

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

**СТОЯНОВ ПАВЛО ПЕТРОВИЧ**

УДК 539.21+669-176

**РОЗВИТОК ТЕКСТУРИ ТА АНІЗОТРОПІЇ ВЛАСТИВОСТЕЙ В  
ГЕКСАГОНАЛЬНИХ ПОЛІКРИСТАЛАХ  $Mg-3\%Al-1\%Zn$**

Спеціальність 01.04.07 – Фізика твердого тіла

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико – математичних наук

Одеса – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному закладі «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського», Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

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

Офіційні опоненти: доктор фізико – математичних наук, професор  
**КУРМАШОВ Шаміль Джамашович**,  
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, професор кафедри фізики

кандидат фізико – математичних наук, доцент  
**ЖУКОВСЬКИЙ Вадим Кирилович**,  
Державний заклад «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського», докторант кафедри фізики

Захист дисертації відбудеться «24» листопада 2012 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 41.053.07 при Державному закладі «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського» за адресою: вул. Старопортофранківська, 26, Одеса, Україна, 65020, ауд. № 52.

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

Автореферат розісланий «\_\_» жовтня 2012 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О.Х. Тадеуш

Підписано до друку 10.10.2012р. Формат 60x84/16. Папір офсет.  
Друк – ризографія Умов. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим.  
Віддруковано в інформаційно – видавничому центрі ПНПУ імені  
К.Д. Ушинського  
65020, м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 26

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Формозмінювання кристалічних тіл визначається низкою механізмів, серед яких головними є ковзання по певних кристалографічних площинах і двійникування. Реалізація того чи того механізму пластичної деформації залежить, крім властивостей самого кристалу, від симетрії та характеру прикладеного зовнішнього поля напруг, температури, швидкості деформації тощо. Як наслідок деформоване тіло набуває нового комплексу властивостей (наприклад, відбувається деформаційне зміцнення або знеміцнення), виявляє їх анізотропію. У полікристалічних тілах деформація призводить насамперед до утворення й змінювань орієнтаційного розподілу елементів, що складають полікристал - кристалографічної, механічної та дефектної текстури. Для гексагональних полікристалів значну роль у пластичній деформації відіграють механізми двійникування та роздвійникування, які суттєво впливають на кінцеву текстуру, анізотропію і рівень механічних властивостей. Цей феномен проявляється і в магнієвих сплавах, де, на відміну від традиційного деформаційного зміцнення, спостерігається деформаційне знеміцнення. Наявні моделі пластичної деформації – полікристалічна, феноменологічна, що заснована на поданні кристалу як континууму, достатньо результативні для пояснення ефектів анізотропії в кубічних металах, але виявляють недоліки при поясненні пластичності гексагональних полікристалів.

З практичного погляду магнієві сплави становлять значний інтерес. Це обумовлено високою питомою міцністю магнієвих сплавів, що робить їх перспективними для використання в транспортній промисловості. У порівнянні з алюмінієвими конкурентами, магнієві сплави мають переваги у таких властивостях, як опір розтягуванню, втомі. Широкому застосуванню магнієвих сплавів перешкоджають низька здатність до формозмінювання за кімнатних температур та брак знань про їх незвичайні пластичні властивості.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота є частиною експериментальних і теоретичних досліджень процесів формування текстур і анізотропії властивостей згідно з темою «Дослідження впливу напружено-деформованого стану на текстуроутворення і анізотропію властивостей твердого тіла»(Державний реєстраційний №01090000216), що проводяться на кафедрі фізики інституту фізики і математики Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського».

**Мета дослідження:** встановити кількісний зв'язок між властивостями моно- і текстурованих полікристалів сплаву твердого розчину алюмінію в магнії, деформованих розтягуванням і стисканням, з урахуванням розподілу кристалів по орієнтаціям, що дозволяють прогнозувати анізотропію властивостей листових полікристалів.

**Завдання дослідження:**

1. Проаналізувати наявні моделі розвитку текстури і анізотропії

властивостей гексагональних полікристалів і визначити оптимальний підхід до вивчення текстури і анізотропії властивостей  $\alpha$ -сплавів магнію.

2. Оцінити коректність застосування для прогнозування анізотропії тензорних властивостей полікристалічного агрегату, монокристалічних характеристик нелегованого магнію і вибрати оптимальний набір констант піддатливості монокристалу досліджуваного матеріалу для опису анізотропії пружних властивостей текстурованого полікристалу.

3. Для листів сплаву AZ31 вивчити вплив деформації стисканням і розтягуванням на текстурні характеристики, анізотропію пружних і механічних властивостей. Встановити зв'язок між характеристиками текстури стиснення і розтягування сплаву та анізотропією властивостей деформованих листових полікристалів, знайти набір параметрів для прогнозування анізотропії властивостей листів за текстурними характеристиками і властивостям монокристалу сплаву.

4. У представленні інтегральних характеристик вивчити утворення, розвиток і перетворення текстури та відповідної їй анізотропії властивостей у листах сплаву AZ31 за деформації знакозмінним згином.

5. На підставі результатів досліджень мікроструктури, текстури і субструктури змоделювати кристалографічний механізм пластичної деформації при розтягуванні та стисканні полікристалів сплаву AZ31.

6. На основі наявних феноменологічних підходів пояснити особливості формозміни листів при стисканні та наступному розтягуванні, обумовлені процесами двійникування і роздвійникування.

*Об'єктом дослідження є текстурний стан деформованих гексагональних полікристалів і анізотропія їх властивостей.*

*Предметом дослідження є листові полікристали сплаву твердого розчину алюмінію в магнії.*

*Методи дослідження.* Вирішення сформульованих завдань досягнуто методами рентгенівського текстурного аналізу, динамічним і статичним методами вимірювання анізотропії пружних властивостей, методами вимірювання мікротвердості, теоретичним моделюванням можливих текстурних станів гексагональних полікристалів.

