

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

# Е. Ю. Бадіян, А. Г. Тонкопряд, Р. В. Шурінов

# дослідження механізмів Пластичної деформації Полікристалів

ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ МЕТОДИК

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізичного матеріалознавства Міністерство освіти і науки України Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Є. Ю. БадіянА. Г. ТонкопрядР. В. Шурінов

# ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПОЛІКРИСТАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ МЕТОДИК

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізичного матеріалознавства

#### Рецензенти:

**В. П. Пойда** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри експериментальної фізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна;

**О. В. Шеховцов** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри експериментальної фізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Рекомендовано до друку Вченою радою фізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 4 від 19.04.2019 р.)

#### Бадіян Є. Ю.

Б15

Дослідження механізмів пластичної деформації полікристалів за допомогою оптоелектронних методик: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізичного матеріалознавства / Є. Ю. Бадіян, А. Г. Тонкопряд, Р. В. Шурінов. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. – 34 с.

Методичні вказівки містять необхідний матеріал для теоретичної підготовки та рекомендації щодо виконання лабораторних робіт з фізичного матеріалознавства для студентів 4, 5 курсів фізичного факультету ХНУ імені В.Н. Каразіна.

#### УДК 53.05; 538.95

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2019

© Бадіян Є. Ю., Тонкопряд А. Г., Шурінов Р. В, 2019

© І. М. Дончик, макет обкладинки, 2019

Навчальне видання

Бадіян Євген Юхимович Тонкопряд Алла Григорівна Шурінов Роман Володимирович

#### ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПОЛІКРИСТАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ МЕТОДИК

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізичного матеріалознавства

> Коректор О. В. Анцибора Комп'ютерне верстання В. В. Савінкова Макет обкладинки І. М. Дончик

Формат 60х84/16. Ум. друк. арк. 1,95. Наклад 100 пр. Зам. № 86/19.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,

61022, Харків, майдан Свободи, 4. Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009 Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна Тел. 705-24-32

# **3MICT**

# 1. МЕХАНІЗМИ РОЗВИТКУ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ КРИСТАЛІЧНИХ ЗРАЗКІВ

Добре відомо, що пластична деформація кристалічних зразків відбувається на різних структурних рівнях і характеризується двома модами – *трансляційною і ротаційною. Трансляційна мода* пластичної деформації здійснюється за рахунок *дислокаційного ковзання*. В результаті елементарного акту пластичної деформації – ковзання дислокацій на поверхні зразка в місці виходу дислокацій виникає рельєф у вигляді сходинок, форма яких, розміри, кількість, орієнтація та інші параметри залежать від природи матеріалу, умов деформування та інших факторів.

**Ротаційна мода** пластичної деформації на мезо- і макроскопічному рівні здійснюється шляхом виникнення та розвитку переорієнтації областей кристалічної ґратки в межах всього зерна або окремих фрагментів в тілі зерна. Носіями ротаційної пластичності є **дисклінації.** Переорієнтація є одним із основних механізмів пластичної деформації незалежно від орієнтації кристалографічних систем ковзання.

Під дією прикладеного навантаження в кристалічних зразках релаксація напруженого стану може відбуватися різними способами послідовно або одночасно за рахунок розвитку дислокаційного ковзання в різних (окремих) зернах з високим фактором Шміда; утворення різної за формою, типом і способом виникнення ротаційної структури і подальшого її розвитку. У випадку, коли вичерпані вищевказані способи релаксації напруженого стану в деформованих зразках, відбувається руйнування зразка за рахунок виникнення і розвитку однієї або декількох тріщин у різних областях полікристала в тілі зерна або по границях зерен.

# 2. ТРАНСЛЯЦІЙНА МОДА ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПОЛІКРИСТАЛІВ

Добре відомо, що трансляційна мода пластичної деформації кристалічних зразків реалізується за рахунок дислокаційного ковзання по різних системах ковзання. При цьому на поверхні полірованого зразка в результаті виходу на поверхню дислокацій спостерігаються лінії ковзання і смуги ковзання. Внаслідок цього на поверхні зразка на місці виходу дислокацій утворюються сходинки, тобто формується певний деформаційний рельєф. По мірі розвитку пластичної деформації металевих зразків рух дислокацій протікає в об'ємі матеріалу неоднорідно в часі і в просторі, в результаті чого формування ліній та смуг ковзання на поверхні зразка буде протікати неоднорідно і, як наслідок, буде змінюватися характер деформаційного рельєфу. Аналіз інформації про характер деформаційного рельєфу і його зміну в процесі деформування зразка дозволяє судити про фізичні процеси, які супроводжують і визначають пластичну деформацію кристалічних матеріалів. Традиційно поверхню пластично деформованих зразків досліджували *після* випробування зразків за допомогою світлової мікроскопії і дифракційної електронної мікроскопії. Останнім часом з'явилися роботи, присвячені експериментальному дослідженню динаміки і механізму формування деформаційних сходинок *нанометричних* розмірів на поверхні пластично деформованих кристалів на *початкових стадіях* розвитку пластичної деформації з використанням різної сучасної техніки: скануючої тунельної мікроскопії, фотоемісійної техніки тощо.

Як приклад, на рис. 1 наведено мікрофотографії поверхні зразків Al та відповідний їм деформаційний рельєф, який формується на початкових стадіях деформування. Ці результаті одержані за допомогою фотоемісійної техніки та силової атомної мікроскопії.



Рис. 1. Мікрофотографії поверхні моно- і полікристалічного зразка (а і б відповідно) на початковій стадії пластичної деформації і деформаційний рельєф, відповідний даним ділянкам зразка

При *подальшому* деформуванні зразка досліджувана поверхня буде являти собою набір квазіперіодично розташованих сходинок мікронних розмірів. При перпендикулярному падінні пучка монохроматичного випромінювання до поверхні зразка спостерігаються картини розсіювання, які матимуть яскраво виражену анізотропію. Для отримання інформації щодо дифракції випромінювання від поверхні зразка, що деформується, необхідно використовувати методику, в якій довжина хвилі падаючого випромінювання і відстань між квазіперіодично розташованими сходинками були б порівнянні. Характер картин розсіювання буде визначатися особливостями рельєфу: зі зменшенням відстані між сходинками на поверхні зразка лінійні розміри смуг розсіювання будуть збільшуватися.

