягу до різних ступенів деформації;

- методами електронної мікроскопії вивчити розподіл і морфологію мікропошкоджень в таких полікристалах;
- вивчити зміну динамічного модуля Юнга в різних напрямках листів двофазної сталі, яка деформована розтягом;
- встановити аналітичний зв'язок між рівнем пошкоджень структури двофазних полікристалів  $\alpha$ -заліза і характеристиками анізотропії їх пружності.

**Об'єкт дослідження.** Листові полікристали зі структурою  $\alpha$ -заліза, суміші  $\alpha$ -заліза (фериту) і пересиченого твердого розчину вуглецю в  $\alpha$ -залізі (мартенситу).

**Предмет дослідження.** Фізичні процеси формування текстури, особливостей структурних змін при пластичній деформації і термічній обробці; механічні і пружні властивості; процеси порушення суцільностей на етапі прихованого руйнування.

Основними експериментальними методами дослідження були:

- рентгенодифрактометричні методи вивчення текстур на рентгенівському приладі з побудовою прямих полюсних фігур, а також розрахунком інтегральних характеристик текстур за даними функцій розподілу кристалів за орієнтаціями;
- методи електронної мікроскопії структур полікристалів на електронному мікроскопі LEO 1455 VP;
- методи побудови кривих «деформація-напруженість» на випробувальній машині «Zwick Z100 (100 кН)»;
- динамічний метод вимірювання модуля Юнга за частотою власних поперечних коливань плоских зразків;
- комп'ютерні методи вимірювання частот коливань зразків;
- числові математичні методи розрахунку інтегральних характеристик текстури за даними функцій розподілу кристалів за орієнтацією.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вивчено анізотропію характеристики пружності, її середніх значень в різних ідеальних орієнтуваннях  $\alpha$ -заліза.
2. Встановлено аналітичний зв'язок між рівнем пошкодження полікристалу з ОЦК структурою та величиною деформації розтягу.
3. Встановлено закономірності текстурних перетворень в листах двофазних полікристалів при деформації розтягу.
4. Отримано характеристики пружності, пластичності та міцності однофазних та двофазних полікристалів  $\alpha$ -заліза при деформації розтягу.
5. Визначено коефіцієнт пошкодження полікристалічних листів сталі DP600 в деформованому стані відносно стану рівноваги, одержаного після довготривалого відпалу.
6. Створено механізм текстурних перетворень в листових полікристалах з двофазною структурою в процесі деформації розтягу.
7. Оцінено внесок в анізотропію коефіцієнту пошкодження морфології мікро- та нанопошкоджень за результатами електронно-мікроскопічного фрактологічного аналізу.

**Практичне значення отриманих результатів дослідження** визначається, зокрема, широким застосуванням досліджуваних низьковуглецевих сталей в транспортному будівництві.

Для цих матеріалів в дисертації знайдено:

1. Характеристики міцності, пластичності, пружні властивості листів після довготривалого відпалу та деформації розтягу.
2. Оптимальні умови отримання листів сталі DP600 з найменшим рівнем пошкодження.
3. Характеристики текстур, які утворюються в результаті деформації і відпалу, зручних для обчислення анізотропії властивостей при моделюванні умов деформування листів при отриманні штампових деталей складної форми.
4. Характеристики рівня мікропошкоджень деформованих розтягом до різних ступенів деформації листів двофазної сталі DP600.
5. Напрямки досліджень в розрахунку можливих зон прихованого руйнування при деформаціях листів металів з двофазною структурою.

**Особистий внесок здобувача.** У наукових працях опублікованих у співавторстві, дисертант брав участь у постановці циклу досліджень, обговоренні результатів досліджень, готував зразки для рентгенівських досліджень, будував полюсні фігури, аналізував їх, корелював результати аналізу з літературними даними. Провів теоретичні дослідження анізотропії модуля Юнга для головних ідеальних орієнтувань текстур  $\alpha$ -заліза, усі комп'ютерні розрахунки, сформулював висновки, щодо параметрів текстури, які відображають рівень пошкоджень у двофазних сталях. Готував матеріал для доповідей на конференціях і статей. Оформляв і корегував статті.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідалися і обговорювалися на таких конференціях:

1. 13 Євразійській конференції «Прочность неоднородных структур». ПРОСТ 2010. М. 20-22 апреля 2016 г. М. : МИСИС. 2016.
2. ICMM4, 4th International Conference on Material Modeling, Berkeley, California, USA, May 27, 2015 8:00 AM - Friday, May 29, 2015.
3. Міжнародній науково-практичній конференції «Наукові перспективи XXI віку. Дослідження и перспективи нового століття» (Росія, г. Новосибірськ, 17-18.04. 2015г.)
4. Щорічних наукових конференціях Південноукраїнського національного педагогічного університету імені К. Д. Ушинського. Листопад 2015-2017рр.

**Структура та об'єм дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу, загальних висновків до дисертації, списку літератури. Загальний об'єм дисертації складає 122 сторінок, 30 рисунків, 5 таблиць, 154 бібліографічних джерел.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовується актуальність досліджень щодо внеску різних механізмів деформації на загальну формозміну конструкційних матеріалів і обумовлену текстурою анізотропію їх властивостей. «Ефект текстури» важливо враховувати на всіх етапах одержання та обробки металів і сплавів у широкому діапазоні швидкостей і видів навантаження. Проблема формування оптимальної текстури визначається надійністю теоретичних механізмів пластичної деформації при різних видах зовнішніх силових і температурних полів.

Визначено матеріали для досліджень, методи досліджень, умови проведення експерименту, методи й моделі аналізу результатів, теоретична та практична результативність роботи, апробація, публікації та положення, що виносяться на захист.

У **першому розділі** аналізуються результати досліджень процесів руйнування та пошкодження полікристалів. Пошкодження матеріалів – це фізичний процес, що розвивається та з часом, призводить до їх руйнування. Цей процес проходить у кілька стадій та розрізняється за рівнями: мікро-, мезо-, та макро. Відповідно до рівнів в загальній механіці деформованого твердого тіла виділено напрямки вивчення процесів руйнування, які розвиваються як самостійні науки. Це мікромеханіка, механіка континуальних пошкоджень та механіка руйнування.

Мікромеханіка вивчає початкові стадії утворення пошкоджень, які ініціюють процес руйнування твердого тіла. Ця стадія фіксує момент появи локальних напружень та накопичень дефектів у вигляді утворення субмікросуцільності розміром  $\sim 1\text{нм}$ . На наступному етапі пошкодження структури матеріалу утворюються та зливаються «несуцільності» розмірів, порівняних з розмірами структурної гетерогенності полікристала. На цьому етапі порушення суцільності оцінюються розмірами  $\sim 100\text{нм}$ . Розвивається також підхід вивчення сумарного ефекту впливу дефектів різних рівнів. Створюються моделі руйнування, засновані на статистичному та термодинамічному описі пошкоджень. Розвиваються ідеї про етапи процесу руйнування, як про форму самоорганізації системи. Самостійно розвивається також мезомеханіка – напрямок, який враховує рівень руйнування та ієрархію дефектності.

