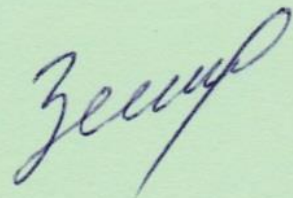


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА

Зєтова Тетяна Расімовна



УДК 538.911; 539.3/.4

**СУБСТРУКТУРНІ ТА ОРІЄНТАЦІЙНІ ЗМІНИ, ЩО
ЗДІЙСНЮЮТЬСЯ В ХОДІ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ
ДВОВИМІРНИХ ПОЛІКРИСТАЛІВ АЛЮМІНІЮ І МІДІ ПРИ
КІМНАТНІЙ ТЕМПЕРАТУРІ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук, професор
Бадіян Євген Юхимович,
Харківський національний університет імені
В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки
України, професор кафедри фізики твердого
тіла.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
Петченко Олександр Матвійович,
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова МОН
України, завідувач кафедри фізики.

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Мазілова Тетяна Іванівна,
Національний науковий центр "Харківський
фізико-технічний інститут" НАН України,
провідний науковий співробітник.

Захист відбудеться «27» серпня 2017 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.03 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. імені К.Д. Синельникова).

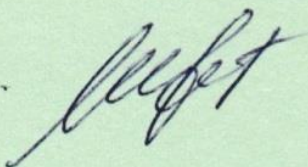
З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, а також на сайті фізичного факультету ХНУ імені В. Н. Каразіна.

Режим доступу: http://physics.karazin.ua/ua/dis_zachyst.html

Автореферат розісланий

«27» Травня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 64.051.03



О. В. Шурінова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Відомо, що здатність до пластичного деформування полікристалічних металевих матеріалів визначається характеристиками їх мікроструктури. Для прогнозування механічної поведінки матеріалів, які перебувають під дією механічних напружень, необхідно отримати дані про їх вихідний структурний стан і встановити механізми структурних змін, що здійснюються в них в ході пластичної деформації, які призводять до утворення субзеренної структури.

Проблема дослідження субструктури і визначення її характеристик (розмір субзерен і їх кристалографічна орієнтація) *in situ* в процесі деформування полікристалічних зразків є найважливішою при визначенні механізмів узгодження пластичної деформації зерен. Необхідною вимогою до методики, яка застосовується до таких досліджень, є високе лінійне і кутове розділення, а також неперервність у часі отримання інформації про структурні зміни від усієї поверхні робочої частини зразка.

Відомі різні дифракційні методи визначення структурних і субструктурних характеристик в кристалічних зразках. До них слід віднести методи, які засновані на дифракції рентгенівських променів (РСА), просвічуючу (ПЕМ) та растрову (РЕМ) електронну мікроскопію. Метод ПЕМ тонких зразків є одним з найбільш інформативних при дослідженні дислокацій, проте він дуже локальний, оскільки один знімок дає інформацію про характеристику субзеренної структури на площі в кілька мікрометрів. Фольги, які використовуються для дослідження дислокаційної структури з використанням ПЕМ, повинні бути дуже тонкими та прозорими для електронів, що впливає на здійснення пластичного плину зразків, які деформовані безпосередньо в колоні електронного мікроскопа, і не дозволяє використовувати отримані результати для пояснення механізмів пластичної деформації масивних зразків. Останнім часом активно використовується методика визначення спектру дезорієнтацій зерен за допомогою приставок до РЕМ для автоматичної реєстрації картин дифракції зворотнорозсіяних електронів (EBSD) і їх аналізу та обробки за допомогою комп'ютера. До переваг методу EBSD можна віднести визначення кристалографічної орієнтації в різних точках зразка, що дозволяє виявити границі зерен і визначити спектр дезорієнтацій останніх. Інформація про спектр дезорієнтацій зерен є найважливішою для полікристалічних зразків. При області дослідження, яка не перевищує кілька квадратних міліметрів, і зерен мікронного розміру, дослідженню піддаються десятки тисяч зерен, що дозволяє зробити статистичну обробку отриманих результатів. Недоліками методу EBSD є: локальність дослідження, велика похибка у визначенні дезорієнтації, і, найголовніше, неможливість використання методу для досліджень зміни дезорієнтацій окремих ділянок для всього зразка в процесі впливу на нього зовнішніх чинників, а також для проведення експериментів *in situ*.

Таким чином, методики ПЕМ і EBSD не в повній мірі підходять для встановлення закономірностей еволюції і механізмів самоузгоджених змін структури і субструктури для всього досліджуваного полікристалічного зразка *in situ* в процесі його деформування. Для цього повинні бути розроблені та апробовані нові дифракційні методики, які дозволяють отримати експериментальні дані про субструктурні та орієнтаційні зміни, що здійснюються в ході пластичної деформації на різних структурних рівнях у всіх ділянках поверхні робочої частини полікристалічних зразків у процесі їх деформування.

У зв'язку з цим, тема дисертаційної роботи, в якій проведено дослідження, що спрямовані на встановлення фізичних закономірностей і механізмів субструктурних та орієнтаційних змін, що здійснюються в ході пластичної деформації двовимірних полікристалів алюмінію і міді при кімнатній температурі з використанням методики отримання кольорних орієнтаційних карт, яка заснована на використанні ефекту дифракції білого світла на квазіперіодичній структурі поверхні зразка, є **актуальною**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі фізики твердого тіла Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна в рамках держбюджетної НДР: №0112U005922 "Нелінійні оптичні властивості, спектроскопія фоточутливих і комплексних діелектричних тонкоплівкових систем, оптоелектронні дослідження". Здобувачка брала участь у виконанні зазначеної НДР як виконавець – аспірантка кафедри.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є вирішення наукового завдання, яке полягає у встановленні фізичних закономірностей та механізмів, субструктурних і орієнтаційних змін, що здійснюються в ході пластичної деформації двовимірних полікристалів алюмінію і міді при кімнатній температурі.

Для досягнення поставленої мети було необхідно:

1. Виготовити двовимірні полікристалічні зразки алюмінію і міді;
2. Розробити комп'ютерну методику автоматичного визначення кристалографічної орієнтації всіх зерен зразка, фактора Шміда для всіх систем ковзання і атестації границь зерен;
3. Вивчити механізми релаксації напруженого стану, що виникають в двовимірних полікристалічних зразках алюмінію на всіх стадіях пластичної деформації розтягуванням в умовах активного одноосьового навантаження із постійною швидкістю деформації при кімнатній температурі;
4. Встановити характер субструктурних та орієнтаційних змін, що відбуваються в окремих зернах двовимірних полікристалічних зразків міді і алюмінію *in situ* у процесі їх деформування;
5. Дослідити вплив субструктурних змін, які здійснюються у ході пластичної деформації двовимірних полікристалічних зразків алюмінію, на форму деформаційної кривої;

6. Встановити закономірність субструктурних та орієнтаційних змін, що призводять до виникнення у зразках тріщин, та визначити можливі механізми їх утворення.

Об'єктом дослідження були полікристалічні фольги алюмінію та міді, що містять наскрізні границі зерен (двовимірні полікристали).

Предмет дослідження - субструктурні та орієнтаційні зміни, що здійснюються у процесі пластичної деформації двовимірних полікристалів алюмінію та міді, продеформованих розтягуванням в умовах активного одноосового навантаження з постійною швидкістю деформування при кімнатній температурі.

Методи досліджень. Зеренну структуру у зразках формували з використанням методів термомеханічної обробки. Була сформована структура двох типів: умовно "крупнозернисті" та умовно "дрібнозернисті" зразки.

Мікроструктуру зразків виявляли хімічним травленням. Перед деформацією поверхню всіх зразків ретельно шліфували та полірували. Усі зразки деформували розтягуванням в умовах активного навантаження з постійною швидкістю деформації $\dot{\epsilon} \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$ при кімнатній температурі $T = 293 \text{ К}$. Дослідження структури поверхні зразків до та після їх деформації проводили методом оптичної мікроскопії. При дослідженні поверхні двовимірних полікристалічних зразків використовували інтерферометр МП 4М.

Для дослідження субструктурних та орієнтаційних змін, що здійснюються в ході пластичної деформації двовимірних полікристалічних зразків алюмінію та міді, була використана методика отримання кольірних орієнтаційних карт, основою якої є виявлений авторами ефект дифракції білого світла на квазіперіодичній структурі поверхні зразка. З метою збільшення лінійного та кутового розділення цієї методики було розроблено метод візуалізації візуально невиразних відтінків кольору на кольірних орієнтаційних картах (КОК).

Для визначення кристалографічної орієнтації зерен використовували рентгенографічний метод Лауе. Розроблено комп'ютерну методику автоматичного визначення кристалографічної орієнтації всіх зерен зразка, фактора Шміда для всіх систем ковзання та атестації границь зерен. Основним алгоритмом застосування цієї методики є визначення та побудова системи одиничних радіус-векторів нормалей до відбивальних площин (за даними лауєграми), системи аналогічних векторів для кристала з відомою орієнтацією та їх поєднання.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у тому, що в ній:

1. Вперше виявлений ефект субструктурних та орієнтаційних змін, які відбуваються на початкових етапах пластичної деформації двовимірних полікристалів алюмінію як спосіб релаксації напруженого стану зразка.

2. Візуалізація зміни субзеренної структури у процесі деформування двовимірного зразка полікристалічного алюмінію дозволила вперше виявити ефект "розсіпання" границь зерен та встановити можливий механізм цього явища.

3. Вперше виявлено аномально високу локальну деформацію ($\varepsilon = 40\%$) ділянки двовимірного зразка алюмінію з "крупнозернистою" структурою, яка містить границю зерен загального типу, що призводить до її "розпушування" та утворення у приграничній області границі тріщини, подальше поширення якої відбувається у тілі зерна.