# 3. ЛАЗЕРНА МЕТОДИКА ДЛЯ ВИВЧЕННЯ РОЗВИТКУ ТРАНСЛЯЦІЙНОЇ МОДИ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ КРИСТАЛІЧНИХ ЗРАЗКІВ IN SITU В ПРОЦЕСІ ДЕФОРМУВАННЯ

Для вивчення закономірності виникнення і розвитку дислокаційного ковзання, що забезпечує розвиток трансляційної моди пластичної деформації в зразку, пропонується методика, яка заснована на розсіюванні монохроматичного випромінювання поверхнею зразка. Така методика дозволить стежити in situ за зміною деформаційного рельєфу поверхні кристалічних матеріалів, що являє собою набір квазіперіодичних ліній ковзання, які виникають в результаті виходу дислокацій на поверхню зразка при пластичній деформації.

В якості джерела монохроматичного випромінювання слугує Не-Ne лазер з довжиною хвилі  $\lambda = 633 \ нm$  (червоне світло), діаметр пучка становить  $\approx 2 \ mm$ . Відомо, що вимушене випромінювання, що випускається лазером, має низку чудових характеристик в порівнянні зі спонтанним випромінюванням звичайних оптичних джерел. Лазерне випромінювання має високу спрямованість і монохроматичність у поєднанні з високою потужністю.

Як уже зазначалося, в процесі деформування на поверхні зразка формується деформаційний рельєф. У даній методиці пучок лазера направляють перпендикулярно поверхні зразка, в результаті розсіювання пучка лазера на поверхні зразка виникають дифракційні картини, які in situ реєструються за допомогою веб-камери Creative PC CAM 300, з'єднаної із ПК. Реєстрація картини розсіювання здійснюється з періодом 0,02 *с*. Таким чином, можна стежити за зміною індикатриси розсіювання, що характеризує виникнення й розвиток на поверхні зразка деформаційного рельєфу in situ у процесі деформування зразка. Такі умови проведення експерименту дозволяють однозначно в будь-який момент часу деформування встановлювати зв'язок між отриманими картинами розсіювання і ступенем деформації зразка.

На рис. 2 наведена схема розташування джерела монохроматичного випромінювання, зразка і WEB-камери при дослідженні структури деформаційного рельєфу в процесі деформування з використанням випромінювання лазера. На зразок 2, закріплений у захватах деформуючого пристрою, через отвір в екрані 3 направляється пучок від He-Ne лазера 1 перпендикулярно поверхні зразка. Розсіяний поверхнею зразка пучок лазера реєструється у вигляді картин розсіювання на екрані 3.



Рис. 2. Схема установки для реєстрації картин розсіювання лазерного випромінювання поверхнею зразка: 1 – лазер; 2 – зразок; 3 – екран з отвором для спостереження розсіяного поверхнею зразка випромінювання; 4 – цифрова камера, яка пов'язана із ПК

Як приклад на рис. За наведена мікрофотографія деформаційного рельєфу, який являє собою квазіперіодичну структуру у вигляді ліній ковзання, що виник в одному із зерен двовимірного полікристала Al (на попередньо полірованій поверхні) після його деформування на 7,5 %. На рис. Зб представлена дифракційна картина, яка виникає в результаті взаємодії лазерного пучка з цією структурою, де вказано напрямок розтя-гування зразка  $\sigma$ , напрямок ліній ковзання на поверхні зразка T, напрямок максимального розсіювання лазерного пучка *l*. За допомогою дифракційної картини можна визначити кут між віссю розтягування та лініями ковзання  $\alpha$  та його зміни в процесі деформування. Крім того можна визначити величину *l*<sub>max</sub>, яка дозволяє визначати мінімальну відстань між лініями ковзання *d<sub>min</sub>* (*d<sub>mmin</sub> ~ 1/l<sub>max</sub>).* 



Рис. 3. Мікрофотографія поверхні зерна Al після деформації на 7,5 % (а) та картина розсіювання лазерного випромінювання на цій структурі (б)

Як видно з рис. За, квазіперіодичність структури відрізняється двома основними параметрами – непостійністю періоду (відстані між лініями ковзання) і викривленням ліній ковзання, що складають цю структуру. Перший фактор завжди призводить до розмиття дифракційних рефлексів у напрямку дифракції *l*, а другий – до розширення дифракційного рефлек-

су в напрямку, перпендикулярному напрямку дифракції. При виникненні додаткових ліній ковзання, що зменшують період їх розташування, відбувається збільшення дифракційного рефлексу в напрямку *l*.

Видно, що в зерні досліджуваного зразка «працює» тільки одна система ковзання і, як наслідок, на поверхні деформованого зразка виявляється відповідна квазіперіодична структура у вигляді ліній ковзання, характер і орієнтація яких визначається кристалографічною орієнтацією цієї області та ступенем деформації зразка. Переважне розсіювання у напрямку *I* лазерного випромінювання на цій квазіперіодичній структурі свідчить про анізотропію розсіювання. Для областей поверхні, що виявляють тільки одну систему ковзання, реєструється тільки один напрямок максимального розсіювання, перпендикулярний лініям ковзання. У випадку, наприклад, з двома системами ліній ковзання – два напрямки максимального розсіювання, кожний з яких спрямований перпендикулярно певній системі ковзання. **Таким чином**, характер розсіювання лазерного випромінювання на деформаційному рельєфі відбиває його структуру і свідчить про наявність і кінетику розвитку дислокаційного ковзання в певних системах ковзання.

За дифракційною картиною можна визначити мінімальну відстань між лініями ковзання, яка є характеристикою інтенсивності розвитку дислокаційного ковзання; зміну напрямку ковзання  $\Delta \alpha$  по відношенню до осі розтягування зразка  $\sigma$ , виникнення і розвиток ковзання по всіх діючих системах ковзання в зерні та інше. Завдяки застосуванню даної методики дослідження можна виявляти виникнення ковзання на ранніх стадіях пластичної деформації, коли візуально воно непомітно. За орієнтацією і розміром картин розсіювання з досить великою точністю можна визначати напрямок ковзання й зміни його в процесі деформування зразка, виникнення нових систем ковзання. Розсіювання лазерного випромінювання на деформаційному рельєфі, що виникає при деформуванні кристалічних тіл, може бути використано й для визначення інтенсивності розвитку дислокаційного ковзання, що характеризується щільністю ліній ковзання.

Нижче наведені результати експериментальних досліджень щодо розсіяння лазерного випромінювання поверхнею одного із зерен бікристала Al в процесі деформування зразка. Картини розсіювання реєструвалися in situ у процесі деформування зразка. Область дослідження на поверхні становила  $\approx 2 \ MM^2$ .

На рис. 4 представлена деформаційна крива дослідженого зразка, а на рис. 5 наведені фрагменти відеозйомки картин розсіювання лазерного випромінювання на деформаційному рельєфі, що виникає на поверхні одного із зерен при деформуванні зразка. На деформаційній кривій стрілками показані значення відносної деформації зразка, які відповідають цим картинам розсіювання. Аналіз картин розсіювання монохроматичного випромінювання, отриманих для цього зразка, дозволив встановити, що в розглянутому зерні деформаційний рельєф у вигляді сходинок на поверхні виникає на початковій стадії деформації (при  $\varepsilon \sim 2$  %) і розвивається аж до руйнування зразка. Це свідчить про те, що в даному зерні в процесі деформації дислокаційне ковзання відбувається по одній системі ковзання і активізується з ростом деформації.