На мезорівні щільність мікропустот може бути оцінена в будь якій площині перерізу зразка як дефект площі  $\delta\tilde{s}$  взаємодії частин тіла до повного перерізу  $\delta s$ :

$D = \frac{\delta\tilde{s}}{\delta s}$ . Поява пустот та інших пошкоджень в об'ємі полікристала змінюють суттєво

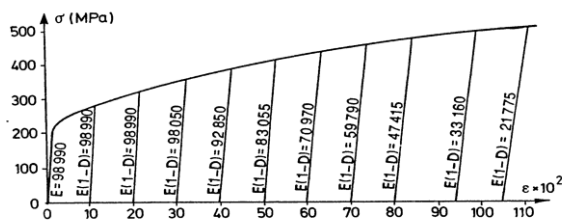


Рис. 1. Зміна модуля Юнга в залежності від зростання щільності пошкоджень при послідовних розтягуваннях зразків електротехнічної міді [Lemaitre J. A. *Course of Damage Mechanics-Berlin: Springer-Verlag, 1992.-210 p.*]

його властивості і, перш за все, зменшують пружні модулі. Це можна побачити, виходячи з наступних міркувань. Пружний модуль пошкодженого матеріалу, який визначається відношенням  $\tilde{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_e}$ ,

отримає вигляд:  $\tilde{E} = E(1 - D)$ , а коефіцієнт пошкодження визначиться:  $D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E}$ , де  $\tilde{E}$

и  $E$  – модулі Юнга пошкодженого та непошкодженого зразків.

Вплив пошкоджень на пружні властивості полікристала наглядно демонструє зміна кута нахилу пружної складової кривої розтягу при послідовних іспитах на розтяг із заходом до області пластичної деформації (рис. 1).

Проведений аналіз утворення та розвитку пошкоджень в полікристалах кубічної симетрії зі складною двофазовою структурою показав, що в полікристалах

сплавів  $Fe-C$  пошкодження першого типу (мартенситні пошкодження) виникають всередині твердих розчинів вуглецю в  $\alpha-Fe$ . Суттєву роль відіграють форма зерен мартенситу і напрямки зовнішніх деформуючих навантажень. На межах зерен мартенситу виникають мікророзриви, що поширюються вздовж межі розділу. Пошкодження у вигляді пор виникають на межах розділу мартенсит/ферит та ростуть в напрямку розтягуючого напруження. Виникнення пор можливо за рахунок відриву від сторонніх частин. Встановлено, що накопичення в металічних матеріалах пошкоджень є кінетичним процесом, який пов'язаний з деформацією. Проте для опису деформаційного пошкодження та його впливу на механічні властивості полікристалів потрібно розробити практичні методи ідентифікації дефектності, виявлення стадій його розвитку, умов утворення мікро- та макродефектів. Пошкодження, що утворились у полікристалі, впливають на міцність, пластичність, пружність та інші властивості, на загальну здатність до формозміни. Непрямі методи оцінки пошкодження матеріалу засновані на вимірах властивостей залежно від величини накопичених пошкоджень.

Для в'язких матеріалів ефективним є метод пружних модулів. Пошкодження в зернах мартенситної фази розвиваються у чотири етапи; (I) пластична деформація мартенситу, (II) пошкодження на межах мартенсит/ферит, (III) коалесценція пустот, що призводить до руйнування частинок мартенситу та (IV) утворення пустот шляхом розділення фрагментів частинок. В літературі практично не згадуються питання форми пошкоджень в різних перерізах зразків, що деформуються. Відсутня інформація про вплив орієнтування зерен мартенситу та фериту на утворення «несуцільностей» в масивних матеріалах та взаємний вплив орієнтування зерен на процеси коалесценції пошкоджень. Не враховується вплив початкової та кінцевої текстур на пошкодження та анізотропію властивостей при деформації та термічній обробці двофазних матеріалів з ОЦК структурою.

У **другому розділі** описано методи вивчення текстури та анізотропії властивостей кубічних кристалів.

Рентгенодифрактометричні методи дозволяють отримати кількісний розподіл полюсів кристалографічних площин в полікристалі у вигляді прямих або зворотних полюсних фігур (ПФ), а також функції розподілу орієнтацій (ФРО). При цьому необхідно врахувати ефект дефокусування, що має місце при зйомці прямих ПФ, який може визначатися за допомогою безтекстурного еталону або аналітично з підбором оптимальної ширини щілин джерела та детектора. В дисертації дослідження текстур проводили за допомогою гоніометра вертикального  $\theta-\theta$  типу, що дозволяє вести зйомку дифракційної картини з нерухомого горизонтально розташованого зразка та використовує фокусуючу геометрію Брега-Брентано. В цьому гоніометрі джерело випромінювання та приймальна щілина детектора лежать на колі гоніометра, в центрі якого розташований плоский зразок

Для вивчення впливу орієнтаційного розподілу кристалів в полікристалі на анізотропію їх властивостей в наближенні механіки суцільних середовищ ФРО має зайву інформацію. Тому для цих задач з урахуванням симетрії досліджуваного об'єкту достатньо описати текстуру не повною ФРО, а певними її частинами, що описують внесок текстури в анізотропію властивостей полікристала.

Для кубічних листових полікристалів достатньо трьох таких зверток функції,



які є інтегральними характеристиками текстури (ИХТ)  $(\mathfrak{S}_i)$  та являють собою комбінації направляючих косинусів системи координат кристала відносно системи координат полікристала:

$$\left. \begin{aligned} \mathfrak{S}_1 &= \langle a_{11}^4 + a_{12}^4 + a_{13}^4 \rangle \\ \mathfrak{S}_2 &= \langle a_{21}^4 + a_{22}^4 + a_{23}^4 \rangle \\ \mathfrak{S}_3 &= \langle a_{11}^2 a_{21}^2 + a_{12}^2 a_{22}^2 + a_{13}^2 a_{23}^2 \rangle \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Анізотропія модуля Юнга ( $E$ ) в площині листа для полікристалів кубічної симетрії має вигляд:

$$E^{-1}(\varphi) = s_{11} - k\psi(\varphi), \quad (2)$$

де  $\psi(\varphi) = 1 - (\mathfrak{S}_1 \cos^4 \varphi + \mathfrak{S}_2 \sin^4 \varphi + 1,5\mathfrak{S}_3 \sin^2 2\varphi)$  – функція анізотропії;

$k = \left( s_{11} - s_{12} - \frac{1}{2}s_{44} \right)$ , а  $s_{11}$ ,  $s_{12}$ ,  $s_{44}$  – константи піддатливості монокристала.

$\langle \rangle$  - означає осереднення по усіх орієнтаціях кристалів.

Значення властивостей у важко вимірювальних напрямках (наприклад, у напрямку, нормальному до площини листа) можна знайти за формулою:

$$E_{HH}^{-1} = s_{11} - k(\mathfrak{S}_1 + \mathfrak{S}_2 + 2\mathfrak{S}_3) \quad (3)$$

ИХТ розраховують із ФРО або безпосередньо із ПФ від ізотропних площин, якими для кубічних кристалів є площини  $\{111\}$ . Опис текстур, крім ФРО, проводиться за допомогою ідеальних орієнтувань (ІО), кожна з яких відображає утворюючу її систему ковзання чи двійникування, а в сукупності набір ІО визначає реальну анізотропію властивостей текстурованого полікристалу. Для задач з прогнозування анізотропії властивостей листових полікристалів достатньо представлення текстур у вигляді ИХТ, набір яких достатній для сертифікації листових полікристалів з кубічною решіткою.

Експериментальні прямі полюсні фігури  $\{001\}$  та  $\{111\}$  ОЦК металів неможливо отримати прямими рентгенодифрактометричними методами в силу закону загасання рефлексів. Тому для їх отримання потрібно визначення спочатку ФРО за трьома ПФ, рефлекси яких одержуються звичайними методами, а потім розрахувати вказані ПФ.

Аналіз текстур проводили по повним ПФ, які одержували комп'ютерною обробкою даних ФРО, реконструйованих з неповних експериментальних ПФ.