### **Наукова новизна дослідження.**

1. Отримано інтегральні характеристики текстур листових полікристалів магнієвого сплаву при деформації їх послідовними стисненням та розтягуванням і за допомогою них встановлено зв'язок між анізотропією властивостей моно- і полікристалу.

2. Показано некоректність використання констант піддатливості монокристалів магнію для опису анізотропії властивостей сплаву AZ31. Для практичного використання знайдено значення компонента тензора піддатливості монокристалів цього сплаву.

3. З'ясовано роль процесів ковзання, двійникування і роздвійникування в механізмі пластичної деформації магнієвого сплаву.

4. Розраховано орієнтаційні залежності пружних властивостей листів досліджуваного сплаву, а також значення модуля Юнга в напрямку,

нормальному до площини листів, після деформації листів знакозмінним згином з різним числом циклів.

5. На основі гіпотези Ашкеназі визначено тензорну розмірність анізотропії межі текучості листів сплаву у відпаленому і деформованому циклічною деформацією листовому полікристалі.

6. Визначено набір емпіричних констант для опису анізотропії механічних властивостей деформованих листів сплаву AZ31, а також метод розрахунку цих властивостей в нормальному до площини листів напрямку.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

Отримано текстурні характеристики листів сплаву AZ31 (3% Al, 1% Zn) після різних видів деформації знакозмінним згином. Результати представлено у вигляді інтегральних характеристик текстури і статистичних кутів нахилу гексагональної осі до площини прокатки, за допомогою яких пропонується розраховувати анізотропію властивостей листів перед штампуванням полегшених деталей.

Встановлено режими обробки листів сплаву AZ31 правкою і знакозмінним згином для отримання листів з високим рівнем пластичності за кімнатних температур, придатних для подальшого штампування та витяжки.

Встановлено, що анізотропія механічних властивостей листів сплаву AZ31 після деформації знакозмінним згином піддається тензорному опису і оцінюється з інтегральних характеристик текстури і монокристалічних констант.

**Особистий внесок здобувача** полягає в тому що ним безпосередньо:

1. Проведено підготовку зразків і проведення рентгенівських та металографічних досліджень.

2. Встановлено основні закономірності текстурних перетворень сплаву магнію Mg – 3%Al – 1%Zn, математична обробка результату.

3. Провів механічні випробування на згин, визначено значення модуля Юнга в головних напрямках після різної кількості циклів ЗЗ.

4. Розраховано константи податливості для листів сплаву Mg – 3%Al – 1%Zn, на прикладі розрахунку анізотропії модуля Юнга показано некоректність використання монокристалічних характеристик податливості монокристала магнію при розрахунку анізотропії механічних властивостей сплаву.

5. Отримано формули щодо представлення анізотропії механічних властивостей у тензорному вигляді, розраховано моно кристаліні характеристики матеріалу після різних деформацій.

6. Встановлено, що деформація знакозмінним згином призводить до утворення двійників на етапі стиснення, які надають можливість для ковзання по різних системах ковзання, що призводить до знеміцнення після трьох циклів деформації ЗЗ.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідалися і обговорювалися на конференціях та семінарах: Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики, Еврика-2005. (Львів, травень 2005,2009),Євразійській конференції «Міцність неоднорідних структур». ПРОСТ 2008, М. 8-10 квітня 2008 М. ПРОСТ 2010, М. 22 квітня 2010

**Обґрунтованість і надійність результатів** підтверджується надійністю методів рентгенівського текстурного експерименту і методів визначення анізотропії властивостей, що вивчаються, задовільним збігом експериментальних даних з розрахунковими результатами, відповідністю висновків загальноприйнятим уявленням.

**Публікації.** Основний зміст дисертації опубліковано у 8 статтях періодичних видань, з них чотири тези у збірниках міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація містить вступ, чотири розділи, висновки з кожного розділу і загальні висновки, список використаних джерел (250 найменувань). Загальний обсяг дисертації складає 163 сторінок, 60 малюнків, 11 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано напрям і обсяг досліджень. Для досліджень вибрано здатний до пластичної деформації сплав магнію AZ31, що містить 3% алюмінію і 1% цинку, який набув широкого використання в авіа та автобудуванні. Розглянуто основні проблеми текстуроутворення, роль процесів ковзання й двійникування у пластичній деформації полікристалів з гексагональної структурою. Сформульовано мету й завдання досліджень; виявлено наукову новизну і практичну значущість дисертаційної роботи.

У першому розділі «Розвиток текстури та анізотропії властивостей в гексагональних полікристалах Mg-3%Al-1%Zn» розглянуто експериментальні методи текстурного аналізу, які використані в роботі, а також метод створення в листових полікристалах текстур стиснення і розтягування за допомогою знакозмінного згину (ЗЗ). Показано, що найбільш інформативним методом є рентгенодифрактометричний метод з побудовою прямих полюсних фігур (ПФ). Для кількісних досліджень текстури оптимальним є нормування полюсних фігур у рівнях середньої полюсної щільності, що дає можливість оцінювати полюсну щільність у кожній точці ПФ як щільність ймовірності наявності в текстурі орієнтувань в інтервалі кутів ( $\alpha \pm d\alpha$ ) і ( $\beta \pm d\beta$ ). Що стосується магнієвих сплавів, то знайдені оптимальні умови (режими зйомки, ширина щілин джерела рентгенівських променів і детектора) отримання ПФ (0002) деформованих листів сплаву на дифрактометрі ДРОН 3-М. Описано рентгенодифрактометричні методи, які використано для визначення елементів субструктури деформованих магнієвих сплавів.