4. Експериментально показано, що дрібні субзерна (1- 5 мкм) з широким спектром дезорієнтацій, який змінюється у процесі деформування зразка, виявлені поблизу границі, відіграють акомодативну роль на границі зерна при його деформації.

5. Показано, що різноманіття вихідної мікроструктури двовимірних полікристалів міді приводить до різних способів релаксації напруженого стану в ході їх деформації і, нарешті, до зміни механічних характеристик зразків. Так, уперше експериментально показано, що в двовимірних полікристалічних зразках міді, що містять тільки двійникові границі, які перетинають всю поверхню зразка, у процесі їх пластичної деформації при кімнатній температурі поблизу двійникових границь виникають екструзії і інтрузії як способи релаксації напруженого стану.

6. Встановлено, що у зразках міді, що містять двійники, які відрізняються за формою, розмірами та орієнтацією, а також границі зерен спеціального та загального типу, у процесі їх пластичної деформації виникають різноманітні ротаційні структури та проявляється ефект прозорості двійникових границь для дислокацій.

7. Встановлено, що у зразках міді з умовно "дрібнозернистою" мікроструктурою з границями зерен загального типу та наявністю всередині цих зерен великої кількості двійників при їх деформації у тілі кожного із зерен здійснюється інтенсивне дислокаційне ковзання, розвиваються ротаційні ефекти. Показники пластичності таких зразків зростають одночасно зі збільшенням їх границі міцності.

Практичне значення отриманих результатів. Основні результати досліджень можуть бути використані при розробці полікристалічних матеріалів з ГЦК структурою з прогнозованими механічними характеристиками. Розроблені оригінальні методи та методики можуть бути використані при виконанні науково-дослідних робіт. Виявлені механізми аномально високої локальної пластичної деформації окремих зерен полікристалічних зразків та механізми виникнення та розвитку тріщин можуть бути використані при створенні теорії міцності та пластичності полікристалічних матеріалів. Отримані результати можуть бути застосовані для прогнозування та поліпшення механічних властивостей конструкційних та функціональних матеріалів, що використовуються у вигляді фольг, стрічок, тонких плівок. Методики визначення кристалографічної орієнтації

зерен на поверхні полікристалічного зразка і візуалізації орієнтаційної неоднорідності та морфології поверхні монокристала або окремих зерен полікристала, які розроблені та апробовані у ході виконання досліджень за темою дисертації, захищені патентами на винахід.

Особистий внесок здобувача. Здобувачка брала безпосередню участь у постановці завдань дисертаційної роботи, розробці комп'ютерної методики автоматичного визначення кристалографічної орієнтації всіх зерен зразка, фактора Шміда для всіх систем ковзання та атестації границь зерен. Експериментальні дослідження субструктурних і орієнтаційних змін, які здійснюються у процесі пластичної деформації двовимірних полікристалів алюмінію і міді (експерименти *in situ*), виконані здобувачкою особисто. Всі структурні дослідження проведені за безпосередньою участю здобувачки. При підготовці всіх публікацій за темою дисертаційної роботи здобувачка брала безпосередню участь в аналізі, систематизації та узагальненні отриманих результатів, на основі яких вона спільно з науковим керівником сформулювала висновки дисертаційної роботи.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних наукових конференціях: VII Міжнародній науковій конференції “Фізичні явища в твердих тілах”, 15 – 14 грудня 2005 р., Україна; VIII Міжнародній науковій конференції “Фізичні явища в твердих тілах” 11 – 13 грудня 2007 р., Україна, Харків, ХНУ імені В. Н. Каразіна; 47 Міжнародній конференції "Актуальные проблемы прочности", 1 – 5 червня 2008 р., м. Нижній Новгород; IX Міжнародній науковій конференції “Фізичні явища в твердих тілах”, 1 – 4 грудня 2009 р., Україна, Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна; IX Міжнародній науковій конференції “Фізичні явища в твердих тілах”, 1 – 4 грудня 2009 р., Україна, Харків, ХНУ імені В.Н. Каразіна; 52-й Міжнародній конференції “Актуальные проблемы прочности”, 4 – 8 червня 2012 р., м. Уфа, Росія; 18-й Міжнародній науковій конференції “Физика прочности и пластичности материалов”, 2 – 4 червня 2012 р., м. Самара, Росія; 85. VII Міжнародній конференції «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (MPFP-2013) 17-23 липня 2013 р., м. Тамбов; XIX Міжнародній науковій конференції “Физика прочности и пластичности материалов”, 8 –11 червня, 2015 р., м. Самара; Міжнародній науковій конференції “Фізичні явища в твердих тілах”, м. Харків, 2015 р.

Публікації. За темою дисертації здобувачкою у співавторстві опубліковано 22 наукові праці. Серед них 9 статей у наукових журналах, 2 патенти на винахід та 11 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, примітки, списку використаних джерел та 1 додатку. Зміст досліджень викладено на 110 сторінках, включаючи 62 рисунка (на 1 окремій сторінці), 5 таблиць. Список використаних джерел, викладений на 13 стор., містить 123 бібліографічних найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вибору теми дисертації. Визначено мету, завдання дослідження та показано зв'язок виконаної дисертаційної роботи з науковими програмами, темами. Сформульована наукова новизна отриманих результатів та наведено інформацію про можливе практичне використання результатів досліджень. Визначено особистий внесок здобувачки, наведені результати апробації роботи та інформація про публікації і структуру дисертації.

Перший розділ "Пластична деформація, субструктурні та орієнтаційні зміни як спосіб релаксації напруженого стану у кристалічних тілах (огляд літератури)" присвячений розгляду та аналізу літературних даних та основних етапів розвитку наукової думки за розв'язуваним завданням. Розглянуто можливі механізми узгодження пластичної деформації в сусідніх зернах полікристалічних зразків. Викладено сучасні фізичні уявлення про стадії пластичної деформації. Аналіз літературних даних показує, що пластична деформація полікристалічних матеріалів і в кінцевому підсумку їх механічні характеристики залежать не тільки від характеру субструктурної та орієнтаційної неоднорідностей в зразках при їх деформування, а й, більшою мірою, від закономірностей їх зміни у процесі деформування. Аналіз літературних даних показує, що для вирішення проблеми міцності і пластичності кристалічних матеріалів недостатньо даних щодо дослідження на мікроскопічному рівні субструктурних і орієнтаційних змін, які відбуваються в зразках і одержані із застосуванням методів просвічуючої та скануючої електронної мікроскопії. Необхідні дослідження субструктурної неоднорідності та її зміни на макроскопічному рівні, причому ці дослідження повинні бути проведені *in situ* в процесі деформування зразка одночасно у всіх його частинах. На підставі проведеного аналізу обґрунтована мета дисертаційної роботи і завдання дослідження.

У другому розділі **"Об'єкти дослідження та методики проведення експериментів"** описані методики отримання двовимірних полікристалів алюмінію та міді з наскрізними границями зерен; методики механічних випробувань цих зразків розтягуванням в умовах активного навантаження з постійною швидкістю деформації $\dot{\epsilon} \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$ при $T = 293 \text{ K}$ та реєстрації деформаційної кривої; методики визначення орієнтаційних та структурних змін у зразку *in situ* в процесі деформування за допомогою колірних орієнтаційних карт; методики візуалізації субструктурної та орієнтаційної неоднорідності; методики визначення кристалографічної орієнтації окремих зерен полікристалічного зразка, фактора Шміда для всіх систем ковзання та атестації границь зерен.

Для дослідження субструктурних та орієнтаційних змін, що здійснюються в ході пластичної деформації полікристалічних зразків, з фольг алюмінію (99,96 %) та міді (99,97 %) були виготовлені зразки двовимірних полікристалів з різним розміром зерна, які містять тільки наскрізні границі

зерен. Для отримання зразків з різним розміром зерна експериментально були підібрані умови їх термомеханічної обробки. Зернову мікроструктуру зразків виявляли хімічним травленням. Середній розмір зерен полікристалів алюмінію становив 5 - 20 мкм. Робоча частина зразків становила $100 \times 20 \times 0,15$ мм³. Середній розмір зерен полікристалів міді становив 1 - 10 мкм. Зразки міді мали різну кількість спеціальних, у тому числі двійникових, границь зерен. Розміри робочої частини зразків міді були такими $70 \times 10 \times 0,2$ мм³.

Перед деформацією поверхню всіх зразків ретельно шліфували, полірували та на ній методом хімічного травлення створювався квазіперіодичний рельєф для реєстрації кольорних орієнтаційних карт. Усі зразки деформували розтягуванням в умовах активного навантаження з постійною швидкістю деформації $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$ при кімнатній температурі $T = 293 \text{ K}$.

Дослідження субструктурних і орієнтаційних змін, що здійснюються у процесі пластичної деформації двовимірних полікристалічних зразків алюмінію і міді, проводили для всіх зерен, з яких складаються зразки, до їх деформування та *in situ* у процесі їх деформування. Ці дослідження здійснювали в три етапи. На першому етапі після створення на одній із поверхонь зразка хімічним травленням квазіперіодичного рельєфу, реєстрували кольорні орієнтаційні карти (КОК) в просторі кольорів RGB, що містить 16,7 млн. відтінків кольору. Таке велике число відтінків кольору не завжди дає можливість ідентифікувати дезорієнтацію ділянки поверхні зразка (зерна) через візуально невиразні відтінки кольору і, таким чином, визначити характеристики субзерен.