Анізотропію пружних властивостей листів ОЦК-металів в дисертації вивчали динамічним методом за частотою власних поперечних коливань плоских зразків, вирізаних під різними кутами до головної осі координат листів. Частоту коливань визначали за допомогою комп'ютерної програми Spectra PLUS. Механічні властивості вивчали методом розтягу на випробувальній машині «Zwick Z100 (100 кН)».

У **третьому розділі** наведено результати досліджень текстур, анізотропії властивостей, рівня пошкодження листових двофазових полікристалів з ОЦК граткою. Матеріалом для досліджень слугувала низьковуглецева сталь DP600 з

гарантованим фірмою «Salzgitter flach stahl» хімічним складом (0,1% С, 0,15% Si, 1,4% Mn, 0,007% P, 0,008% S, 0,009% N, 0,02-0,06 % Al, 1,0% Cu + Cr + Ni) у вигляді листів товщиною 2 мм. В Україні вона відноситься до класу двофазових феритно-мартенситних низьковуглецевих сталей (ДФМС) з дрібнозернистою феритною матрицею та 15-25% мартенситу.

Електронно-мікроскопічні дослідження показали, що в зернах фериту сталі пошкодження присутні у вигляді пор та пустот, що мають переважно рівноосьову сферичну форму розміром  $\sim 10-12 \cdot 10^{-8}$  м.

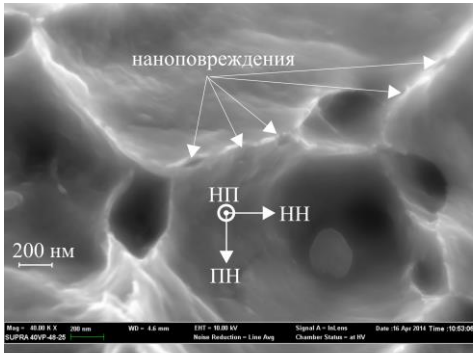


Рис.2. Мікроструктура ділянки зерна мартенситу сталі DP600 ( $\times 40,000$ ) в стані постачання

необхідно мати зразки-еталони з певною фіксованою структурою, включаючи текстуру з мінімальним пошкодженням. Тому спочатку було проведено дослідження з вивчення впливів відпалу на структуру та властивості листів досліджуваної сталі.

Зразки, вирізані під різними кутами до НП, піддавали послідовному відпалу у залізній тирсі при температурах 100, 150, ..., 400<sup>0</sup> протягом однієї години в лабораторній печі. Після кожного відпалу вимірювали частоту власних коливань зразків та розраховували зміни модулів Юнга за умови збереження геометричних розмірів.

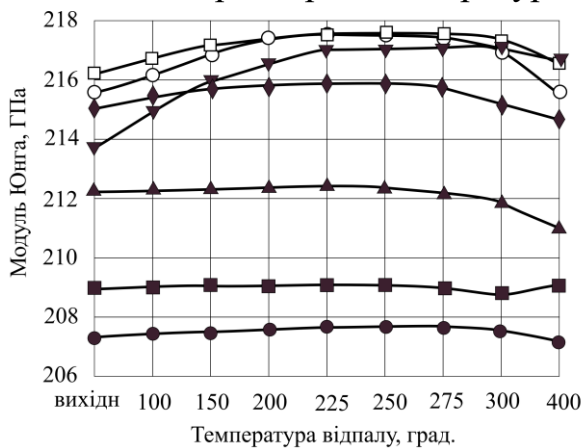


Рис.3. Зміна модуля Юнга з температурою відпалу для напрямків вимірювання: ● - НП; ■ - НП+15; ▲ - НП+30; ▼ - НП+45; ◆ - НП+60; ○ - НП+75<sup>0</sup>; □ - ПН

На рис. 3 приведено криві анізотропії модуля Юнга в початковому стані і після послідовних відпалів.

Модуль Юнга при збільшенні температури відпалу демонструє спершу монотонний ріст для всіх напрямків, потім його сповільнення, а потім  $E$  змінюються неоднаково для різних напрямків. Це характерно для етапів полігонізації, первинної рекристалізації з наступною збиральною та вторинною рекристалізаціями.

На етапі полігонізації реалізуються процеси, що називаються «лікуванням дефектів». Електронна мікроскопія демонструє зменшення рівня мікропошкоджень. Збиральна рекристалізація впливає на анізотропію механічних властивостей листів сталі, зміни якої ми спостерігали на кривих розтягу вихідних листів та відпалених

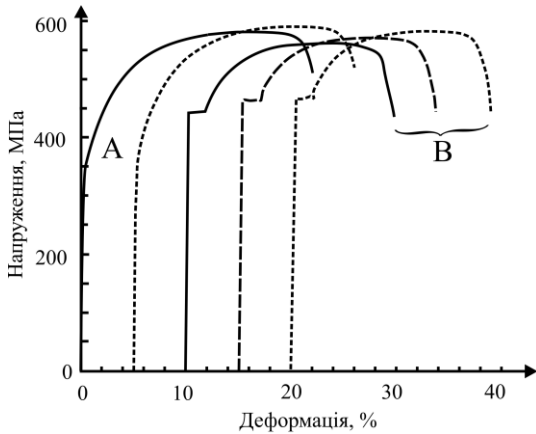


Рис.4. Криві розтягу сталі DP600 в стані постачання і після відпалу при температурі 250° С протягом 48 годин: (—) - в НП, (---) - в ПН, (---) - в НП + 45°

демонструє зміна нахилу кривих в області навантажень ~240 МПа. Текстура суттєво впливає на анізотропію властивостей листів ОЦК-металів та їх значення.

Для відокремлення впливу текстурних характеристик на значення модуля Юнга від впливу пошкоджень проведено теоретичні дослідження характеру анізотропії  $E$  і його середніх значень для ІО можливих текстур  $\alpha$ -заліза.

Використовували рівняння анізотропії модуля Юнга для різних ІО у вигляді рядів Фур'є:

$$\frac{1}{E} = s_{11} - 2 \left( s_{11} - s_{12} - \frac{1}{2} s_{44} \right) (A_0 + A_2 \cos 2\varphi + A_4 \cos 4\varphi),$$

де  $s_{ij}$  – константи піддатливості монокристала заліза,

$$A_0 = \frac{1}{64} (8 - 24 \sin^2 \alpha - 21 \sin^4 \alpha - 3 \sin^4 \alpha \cos 4\omega),$$

$$A_2 = -\frac{1}{16} [(6 \sin^2 \alpha - 7 \sin^4 \alpha) + (2 \sin^2 \alpha - \sin^4 \alpha) \cos 4\omega],$$

$$A_4 = -\frac{1}{64} [7 \sin^2 \alpha + (8 \cos^2 \alpha + \sin^4 \alpha) \cos 4\omega],$$

$$\cos 4\omega = 1 - 8 \frac{h^2 k^2}{(h^2 + k^2)^2}, \quad \sin 4\omega = 4 \frac{hk}{(h^2 + k^2)^2} (h^2 - k^2), \quad \cos^2 \alpha = \frac{l^2}{h^2 + k^2 + l^2},$$

$$\sin^2 \alpha = \frac{h^2 + k^2}{h^2 + k^2 + l^2}.$$

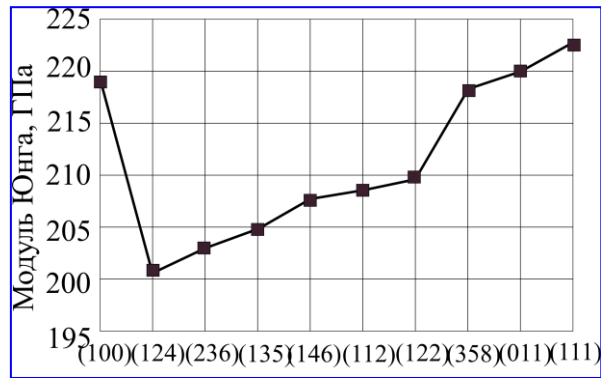
За отриманими рівняннями розраховували анізотропію  $1/E(\varphi)$  для основних ІО ОЦК металів. Кожна з ІО має власне середнє значення  $E$  (рис.5) та характер анізотропії.