У дослідженні проаналізовано методи подання текстур у наближенні ідеальних орієнтувань і функцій розподілу кристалів по орієнтаціям (ФРО). Ідеальні орієнтування і кут  $\alpha$  нахилу осі  $c$  гексагонального кристалу знаходять або з полюсних фігур шляхом порівняння зі стандартними стереографічними проекціями кристалу або за результатами Фур'є-аналізу анізотропії властивостей, що піддаються тензорному опису. Найбільш повно описує текстуру безперервна функція розподілу кристалів по орієнтаціям (ФРО). Однак реконструкція ФРО з експериментальних ПФ вимагає обробки великих

масивів даних рентгенодифрактометричного аналізу та використання не однієї, а набору ПФ від різних кристалографічних площин. Для аналізу зв'язку текстури і анізотропії властивостей гексагональних полікристалів достатню інформацію можливо отримати, використовуючи згортки ФРО у вигляді комбінацій направляючих косинусів гексагональної осі щодо координат плоского зразка, який володіє орторомбічною симетрією. У якості осей координат вибираються головні напрямки листового полікристалу, а саме: напрямок прокатки (НП), поперечний напрям (ПН) і нормальний до площини листа напрям (НН). Число незалежних комбінацій направляючих косинусів для гексагонального текстурованого полікристала, п'ять, і вони названі інтегральними характеристиками текстури (ІХТ). Ці характеристики повністю описують анізотропію властивостей листових полікристалів, що піддаються тензорному опису. Анізотропія властивостей четвертої тензорної розмірності, наприклад, модуля Юнга, розраховується за формулами:

$$E^{-1}(\phi) = s_{11} + 2K_1\psi_2(\phi) + K_2\psi_4(\phi), \quad (1)$$

де  $K_1 = s_{13} - s_{11} + \frac{1}{2}s_{44}$ ;  $K_2 = s_{33} + s_{11} - 2s_{13} - s_{44}$ ;  $s_{ik}$  – монокристалні характеристики властивостей (у даному випадку "податливості");

$$\psi_2(\phi) = I_1 \cos^4 \phi + I_2 \sin^4 \phi + \frac{1}{4}(I_1 + I_2) \sin^2 2\phi;$$

$\psi_4 = I_6 \cos^4 \phi + I_4 \sin^4 \phi + 1,5I_5 \sin^2 2\phi$  – функції анізотропії текстурованого полікристала,  $I_i$  – ІХТ.

ІХТ розраховуються усередненням направляючих косинусів та їх комбінацій по всім можливим орієнтаціям кристалів:

$$I_1 = \langle \alpha_{13}^2 \rangle; \quad I_2 = \langle \alpha_{23}^2 \rangle; \quad I_3 = \langle \alpha_{33}^2 \rangle; \quad I_4 = \langle \alpha_{13}^4 \rangle; \quad I_5 = \langle \alpha_{23}^4 \rangle; \\ I_6 = \langle \alpha_{13}^2 \alpha_{23}^2 \rangle. \quad (2)$$

Тут  $\langle \rangle$  означає усереднення  $\alpha_{i3}^n$  за всіма можливими орієнтаціями текстурованого полікристалу.

Кількість незалежних  $I_i$  дорівнює п'яти, так як очевидно:  $I_1 + I_2 + I_3 = 1$ .

Ураховуючи ізотропність площини (0002) щодо тензорних властивостей, вказане усереднення можна проводити безпосередньо за функцією розподілу полюсної щільності  $P(\alpha, \beta)$  осі [0002] гексагонального кристалу на сфері проєкцій, тим більше, що ПФ (0002) для гексагональних полікристалів рентгенографічно можна отримати досить просто. Так як  $\alpha_{13} = \sin \alpha \cdot \cos \beta$ ;

$\alpha_{33} = \cos \alpha$ , то для ІХТ:



$$\langle \alpha_{i3}^n \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} P_{(0002)}(\alpha, \beta) \alpha_{i3}^n(\alpha, \beta) \sin \alpha d\alpha d\beta \quad (3)$$

Метод представлення текстури за допомогою ІХТ дозволяє визначити пружні константи, не вдаючись до штучного вирощування відповідних монокристалів, що особливо важливо для монокристалів сплавів. Прямим інтегруванням виразу (1) отримали формули для амплітуд гармонік у представленні анізотропії модуля Юнга у вигляді:

$$A_0 = s_{11} + \left( s_{13} - s_{11} + \frac{1}{2} s_{44} \right) (I_1 + I_2) + \frac{3}{8} (s_{33} + s_{11} - 2s_{13} - s_{44}) (I_4 + 2I_5 + I_6) \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \left[ (2s_{13} - 2s_{11} + s_{44}) (I_1 - I_2) + (s_{33} + s_{11} - 2s_{13} - s_{44}) (I_6 - I_4) \right] \quad (5)$$

$$A_4 = \frac{1}{8} (s_{11} + s_{33} - 2s_{13} - s_{44}) (I_4 + I_6 - 6I_5) \quad (6)$$

Далі, якщо  $A_0$ ,  $A_2$ ,  $A_4$  визначені експериментально, то константи податливості монокристалів сплаву та їх комбінації знаходяться таким чином:

$$\begin{aligned} s_{11} &= A_0 - \frac{A_2(I_1 + I_2)}{I_1 - I_2} + 4 \frac{A_4(I_6 - I_4)(I_1 + I_2)}{(I_1 - I_2)(I_4 + I_6 - 6I_5)} - 3 \frac{A_4(I_4 + I_6 + 2I_5)}{(I_4 + I_6 - 6I_5)} \\ s_{13} - s_{11} + \frac{1}{2} s_{44} &= \frac{2A_2}{I_1 - I_2} - 8A_4 \frac{I_6 - I_4}{(I_1 - I_2)(I_4 + I_6 - 6I_5)} \\ s_{33} + s_{11} - 2s_{13} - s_{44} &= \frac{8A_4}{(I_4 + I_6 + 6I_5)} \end{aligned} \quad (7)$$

Анізотропія властивостей другої тензорної розмірності полікристалів орторомбічної симетрії має вигляд:

$$D(\phi) = d_1^{(M)} + (d_2^{(M)} + d_1^{(M)}) \psi_2(\phi) \quad (8)$$

де  $d_1^{(M)}$ ,  $d_2^{(M)}$  – компоненти тензора, що відповідає механічній властивості гексагонального монокристалу, кут  $\phi$ , як і раніше, відряховується від НП,