Використання методу візуалізації (другий і третій етап досліджень) дозволяє виявити в будь-якій ділянці поверхні зразка субструктурну і орієнтаційну неоднорідність та визначити її характеристики. Для цього необхідно, по-перше, перейти до розгляду кольірної орієнтаційної карти в відтінках червоного, синього або зеленого кольорів, які складають простір кольорів RGB. Число відтінків кожного з вищезазначених кольорів становить 256. Приклад такої кольірної орієнтаційної карти, яка отримана від одного з зерен полікристалічного зразка алюмінію у відтінках червоного кольору, наведено на рис.1. Візуально це кольірне зображення поверхні зерна практично однорідне, але воно дозволяє отримати розподіл субзерен за розмірами (S_n) і умовною кристалографічною орієнтацією (n) (рис.2). Розміри субзерен визначаються площею ділянки кольірної орієнтаційної карти із одним і тим же відтінком кольору, а умовна кристалографічна орієнтація – номером відтінку кольору з 256 можливих. Для виявлення субструктури на поверхні зерна необхідна заміна візуально нерозпізнаних відтінків червоного кольору на кольірній орієнтаційній карті на візуально помітні, які заздалегідь підібрані з простору кольорів RGB. Схема такої заміни наведена у таблиці 1. На рис. 3 наведено кольорове зображення поверхні зерна після заміни, що дозволяє визначити характеристики субструктури.

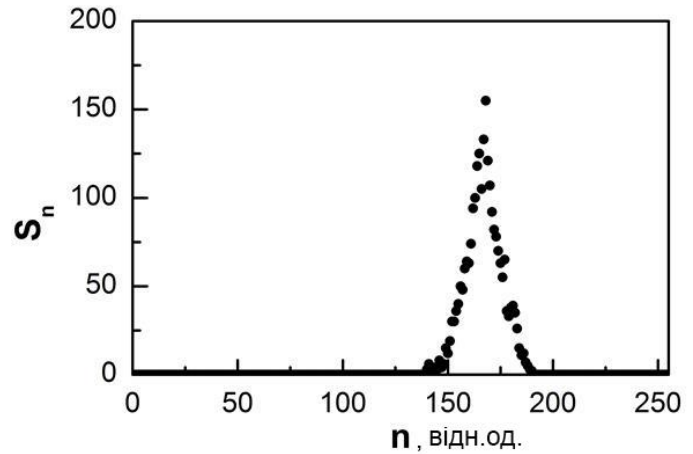


Рис.1. КОК, яка отримана від одного з зерен двовимірного полікристалічного зразка алюмінію у відтінках червоного кольору.

Рис.2. Розподіл областей з однаковим відтінком кольору на колірній орієнтаційній карті за їх площею S_n (у пікселях) та відтінками червоного кольору n , для КОК, яка наведена на рис. 1.

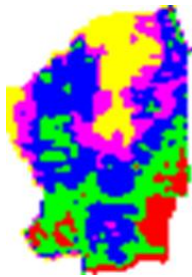


Рис.3. КОК поверхні зерна, яке наведене на рис.1, після заміни на ній візуально невиразних відтінків кольору на заздалегідь підібрані візуально помітні.

Таблиця 1

Схема заміни візуально невиразних відтінків червоного кольору на колірних орієнтаційних картах поверхні одного з зерен двовимірного полікристалічного зразка алюмінію візуально помітними, які заздалегідь підібрані з простору кольорів RGB ($\Delta n = 10$).

S_n , pixel	n	Візуально невиразні відтінки	Візуально помітні відтінки	R, G, B
65	140 – 150			255, 0, 0
440	151 – 160			0, 255, 0
932	161 – 170			0, 0, 255
612	171 – 180			255, 255, 0
103	181 – 190			255, 0, 255

Для визначення кристалографічної орієнтації всіх зерен (та їх частин), фактора Шміда для всіх систем ковзання і повної атестації границь зерен

двовимірних полікристалічних зразків міді або алюмінію до їх деформування та після руйнування була розроблена комп'ютерна методика. Основним алгоритмом використання цієї методики є визначення та побудова системи одиничних радіус - векторів нормалей до відбивальних площин $\vec{P}_n$ (1), за даними лауеграми (рис. 4), системи аналогічних векторів для кристала з відомою орієнтацією і поєднання їх центрів.

Комп'ютерна програма дозволяє знайти оптимальне взаємне розташування спектрів цих векторів у просторі, що призводить до максимального збігу векторів, і дозволяє кожній Лауе-плямі приписати індекси відбивальної площини. Таким чином, особливостями цієї методики є практично автоматична обробка лауєграм без використання стереографічних проекцій.

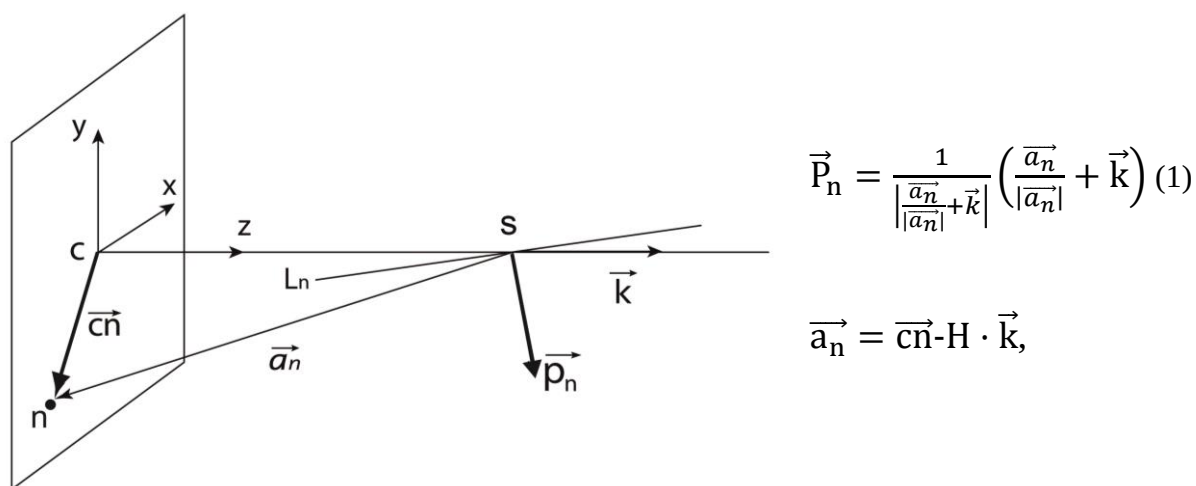


Рис.4. Схема побудови одиничних векторів нормалей $\vec{P}_n$ до відбивальних площин: S – зразок; L_n – відбивальна площина, n – Лауе-пляма, $\vec{k}$ – одиничний орт осі Z; H – відстань зразок - плівка.

Розроблені методики можуть бути використані для матеріалів з "крупнозернистою" структурою.

У розділі 3 "Субструктурна та орієнтаційна неоднорідність двовимірних полікристалічних зразків алюмінію і її зміна у процесі пластичної деформації" представлені результати експериментальних досліджень субзереної і орієнтаційної неоднорідності різних зерен досліджуваних двовимірних полікристалів до їх деформації; хаотичної зміни розмірів, орієнтації субзерен і форми субзерених границь, субструктурних змін на початковій стадії пластичної деформації ($\epsilon \sim 5\%$) полікристалічних зразків алюмінію; описано фрагментацію субзереної структури окремих зерен полікристалічного зразка алюмінію у процесі деформування; вплив субструктурних змін, які розвиваються у ході пластичної деформації двовимірних полікристалічних зразків алюмінію, на форму деформаційної

кривої; субструктурну, орієнтаційну неоднорідність, яка передуює виникненню у зразках тріщин; розвороти зерен і субзерен, що відбуваються у процесі пластичної деформації.

Визначення субструктурної та орієнтаційної неоднорідності за кольорними орієнтаційними картами з використанням методу візуалізації показує, що всі зерна досліджених двовимірних полікристалічних зразків алюмінію до їх деформування є субструктурно неоднорідними. Субзерна мають різну форму і розміри, і несуттєво дезорієнтовані одне відносно одного.

Використання методу одержання від поверхні зразка кольорних орієнтаційних карт і їх візуалізації для визначення субструктурної неоднорідності на поверхні різних зерен полікристалічних зразків дозволило визначити механізми релаксації напруженого стану, що виникає у полікристалічних зразках алюмінію на ранніх стадіях пластичної деформації (рис.5).

Аналіз виду кольорних орієнтаційних карт, які отримані від поверхні зерна на різних етапах пластичної деформації зразка $\varepsilon = 0,04\% - 0,1\%$, і їх візуалізація показують, що у процесі деформування розміри ділянок зерен на поверхні зразка з однією і тією ж орієнтацією змінюються, однак якісно розподіл кольору на зображенні поверхні зерна залишається незмінним. При відносній деформації $\varepsilon > 0,1\%$ відбувається не тільки зміна розмірів ділянок поверхні зерна з певною орієнтацією, а й виникнення областей поверхні з новою кристалографічною орієнтацією.

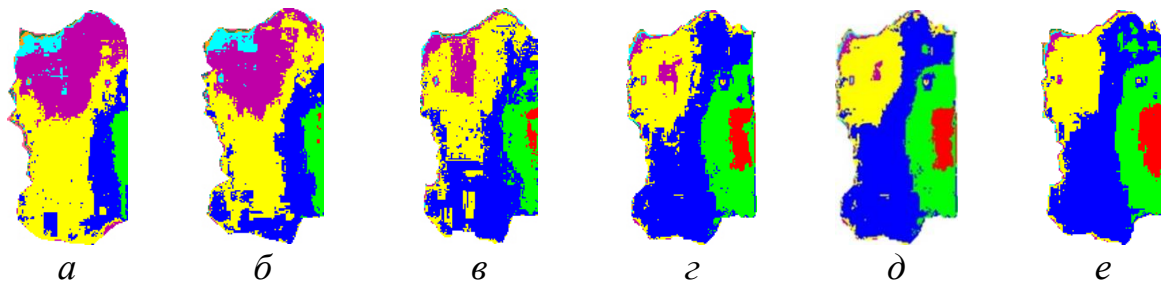


Рис.5. Характерні види субструктурної та орієнтаційної неоднорідності одного з зерен двовимірного полікристалічного зразка алюмінію на різних етапах його деформування: *а* – $\varepsilon = 0\%$; *б* – $\varepsilon = 0,04\%$; *в* – $\varepsilon = 0,08\%$; *г* – $\varepsilon = 0,1\%$; *д* – $\varepsilon = 0,2\%$; *е* – $\varepsilon = 0,6\%$.