Рис. 4. Деформаційна крива для двовимірного бікристала Al



Рис. 5. Картини розсіювання лазерного пучка на деформаційному рельєфі, що виникає на полірованій поверхні одного із зерен зразка Al при його деформуванні, для зазначених деформацій на деформаційній кривій, представленій на рис. 4: ε = 0 % (a); ε = 6 % (б); ε = 10 % (в); ε = 13 % (г); ε = 18 % (д); ε = 24 % (е); ε = 31 % (ж); ε = 37 % (з)

З ростом ступеня деформації зразка щільність ліній ковзання збільшується (про це свідчить збільшення розмірів дифракційного рефлексу), а розширення смуг розсіювання в центральній частині свідчить про зміну виду ліній ковзання: зі збільшенням ступеня деформації з'являються хвилясті лінії ковзання, що пов'язують з інтенсивним розвитком поперечного ковзання гвинтових дислокацій в об'ємі зразка.

Про інтенсивність розвитку дислокаційного ковзання можна судити з залежності зміни лінійного розміру розсіяного пучка лазера *l*<sub>max</sub> від ступеня деформації зразка (рис. 6). Така залежність якісно свідчить про нелінійний характер розвитку дислокаційного ковзання в процесі пластичної деформації.



Рис. 6. Залежність мінімальної відстані між лініями ковзання **d**<sub>min</sub> і величини **1/d**<sub>min</sub> від відносної деформації зразка є

Аналізуючи картини розсіювання лазерного випромінювання поверхнею зразка, які отримані іп situ в процесі деформування зразка, одержують інформацію про виникнення і кінетику розвитку дислокаційного ковзання в процесі розвитку пластичної деформації в досліджуваних зразках. Початку формування деформаційного рельєфу на поверхні деформованого зразка (утворення сходинок) буде відповідати поява вузьких смуг розсіювання лазерного випромінювання, витягнутих в певному напрямку. По мірі розвитку пластичної деформації зразка при роботі однієї системи ковзання щільність ліній ковзання збільшується і, як наслідок, зменшується відстань між сходинками на поверхні деформованого зразка. Це призводить до того, що лінійні розміри смуг розсіювання від такої поверхні будуть збільшуватися. Якщо дислокаційне ковзання буде розвиватися в двох системах ковзання, то на поверхні буде формуватися ще одна серія ліній ковзання і при цьому будуть з'являтися смуги розсіювання в іншому напрямку і так далі.

Таким чином, лазерна методика дозволяє досліджувати іп situ деформаційний рельєф, що формується в процесі пластичного деформування зразків, з використанням розсіювання випромінювання лазера на поверхні зразка і комп'ютерних технологій. Зазначена методика дозволяє встановлювати число діючих систем ковзання і послідовність їх включення в певному структурному елементі деформованого зразка. За дифракційними картинами можна визначити мінімальну відстань між лініями ковзання, яка характеризує інтенсивність розвитку дислокаційного ковзання. Порівняльний аналіз картин розсіювання монохроматичного випромінювання поверхнею різних зерен досліджуваного зразка, отриманих in situ в процесі деформування, дозволяє робити висновки про виникнення і розвиток дислокаційного ковзання в окремих зернах в залежності від їх кристалографічної орієнтації та ступеня деформації. Отримуючи і аналізуючи інформацію про виникнення, еволюцію та характер розподілу деформаційних сходинок при різному напруженні і деформаціях, можна судити про закономірності розвитку пластичної деформації в зразках.

## 4. РОТАЦІЙНА МОДА ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПОЛІКРИСТАЛІВ

Дослідження закономірностей виникнення та розвитку ротаційної деформації має особливий інтерес, оскільки вона може грати не тільки акомодаційну роль, але й бути самостійним процесом, внесок якого у пластичну деформацію всього зразка може бути суттєвим.

Експериментально встановлено, що в однорідно орієнтованих кристалах перед деформуванням в ході пластичної деформації відбуваються структурні та субструктурні зміни і, як наслідок цього, виникають взаємно розорієнтовані області незалежно від вихідної структури кристала, його хімічного і фазового складу для різних режимів механічної дії в широкому діапазоні температур, навантажень, ступенів деформації. Це свідчить, що в процесі пластичного деформування кристалічних зразків реалізується ротаційна мода пластичної деформації. Вона проявляється, наприклад, у вигляді смуг переорієнтації різного типу (області з ґраткою, розорієнтованою відносно навколишнього об'єму, один з розміров яких виявляється багато меншим порівняно з іншими); фрагментації (розбиття вихідного монокристалічного матеріалу на взаємно розорієнтовані області, які мають мезоскопічні розміри (0,1-0,5 мкм), кути розорієнтації між фрагментами залежать від ступеня деформації і досягають десятки градусів); двійникування (специфіка його полягає в тому, що кут на границі переорієнтованих областей приймає суворо фіксоване значення у відповідності до симетрії кристалічної гратки) тощо.

Численні експериментальні дослідження механізмів розвитку пластичної деформації двовимірних полікристалів (однокристальних за товщиною), проведених на кафедрі фізики твердого тіла, показали, що за умов активного навантаження за кімнатної температури в кристалічних зразках релаксація напруженого стану може відбуватися різними способами послідовно або одночасно: за рахунок розвитку дислокаційного ковзання в різних зернах, за рахунок структурних і субструктурних змін, які приводять до виникнення пластичних ротацій, як правило, у вигляді смуг переорієнтації (СП). Якщо вичерпані ці способи релаксації, то відбувається руйнування зразків шляхом виникнення та подальшого розвитку однієї або декількох тріщин в тілі зерна або в границі зерен.

Більш детально зупинимося на розвитку ротаційної моди пластичної деформації в двовимірних полікристалічних зразках при деформуванні за умов активного розтягнення за кімнатної температури. Для дослідження ротаційної моди пластичної деформації є доцільним використовувати двовимірні зразки, оскільки через відсутність стиснення у напрямку, перпендикулярному до поверхні зразка, відсутні сили, які б блокували розвиток орієнтаційних змін у зразку в процесі деформування. Експериментально встановлено, що у двовимірних полікристалах найчастіше ротаційна мода проявляється у вигляді смуг переорієнтації (СП).

Смуги переорієнтації, які спостерігаються і мають мікро- і макроскопічні розміри, досить різноманітні за типом і формою.