$\psi_2(\phi) = I_1 \cos^4 \phi + I_2 \sin^4 \phi + 0,25(I_1 + I_2) \sin^2 2\phi$  – функція анізотропії для листів гексагональних металів (квазімонокристал орторомбічної симетрії) значення властивостей другої тензорної розмірності в головних напрямках квазімонокристалу виражається:

$$D(0^0) = d_1^{(M)} + (d_2^{(M)} - d_1^{(M)}) I_1 \quad ; \quad D(90^0) = d_1^{(M)} + (d_2^{(M)} - d_1^{(M)}) I_2^{(h)} \quad (9)$$

де  $I_i$  – інтегральні характеристики текстури.

$$d_1^{(M)} = \frac{D(0^0)I_2 - D(90^0)I_1}{I_2 - I_1} \quad , \quad d_2^{(M)} = \frac{D(0^0)(1 - I_2) + D(90^0)(1 - I_1)}{I_1 - I_2} \quad , \quad \text{а}$$

значення властивості в напрямку, нормальному до площини листів виражається:

$$D_{HH} = d_1^{(M)} + (d_2^{(M)} - d_1^{(M)}) I_3 \quad .$$

(10)

У другому розділі «Розвиток текстури та анізотропії властивостей в гексагональних полікристалах Mg-3%Al-1%Zn» розглянуто сучасні моделі пластичної деформації щодо досліджуваного сплаву магнію. Для опису властивостей полікристалів при пластичній деформації розроблено моделі, які дозволяють вибрати механізм деформації, оцінити його роль в анізотропії властивостей деформованих полікристалів, вплив текстури, що розвивається при деформації та особливості деформаційного зміцнення або знеміцнення. Загальноприйнятими є полікристалічні та континуальні феноменологічні моделі пластичної деформації. Головні феноменологічні моделі в процесах пластичної деформації розглядають, принаймні, 5 незалежних систем ковзання, причому саме ковзання є домінуючим механізмом пластичної деформації. Проте процеси двійникування і роздвійникування в цих моделях не враховуються. Полікристалічні моделі дозволяють вибрати механізми деформації і оцінити їх роль у пластичній анізотропії, пояснити розвиток текстури і деформаційне зміцнення, хоча комп'ютерні витрати при такому описанні процесів деформації листів є надзвичайно громіздкими порівняно з феноменологічними моделями. В основу підходу до вивчення процесу пластичної деформації твердих тіл покладено концепцію про те, що в процесі деформації полікристалу реалізуються два основних механізми, які конкурують один з одним. Це ковзання і двійникування. При ковзанні по різних площинах кристалу переміщення атомів виявляється більшим міжатомної відстані для цих площин. Як наслідок спостерігається переорієнтація кристалів, що для полікристалів виражається у зміні текстури. Якщо прикладена напруга змінюється на протилежну, то дислокації змінюють напрямок руху на протилежний. Причому критична здвигова напруга (КЗН) не залежить від напрямку руху. На відміну від ковзання, двійникування є однорідним зсувом, рівномірно розподіленим в області трьох вимірів. Кристалічна структура двійників ідентична структурі матриці, але з іншою орієнтацією. Загальна деформація при двійникуванні мала та обмежена. Процес двійникування активізується тільки стисненням або розтягненням окремо одне від одного, але не ними разом і залежить від структури кристалу. Це явище називається поляризацією. Двійники деформації мають форму пластин через утворення енергетичних бар'єрів при утворенні двійників.

Двійниковий зсув змінює знак при  $c/a = \sqrt{3}$ . При цьому площина зсуву перетворюється на квадрат, а величина зсуву  $\gamma = 0$ , тому утворення двійника за цією системою стає неможливим. Двійник "стиснення" вкорочує вісь  $c$  кристалу й може утворюватися при  $c/a > \sqrt{3}$  (цинк, кадмій). Двійник "розтягування" реалізується при  $c/a < \sqrt{3}$  (магній, цирконій, титан). Величина змінюється від -0,175 для кадмію до 0,186 – для берилію.

Існує два механізми зародження двійників: гомогенний і гетерогенний. Для реалізації гомогенного зародження двійників потрібні висока напруга і низька

енергія поверхні упаковки та деформації. Це передбачає наявність дефектів, що сприяють зародженню двійників за рахунок концентрації напруг.

Для гетерогенного зародження двійникові зародки (дефекти упаковки) з'являються через дисоціації певних дислокаційних конфігурацій. Далі двійники ростуть за рахунок вихідних зерен, таким чином, забезпечуючи деформацію. У даний час залишається відкритим питання, чи залежить двійникування від величини (КЗН).

Додатково до дислокаційного ковзання і двійникування, в продвійникованих матеріалах можливе протікання процесу роздвійникування. Роздвійникування відповідає за ефект пам'яті форми у відповідних сплавах, де роздвійникування відбувається у вигляді зростання одного типу мартенситу за рахунок іншого. У деформованих сплавах магнію утворюється висока щільність двійників, які піддаються подальшому роздвійникуванню. Мікроскопічно роздвійникування проявляється в тому, що зникають характерні двійникові смуги. Двійники зникають або стають тоншими при зміні навантаження на протилежне.

Процес роздвійникування подібний до процесу двійникування, хоча процесу зародження двійника тут не потрібно.

Напруга, яка необхідна для роздвійникування, є меншою, ніж для зародження двійників, але більшою, ніж потрібна для зростання двійників. За циклічної деформації двійникування і роздвійникування послідовно змінюють одне одного. Висока імовірність роздвійникування по системі  $10\{1\bar{1}0\}$  пояснюється легкістю ковзання дислокацій. І тут важливим є розуміння поведінки сплавів магнію в пружно-пластичній області для завдань, пов'язаних із формозміною листів при штампуванні, витяжці тощо.