Ефективність оцінки текстурного стану та анізотропії пружних властивостей проводили на листах однофазної низьковуглецевої сталі DC04 (0,06% С, до 0,35% Мп, до 0,40% Si, ~ 0,025% S і Р).

до 250°С (рис.4).

Відпал приводить до зміни характеру кривих розтягу зразків в різних напрямках. З'являються площадки текучості на кривих для усіх напрямків. Збільшується пластичність, знижуються характеристики міцності.

Анізотропія границі плинності листів збільшується від 2,1 до 4,9%, границі міцності (від 1,5 до 3,1), пластичності (від 3,7 до 6,1%), модуля Юнга (від 3,1 до 4,0%). У цілому криві демонструють характер деформування пружної складової двофазного агрегату, тобто мартенситної складової. Феритна складова деформується пластично, це



Кристаллографічні площини

Рис.5. Значення середніх модулів Юнга для площин різних ІО  $\{hkl\}\langle UVW \rangle$   $\alpha$ -заліза  
Текстуру вивчали рентгенівським методом з побудовою прямих ПФ для відпалених листів сталі та після холодної прокатки до 50%.

Анізотропію модуля Юнга будували за результатами прямих змін  $E$ , для різних напрямків в листах. ІО, які визначили з експериментальних ПФ, було використано для розрахунку анізотропії модуля Юнга в площині листів. Експериментальні значення  $E$  відповідають характеру розрахованої пружної анізотропії. В цілому, з урахуванням прийнятих наближень, відповідність експериментальних даних анізотропії  $E$  та розрахованих значень  $E$  із ІО, які спостерігалися на ПФ для відпалених та деформованих листів низьковуглецевої сталі, є задовільною.

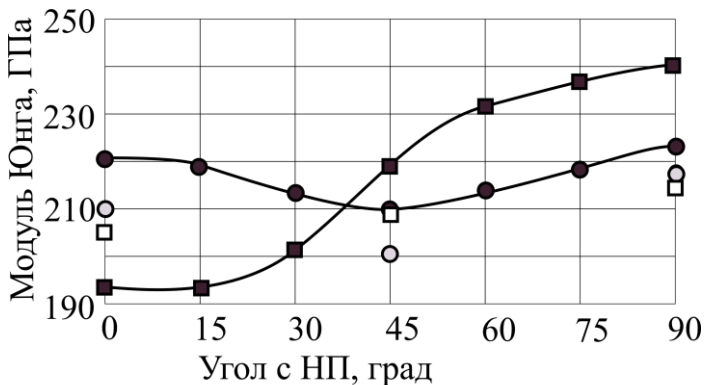


Рис.6. Анізотропія модуля Юнга листів сталі DC04 після ● - відпалення і ■ - деформації прокаткою ○, □ - експериментальні значення модуля Юнга для відпалених і деформованих листів сталі

Товщину зразків контролювали з метою забезпечити рівномірну за всією довжиною деформацією.

З робочих частин відпалених та деформованих зразків вирізали прямокутні смужки довжиною  $\sim 100$  мм і зразки для рентгенівських досліджень текстури. Для забезпечення однакових розмірів по довжині смужки обробляли в пакеті. Поверхні зразків для рентгенівських досліджень протравлено у розчині  $\text{HNO}_3$ .

Найменший рівень пошкодження листів досліджуваної сталі відповідає відпалу при температурах 225-275 $^{\circ}\text{C}$ .

З метою отримання еталону для оцінки рівня пошкодження в результаті пластичної деформації листи сталі DP600 товщиною 2 мм піддавали відпалу при температурі 250 $^{\circ}\text{C}$  протягом 48 годин в атмосфері нейтрального газу.

З відпалених листів вирізали зразки для механічних досліджень в головних напрямках листа. Зразки однієї партії розтягували на випробувальній машині до величини деформації 3%, другу партію деформували до 6%, третю – до 10%.

Текстурні зміни вихідних листів сталі DP600 в результаті відпалів зводяться до посилення типових орієнтувань  $(100)[011]$ , що свідчить на користь протікання збиральної рекристалізації.

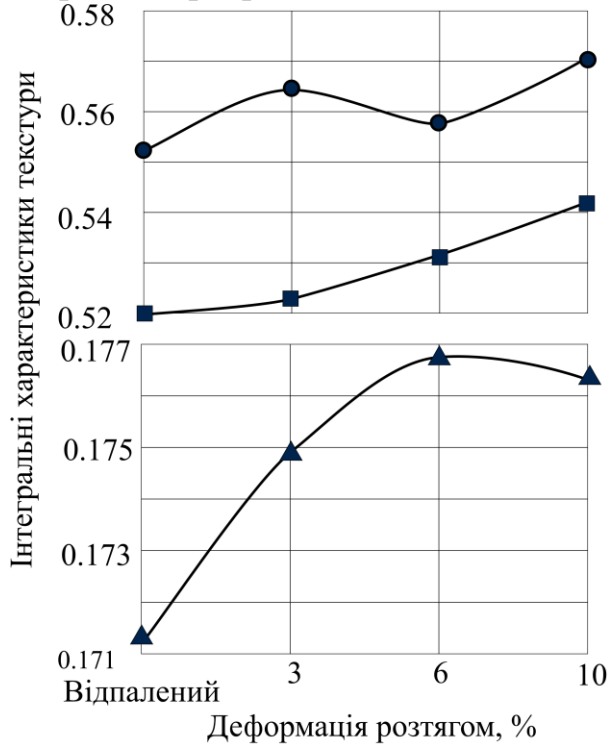


Рис. 7. Зміна інтегральних характеристик текстури відпалених листів сталі після деформації розтягом:

● -  $\mathfrak{S}_1$ , ■ -  $\mathfrak{S}_2$ , ▲ -  $\mathfrak{S}_3$

$\{112\}\langle 110 \rangle$ ;  $\{111\}\langle 110 \rangle$  і близькими до них  $\{221\}\langle 110 \rangle$ ;  $\{111\}\langle 112 \rangle$ ;  $\{111\}\langle 312 \rangle$ ;  $\{115\}\langle 552 \rangle$ ;  $\{221\}\langle 114 \rangle$ .

Значення ФРО використовували для розрахунку ІХТ за формулами (1). В результаті деформації ІХТ ( $\mathfrak{S}_i$ ) проявляють тенденцію до росту зі збільшенням ступеню деформації (рис. 7).  $\mathfrak{S}_3$  зростає різко вже при малих деформаціях.  $\mathfrak{S}_1$  та  $\mathfrak{S}_2$  збільшуються менш різко,  $\mathfrak{S}_1$  в області деформацій 6% показує невелике падіння. Текстурні зміни при малих деформаціях розтягу листів двофазної сталі в НП призводять до певного збільшення середнього модуля пружності. При цьому модулі відображають не тільки текстурні зміни, але й реальну структуру полікристалу.