Ступінь критичної деформації, що відповідає закінченню початкового етапу деформування зразка, у залежності від дослідженого зразка і зерна у ньому змінюється у межах від $0,1$ до $0,2\%$. При досягненні ступеня деформації $\varepsilon \approx 5\%$ відбувається субзерена і орієнтаційна перебудова у зернах зразка. Використання методу візуалізації кольорних орієнтаційних карт з найвищим кутовим розділенням ($\Delta\varphi=1$) дозволило експериментально виявити на ранніх стадіях пластичної деформації ($\varepsilon \leq 5\%$) двовимірних полікристалічних зразків алюмінію хаотичну зміну розмірів субзерен, їх

кристалографічної орієнтації та форми субзерених границь. Як правило, це стосується субзерен, розміри яких значно менші за товщину зразка. У процесі пластичної деформації відбувається "розсіпання" границь блоків у зернах і поява в них нових субзерених границь. При досягненні ступеня відносної деформації $\approx 5 - 10 \%$ формується відносно стійка субзерена субструктура, яка у кінцевому підсумку і визначає закономірності подальшого розвитку пластичної деформації та характер руйнування зразка.

У результаті проведення систематичних досліджень субструктурних та орієнтаційних змін, що відбуваються у різних зернах двовимірних полікристалічних зразків алюмінію *in situ* у процесі деформування зразка встановлено, що основним видом цих змін є фрагментація субзереної структури з широким спектром дезорієнтації (рис.6).

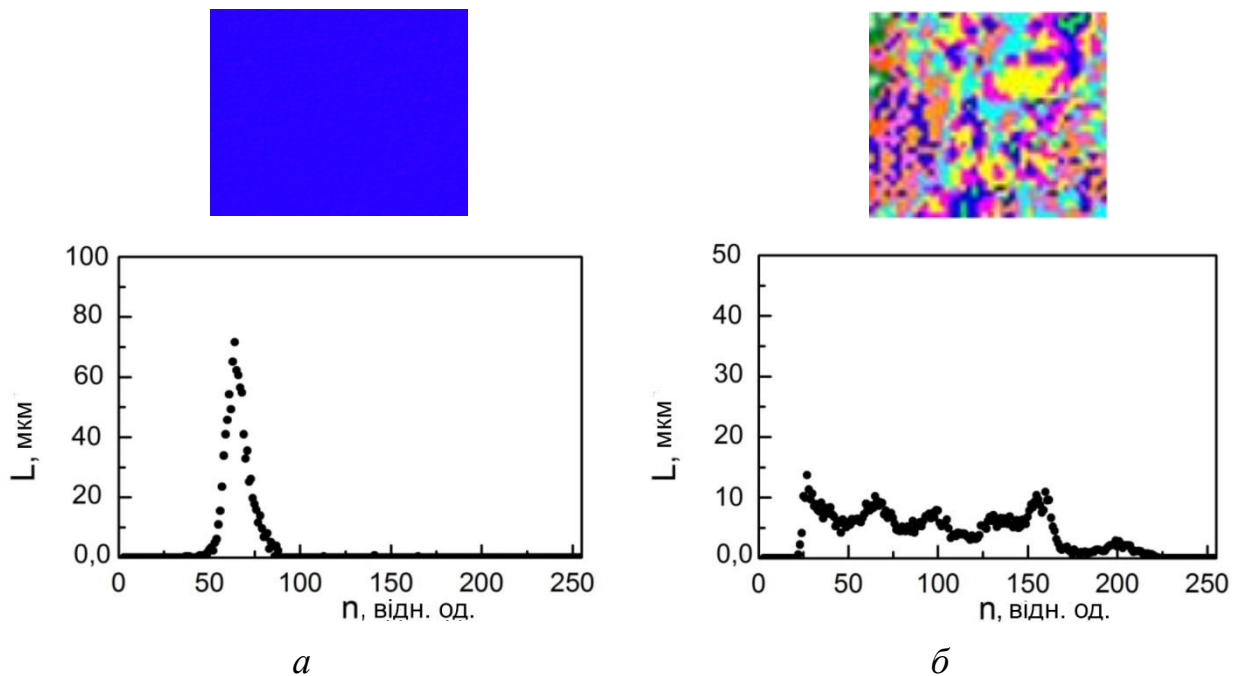


Рис.6. КОК однієї й тієї ж ділянки поверхні для одного з зерен полікристалічного зразка алюмінію після візуалізації ($\Delta n = 20$) на ній фрагментованої структури та криві розподілу субзерен за розмірами та умовною кристалографічною орієнтацією, що відповідають цим ділянкам: *a* – до деформування зразка; *б* – після деформації зразка на 17 %.

В умовно "крупнокристалічних" двовимірних полікристалічних зразках алюмінію ($\bar{d} > 10$ мм) при використанні розробленої методики дослідження ротаційних та орієнтаційних змін *in situ* у процесі деформування зразків вдалося виявити "стрибки" деформаційного напруження. Встановлено, що причиною таких "стрибків" є виникнення та швидкий розвиток ділянок переорієнтації, які перетинають усе зерно. На рис. 7 наведено типову деформаційну криву (*a*) двовимірної полікристалічної зразка алюмінію ($\bar{d} \approx 15$ мм), на якій виявляється "стрибок" деформуючого напруження, та

відповідна цій деформації колірна орієнтаційна карта після візуалізації (б) поверхні одного з зерен зразка. Видно, що на колірній орієнтаційній карті чітко виявляється досить широка смуга переорієнтації, яка перетинає усе зерно. Час її розвитку не перевищує декількох секунд. При такій швидкості розвитку не відбувається релаксації напруженого стану у зерні, що приводить до "стрибка" деформуючого напруження.

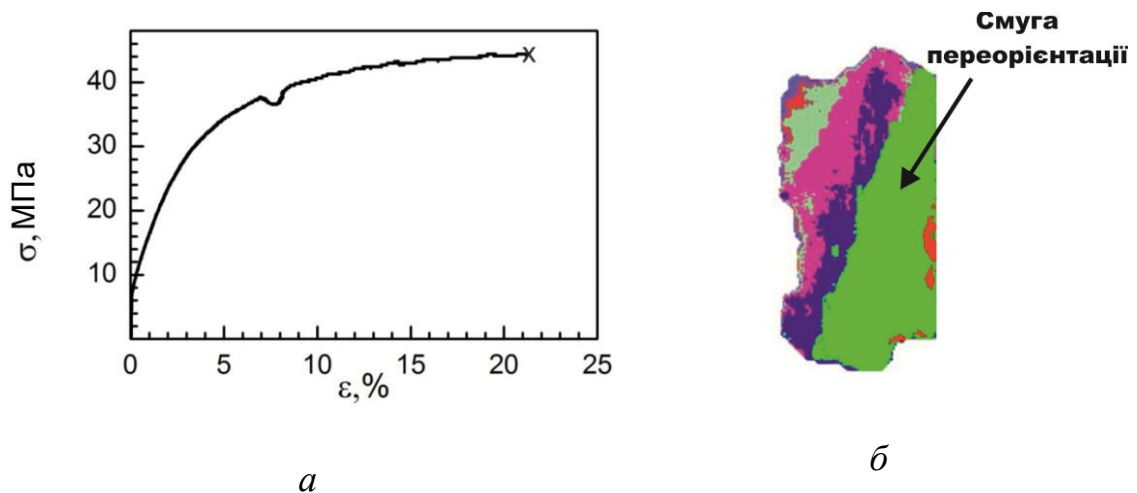


Рис.7. Типова деформаційна крива для двовимірного "крупнокристалічного" зразка алюмінію (а) та колірна орієнтаційна карта поверхні одного з його зерен після її візуалізації (б), що відповідає ступеню відносної деформації зразка $\varepsilon \approx 7\%$.

Субструктурні та орієнтаційні зміни, що здійснюються у ході пластичної деформації двовимірних полікристалічних зразків алюмінію, різноманітні. Встановлено, що в різних зернах одного і того ж зразка можуть відбуватися субструктурні та орієнтаційні зміни, різні за характером та за закономірностями розвитку. Зокрема, можливі субструктурні та орієнтаційні зміни, які призводять до утворення в зерні тріщини. Нижче наведені колірні орієнтаційні карти, що характеризують різні етапи виникнення і розвитку тріщини як результат попередніх субструктурних і орієнтаційних змін (рис. 8).