Ефект Баушінгера має місце за низьких значень межі текучості при розвантаженні за тим же шляхом, за яким відбувалося навантаження. Цей ефект пояснюють різними механізмами: залишковими напругами, які виникли при прямому деформуванні, петлями Орована навколо включень, внутрішніми напругами за рахунок взаємодії дислокацій, скупчення дислокацій на границях зерен. Проте цей ефект залишається маловивченим і роль двійникування та роздвійникування тут є невизначною. У цілому в літературі недостатньо даних щодо зв'язку характеру анізотропії властивостей деформованих полікристалів магнієвих сплавів із текстурними характеристиками листів та виробів з орторомбічною симетрією (листи, смуги та ін.). Не визначено також можливості тензорного опису властивостей міцності та пластичності таких об'єктів у відпаленому і деформованому станах, не вивчено проблеми, пов'язані з анізотропією внутрішніх мікропошкоджень за циклічних деформацій розтягуванням і стисненням.

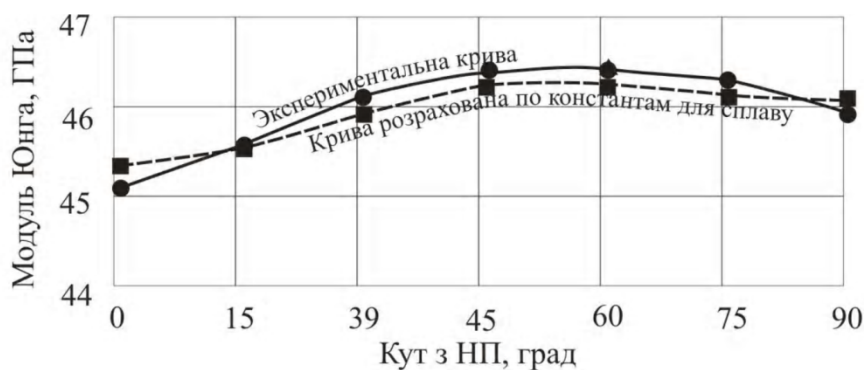
У **третьому розділі** «Розвиток текстури та анізотропії властивостей в гексагональних полікристалах Mg-3%Al-1%Zn» вивчено текстуроутворення і розвиток анізотропії властивостей важливого в практичному відношенні  $\alpha$ -сплаву магнію Mg-3Al-1% Zn після рекристалізаційного відпалу і деформації розтягуванням і стисненням, і їх сумарним впливом при знакозмінному вигині (33). Текстура вихідних листів обох сплавів характеризується, головним чином,

базисною компонентою  $\{0001\}$   $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  зі значною протяжністю області розсіювання в НП. З метою більш повного аналізу текстури для листів сплаву AZ31 після гарячої прокатки і рекристалізаційного відпалу додатково проведено аналіз текстури у представленні функцій розподілу кристалів по орієнтаціям. З отриманої ФРО розраховано ПФ можливих ідеальних орієнтувань, присутніх у текстурі, з яких випливає, що орієнтування з площиною  $\begin{matrix} 10\{1\bar{1} \\ \langle 10\bar{1}0 \rangle \end{matrix}$  в площині листів сплаву AZ31 в текстурі відсутні. Пірамідальні орієнтування типу  $\begin{matrix} 10\{1\bar{1} \\ \langle 10\bar{1}0 \rangle \end{matrix}$ ,  $\begin{matrix} 10\{1\bar{1} \\ \langle 10\bar{1}0 \rangle \end{matrix}$ ,  $\{10\bar{1}3\}$  та  $\begin{matrix} 11\{2 \\ \langle 10\bar{1}0 \rangle \end{matrix}$  в текстурі присутні. Процентний вміст цих орієнтувань не перевищує в сумі 30%.

За (3) розраховали значення ІХТ, які склали:  $I_1 = 0,2814$ ;  $I_2 = 0,2455$ ;  $I_3 = 0,4729$ ;  $I_4 = 0,1609$ ;  $I_5 = 0,147469$ ;  $I_6 = 0,0006$ .

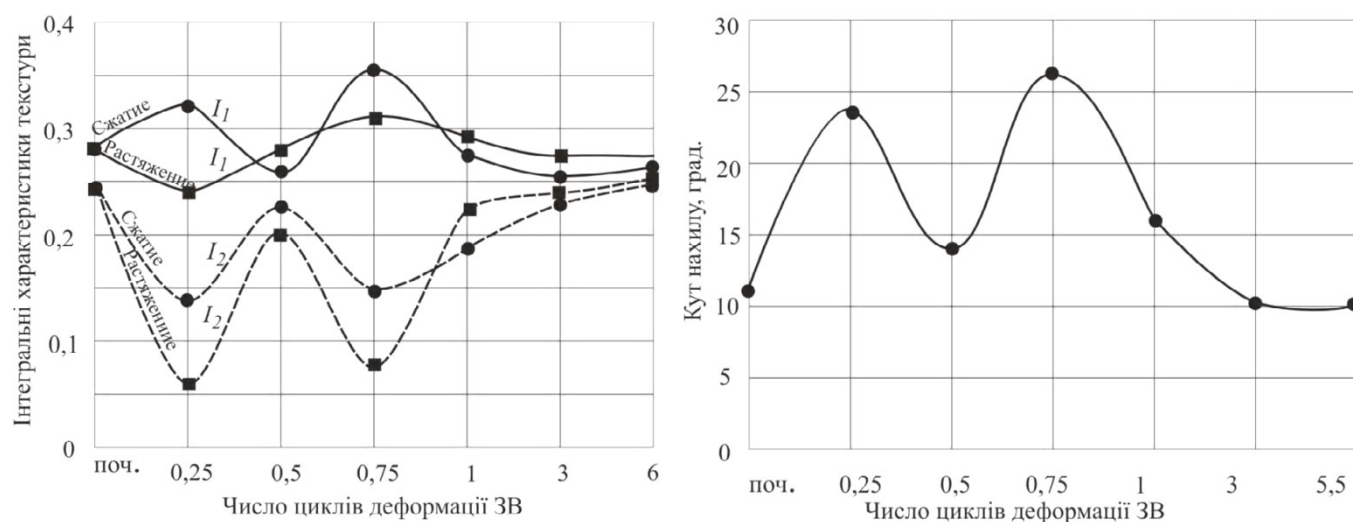
За (1), використовуючи значення монокристалних характеристик податливості для монокристала магнію, розраховали анізотропію модуля Юнга листів сплаву у вихідному стані. Збіг з експериментальною анізотропією  $E$  виявився незадовільним. Представивши експериментальну анізотропію  $1/E$  у вигляді рядів Фур'є за (8) розраховали константи податливості монокристалу сплаву AZ31, значення яких склали: ( $s_{11}=0,99$ ;  $s_{12}=-0,495$ ;  $s_{33}=0,672$ ;  $s_{44}=2,31$ ;  $s_{13}=-0,21$ )\* $10^{-11}$ м<sup>2</sup>/Н.