За даними ІХТ за формулою (2) розраховували анізотропію модуля Юнга листів після відпалу і послідовних розтягів (рис. 8).

Після деформації у відповідних напрямках модулі Юнга в цілому зменшуються. Максимальне зменшення (6 ГПа  $\approx$  2.8%)  $E$  при 10% деформації спостерігається в діагональному напрямку (ДН) (тобто  $\varphi=45^\circ$ ) та ПН. Подібна тенденція спостерігається для малих (3%) та середніх (6%) деформацій. Для малих деформацій максимум зменшення  $E$  складає 3 ГПа або 1,3% в ДН та ПН. В НП зменшення  $E$  складає 2 ГПа або 1.2%.

Зберігаються орієнтування  $\{112\}[\bar{1}10]$ ,  $\{112\}[\bar{8}62]$  та  $\{335\}[7\bar{1}23]$ , які присутні в текстурі листів сталі в вихідному стані. Відповідно до вихідного стану зникають орієнтування  $\{110\}[uvw]$ , але з'являється близьке до  $\{110\}[uvw]$  орієнтування  $(320)[001]$ .

Деформації розтягу призводять до появи на ПФ зон підвищеної полюсної щільності, що відповідають орієнтуванням текстури деформації ОЦК металів.

Після деформації розтягу до 6% на фоні вже існуючих орієнтувань текстур відпалу розвиваються орієнтування  $\{001\}\langle 110 \rangle$  і  $\{111\}\langle 110 \rangle$ ,  $\{111\}\langle 112 \rangle$ ,  $\{111\}\langle 312 \rangle$ . Деформація до 10% призводить до подальшого розвитку орієнтувань, що відрізняються від орієнтувань текстури відпалу. Кінцева текстура достатньо повно характеризується орієнтуваннями:  $\{001\}\langle 110 \rangle$  та близькими до нього  $\{115\}\langle 110 \rangle$ ;

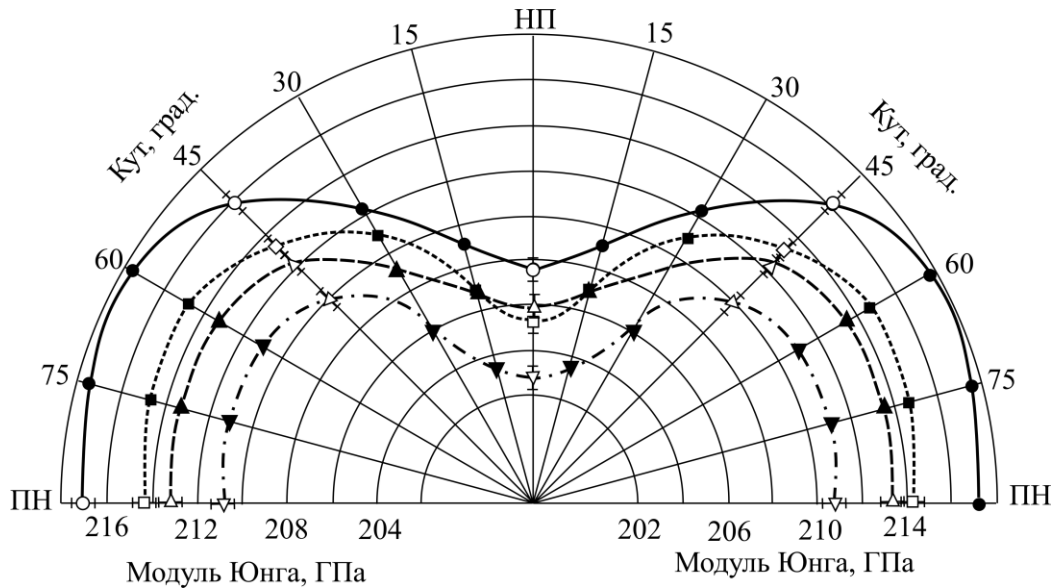


Рис.8. Анізотропія модуля Юнга листів сталі DP600: ● – після відпалу при 250°C, ■ – після додаткової деформації розтягу 3%, ▲ – 6%, ▼ - 10%, ○, △, ▽ – контрольні виміри модуля Юнга

На основі контрольних вимірювань модуля Юнга за формулами:

$$I_1 = \frac{1}{kE_{\text{НП}}} - \frac{s_{11}}{k} + 1; I_2 = \frac{1}{kE_{\text{ПН}}} - \frac{s_{11}}{k} + 1; I_3 = \frac{2}{3k} \left( \frac{1}{E(45^\circ)} - s_{11} \right) + \frac{2}{3} \left( 1 - \frac{\mathfrak{I}_1 + \mathfrak{I}_2}{4} \right)$$

розрахували ІХТ листів досліджуваної сталі у відпаленому стані та після відповідних розтягів.

Зміни ІХТ, які розраховані з результатів рентгенографічних вимірювань та які розраховані за результатами вимірювань пружних властивостей в різних напрямках листів є різними. Але змінюються вони зі збільшенням ступеня деформації приблизно однаково.

Коефіцієнт пошкодження виразили через ІХТ у вигляді:

$$D(\varphi) = 1 - \frac{s_{11} - k \left[ 1 - \left( \mathfrak{I}_1^0 \cos^4 \varphi + \mathfrak{I}_2^0 \sin^4 \varphi + 1.5 \mathfrak{I}_3^0 \sin^2 2\varphi \right) \right]}{s_{11} - k \left[ 1 - \left( I_1^1 \cos^4 \varphi + I_2^1 \sin^4 \varphi + 1.5 I_3^1 \sin^2 2\varphi \right) \right]},$$

де  $\mathfrak{I}_i^0$  - інтегральні характеристики текстури листів у відпаленому (непошкодженному) стані,  $I_i^1$  - ІХТ листів після деформації, в пошкодженному стані,

$S_{ik}$  - константи піддатливості монокристала досліджуваного металу. Залежність  $D(\varphi)$  носить анізотропний характер.

Зі збільшенням ступеня деформації розтягненням загальна площа мікропошкоджень зростає відносно до вихідного стану, самі пошкодження приймають більш правильну (рівноосьову) форму.

Відповідно до літературних даних зародження пустот у двофазових матеріалах мають місце переважно в зернах мартенситу, витягнутих у напрямках деформуєчої сили. Саме на такі зерна звертали особливу увагу при проведенні електронімікроскопічних досліджень.

На вихідній структурі візуально пустот та тріщин не спостерігали. Після деформації розтягу до 3% на мікроструктурах зразків, вирізаних в ПН та деформованих розтягом в цьому ж напрямку при збільшенні порядку ( $\times 5000$ ) на

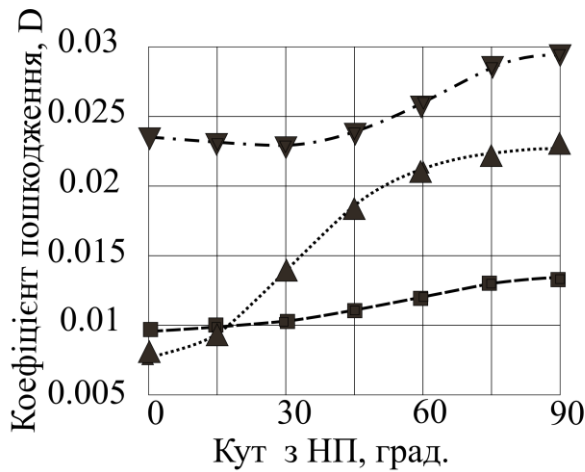


Рис. 9. Анізотропія коефіцієнта пошкодження сталі DP600 після довготривалого відпалу та додаткової деформації розтяганням до ■ - 3, ▲ - 6, ▼ - 10%.