Поодинокі смуги переорієнтації можуть бути наскрізними, тобто проходити через зерно від однієї його межі до іншої, але можуть і обриватися в зерні. Обірвані лінії переорієнтації найчастіше мають клиноподібну форму, іноді тупокутну. Як правило, місцем зародження клиновидних смуг переорієнтації є зигзагоподібні ділянки меж зерен, а тупокутних – потрійні стики меж зерен. Крім того, в смузі переорієнтації, що утворилася, може виникати в процесі деформації нова переорієнтації найчастіше виникати в переорієнтації. Колективні смуги переорієнтації найчастіше виникають на стадії розвиненої деформації і являють собою набір квазіпаралельних смуг переорієнтації. Всі описані смуги переорієнтації мають макроскопічні розміри (~*мм*).

На рис. 7 наведені фотографії різних типів смуг переорієнтації, які експериментально виявлені в деформованих зразках Al. Вони є наскрізними по товщині зразка, що становить 0,15 *мм*.



Рис. 7. Смуги переорієнтації різного типу в двовимірних полікристалах Al, які виникають в процесі деформування: поодинокі (а), клиновидні (б), колективні (в), вторинні (г)

Встановлено, що всі макроскопічні смуги переорієнтації, зароджуючись поблизу меж зерен, розвиваються в тіло одного з них. За даними

рентгенографічних досліджень, виконаних для пластично деформованих і доведених до руйнування зразків, орієнтація кристалічної ґратки в межах смуги переорієнтації є практично однорідною. Всі смуги (за винятком вторинних), що утворюються в межах одного зерна, мають однакову кристалографічну орієнтацію і утворюють з тілом зерна межу деформаційного походження з однією і тією ж розорієнтацією.

## 5. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ IN SITU ОРІЄНТАЦІЙНИХ ТА СУБСТРУКТУРНИХ ЗМІН В ПОЛІКРИСТАЛІЧНОМУ ЗРАЗКУ В ПРОЦЕСІ ДЕФОРМУВАННЯ

Добре відомо, що структурна, субструктурна і орієнтаційна неоднорідність зразків є одним з основних факторів, що визначають фізичні і, в більшій мірі, механічні властивості кристалічних матеріалів. Відомі численні, як правило, дифракційні методи, дозволяють визначати орієнтаційну неоднорідність тільки для невеликої області досліджуваного зразка в порівнянні з його розмірами і не дозволяють in situ простежити за структурними і орієнтаційними змінами, що відбуваються в зразках у процесі зовнішнього впливу. На кафедрі фізики твердого тіла розроблена принципово нова оптоелектронна методика визначення кристалографічної орієнтації різних областей зразка та її зміни in situ в процесі деформування, яка заснована на дифракції білого світла на квазіперіодичному рельєфі, що виникає на поверхні полікристалічного зразка в результаті хімічного травлення. Ця методика дозволяє отримувати колірні орієнтаційні карти поверхні зразка in situ в процесі пластичної деформації кристалічних зразків, аналіз яких дає можливість одержувати всю інформацію щодо орієнтаційних та субструктурних змін в полікристалічному зразку в процесі деформування.

#### Суть методики полягає в наступному.

Одним із способів виявлення мікроструктури полікристала є хімічне травлення. При травленні полікристалічного зразка на його поверхні можна виявити не тільки межі зерен у вигляді тонких ліній, але і різним чином орієнтований анізотропний квазіперіодичний рельєф у вигляді канавок травлення. Експериментально показано, що характер рельєфу однозначно визначається кристалографічною орієнтацією зерна. На рис. 8 представлені мікрофотографії типової квазіперіодичної структури, яка виникає на поверхні по різному орієнтованих зерен полікристала Al після хімічного травлення травителем Келлера (30 мл HCl, 20 мл HNO<sub>3</sub>, 5 мл HF, 30 мл H<sub>2</sub>O) з метою виявлення меж зерен. Кристалографічна орієнтація цих зерен щодо нормалі до поверхні зерен і напрямку, що лежить в площині зерна і позначений стрілкою, наведено в стереографічному трикутнику.



Рис. 8. Мікрофотографії поверхні окремих зерен полікристалічного зразка Al, отримані за допомогою растрового електронного мікроскопа JEOLJSM-840, де вказана їх кристалографічна орієнтація (1 – нормаль до вільної поверхні зерна, 2 – напрямок, вказаний на рисунку стрілкою), а – зерно 1, б – зерно 2



Рис. 9 .Фотографії, що ілюструють анізотропне розсіювання монохроматичного випромінювання квазіперіодичною структурою поверхні зерен, наведених на рис. 8: a – зерно 1, б – зерно 2

Експериментально показано, що взаємодія монохроматичного випромінювання ( $\lambda = 633 \ hm$ ) з цим рельєфом призводить до його аномального розсіювання (квазідифракції). На рис. 9 наведено фотографії, що ілюструють анізотропне розсіювання монохроматичного випромінювання поверхнею окремих зерен з квазіперіодичним рельєфом, які наведені на рис. 8. Ці картини в повній мірі корелюють з характером рельєфу поверхні кожного з зерен.

Заміна монохроматичного випромінювання на біле світло з досить широким спектром довжин хвиль і використання WEB-камери з високочутливої до кольору матрицею для реєстрації розсіяного поверхнею зразка світла і комп'ютера при певному їх взаємному розташуванні дозволяє отримати від всієї поверхні досліджуваного зразка так звані колірні орієнтаційні карти (КОК). Їх одержують в адитивному колірному просторі RGB, що містить 16,7 млн відтінків кольору і являють собою комбінацію відтінків трьох основних кольорів – червоного (R), зеленого (G) і синього (B). Число відтінків для кожного із зазначених кольорів становить 256.

Візуально колірне зображення поверхні зерен, що мають різну кристалографічну орієнтацію, відрізняється за відтінком кольору, оскільки колір зображення певної області поверхні зразка та її кристалографічна орієнтація знаходяться в однозначній відповідності.

Методика, яка запропонована в даній роботі, дозволяє автоматично отримувати колірні орієнтаційні карти одночасно для всього зразка з розмірами робочої поверхні 100 × 20 *мм*<sup>2</sup> в процесі його деформування з частотою 30 карт в секунду.

Схема проведення експерименту наведена на рис. 10. На зразок 1 спрямоване біле світло від двох джерел: лампи накалювання (17 В, 170 Вт) (2)

і люмінесцентної лампи (ЛД20-2) (3). Реєстрація світла, розсіяного зразком, здійснюється за допомогою WEB-камери PC-CAM 300 (4), з'єднаної з комп'ютером. Для отримання (за необхідності) збільшеного зображення (в кілька разів) між зразком і камерою розміщується система лінз (5).