Розрахунок анізотропії  $E$  з використанням отриманих констант для сплаву засвідчив хороший збіг з експериментальною кривою. Тому отримані константи монокристалу використовували в подальших розрахунках анізотропії пружних властивостей деформованих листів.



Мал.1. Експериментальна та теоретична крива анізотропії модуля Юнга, розрахована з використанням констант податливості для сплаву AZ31

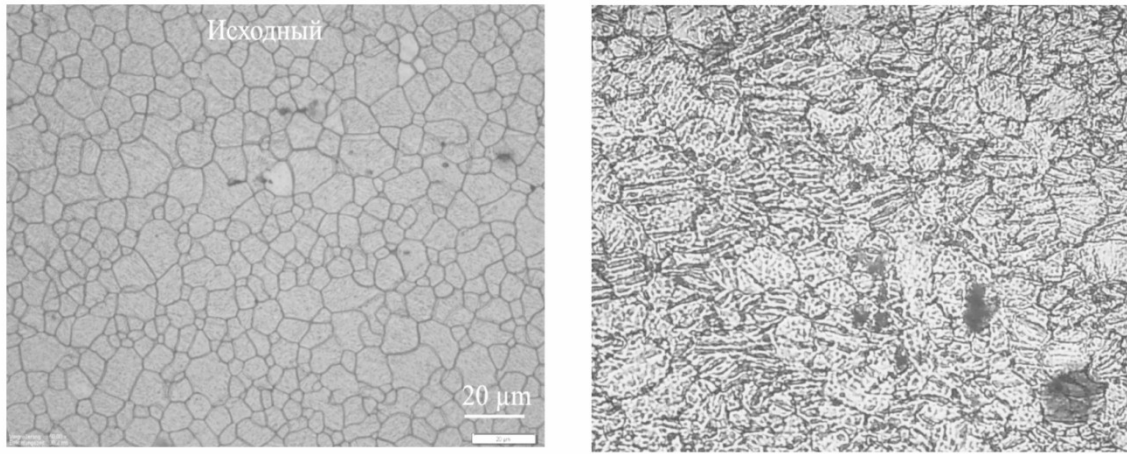
Деформація 0,25 циклів ЗЗ змінює текстуру сторони листа, що піддана стисненню. Текстура шарів, підданих розтягуванню, змінюється мало. Деформація 0,5 циклів сторони, підданої після розтягнення стисненню, текстуру змінює незначно. Протилежні шари листа, що були випробувані після стиснення деформацію розтягуванням, повертаються до текстури центрального базисного типу, якою вони володіли в початковому стані. Подібні текстурні циклічні зміни для обох сторін листів спостерігаються і при деформаціях 0,75; 1; 3 та 5,5 циклами ЗЗ, але менш виражено. Тобто, спостерігається стабілізація



Мал. 2. Зміна перших двох ІХТ і статистичного кута нахилу гексагональної призми до площини прокатки листів сплаву AZ31 після деформації різним числом циклів знакозмінного згину

текстури з присутністю і відхиленого, і центрального орієнтувань. Деформація стисненням і розтягуванням, які чергуються, змінює і характер ІХТ (мал.2).

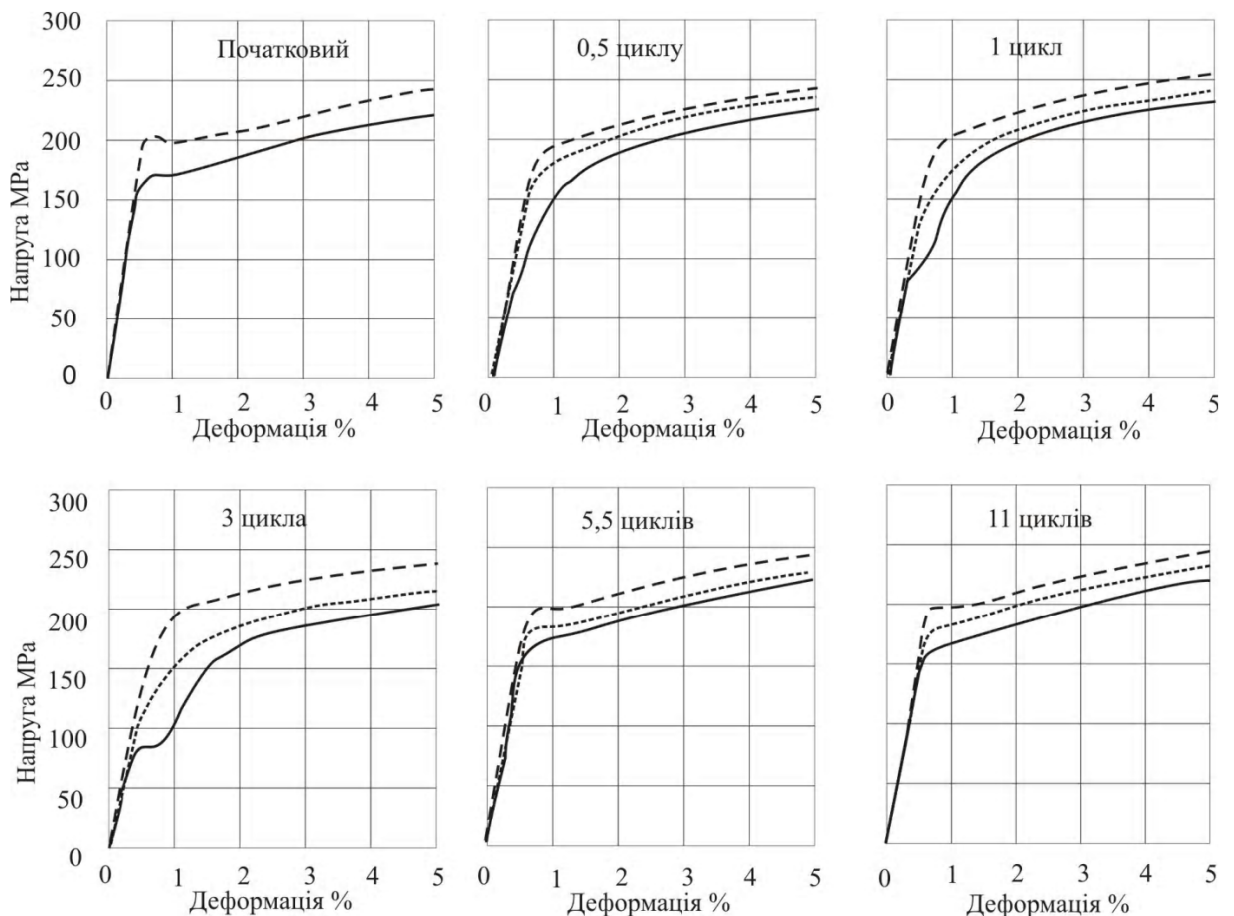
Моделювання зміни ІХТ для різних типів текстур показує те, що одночасне зростання  $I_1$  та  $I_2$  відповідає збільшенню розсіювання полюсів [0001] по азимутальному і меридіанному кутах. Збільшення різниці між цими характеристиками відповідає розвитку додаткових максимумів віддалених від