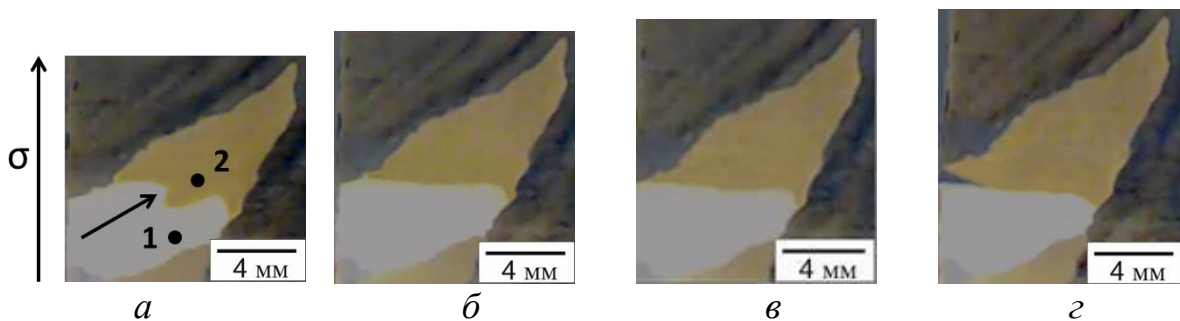


Рис.8. КОК, які отримані від ділянки двовимірного полікристалічного зразка алюмінію до деформування (а) та після його деформування на 9 % (б), 10 % (в) та 11 % (г) (точками 1 та 2 позначені ділянки, від яких були отримані рентгенограми).

Одна з субзеренних границь (на рис.8 *а* вона вказана стрілкою) до деформування зразка є звивистою. Підтвердженням того, що границя між ділянками зерен 1-2 є субзеренною є однаковий вид лауеграм, які одержані від обох цих ділянок. У процесі деформування зразка субзерена границя вирівнюється (рис.8 *б*) та переміщується на край зразка (рис.8 *в*). Переміщення границі супроводжується збільшенням дезорієнтації на границі $\Delta\theta$. На тій ділянці, де границя перетинає край зразка, утворюється тріщина (рис. 8 *г*), розвиток якої відбувається уздовж границі субзерна.

Ще один приклад, який ілюструє субструктурні та орієнтаційні зміни, що передують виникненню тріщини у зразку, наведений на колірних орієнтаційних картах, які отримані від ділянок двовимірного полікристалічного зразка алюмінію, *in situ* після візуалізації на них ефекту "розсіпання" границі (рис.9).

Експериментально показано, що характерним для досліджених зразків двовимірних полікристалів алюмінію є вперше виявлений ефект "розсіпання" малокутових границь зерен та границь загального типу в ході пластичної деформації. "Розсіпання" першої границі зерен супроводжується зменшенням кута дезорієнтації зерен, причому, це зменшення в основному відбувається через зміни кристалографічної орієнтації зерна (рис.9).



Рис.9. КОК приграничних ділянок двох зерен 3 та 5 двовимірного полікристалічного зразка алюмінію після візуалізації на них ефекту "розсіпання" границі: *а* – $\varepsilon = 0\%$; *б* – $\varepsilon = 27\%$.

Причиною "розсіпання" границі загального типу, можливо, є істотне збільшення її довжини більш ніж у 4 рази, що призводить до "розпушування" границі та виникнення на ній тріщини. Встановлено, що подальше поширення тріщини відбувається у тілі зерна. Таким чином, експериментально показано, що "розсіпання" границь зерен при пластичній деформації двовимірного полікристалічного зразка алюмінію при кімнатній температурі та $\dot{\varepsilon} \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ обумовлено перебудовою субзереної структури поблизу границь.

Однією з особливостей пластичної деформації двовимірних полікристалічних зразків алюмінію є її локальна неоднорідність.

Експериментально показано, що локальна відносна пластична деформація окремих зерен двовимірних полікристалів алюмінію може значно перевищувати відносну деформацію всього зразка. Така деформація, як правило, супроводжується помітним поворотом всього зерна в цілому. Для невеликої частини всіх досліджених зерен була виявлена локальна відносна деформація, що значно перевищує відносну деформацію всього зразка. Пластична деформація таких зерен супроводжується помітною зміною їх кристалографічної орієнтації. Аналіз колірних орієнтаційних карт, які отримані від поверхні цих зерен у процесі деформації зразка, дозволив встановити механізми пластичної деформації, що призводять до здійснення орієнтаційних змін у зерні, які полягають у специфічній та послідовній орієнтаційній перебудові субзереної структури в тілі зерна (рис.10). Поблизу границі зерна виявлена дрібноблочна структура ($\bar{d} < 5$ мкм) з широким спектром дезорієнтацій, який змінюється у процесі деформації зерна. Утворення та перебудова такої структури поблизу границь зерен, напевно, відіграє акомодативну роль та запобігає можливості порушення цілісності на границях зерен полікристалічного зразка при його деформації.

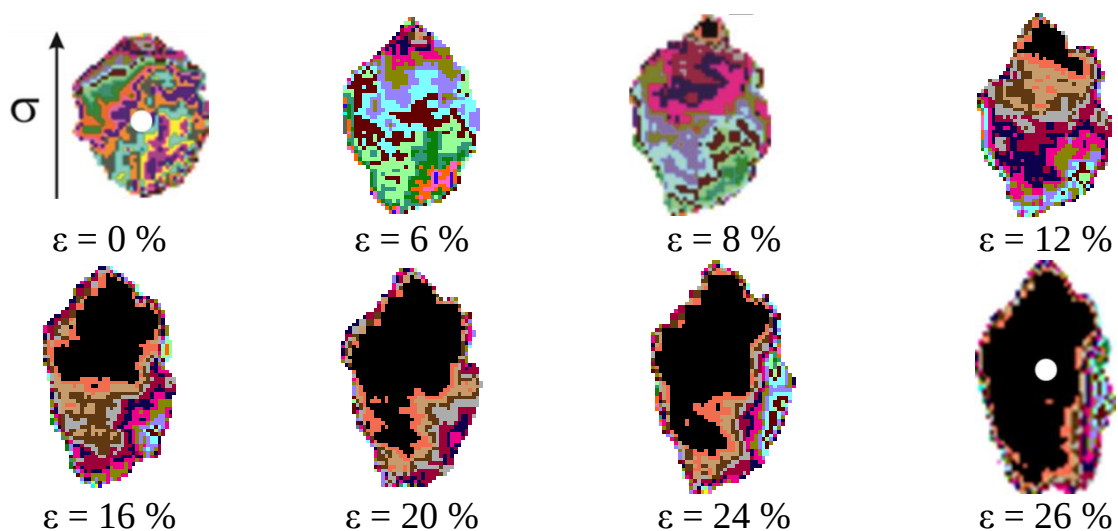


Рис.10. КОК, які отримані від одного із зерен полікристалічного зразка алюмінію на різних етапах, після візуалізації на них субструктурної та орієнтаційної неоднорідності. Точками відзначена область, для якої була визначена кристалографічна орієнтація методом Лауе.

У четвертому розділі "Структурні та субструктурні зміни, що здійснюються у процесі пластичної деформації в двовимірних полікристалічних зразках міді" наведені результати експериментального дослідження орієнтаційних та структурних змін, що здійснюються у ході пластичної деформації двовимірних полікристалічних зразків міді.

Експериментально показано, що зміною умов рекристалізації мідної фольги, товщина якої 200 мкм, можна змінити у зразках не тільки середній розмір зерен, але й тип всіх границь розділу, які є наскрізними. Умовно все

різноманіття структур, що є у рекристалізованих зразках, можна розділити на три типи. У зразках першого типу є тільки двійникові границі (рис. 11 *а*), які перетинають всю поверхню зразка. У структурі зразків (рис. 11 *б*) другого типу є двійники, що відрізняються за формою, розмірами та орієнтацією, границі зерен спеціального та загального типу. Зразки третього типу (рис. 11 *в*) мають умовно "дрібнозернисту" структуру з границями зерен загального типу. Середній розмір таких зерен становить ≈ 1 мм.

У процесі пластичної деформації зразків міді першого типу виявлено виникнення екструзій та інтрузій, форма яких різноманітна, але всі вони локалізовані поблизу двійників.

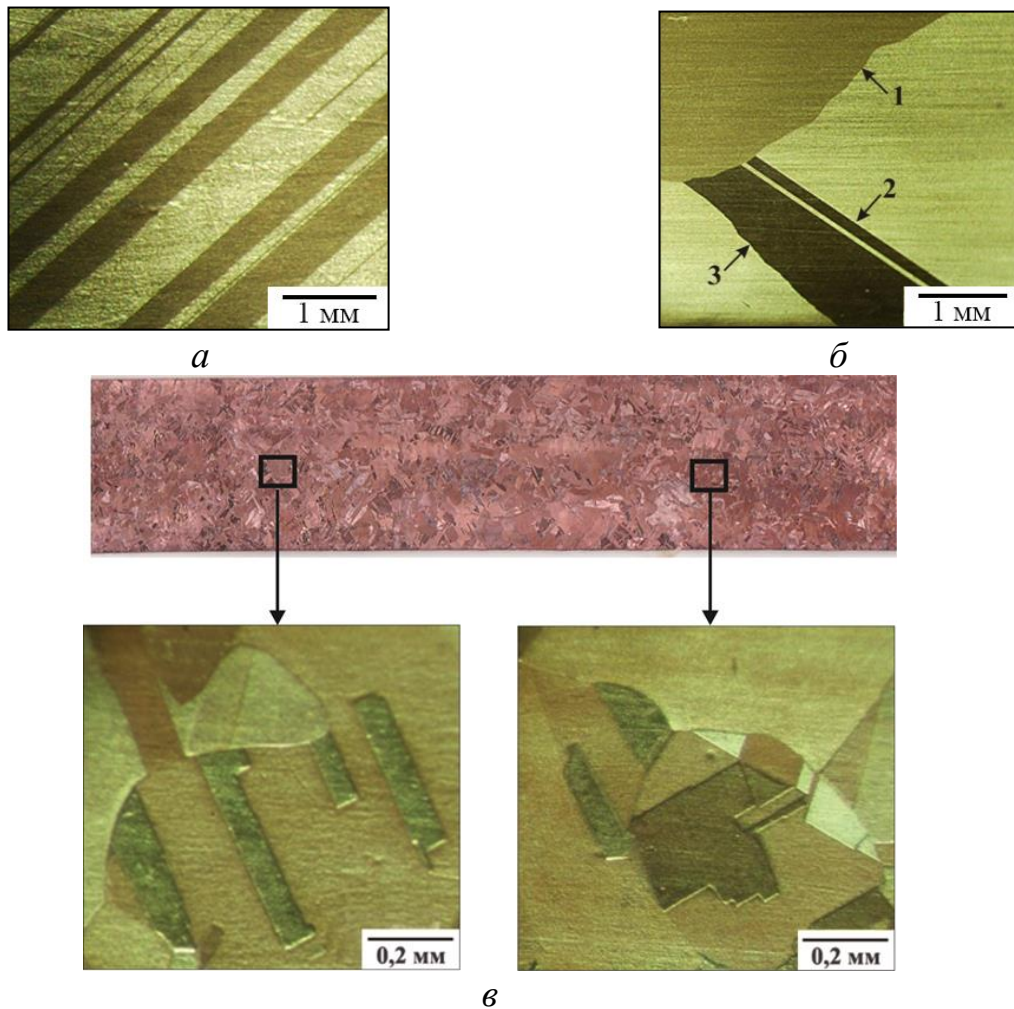


Рис.11. Характерні види мікроструктури двовимірних полікристалічних зразків міді, які отримані у результаті рекристалізації, в залежності від ступеня попередньої деформації.