Якщо в процесі пластичної деформації зразка відбуваються орієнтаційні зміни окремих зерен або їх фрагментів і, отже, зміна орієнтації рельєфу, що виникає на поверхні в результаті хімічного травлення відносно пучка світла і реєструючого пристрою, то це призводить до зміни колірного зображення цих областей.



Рис. 10. Схема отримання колірних орієнтаційних карт: 1 – зразок; 2, 3 – джерело білого світла; 4 – WEB-камера; 5 – система линз

Таким чином, за орієнтаційними і субструктурними змінами, що відбуваються в процесі пластичної деформації зразка, можна простежити за зміною кольору зображення певної області зразка. Субструктурні характеристики визначаються за розмірами областей зображення поверхні зразка, які мають один і той же колір.

Лінійне розділення методики з використанням WEB-камери PC-CAM 300 становить ≈ 10 *мкм*, а кутове – ≈ 30 *кутових секунд*.

Як приклад на рис. 11 наведено ряд колірних орієнтаційних карт полікристалічного зразка Al до деформування і в процесі деформування при декількох ступенях деформації.



Рис. 11. Фрагменти відеозйомки поверхні полікристала Al, які отримані при різних ступенях деформації

Видно, що колір окремих зерен в процесі розвитку пластичної деформації змінюється, в окремих зернах добре видно розбиття кольору на окремі фрагменти, що свідчить про утворення смуг переорієнтації. Ці колірні орієнтаційні карти наочно ілюструють утворення субструктури та її зміни в процесі деформування зразка. Елементи субструктури зерна, що відрізняються за кристалографічною орієнтацією, на колірних орієнтаційних картах мають різні відтінки кольору.

#### Аналізуючи результати відеозйомки, легко встановити умови виникнення смуг переорієнтації, їх тип і закономірності розвитку ротаційних ефектів пластичної деформації полікристалічних зразків в процесі деформування зразка.

Таким чином, ця методика дозволяє in situ реєструвати виникнення і розвиток ротаційних ефектів, які супроводжуються переорієнтацією окремих зерен або їх фрагментів в процесі деформування: зміна кольору в будь-якій області полікристалічного зразка в процесі пластичної деформації свідчить про зміну кристалографічної орієнтації цієї ділянки зразка, тобто про розвиток ротаційної моди, що проявляється у виникненні смуг переорієнтації різного типу. Запропонована методика дозволяє in situ автоматично, безперервно визначати кристалографічну орієнтацію і структурні зміни, які відбуваються в зразку в процесі пластичного деформування, одночасно для всіх областей зразка.

# 6. МЕТОДИКА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ КОЛІРНИХ ОРІЄНТАЦІЙНИХ КАРТ

Як було зазначено вище, колірну орієнтаційну карту одержують в адитивному колірному просторі *RGB*, що містить 16,7 млн відтінків кольору. Така велика кількість відтінків кольору в колірному просторі *RGB* не дозволяє візуалізувати області поверхні зразка з певною кристалографічною орієнтацією і однозначно встановлювати зв'язок між відтінком кольору певної області поверхні зразка і її кристалографічною орієнтацією.

Для деяких зерен орієнтаційні зміни в процесі деформування зразка становлять більше  $10^{0}$ , що приводить до помітної зміни відтінку кольору зображення поверхні цього зерна на колірній орієнтаційній карті. Експериментально показано, що на колірній орієнтаційній карті візуально помітними можуть бути області поверхні зразка, якщо їх кристалографічна розорієнтація перевищує кілька градусів. Така зміна кристалографічної орієнтації приводить лише до малопомітної зміни відтінку кольору на колірних орієнтаційних картах, отриманих від поверхні зерна.

Приклад колірних орієнтаційних карт поверхні полікристалічного зразка Al до деформування й після деформування за умов одноосьового розтягнення на 26% наведений на рис. 12. Для більшої частини зерен зміна їх кристалографічної орієнтації в процесі деформування не перевищує кілька градусів.



Рис. 12. Колірні орієнтаційні карти поверхні полікристалічного зразка Al до його деформування (a) і після деформування на 26 % (б)

Для візуалізації орієнтаційної і субструктурної неоднорідності колірне зображення поверхні зразка можна розглядати послідовно й незалежно у відтінках червоного, зеленого, синього або сірого кольору.

Таке подання колірної орієнтаційної карти поверхні зразка дозволяє, по-перше, встановити відповідність між відтінком кольору зображення будь-якої області поверхні зразка і її кристалографічною орієнтацією; подруге, візуалізувати ділянки поверхні зразка з різною кристалографічною орієнтацією; по-третє, визначати кількісні характеристики субструктурної і орієнтаційної неоднорідності і їх зміни іп situ у процесі зовнішнього впливу на зразок. Параметром, що характеризує кристалографічну орієнтацію області поверхні зразка, є номер відтінку **n** колірного зображення цієї області з 256 можливих відтінків червоного, зеленого, синього або сірого кольору.

Суть методики візуалізації полягає в заміні на колірних орієнтаційних картах, одержаних в адитивному колірному просторі RGB, поверхні зразка візуально нерозрізнених відтінків кольору на візуально помітні, які заздалегідь підібрані з колірного простору RGB.

*Методика візуалізації* орієнтаційної та субструктурної неоднорідності поверхні будь-якої області зразка, наприклад зерна, *містить два етапи*.

<u>На першому етапі</u> відбувається заміна розгляду колірного зображення ділянки поверхні, яке одержано в адитивному колірному просторі *RGB*, що містить 16,7 млн відтінків кольору, на послідовний і незалежний розгляд в колірному просторі *червоного, зеленого, синього або сірого* кольору, кожний з яких містить 256 відтінків. При такому підході з'являється можливість отримувати розподіл областей досліджуваної частини поверхні зразка за площею колірних зображень з одним і тим же відтінком кольору  $N_n$  (площа субзерна) та умовною кристалографічною орієнтацією (відтінку кольору n).

На рис. 13 наведено колірне зображення поверхні одного із зерен полікристалічного зразка Al у відтінках червоного кольору. На рис. 14 $\delta$  і 14 $\sigma$  представлено розподіл областей поверхні зерна за їх розміром *Nn* (в пікселях\*) і умовною кристалографічною орієнтацією (відтінку колірного зображення *n*).