Мал.3. Мікроструктура листів сплаву AZ31 у вихідному (відпаленому) стані та після деформації 0,25 циклу ЗЗ

центру ПФ. Якщо  $I_1 > I_2$ , то текстура відповідає відхиленю від центру в НП і, навпаки, якщо  $I_1 < I_2$  – в ПН. Деформація вигином 0,25 циклу призводить до появи великої кількості двійників на стороні (мал. 2), яка піддавалася стисненню що, у свою чергу, збільшує вагу орієнтування відхиленого базисного типу. Це виражається в різкому збільшенні кута  $\alpha$

Пружні і механічні властивості листів досліджуваного сплаву проявляють істотну анізотропію, яка залежить від числа циклів ЗЗ (мал. 4).

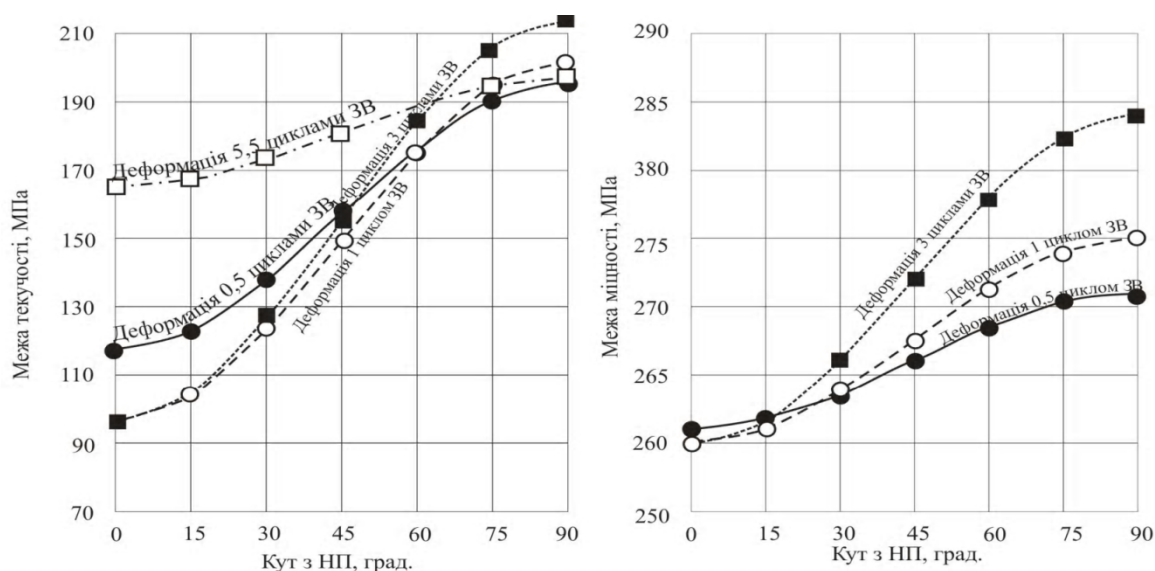


Мал. 4. Криві розтягування в головних напрямках листів сплаву AZ31 після деформації ЗЗ різним числом циклів

Модуль Юнга, межі міцності і пластичності в ПН вище, ніж в НП, спостерігається чіткий зуб текучості. Деформація 0,5 циклу ЗЗ змінює вигляд кривих розтягування листів. Зникає зуб текучості для всіх трьох напрямків у листах. Пружна частина кривої в НП скорочується і відповідно для цього напрямку зменшується межа текучості. Деформація 1 циклом ЗЗ призводить до появи перегину в НП в області напруг 80 - 100Мпа, який переходить на площадку текучості після деформації 3 циклами ЗЗ істотно знижуються і точки, які відповідають межі текучості.

Криві розтягнення після деформації 5,5 циклами ЗЗ в НП і 11 циклами, що відповідає правці 1 і двома проходами на правильній машині, виглядають конгруентними лініями зі зміщенням від ПН до НП в сторону менших напруг. Майданчик текучості, який спостерігається при деформаціях 1 і 3 циклами в області напруг 80-100МПа, зникає. Проте спостерігається тенденція до появи зуба текучості, частина кривих, які відповідають цій області, стають більш пологими, особливо в ПН.