деяких зернах спостерігаються потемніння на границі зерна фериту та оточуючого його мартенситу, які можна прийняти за тенденцію до утворення пошкоджень.

Після подальшої деформації до 6% пори в металі виглядають досить чітко. Після деформації до 10% пошкодження стають більш виразними. При більшому збільшенні це пошкодження можна оцінювати як пору, якщо розглядати її в площині, перпендикулярній напрямку осі навантаження (рис. 9).

У площині, в якій лежить напрямок прокатки та вісь навантаження пори мають еліптичну форму з рваними краями. Загальна площа пошкоджень в перерізі листа досліджуваної сталі, перпендикулярна НП та осі розтягнення, менша площі пошкоджень в перерізі, в якому лежить вісь навантаження та НП. Відповідно і дефект модуля Юнга в ПН має бути більшим, ніж в НП, що ми і спостерігаємо.

У четвертому розділі проведено аналіз орієнтувань, що формується в листах двофазної сталі в процесі деформації розтягу. Ряд орієнтувань відноситься до типових орієнтувань текстур плоскої деформації ОЦК–металів (текстури ковзання). При відпалі їх розвиток відповідає переходу орієнтувань текстур відпалу в орієнтування виду  $\{111\}\langle uvw \rangle$  – в деформованих листах. Орієнтування виду  $\{111\}\langle uvw \rangle$  виникають при активізації системи ковзання  $\{110\}\langle 111 \rangle$ .

Крім орієнтувань текстур плоскої деформації після високих деформацій спостерігаються також і орієнтування, що не відповідають орієнтуванням ковзання в ОЦК металах, зв'язаних з можливими процесами двійникування.

Виявили наступні двійникові переорієнтації:  $\{115\}\langle 552 \rangle$  – двійникові орієнтування від  $\{111\}\langle 211 \rangle$  та  $\{221\}\langle 114 \rangle$  – двійникові орієнтування від  $\{001\}\langle 110 \rangle$ .

Деформація м'яких зерен фериту має вигляд смуг ковзання. Утворення пор спостерігається на стиках зерен фериту різного орієнтування.

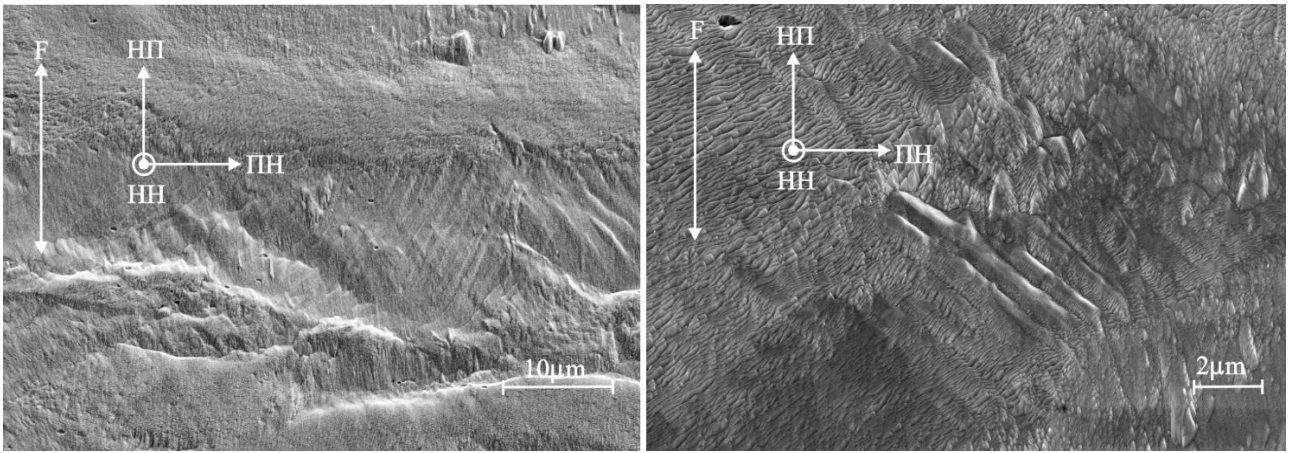


Рис.10. Мікроструктури сталі, деформованої до 30%, в зоні шийки після іонного травлення зі збільшеннями  $\times 2000$  та  $\times 10000$ , з видимими двійниками.

Характер анізотропії мікропошкоджень в листах двофазної сталі при деформації розтягу оцінювали методом апроксимації кривих анізотропії коефіцієнта пошкодження.

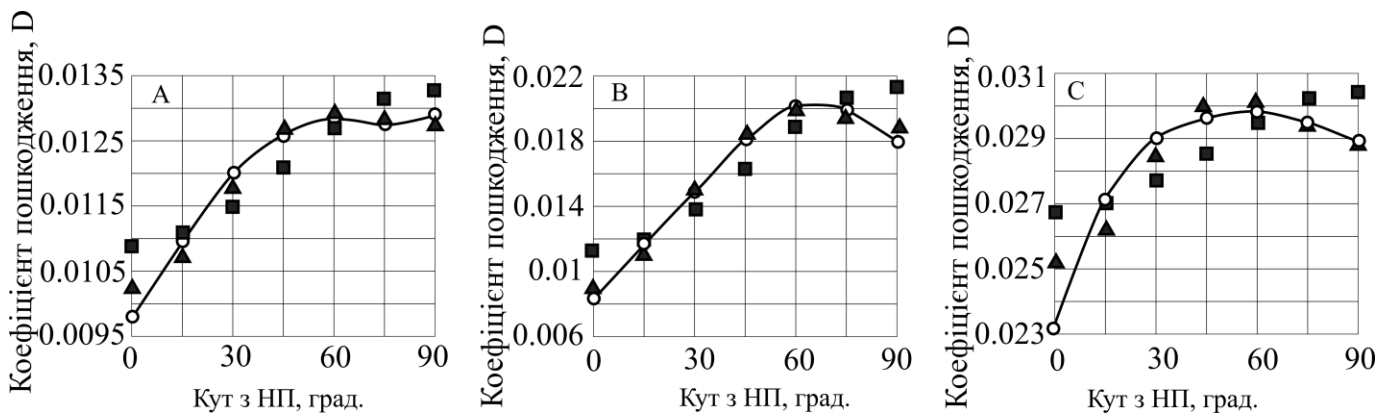


Рис. 11. Анізотропія коефіцієнта пошкодження відпалених листів сталі DP600 після додаткової деформації розтягом до А-3, В-6 и С-10%. ■ – значення коефіцієнтів пошкодження при апроксимації анізотропії рядом Фур'є, який містить окрім вільного члена другу гармоніку і ▲ – вільний член, містить другу і четверту гармоніки.

Використовуючи ІХТ, отримані з результатів вимірювань модулів Юнга в НП, НП+45°, ПН, анізотропію коефіцієнта пошкодження  $D(\varphi)$  в площині листів досліджуваної сталі після деформації розтягу до 3, 6 и 10% відносно відпаленого стану, представили у вигляді рядів Фур'є, які вміщують крім вільного члена  $A_0$ , або тільки другу ( $A_2 \cos 2\varphi$ ) гармоніку, або другу та четверту гармоніки ( $A_4 \cos 4\varphi$ ). Найближче до експерименту прилягають точки, що відповідають апроксимації анізотропії  $D(\varphi)$  рядами Фур'є типу:  $E(\varphi) = A_0 + A_2 \cos 2\varphi + A_4 \cos 4\varphi$ , що підтверджує можливість опису анізотропії  $D(\varphi)$  тензорами четвертого рангу.