Рис. 13. Колірна орієнтаційна карта поверхні зерна, яка одержана в червоному кольорі



Рис. 14. Розподіл областей поверхні зерна, наведеного на рис. 13, за їх розмірами **Nn** (у пікселях) і кристалографічною орієнтацією (відтінку кольору) **n**: а – до деформування; б – після його деформування на 26 %<sup>1</sup>

Рис. 14*a* і б характеризує структурну і субструктурну неоднорідність поверхні зерна, однак ця інформація не дозволяє ідентифікувати розподіл

<sup>\*</sup> Переведення пікселей у мм<sup>2</sup> може бути виконане, якщо відомо розділення методу одержання колірних орієнтаційних карт, що залежить від розділення цифрової камери, яка використовується, й відстані між поверхнею зразка і камерою. При використанні web-камери Creative PC-CAM 300 і відстані між зразком і камерою 70 мм розділення вимірювальної системи при одержанні чіткого зображення поверхні зразка становить ~100 пікселей в 1 мм<sup>2</sup>. При використанні іншої (більш чутливої до кольору) камери можна досягти більш високої роздільної здатності.

цієї неоднорідності на поверхні зерна. Причиною цього є візуально нерозрізнені відтінки червоного кольору, які характеризують цю орієнтаційну та субструктурну неоднорідність.

<u>Другий етап</u> методики візуалізації дозволяє ідентифікувати субструктурну неоднорідність в будь-якій області поверхні зразка.

Алгоритм розв'язання цієї проблеми полягає в заміні візуально нерозрізнених колірних відтінків колірного зображення поверхні зразка на заздалегідь підібрані з колірного простору *RGB*, які дозволять ідентифікувати субзеренну структуру. Схема такої заміни для колірного зображення поверхні одного із зерен полікристала (див. рис. 13) наведена в таблиці 1. Перші два стовпчики в ній містять інформацію, яка одержана із рис. 14*a*. Третій стовпчик являє собою різні, візуально нерозрізнені відтінки червоного кольору колірного зображення поверхні зерна, представленого на рис. 13. В четвертому і п'ятому стовпчиках наведена колірна лінійка, яка заздалегідь довільно підібрана з візуально помітних відтінків кольору з колірного простору *RGB*, і відповідні цим відтінкам значення *RGB*.

Таблиця 1

Схема заміни візуально нерозрізнених відтінків червоного кольору на колірних орієнтаційних картах поверхні зерна (див. рис. 13) на візуально помітні, заздалегідь підібрані з колірного простору *RGB* 

<i>S</i> , pixel	п	Візуально нерозрізнені відтінки	Візуально помітні відтінки	R, G, B
319	0-10			255,0,0
680	11-20			0, 255, 0
909	21-30			0, 0, 255
1196	31-40			255, 0, 255
703	41-50			255, 255, 0
276	51-60			0, 255, 255

На рис. 15*а,б* наведено колірне зображення поверхні зерна після заміни в ньому відтінків кольору, наведених в третьому стовпчику, на візуально розрізнені, які наведені в четвертому стовпчику. Одержані таким чином нові колірні зображення зерна до та після пластичного деформування дозволяють не тільки візуалізувати субструктурну неоднорідність, а і визначати характеристики цієї неоднорідності – значення середнього, максимального й мінімального розміру субзерен, розподілу субзерен за розміром і кристалографічною орієнтацією та їх зміни в процесі пластичної деформації зразка.



Рис. 15. КОК після візуалізації субструктурної й орієнтаційної неоднорідності поверхні зерна (див. рис. 13) до деформування зразка (а) та після його деформування (б) на 26 % ×5

Лінійне розділення методики при використанні web-камери "Creative PC CAM-300" становить 0,5 *мкм*. Методика дозволяє стежити за зміною субструктурної неоднорідності і її характеристиками in situ в процесі зовнішнього впливу на зразок з періодом 0,02 c одночасно для всіх зерен та їх фрагментів на поверхні полікристалічного зразка.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСЛОКАЦІЙНОГО КОВЗАННЯ В КРИСТАЛІЧНИХ ЗРАЗКАХ IN SITU В ПРОЦЕСІ ДЕФОРМУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

#### Мета роботи:

– ознайомитися з лазерною методикою, яка дозволяє досліджувати характер та розвиток деформаційного рельєфу in situ в процесі деформації полікристалічного зразка одночасно в різних областях його поверхні;

– за допомогою лазерної методики дослідити способи релаксації напруженого стану за рахунок дислокаційного ковзання (розвиток трансляційної моди пластичної деформації) в двовимірних полікристалічних зразках за умов активного навантаження.

#### Порядок виконання роботи

1. Підготувати для дослідження крупнокристалічний двовимірний зразок Al розміром 70х20х0,15 мм<sup>3</sup>. Попередньо визначити робочу довжину і переріз зразка.

2. Виявити мікроструктуру з однієї сторони зразка за допомогою травителя Келлера, іншу сторону зразка відполірувати пастою ДОІ.

3. Уздовж лінії переміщення пучка лазера визначити лінійний розмір двох суміжних зерен (за вибором викладача), від яких будуть реєструватися картини розсіювання лазерного пучка, до деформування зразка і після руйнування для визначення відносної локальної деформації окремих зерен.

4. Встановити досліджуваний зразок в захвати установки спеціальної конструкції (розривної машини) для проведення деформування зразка (див. рис. 16) таким чином, щоб пучок лазера був направлений перпендикулярно *до полірованої поверхні зразка*.

**Інструкція** з проведення дослідження зразка на розривній машині, конструкція якої дозволяє іп situ в процесі деформування зразка реєструвати картини розсіювання лазерного випромінювання, додається на сторінках 23-24.

5. Перед деформуванням зразка одержати картини розсіювання лазерного випромінювання від поверхні двох суміжних зерен зразка, розташованих вздовж осі розтягнення (*за вказівкою викладача*).

6. Продеформувати зразок Al аж до руйнування за умов одновісного навантаження з постійною швидкістю деформації  $\dot{\varepsilon} = 5 \cdot 10^{-5} c^{-1}$  за кімнатної температури. Синхронно in situ в процесі деформування зразка реєструвати картини розсіювання лазерного випромінювання від поверхні зазначених областей зразка (*переміщення лазера уздовж осі розтягнення зразка* з високою швидкістю і синхронне отримання картин лазерного розсіювання передбачено конструкцією установки).

#### Обробка отриманих результатів

1. Побудувати криву деформації для дослідженого зразка в координатах «напруження - деформація» (σ - ε). Визначити відносну локальну деформацію двох суміжних зерен, від яких одержували картини розсіювання лазера в процесі деформування.

2. Встановити наявність картин розсіювання для обох зерен досліджуваного зразка. Про початок формування деформаційного рельєфу на поверхні попередньо полірованого зразка (утворення сходинок) свідчить помітна дифракційна картина. При наявності картин розсіювання лазерного випромінювання хоча б в одному із зерен встановити деформацію, при якій виникає помітна дифракційна картина.

3. Встановити число діючих систем ковзання в окремих зернах, послідовність їх включення в певному структурному елементі деформованого зразка.