Пластична деформація зразків другого типу, що мають "крупнозернисту" структуру, здійснюється за рахунок розвитку дислокаційного ковзання (рис.12 *а*) та ротацій ділянок зерна (1) (рис.12 *б*). В

окремих зернах виявлено проходження дислокаційного ковзання через двійникові границі (рис.12 в).

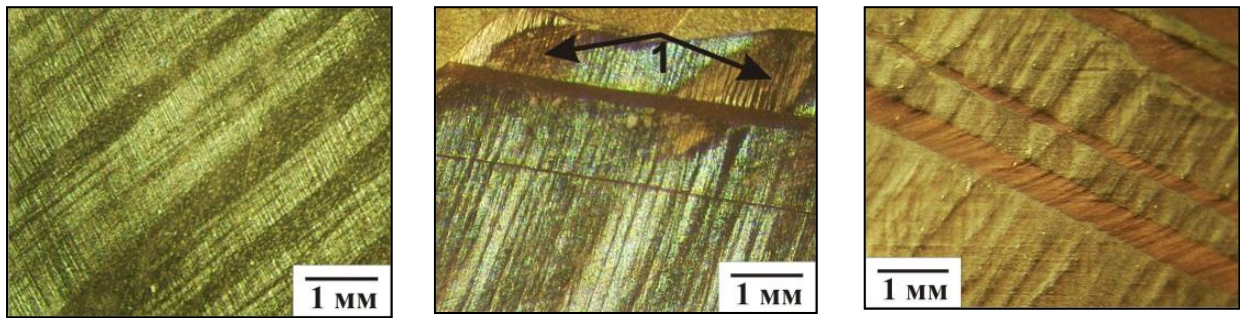
*a**б**в*

Рис.12. Фрагменти поверхні зразка міді після його деформування на 14 % .

Пластична деформація зразків третього типу (рис. 13 *a*), що містять границі зерен загального типу, призводить до утворення ротаційної структури (1) (рис. 13 *б*) та розвитку дислокаційного ковзання (рис. 13 *в*). В цих зразках досягаються найвищі значення границі міцності ($\sigma_b = 480$ МПа) та максимального відносного видовження δ_{max} (21 %) до руйнування зразків у порівнянні зі зразками першого та другого типу ($\sigma_b = 100, 125$ МПа). Показники пластичності таких зразків зростають одночасно зі збільшенням їх границі міцності.

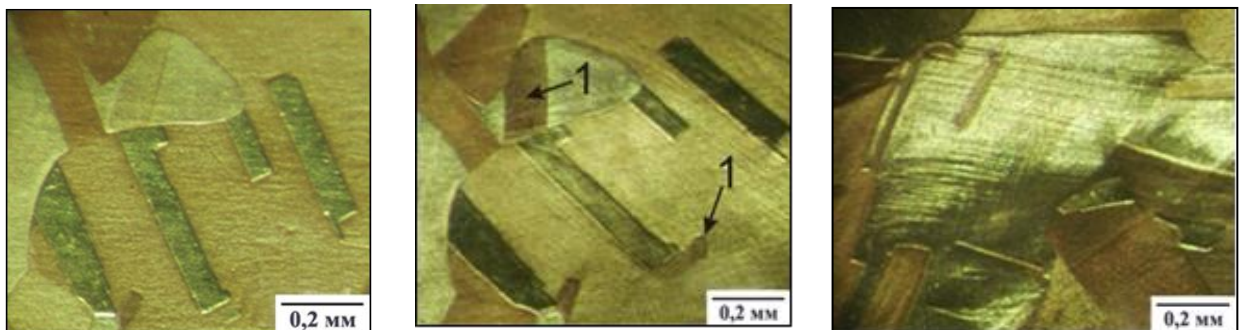
*a**б**в*

Рис.13. Мікрофотографії різних ділянок поверхні зразка двовимірного полікристала міді до деформування (*a*) та після його деформування на 10 %: *б* – виникнення ротацій (1), *в* – розвиток дислокаційного ковзання.

Експериментально виявлено, що у ході пластичної деформації зразків міді з двійниковою структурою при кімнатній температурі в умовах одноосового розтягу на їх поверхні виникають екструзії та інтрузії про що свідчить вид інтерферограм, які отримані з використанням інтерферометра МП 4М (рис.14). За своєю формою та розмірами екструзії досить різноманітні, але всі вони розташовані поблизу двійникових границь та орієнтовані під прямим кутом до них.

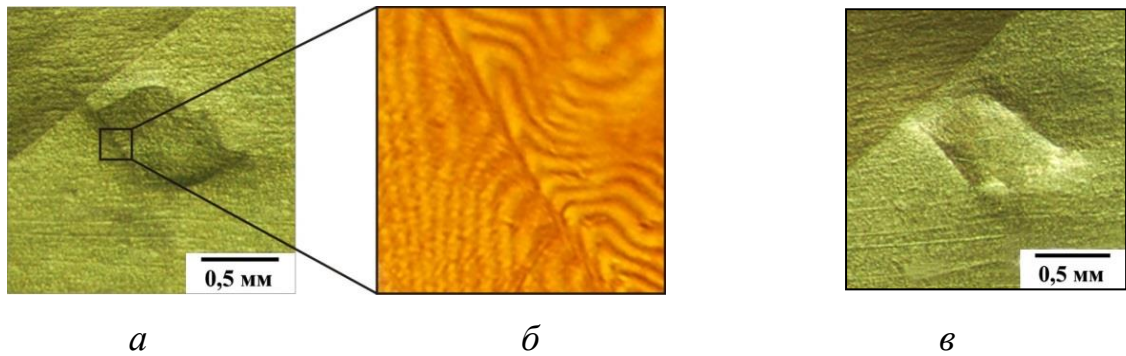


Рис.14. Види фрагментів поверхні зразка міді, продеформованого на 12 %, що свідчать про наявність на одній стороні поверхні зразка екструзії (а), а на протилежній його стороні – інтрузії (в) та інтерференційна картина від ділянки на границі між тілом зерна і екструзією (б).

Показано, що виявлений спосіб релаксації напруженого стану, який не властивий зразкам міді з низькою енергією дефекту упаковки через неможливість розвитку у них поперечного ковзання, може бути пов'язаний: з малою товщиною зразка (200 мкм), з наявністю тільки наскрізних двійникових границь, а також зі специфічною кристалографічною орієнтацією осі розтягу зразка, яка є близькою до напрямку $[\bar{1}12]$ та приводить до виникнення подвійного ковзання в системах $(\bar{1}11)[011]$ і $(111)[\bar{1}0\bar{1}]$.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене поставлене наукове завдання, яке полягає у встановленні фізичних закономірностей і механізмів субструктурних та орієнтаційних змін, що здійснюються у ході пластичної деформації двовимірних полікристалів алюмінію та міді розтягуванням в умовах активного навантаження з постійною швидкістю деформації при кімнатній температурі. Основні наукові та практичні результати:

1. Розроблена комп'ютерна методика, що дозволяє індиціювати лауєграми, визначати кристалографічну орієнтацію окремих зерен крупнозернистого полікристалічного зразка щодо основних напрямків у кристалі, фактор Шміда для всіх систем ковзання і тип границь зерен. Особливостями цієї методики є практично автоматична обробка лауєграми без використання стереографічних проєкцій шляхом порівняння одиничних векторів нормалей до відбивальних площин (за даними лауєграми) і аналогічних одиничних векторів нормалей до можливих відбивальних площин.

2. Експериментально показано, що вихідна субструктура двовимірних полікристалічних зразків алюмінію до їх деформування різноманітна. Вона має вузький спектр дезорієнтацій зерен і різниться характером розподілу субзерен за розмірами та кристалографічною орієнтацією, їх формою і розмірами.

3. Уперше виявлений ефект субструктурних змін, що відбуваються на початкових етапах пластичної деформації двовимірних полікристалічних зразків алюмінію і міді, як спосіб релаксації напруженого стану зразка.

4. Показано, що наявність "стрибків" на деформаційній кривій, яка отримана в ході пластичної деформації двовимірних умовно "крупнозернистих" зразків алюмінію при кімнатній температурі, пов'язана із виникненням і швидким розвитком ділянок переорієнтації субзеренної структури, які перетинають усе зерно.

5. Встановлено, що найбільш імовірним механізмом зміни субструктури у процесі пластичної деформації умовно "крупнозернистих" двовимірних полікристалічних зразків алюмінію є фрагментація субзеренної структури з широким спектром дезорієнтацій.