## ВИСНОВКИ

1. Ідеальні орієнтування (ІО) плоских текстур  $\alpha$ -заліза мають характерну для них анізотропією пружних властивостей з середніми значеннями пружних модулів,



які варіюються в границях 20% в залежності від кристалографічної площини ІО і орієнтації її переважного напрямку. Значення пружності в площині текстурованих листів  $\alpha$ -заліза визначається спільним внеском середніх модулів ІО. Зміни анізотропії модуля Юнга однофазних листів сталі DC04 (0.06% С, до 0.35% Мп, до 0.40% Si,  $\sim$  0.025% S і Р, інше Fe) з структурою  $\alpha$ -заліза після рекристалізаційного відпалу узгоджуються з даними аналізу анізотропії суми ІО, отриманих на основі рентгенівського текстурного аналізу.

2. Зміна анізотропії модуля Юнга (Е) з температурою відпалу в листах двофазної сталі DP600 (0,1% С, 0,15% Si, 1,4% Мп, 0,07% Р, 0,008% S, 0,009% N, 0,02-0,06% Al, 1,0% Cu + Cr + Ni) протікає монотонним зростанням, стабільними значеннями до температур  $\sim$  300<sup>0</sup>С, і зростанням і зменшенням Е для різних напрямків при температурах відпалу вище 300<sup>0</sup>С. Відпал при  $t \sim$  250<sup>0</sup> призводить до появи площадки плинності на кривих «напруженість-деформація». Підвищується пластичність, знижуються характеристики міцності.

3. В результаті прямої прокатки в листах сталі формується типова текстура прокатки ОЦК металів. Загальний внесок в анізотропію пружних властивостей вихідних листів вносять різкоанізотропні орієнтування {112} <110>, {100} <011>. Прямі вимірювання модуля Юнга в НП, НП +45 і ПН для недеформованих і прокатаних листів низьковуглецевої сталі знаходяться в задовільному стані з результатами розрахунку анізотропії Е з даних анізотропії ІО, отриманих з рентгенівського текстурного експерименту.

4. Анізотропія Е відпалених листів сталі характерна для рекристалізованих ОЦК металів. Деформація розтягу не змінює характеру анізотропії Е, але зменшує значення цієї характеристики для всіх напрямків в листі. Максимальні значення для наведених деформацій модуль Юнга приймає в НП  $\pm$  60<sup>0</sup>, а мінімальні зберігаються в НП. Середні значення модуля Юнга зменшуються при збільшенні ступеня деформації розтягу. Найменший рівень пошкодженості листів досліджуваної сталі відповідає відпалу при температурах 225-275<sup>0</sup>С.

5. Після деформації розтягу до 3% на мікроструктурах зразків, пошкоджень в зернах мартенситу не спостерігається. Після деформації до 6% на деяких зернах, спостерігаються області на межі зерен «мартенсит-ферит». Після деформації до 10% пошкодження стають вираженими і їх можна оцінити як пори, площа яких в перерізі листа, перпендикулярному НП і осі навантаження менше площі пошкоджень в перерізі, в якому лежить вісь навантаження і НП.

6. Анізотропія коефіцієнта пошкодження (D) листів сталі DP600 після тривалого відпалу при температурі 250<sup>0</sup>С і додаткової деформації розтягу 3% характеризується мінімумом в НП і максимумом в ПН. Після деформації 6 і 10% максимум D зміщується до напрямів НП + 45<sup>0</sup> ÷ 60, що пов'язано зі змінами текстури. Криві залежності коефіцієнта пошкодження від напрямку вимірювання задовільно апроксимуються рядами Фур'є, що містять крім вільного члена ще дві парні гармоніки.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Dmitry Dyachok The effect of texture in modeling deformation processes of bcc steel Sheets / Gerstein Gregory, Bruchanov Arkadii A, Dyachok. Dmitry, Florian Nurnberger // Materials Letters. – 164 (2016). – pp. 356–359.
2. Дячок Д. А. Влияние дорекристаллизационного отжига на текстуру и анизотропию свойств листов двухфазной низкоуглеродистой стали / Н. А. Волчок, Н. П. Праведна, Д. А. Дячок // Educatio. – 2015 (9). – С.45-49.
3. Dyachok D. A. Effect of deformation texture on the anisotropy of elasticity and damage of two-phase steel sheets, A. A. Bryukhanov, G. Gerstein, D. A. Dyachok // Phys. Metals Metallogr. – 2016. – Vol. 117, pp. 742-747.
- 3(a). Дячок Д. А. Влияние деформации растяжением на анизотропию поврежденности листов двухфазной стали DP600 / Г. Гринштейн, А. А. Брюханов, Д. А. Дячок, Ф. Нюрнбергер // Физика металлов и металловедения. – 2016 (7). – С. 742-748.
4. Дячок Д. А. Анизотропия упругих свойств идеальных ориентировок плоских текстур  $\alpha$ -железа / Д. А. Дячок // «Восточно-Европейский журнал передовых технологий». – 2016 – С. 65-74.
5. Дячок Д. А. К вопросу об оптимальных размерах плоских образцов для измерения упругих модулей резонансным методом / Д. А. Дячок, В. В. Лукашин, Н. А. Волчок, В. Э. Горбачев, С. Н. Поляков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова – 2017. № 2. – С. 51-60.
6. Дячок Д. А. Текстура и механические свойства листов ферритной стали при различных режимах увеличения растягивающей нагрузки / А. А. Брюханов, Г. Герштейн, Д. А. Дячок, Н. А. Волчок, Ф. Нюрнбергер // Сб. трудов 8 Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ-10, 20-22 апреля 2016. – М.: МИСиС.
7. Дячок Д. А. Влияние деформации растяжением на анизотропию поврежденности листов двухфазной стали DP600/ А.А. Брюханов, Г. Герштейн, Д. А. Дячок, Ф. Нюрнбергер // Сб. трудов 8 Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ-10, 20-22 апреля 2016. – М.: МИСиС.
8. Дячок Д. А. Упругие свойства идеальных ориентировок плоских текстур  $\alpha$ -железа / А.А. Брюханова, Н. А. Волчок, Д. А. Дячок // Сб. трудов 8 Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ-10.-20-22 апреля 2016. – М.: МИСиС.
9. Дячок Д. А. Особенности текстурообразования в листах низкоуглеродистой стали при ассиметричной прокатке / А. А. Брюханов, А. Ю. Гридин, А. Андреев, Мирко Шапер, Д. А. Дячок // Сб. трудов 8 Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ-10.-20-22 апреля 2016. – М.: МИСиС.

## АНОТАЦІЯ

**Дячок Д. О. Розвиток пошкоджень в текстурованих полікристалах  $\alpha$ -заліза з феритно-мартенситною структурою. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття вченого 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.

Дисертація присвячена вивченню процесів зародження і коалесценції мікропошкоджень в полікристалах зі структурою  $\alpha$ -заліза + 30% твердого розчину вуглецю в  $\alpha$ -залізі. Рівень пошкодження оцінювали методами електронної мікроскопії та за величиною зміни пружного модуля (дефекту модуля Юнга) щодо неушкодженого зразка. Провели дослідження впливу відпалу при різних температурах на структуру, анізотропію модуля Юнга ( $E$ ) і механічні властивості листових полікристалів низьковуглецевої сталі DP600 (0,1% C, 0,15% Si, 1,4% Mn, 0,007% P, 0,008% S, 0,009% N, 0,02-0,06 % Al, 1,0% Cu + Cr + Ni) з феритно-мартенситною структурою. Найменший рівень пошкодження відповідав відпалу при температурах 225 - 2750С.