4. Порівняти вид картин розсіювання від різних областей зразка, отриманих на початковій стадії деформування і перед руйнуванням зразка, і зробити висновок про характер дислокаційного ковзання на різних стадіях пластичної деформації.

5. Роздрукувати картини розсіювання від тих фрагментів зразка, для яких зафіксоване виникнення картин дифракції (початок дислокаційного ковзання) і далі через кожні 2% деформації аж до руйнування зразка.

6. За картинами розсіювання визначити зміни лінійного розміру дифракційного рефлексу від ступеня деформації зразка, таким чином встановити мінімальну відстань між лініями ковзання  $d_{min}$  для різного ступеня деформації, яка характеризує інтенсивність розвитку дислокаційного ковзання, побудувати залежність  $d_{min} = f(\varepsilon)$ .

#### Звіт

1. Обґрунтувати можливість використання лазерного випромінювання для вивчення трансляційної моди пластичної деформації двовимірних полікристалів, яка реалізується за рахунок дислокаційного ковзання.

2. Аналізуючи отримані результати, зробити висновок щодо способів релаксації напруженого стану в деформованому зразку, за наявністю картин розсіювання лазерного випромінювання зробити висновки щодо активності дислокаційного ковзання в різних зернах полікристалічного зразка. Встановити число діючих систем ковзання і послідовність їх включення в окремих зернах деформованого зразка.

3. За результатами досліджень визначити кінетику розвитку дислокаційного ковзання в різних зернах в залежності від ступеня деформації і зробити висновок відносно інтенсивності розвитку дислокаційного ковзання на різних стадіях деформування зразка.

#### Інструкція з проведення дослідження зразка

#### Експериментальна установка складається з 6 блоків:

1. Блок кріплення зразка (за допомогою захватів) – І.

2. Блок деформування зразка – III.

3. Блок обробки інформації складається з системного блоку (2), монітора (9), мультиметра "UNI-T UTM1804" (3), принтера (10) – **II**.

4. Блок реєстрації, посилення і передачі сигналу – ІV.

5. Блок управління живленням лазера – V.

6. Блок управління переміщенням лазера – VI.



Рис.16. Загальний вигляд установки для дослідження

# ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

#### Для виконання досліджень необхідно виконати наступні операції:

1. За допомогою спеціального пристрою закріпити зразок в захватах (1) і встановити його в деформуючий пристрій (блок I). Попередньо визначити робочу довжину і переріз зразка.

2. Увімкнути: системний блок (2);

мультиметр "UNI-T UTM1804" (3) (тумблер увімкнення знаходиться на звороті) і встановити на ньому режим вимірювання напруги – "*mV*".

3. На програмному комплексі (ПК) на «Робочому столі» запустити додаток «UT804 V.2.00» (натиснути кнопку «USB connect»). Далі увімкнути режим передачі даних в ПК, натиснувши «Send». Після завершення експерименту зберегти дані в додатку в форматі «txt» або «xls».

4. Увімкнути блок живлення тензодатчиків:

встановити на панелі (4) тумблер в положення «Увімкнено»;

встановити струм тензодатчиков 8 *mA*.

5. Увімкнути блок управління лазером (5): тумблери «мережа» і «увімкнення».

6. Запустити на «Робочому столі» додаток Logitech Webcam Software, до якого підключена камера – Logitech HD PRO Webcam C920 (6):

в режимі «настройки зображення» підібрати яскравість, контрастність, колірну гамму, різкість для отримання якісного знімка;

встановити розділення «1080 р (*max*)»;

запустити режим запису відео.

7. Для переміщення лазера встановити тумблер (8) в положення «Увімкн.». Виставити діапазон переміщення лазера за допомогою обмежувачів (7).

8. *Провести деформування зразка*: встановити тумблер управління двигуна на панелі (4) в положення "↑" для переміщення захвату вгору і "↓" – для розвантаження.

9. Для побудови деформаційної кривої в координатах «напруження - деформація» необхідно знати швидкість переміщення захвату, переріз зразка і коефіцієнт переведення значень **mv** в  $\kappa\Gamma$  ( $\sigma = F / S$ ,  $F = U \times k$ , де k = 0.1).

#### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

#### ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ТА СУБСТРУКТУРНИХ ЗМІН У ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ ЗРАЗКАХ IN SITU В ПРОЦЕСІ ДЕФОРМУВАННЯ

#### Мета роботи:

 – ознайомитися з оригінальними оптоелектронними методиками, які дозволяють in situ в процесі деформування зразка одержувати колірні орієнтаційні карти, та за допомогою методики візуалізації опанувати визначення всіх структурних та субструктурних змін в зразках у процесі деформування;

в становити орієнтаційні зміни в різних зернах полікристала in situ
в процесі деформування та способи реалізації ротаційної моди пластичної деформації в зазначених зразках;

– визначити субструктурні зміни в окремих зернах досліджуваного зразка та їх характеристики на різних стадіях деформаційної кривої.

#### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Підготувати для дослідження крупнокристалічний двовимірний зразок Al. Попередньо визначити робочу довжину і переріз зразка.

2. Виявити мікроструктуру зразка за допомогою травителя Келлера.

3. Встановити досліджуваний зразок в захвати розривної машини (рис.17). Отримати колірну орієнтаційну карту від вихідного зразка.

Інструкції з проведення дослідження зразка на розривній машині, отримання колірних орієнтаційних карт та їх візуалізації додаються на сторінках 25–31.

4. Продеформувати досліджуваний зразок за умов одновісного навантаження з постійною швидкістю деформації  $\dot{\varepsilon} = 5 \ 10^{-5} \ c^{-1}$  за кімнатної температури.

5. В процесі деформування зразка аж до руйнування in situ реєструвати колірні орієнтаційні карти.

#### Обробка отриманих результатів

1. Побудувати криву деформації для дослідженого зразка в координатах «напруження - деформація» (σ – ε). Виділити стадії деформаційної кривої з різним коефіцієнтом деформаційного зміцнення.

2. Проаналізувати колірні орієнтаційні карти (КОК), отримані в процесі деформування зразка, роздрукувати КОК від вихідного зразка і далі через кожні 2 % деформації аж до руйнування зразка. Візуально встановити наявність зміни кольору або цілого зерна, або окремих фрагментів в зерні в процесі деформування зразка.

Обробку КОК проводити за вказаною методикою (додається на стор. 28-31).

3. Провести візуалізацію КОК в червоному, синьому, зеленому або сірому кольорі (за вказівкою викладача), які відповідають різним стадіям деформаційної кривої.

4. Отримати кількісні характеристики субструктури та її розподіл в окремих зернах для вихідного зразка та при різних ступенях деформації зразка (за вказівкою викладача).