6. Візуалізація змін субзеренної структури і границь зерен у процесі деформування зразка алюмінію дозволила вперше виявити ефект "розсипання" границь зерен, який супроводжується зменшенням дезорієнтації на таких границях.

7. Експериментально виявлено, що локальна відносна деформація деяких зерен "крупнозернистих" двовимірних полікристалічних зразків алюмінію, продеформованих розтягуванням в умовах активного навантаження з постійною швидкістю деформації $\dot{\epsilon} \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$ при кімнатній температурі, до моменту їх руйнування може значно перевищувати відносну деформацію всього зразка. При цьому виявляється зміна орієнтації зерна в цілому.

8. Уперше виявлено аномально високу локальну деформацію ділянки "крупнозернистого" зразка алюмінію, яка містить границю зерен загального типу, що призводить до утворення у приграничній області границі тріщини, подальше поширення якої відбувається у тілі зерна.

9. Візуалізація субзеренної структури і визначення спектру дезорієнтацій субзерен у процесі деформування двовимірних полікристалічних зразків алюмінію дозволили вперше встановити механізм орієнтаційних поворотів зерна, який полягає у специфічній і послідовній перебудові субзеренної структури, що супроводжується звуженням спектру дезорієнтацій і приводить до підвищення ступеня пластичної деформації зерна. Поблизу границі зерен виявлена дрібноблочна структура ($\bar{d} < 5 \text{ мкм}$) з широким спектром дезорієнтацій, який змінюється у процесі деформації. Утворення та перебудова такої структури поблизу границь зерен, напевно, відіграє акомодативну роль та запобігає можливості порушення цілісності на границях зерен полікристалічного зразка при його деформації.

10. Експериментально показано, що зміною тільки ступеню попередньої деформації двовимірних полікристалічних зразків міді перед рекристалізаційним відпалом можна отримати зразки з різним розміром і різноманітною структурою границь зерен, з якої можна виділити три типи. У першому типі зразків є тільки двійникові границі, які перетинають всю поверхню зразка; у зразках другого типу є двійники, що відрізняються за

формою, розмірами і орієнтацією, границі зерен спеціального, загального типу; зразки третього типу мають умовно "дрібнозернисту" структуру ($\bar{d} \approx 1$ мм) із границями зерен загального типу і наявністю всередині цих зерен великої кількості двійників різного типу, які відрізняються за розмірами, формою і довжиною.

11. Показано, що різноманіття вихідної мікроструктури двовимірних полікристалів міді приводить до різних способів релаксації напруженого стану в процесі їх пластичної деформації і, в кінцевому підсумку, до зміни механічних характеристик зразків.

12. На поверхні зразків міді з мікроструктурою першого типу в процесі їх пластичної деформації при кімнатній температурі поблизу двійникових границь виникають екструзії та інтрузії, як способи релаксації напруженого стану. Встановлено, що можливою причиною виникнення на поверхні двовимірного полікристалічного зразка міді екструзії і одночасно на її протилежному боці інтрузії може бути специфічна кристалографічна орієнтація осі розтягу зразка, його товщина і наявність наскрізної двійникової границі.

13. У зразках міді зі структурою другого типу виникають різноманітні структури і проявляється ефект прозорості двійникових границь для руху дислокацій. Встановлено, що у зразках міді з третім типом мікроструктури в тілі кожного із зерен здійснюється інтенсивне дислокаційне ковзання і розвиваються ротації ділянок зерна. Показники пластичності таких зразків зростають одночасно зі збільшенням їх границі міцності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бадиян Е.Е. Оптическая методика исследования *in situ* ориентационных и структурных изменений, сопровождающих пластическую деформацию поликристаллических образцов / Бадиян Е.Е., Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В., Шуринов Р.В. **Зетова Т.Р.** // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – Т. 76, № 8. – С. 34 – 38.

2. Badiyan E.E. Optical Technique for the In Situ Study of Orientation and Structure Changes Accompanied the Plastic Deformation of Polycrystalline Specimens of Aluminum / Badiyan E.E., Tonkopryad A.G., Shekhovtsov O. V., Shurinov R. V., **Zetova T.R.** // Inorganic Materials. – 2011, №15. – P. 1663 – 1666.

3. Бадиян Е.Е. Визуализация субструктурной и ориентационной неоднородности в отдельных зернах поликристаллических образцов / Бадиян Е.Е., Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В., Шуринов Р.В., **Зетова Т.Р.**, Казачкова Е.С. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т.80, № 8. – С. 37 – 40.

4. Badiyan E. E. Determination of Characteristics of Substructure and Orientation Inhomogeneity in Polycrystalline Specimens / Badiyan E. E., Tonkopryad A. G., Shekhovtsov O. V., Shurinov R. V., **Zetova T. R.**, Kazachkova K. S. // Functional Materials. – 2014.– V. 21, № 3. – P. 307 – 312.

5. Badiyan E.E. Investigation of origination and development of the surface deformation relief of crystalline materials by laser radiation / Badiyan E.E., Tonkopryad A.G., Shekhovtsov O.V., Shurinov R.V., **Zetova T. R.**, Kazachkova K. S // Functional Materials. – 2015. – V. 22, № 3. – P. 396-401.

6. **Zetova T. R.** Computer indexing Laue diffraction pattern, the determination of the crystallographic orientation of the grains relative to the main directions in the crystal and the Schmid factor for all slip systems / **Zetova T. R.**, Ftemov E.V., Tonkopryad A.G., Badiyan E.E. // Вісник ХНУ. – № 1158. – серія «Фізика». – вип. 22. – 2015. – С. 31 – 34.

7. **Zetova T. R.** Extrusion and intrusion in plastically deformed copper foils / **Zetova T. R.**, Badiyan E.E. // Вісник ХНУ. – серія «Фізика». – вип. 23. – 2015. – С 39 – 42.

8. Badiyan E.E. Features of structure of copper two-dimensional polycrystals obtained by recrystallization method and nature of its changes in process of plastic deformation / Badiyan E.E., Tonkopryad A.G., Shurinov R.V., **Zetova T. R.**, Talakh S.V., Dergacheva A.V. // ISSN 1562-6016. PAST. – 2016, №1(101). – P. 88 – 91.

9. Badiyan E.E. Substructure and orientation heterogeneity of polycrystalline aluminum and its changes during plastic deformation / Badiyan E.E., Tonkopryad A.G., Shekhovtsov O.V., Shurinov R.V., **Zetova T.R.** // Functional Materials. 23 – 2016, № 4. – P. 561 – 569.

10. Шеховцов О.В. Влияние размера зерен и типа межзеренных границ на характер разрушения двумерных поликристаллов алюминия / Шеховцов О.В., Шуринов Р.В., Осташко Е.В., **Зетова Т.Р.** // VII Міжнародна наукова конференція “Фізичні явища в твердих тілах”, 15 – 14 грудня 2005 р., Україна: Матеріали конференції – Харків: Вид-во ХНУ імені В. Н. Каразіна. – 2005. – С. 68.

11. Шеховцов О.В. Кристаллографические особенности разрушения двумерных поликристаллов алюминия / Шеховцов О.В., Шуринов Р.В., **Зетова Т.Р.** // VIII Міжнародна наукова конференція “Фізичні явища в твердих тілах” 11 – 13 грудня 2007 р., Україна: Матеріали конференції – Харків: Вид-во ХНУ імені В. Н. Каразіна. – 2007. – С. 108.

12. Шеховцов О.В. Исследование кинетики развития трещин в процессе пластической деформации двумерных поликристаллов алюминия / Шеховцов О.В., Шуринов Р.В., **Зетова Т.Р.** // VIII Міжнародна наукова конференція “Фізичні явища в твердих тілах”, 11 – 13 грудня 2007 р., Україна: Матеріали конференції – Харків: Вид-во ХНУ імені В.Н. Каразіна. – 2007. – С. 109.

13. Бадиян Е.Е. Влияние микродефектной структуры и ориентационных факторов на разрушение поликристаллических фольг алюминия / Бадиян Е.Е., Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В., Шуринов Р.В., **Зетова Т.Р.** // 47 Международная конференция "Актуальные проблемы прочности". Материалы конф., 1 – 5 июля 2008 г. – Нижний Новгород. – 2008. – С. 234 – 236.

14. Бадиян Е.Е. Оптические методики для исследования *in situ* ориентационных и структурных изменений, сопровождающих пластическую деформацию поликристаллических образцов / Бадиян Е.Е., Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В., Шуринов Р.В., **Зетова Т.Р.** // IX Міжнародна наукова конференція “Фізичні явища в твердих тілах”, 1 – 4 грудня 2009 р., Україна: Матер. конф. – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна. – 2009. – С. 127

15. Бадиян Е.Е. Влияние упрочняющих покрытий из нитрида титана на развитие пластической деформации и механические свойства двумерных поликристаллов алюминия / Бадиян Е.Е., Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В., Шуринов Р.В., **Зетова Т.Р.** // IX Міжнародна наукова конференція “Фізичні явища в твердих тілах”, 1 – 4 грудня 2009 р., Україна: Матер. конф. – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна. – 2009. – С. 53.

16. Бадиян Е.Е. Оптическая методика определения структурных характеристик поликристаллических образцов и их изменения в процессе пластической деформации / Бадиян Е.Е., Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В., Шуринов Р.В., **Зетова Т.Р.** // 52-я Международная научная конференция “Актуальные проблемы прочности”: сборник тезисов докладов. 4 – 8 июня 2012 года. г. Уфа, Россия. – Уфа: РИЦ БашГУ. – 2012. – С. 45.