Вплив текстури на властивості пружності розраховали теоретично для головних ідеальних орієнтувань (ІО) текстур деформації і відпалу листів  $\alpha$ -заліза.

Отримано, що кожна ІО характеризується власною анізотропією  $E$  і його середнім значенням в площині ІО. Оцінили вклади текстури і рівня пошкодження в характеристики пружності при пластичній деформації відпалених листів однофазної низьковуглецевої сталі. Зразки відпалених листів двофазної сталі піддавали рівномірному розтягу в напрямках під кутами  $\varphi = 0, 45$  і  $90^0$  до напрямку прокатки (НП). Текстура листів характеризується ІО деформації ОЦК - металів. При високих деформаціях спостерігали двійникові переорієнтації. Інтегральні характеристики текстури (ІХТ) визначили з даних аналізу функцій розподілу орієнтацій для відпалених листів. Для деформованих зразків ІХТ розраховували за результатами вимірювання анізотропії  $E$ . Пошкодження ( $D$ ) визначали по відношенню дефекту  $E$  деформованого листа щодо відпаленого зразка. Результати порівняли з даними електронної мікроскопії. Анізотропію  $D$  апроксимували рядами Фур'є з двома і чотирма парними гармоніками. Експерименту відповідає апроксимація кривих анізотропії пошкодження рядами Фур'є типу:  $E(\varphi) = A_0 + A_2 \cos 2\varphi + A_4 \cos 4\varphi$ , що дає можливість описувати анізотропію  $D$  ( $\varphi$ ) тензорами четвертого рангу.

**Ключові слова:**  $\alpha$ -залізо, текстура, модуль Юнга, анізотропія, інтегральні характеристики текстури, пошкодження, Фур'є-аналіз, тензор.

## АННОТАЦІЯ

**Дячок Д. А. Развитие повреждений в текстурированных поликристаллах  $\alpha$ -железа с ферритно-мартенситной структурой. - 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 изучению процессов зарождения и коалесценции микроповрежденностей в поликристаллах со структурой  $\alpha$ -железа+30% твердого раствора углерода в  $\alpha$ -железе. Уровень поврежденностей оценивали методами электронной микроскопии и по величине изменения упругого модуля (дефекта

модуля Юнга) относительно неповрежденного эталона. Провели исследования влияния отжигов при разных температурах на структуру, анизотропию модуля Юнга (E) и механические свойства листовых поликристаллов низкоуглеродистой стали DP600 (0,1% C, 0,15% Si, 1,4% Mn, 0,007% P, 0,008% S, 0,009% N, 0,02-0,06 % Al, 1,0% Cu + Cr + Ni) с ферритно-мартенситной структурой. Наименьший уровень поврежденности соответствовал отжигам при температурах 225 – 275<sup>0</sup>С.

Влияние текстуры на свойства упругости рассчитали теоретически для главных идеальных ориентировок (ИО) текстур деформации и отжига листов  $\alpha$ -железа.

Получено, что каждая ИО характеризуется собственной анизотропией E и его средним значением в плоскости ИО. Оценили вклады текстуры и уровня поврежденности в характеристики упругости при пластической деформации отожженных листов однофазной низкоуглеродистой стали. Образцы отожженных листов двухфазной стали подвергали равномерному растяжению в направлениях под углами  $\varphi=0, 45$  и  $90^0$  к направлению прокатки (НП). Текстура листов характеризуется ИО деформации ОЦК - металлов. При высоких деформациях наблюдали двойниковые переориентации. Интегральные характеристики текстуры (ИХТ) определили из данных анализа функций распределения ориентаций для отожженных листов. Для деформированных образцов ИХТ рассчитывали по результатам измерения анизотропии E. Поврежденность (D) определяли по отношению дефекта E деформированного листа относительно отожженного эталона. Результаты сопоставили с данными электронной микроскопии. Анизотропию D аппроксимировали рядами Фурье с двумя и четырьмя четными гармониками. Эксперименту соответствует аппроксимация кривых анизотропии поврежденности рядами Фурье типа:  $E(\varphi) = A_0 + A_2 \cos 2\varphi + A_4 \cos 4\varphi$ , что дает возможность описывать анизотропию  $D(\varphi)$  тензорами четвертого ранга.

**Ключевые слова:**  $\alpha$ -железо, текстура, модуль Юнга, анизотропия, интегральные характеристики текстуры, поврежденность, Фурье-анализ, тензор.

## ABSTRACT

**Dyachok D.A. Development of the damage in textured polycrystals of  $\alpha$  – iron with the ferrit-martensit structure. - Manuscript.**

Thesis for the degree of candidate of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.07 - solid state physics. - The South Ukrainian National Pedagogical University named after K. D. Ushinsky, Odessa, 2017.

The thesis is devoted to the study of nucleation and coalescence of microdamages in polycrystals with  $\alpha$ -iron structure + 30% solid solution of carbon in  $\alpha$ -iron. The level of damage was assessed by electron microscopy methods and on the magnitude of the change in the elastic modulus (the Young's modulus defect) with respect to the undamaged reference. Investigations of the influence of annealing at different temperatures on the structure, the anisotropy of the Young's modulus (E), and the mechanical properties of sheet polycrystals of low-carbon steel DP600 (0.1% C, 0.15% Si, 1.4% Mn, 0.007% P, 0.008% S, 0.009% N, 0.02-0.06 % Al, 1.0% Cu + Cr + Ni) with a ferrit-martensit structure

were carried out. The lowest level of damage corresponded to annealing at temperatures of 225 - 275<sup>0</sup> C.

The effect of texture on elastic properties was calculated theoretically for the main ideal orientations (IO) of deformation and annealing textures of  $\alpha$ -iron sheets.

It is obtained that each IO is characterized by its own anisotropy of E and of its mean value in the plane of the IO.

The contributions of the texture and of the level of the damages on the elasticity characteristics under the plastic deformation of annealed sheets of single-phase low-carbon steel were estimated.

Samples of annealed sheets of dual-phase steel were subjected to uniform stretching in directions at angles of  $\varphi = 0, 45$  and  $90^0$  to the rolling direction (RD).

The texture of the sheets is characterized by the IO of deformation of the bcc-metals.

At high deformations, twin reorientations were observed. The integral characteristics of the texture (ICT) were determined from the analysis of the orientation distribution functions for the annealed sheets. For deformed samples, the ICT was calculated from the results of anisotropy E measurements. Damage (D) was determined from the ratio of the E defect of the deformed steel sheet relative to the annealed reference. The results were compared with the data of electron microscopy. The anisotropy D was approximated by Fourier series with two and four even harmonics.

The approximation of the damage anisotropy curves by Fourier type series of type:  $E(\varphi) = A_0 + A_2 \cos 2\varphi + A_4 \cos 4\varphi$  corresponds to the experiment, which makes it possible to describe the anisotropy of D ( $\varphi$ ) by fourth-rank tensors.

**Key words:**  $\alpha$ -iron, texture, Young's modulus, anisotropy, integral characteristics of the texture, damage, Fourier analysis, tensor

Підписано до друку 01.08.2017 р. Формат 60x88/16.  
Папір офсетний. Обсяг 0,9 друк. арк. Наклад 100 прим.  
Надруковано в інформаційно-видавничому  
центрі Університету Ушинського  
65020, м. Одеса. вул. Старопортофранківська, 26