#### Звіт

1. Проаналізувавши КОК, які були одержані при деформуванні зразка, зробити висновок про орієнтаційні зміни, які відбуваються в зразку в процесі пластичного деформування, а саме: встановити способи реалізації ротаційної моди пластичної деформації в зразку. За КОК встановити вид ротаційних ефектів, які виникли в різних областях в зразку при його деформуванні, місця їх зародження і кінетику розвитку.

2. За результатами візуалізації КОК для окремих зерен отримати всі кількісні характеристики субструктури та її розподіл в зернах в залежності від розмірів субструктури і кристалографічної розорієнтації. На підставі отриманих результатів зробити висновок про характер субструктурних змін в зразку, що відповідають різним стадіям на кривій деформації досліджуваного зразка.

#### Інструкція з проведення деформування зразка

#### Експериментальна установка складається з 6 блоків:

1. Блок кріплення зразка – І.

2. Блок деформування зразка – II.

3. Блок обробки інформації III складається з системного блоку (2), монітора (4), мультиметра «UNI-T UTM1804» (3).

4. Блок реєстрації, посилення і передачі сигналу – ІV.

- 5. Блок управління освітленням V.
- 6. Блок переміщення камери VI.



Рис.17. Загальний вигляд установки для дослідження

# ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

### Для виконання дослідження необхідно виконати наступні операції:

1. За допомогою спеціального пристосування закріпити зразок в захватах (1) і встановити його в деформуючий пристрій (блок І). Попередньо визначити робочу довжину і переріз зразка.

2. Увімкнути:

системний блок (2);

мультиметр «UNI-T UT70D» (3) і встановити на ньому режим вимірювання напруги – «mV».

3. На моніторі ПК на «Робочому столі» запустити додаток «UT70D» і в додатку натиснути кнопку «Connect».

Після завершення експерименту зберегти дані в додатку в форматі «txt» або «xls».

4. Увімкнути блок живлення тензодатчиків:

встановити на панелі (5) тумблер в положення «Увімкнено»;

встановити струм тензодатчиков 10 *mA*.

5. Увімкнути джерело світла (9) для освітлення поверхні зразка (встановити рукоятку на автотрансформаторі (8) в положення від 20 до 40).

6. Перевірити наявність з'єднання камери з системним блоком (2).

Запустити на «Робочому столі» додаток Logitech Webcam Software, до якого підключена камера Logitech HD PRO Webcam C920 (6):

в режимі «настройки зображення» підібрати яскравість, контрастність, колірну гаму, різкість для отримання якісного знімка;

встановити розділення «1080р (max)»;

запустити режим запису відео.

#### Після завершення експерименту зупинити запис відео.

7. *Провести деформування зразка*: встановити тумблер управління двигуна на панелі (10) в положення «↑» для переміщення захоплення вгору і «↓» – для розвантаження.

8. Після закінчення деформування зразка отриману інформацію зберегти (див. П.3) і обробити, наприклад, використовуючи програму Mathcad, Excel.

Для побудови деформаційної кривої в координатах «напруження – деформація» необхідно знати швидкість переміщення захватів, переріз зразка і коефіцієнт переведення значень *mv* в  $\kappa\Gamma$  ( $\sigma = F/S$ ,  $F = U \times k$ , де k = 0.1)

## Інструкція щодо отримання колірних орієнтаційних карт та їх візуалізації

1. Після завершення експерименту для аналізу і обробки колірних орієнтаційних карт, отриманих у процесі деформування зразка, необхідно вирізати проміжні кадри з заданим кроком деформації, наприклад, через  $\varepsilon = 5\%$ , з файла, в якому збережено відео:

відкриваємо відеофайл за допомогою програми «Light Alloy»;



🕜 Сохранить кадр (F12)

вибираємо кадри, які відповідають заданій деформації, і зберігаємо їх (для збереження кадрів використовується клавіша «F12» або «Зберегти кадр»);

проводимо порівняльний аналіз отриманих колірних орієнтаційних карт при різній деформації для встановлення наявності орієнтаційних змін у зразку, що виникли в процесі деформування.

2. Для візуалізації колірних орієнтаційних карт необхідно: відкрити збережені кадри (фото) в додатку «Adobe Photoshop»;

на фото вибираємо зерно для дослідження, для чого скористаємося інструментами «Чарівна паличка» або «Лассо», які знаходяться на вертикальній панелі швидкого запуску. Для цього необхідно знайти на вертикальній панелі інструментів інструмент «Лассо» і клацнути по ньому правою кнопкою миші. З'явиться кілька прихованих інструментів, серед яких є інструмент «Магнітне лассо».

Якщо об'єкт знаходиться на білому фоні, то можна скористатися інструментом «Чарівна паличка», який в один клік виділить повністю весь об'єкт, або «Лассо»; якщо ж об'єкт знаходиться на неоднорідному фоні, але з досить чіткими границями, ви зможете скористатися інструментом «Лассо».

Далі *скопіювати виділене зерно* (Ctrl + C) і вставити на нове поле (Ctrl + V), яке створене за розмірами зображення. Зберегти отримані файли в цифровому форматі (jpg).







Для виконання візуалізації субструктури в обраному зерні необхідно зайти на робочому столі в директорію «Visualization program». У ній запускаємо файл «VISUALIZATION.html» через додаток «Firefox».



У додатку необхідно:

вибрати раніше збережений файл з вирізаним зерном і відкрити його за допомогою функції «Виберіть зображення»;

вибрати канал, в якому буде проводитися візуалізація: R, G, B або GRAY;

натиснути функцію «Почати», в результаті з'явиться карта візуалізації;

зберегти отримані карти візуалізації для заданої деформації.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Золоторевский В. С. Механические свойства метал лов : учебник для вузов / В. С. Золоторевский. – М. : Металлургия, 1993. – 352 с.

2. Владимиров В. И. Дисклинации в кристалах / В. И. Владимиров, А. Е. Романов. – Л. : Наука, 1986. – 224 с.

3. Badiyan E. E., Tonkopryad A. G., Shekhovtsov O. V., Shurinov R. V., Zetova T. R., Kazachkova K. S. Investigation of origination and development of the surface deformation relief of crystalline materials by laser radiation // Functional Materials. -2015. - V. 22, No 3. - P. 395-401.

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

5. Патент на винахід № 89743 Україна, МПК G01B 11/16. Спосіб контролю орієнтаційних змін у кристалічних матеріалах іп situ в процесі зовнішнього впливу / Бадіян Є. Ю., Тонкопряд А. Г., Шеховцов О. В., Шурінов Р. В.; заяв. І патентовласник ХНУ імені В. Н. Каразіна. – № а 2009 06455; заявл. 22.06.09; опубл. 25.02.10, Бюл. № 4.

6. Патент на винахід № 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.