17. Бадиян Е.Е. Исследование механизмов пластической деформации и характера разрушения поликристаллических образцов алюминия в широком температурном интервале / Бадиян Е.Е., Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В., Шуринов Р.В., **Зетова Т.Р.** // 18-я Международная конференция “Физика прочности и пластичности материалов”: сборник тезисов докладов. 2 – 4 июля 2012 года, г. Самара, Россия. – Самара: Самарский гос. тех. ун-т. – 2012. – С. 85.

18. Бадиян Е.Е. Микроскопические механизмы пластической деформации и разрушения двумерных поликристаллов алюминия / Бадиян Е.Е., Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В., Шуринов Р.В., **Зетова Т.Р.** // VII Международная конференция «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (MPFP-2013) 17-23 июня 2013 года, г. Тамбов. Вестник ТГУ, серия "Естественные и технические науки". – 2013. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 84.

19. Бадиян Е.Е. Исследование *in situ* дислокационного скольжения при пластической деформации фольг Al с помощью лазерного излучения / Бадиян Е.Е., Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В., Шуринов Р.В., **Зетова Т.Р.**, Казачкова Е.С // Международная конференция "Физика прочности и пластичности материалов". Сб. тез., 8 – 11 июня 2015 г. – Самара. – 2015. С. 136.

20. **Зетова Т.Р.** Субструктурные и ориентационные изменения в поликристаллических образцах алюминия в процессе их деформирования / **Зетова Т.Р.** // IX Міжнародна наукова конференція “Фізичні явища в твердих тілах”, 1 – 4 грудня 2009 р.: Матер. конф. – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна. – 2009. – С. 53.

21. Патент 93021 Україна, МПК G01N 21/00, G01N 21/17, G01N 33/20. Спосіб визначення кристалографічної орієнтації зерен на поверхні полікристалічного зразка / Бадіян Є.Ю., Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В., Шурінов Р.В., **Зетова Т.Р.**; Заяв. і патентовласник ХНУ імені В.Н. Каразіна. – № а 2010 02923; заявл. 15.03.10; опубл. 27.12.10. – Бюл. №24.

22. Патент 104249 Україна, МПК (2013.01), G01N 21/00, G01N 33/20 (2006.1). Спосіб візуалізації орієнтаційної неоднорідності та морфології поверхні монокристала або окремих зерен полікристала / Бадіян Є.Ю., Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В., Шурінов Р.В., **Зетова Т.Р.**, Казачкова К.С. Заяв. і патентовласник ХНУ імені В.Н. Каразіна. – № а 2012 14845; заявл. 24.12.12.; опубл. 10.01.14. – Бюл. №1.

АНОТАЦІЯ

Зетова Т.Р. Субструктурні та орієнтаційні зміни, що здійснюються в ході пластичної деформації двовимірних полікристалів алюмінію і міді при кімнатній температурі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

У дисертаційній роботі наведені результати експериментальних досліджень, що здійснюються в ході пластичної деформації розтягуванням двовимірних полікристалів алюмінію і міді з різним розміром зерен в умовах активного навантаження з постійною швидкістю деформації при кімнатній температурі.

Експериментально показано, що субструктура полікристалічних зразків алюмінію до їх деформування розрізняється за характером розподілу субзерен за розмірами і кристалографічною орієнтацією, їх формою і розмірами.

Експериментально виявлена аномально висока деформація ділянки "крупнозернистого" зразка алюмінію, яка містить границю зерна загального типу, що призводить до її "розпушування" і виникнення в приграничній області границі тріщини, подальше поширення якої відбувається в тілі зерна.

Експериментально виявлено, що локальна відносна деформація деяких зерен крупнозернистих полікристалічних зразків алюмінію, продеформованих в умовах активного навантаження з постійною швидкістю деформації при кімнатній температурі, до моменту їх руйнування може значно перевищувати відносну деформацію всього зразка.

Показано, що різноманіття вихідної мікроструктури двовимірних полікристалів міді приводить до різних способів релаксації напруженого стану в процесі їх пластичної деформації та до зміни механічних характеристик зразків.

Ключові слова: двовимірні полікристали, квазіперіодична структура, пластичне деформування, колірні орієнтаційні карти, візуалізація, субструктурні та орієнтаційні зміни, розсіпання границі зерна.

АННОТАЦИЯ

Зетова Т.Р. Субструктурные и ориентационные изменения, осуществляющиеся в ходе пластической деформации двумерных поликристаллов алюминия и меди при комнатной температуре. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела.

В диссертационной работе приведены результаты экспериментальных исследований субструктурных и ориентационных изменений, происходящих в ходе пластической деформации растяжением двумерных поликристаллов алюминия и меди с различным размером зерен в условиях активного одноосного нагружения с постоянной скоростью деформации при комнатной температуре. Разработаны, апробированы и использованы новые экспериментальные методики: определения ориентационных и структурных изменений в образце *in situ* в процессе деформирования; визуализации субструктурной и ориентационной неоднородности; определения кристаллографической ориентации отдельных зерен поликристаллического образца, фактора Шмида для всех систем скольжения и аттестации границ раздела.

Экспериментально показано, что субструктура поликристаллических образцов алюминия до их деформирования различается характером распределения субзерен по размерам и кристаллографической ориентации, их формой и размерами. Общим для всех исследованных образцов до их деформирования является узкий спектр разориентировок субзерен. Показано, что наличие "скачков" на деформационной кривой, полученной в результате пластической деформации двумерных "крупнозернистых" образцов алюминия при комнатной температуре, связано с возникновением и быстрым развитием областей переориентации субзеренной структуры, пересекающих все зерно.

Установлено, что наиболее вероятным механизмом изменения субструктуры в процессе пластической деформации "крупнозернистых" образцов алюминия является фрагментация субзеренной структуры с широким спектром разориентаций.

Экспериментально обнаружена аномально высокая деформация участка "крупнозернистого" образца алюминия, содержащего границу зерен общего типа, приводящая к ее "разрыхлению" и возникновению в приграничной области границы трещины, дальнейшее распространение которой происходит в теле зерна.

Экспериментально обнаружено, что локальная относительная деформация некоторых зерен крупнозернистых поликристаллических образцов алюминия, продеформированных в условиях активного растяжения с постоянной скоростью деформации $\dot{\epsilon} \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$ при комнатной температуре, к моменту их разрушения может значительно превышать относительную деформацию всего образца. Установлен механизм

ориентационных разворотов зерен, который заключается в специфической и последовательной перестройке субзеренной структуры, сопровождаемой сужением спектра разориентировок и приводящий к пластической деформации зерна. Аккомодационные процессы на границе зерна при его деформировании играют мелкие субзерна (≈ 5 мкм) с широким спектром разориентировок, который изменяется в процессе деформирования образца.

Показано, что изменением величины предварительной деформации поликристаллических образцов меди перед рекристаллизационным отжигом можно получить образцы с разнообразной структурой границ зерен, из которой можно выделить три типа. Первый тип образцов содержит только двойниковые границы, которые пересекают всю поверхность образца; образцы второго типа содержат двойники, отличающиеся по форме, размерам и ориентации, границы зерен специального, общего типа, и образцы третьего типа имеют мелкозернистую структуру с границами зерен общего типа и наличием внутри этих зерен большого количества двойников различного типа, которые различаются по размерам, форме и протяженности.

Показано, что многообразие исходной микроструктуры двумерных поликристаллов меди приводит к различным способам релаксации напряженного состояния в процессе их пластической деформации и, в конечном итоге, к изменению механических характеристик образцов. Так, впервые экспериментально показано, что в образцах меди с микроструктурой первого типа в процессе их пластической деформации при комнатной температуре вблизи двойниковых границ возникают экструзии и интрузии, как способы релаксации напряженного состояния. В образцах меди второго типа возникают разнообразные структуры и проявляется эффект прозрачности двойниковых границ для дислокаций. Установлено, что в образцах меди с третьим типом микроструктуры в пределах каждого из зерен осуществляется интенсивное дислокационное скольжение, развиваются ротационные эффекты. Показатели пластичности таких образцов возрастают одновременно с увеличением их предела прочности.

Экспериментально показано, что возможной причиной возникновения на поверхности образца меди экструзии и одновременно на противоположной стороне интрузии, может быть специфическая кристаллографическая ориентация оси растяжения образца, его толщина и наличие сквозной двойниковой границы.

Ключевые слова: двумерные поликристаллы, квазипериодический рельеф, пластическое деформирование, цветовые ориентационные карты, визуализация, субструктурные и ориентационные изменения, рассыпание границы зерна.

ABSTRACT

Zetova T. R. Substructural and orientation changes which are carried out during a flowage two-dimensional polycrystalline aluminium and copper at a room temperature. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of philosophy degree (Ph.D.) in physics and mathematics on speciality 01.04.07 – Solid State Physics. V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2017.

The thesis presents the results of experimental studies of substructural and orientational changes that accompany plastic deformation dimensional polycrystalline aluminum and copper with different grain size in terms of active load at a constant speed at room temperature.

It is shown by experiments that the substructure of aluminum polycrystalline samples before their deformation varies by distribution of subgrain in size and crystallographic orientation, their shape and size.

Experimentally was detected an abnormally high strain of areas of coarse aluminum sample containing grain boundary general type that leads to its emergence in "loosening" and near-boundary area boundary cracks, which is further spread in the body of the grain.

Experimentally found that some local relative deformation coarse grain polycrystalline samples of aluminum, deformed in terms of active load at a constant speed of deformation at room temperature until their destruction can exceed the strain of the whole sample.

It is shown that the variety of original two-dimensional microstructure of polycrystalline copper leads to different ways of relaxing the stress state in the process of plastic deformation and changes to the mechanical properties of the samples.

Keywords: two-dimensional polycrystals, a quasiperiodic relief, plastic deformation, color orientation maps, visualization, substructural and orientational changes, dispersal grain boundary.