Для опису анізотропії модуля Юнга скористалися поданням текстури листів сплаву за допомогою статистичного кута нахилу призми до площини листа. Побудували криві залежності модуля Юнга від напрямку вимірювання для різних кристалографічних площин, положення кожної з яких задано кутом нахилу  $\alpha$  до площини базису (0001), які відповідають статистичним кутам. Використовуючи монокристалні характеристики сплаву, розраховані з даних Фур'є-аналізу анізотропії модуля Юнга і ІХТ вихідних листів, знайшли анізотропію модуля Юнга для площин монокристалу, що утворюють з площиною базису кути 23,9; 13,5; 26,2; 16,  $10^0$ , які відповідають статистичним кутам нахилу призми, що описують текстуру листів сплаву після деформації. Збіг з експериментальними значеннями модуля Юнга досить хороший.



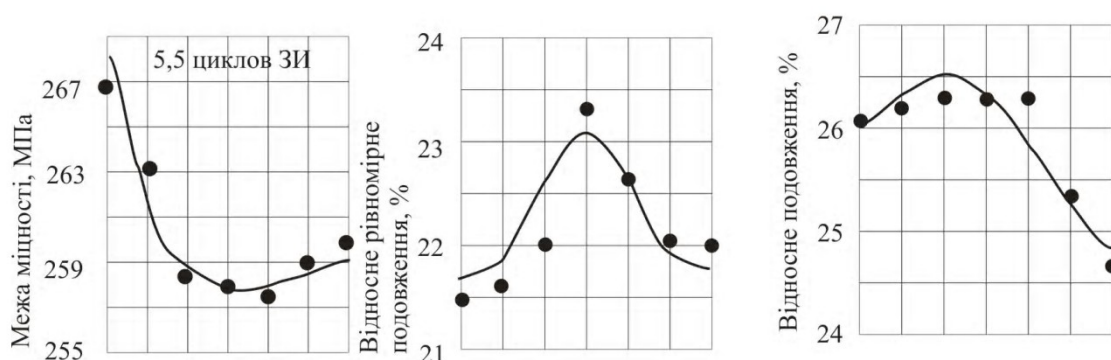
Мал.5. Анізотропія механічних властивостей листів сплаву AZ31 у поданні тензорів другого рангу

Криві анізотропії механічних властивостей листів розраховали по рядах Фур'є з використанням других і четвертих гармонік. Отримали, що механічні

властивості для деяких деформацій можуть бути представлені у вигляді тензорів другого рангу, а деякі – тільки четвертого рангу.

За формулами (9) - (11) розраховали монокристалні характеристики властивостей, що піддаються опису тензорами другого рангу. Використовуючи ці характеристики і відповідні ІХТ, розраховали анізотропію механічних властивостей листів сплаву AZ31 після деформації різним числом циклів ЗЗ. Результати показали задовільний збіг з експериментальними значеннями в головних напрямках листів.

За формулами аналогічними (1), (7) розраховали також монокристалні характеристики властивостей для тих деформацій, для яких опис вимагає тензорів вищого рангу, а саме – четвертого. Результат цілком узгоджується з експериментальними значеннями.



Мал. 6. Анізотропія механічних властивостей листів сплаву AZ31 в поданні тензорів четвертого рангу, ● – експериментальні значення

У четвертому розділі «Розвиток текстури та анізотропії властивостей в гексагональних полікристалах Mg-3%Al-1%Zn» здійснено аналіз механізмів пластичної деформації, які реалізуються при послідовній деформації стисненням і розтягненням; побудовано зворотні ПФ і проведено дослідження зміни субструктури листів після деформації різним числом циклів ЗЗ.

У металах і сплавах з високою кристалічною симетрією деформація реалізується переважно ковзанням по певним площинам, внаслідок - відбувається поступова переорієнтація кристалів. Для металів із більш низькою симетрією кристалів, наприклад ГПУ металів, важливу роль відіграють процеси двійникування, оскільки всі п'ять систем ковзання, що є необхідними для довільної формозміни в таких металах, важко реалізуються за кімнатних температур. Тому здатність ГПУ металів до формозміни реалізується здебільшого за рахунок двійникування. Відомі чотири системи двійникування:

$\begin{matrix} 10 \{ \bar{1} \\ 10 \{ \bar{1} \\ \langle \bar{2} \rangle \langle \bar{2} \rangle \end{matrix}$  ,  $\begin{matrix} 10 \{ \bar{1} \\ 10 \{ \bar{1} \\ \langle \bar{2} \rangle \langle \bar{2} \rangle \end{matrix}$  ,  $\begin{matrix} 11 \{ \bar{2} \\ 11 \{ \bar{2} \\ \langle \bar{2} \rangle \langle \bar{1} \bar{1} 23 \rangle \end{matrix}$  ,  $\begin{matrix} 11 \{ \bar{2} \\ 11 \{ \bar{2} \\ \langle \bar{2} \rangle \langle \bar{2} \rangle \end{matrix}$  , які спостерігали в ГПУ металах.

Для магнію спостерігали ще дві системи двійникування по  $\begin{matrix} 10 \{ \bar{1} \\ \langle \bar{2} \rangle \end{matrix}$  и  $\begin{matrix} 30 \{ \bar{3} \\ \langle \bar{4} \rangle \end{matrix}$  , але основною є  $\begin{matrix} 10 \{ \bar{1} \\ 10 \{ \bar{1} \\ \langle \bar{2} \rangle \langle \bar{2} \rangle \end{matrix}$  . Такий двійник в ГПУ

матеріалах з  $c/a < \sqrt{3}$  є двійником розтягування. Двійникування за такою системою при розтягуванні перекидає базисні полюси на великі кути ( $86^{\circ}18'$ ) відносно площини базису матриці, в результаті чого базисна площина



виявляється несприятливо орієнтованою для ковзання. Тому вважається, що за простих схем деформацій (однорізне розтягування) вклад такого двійникування в деформування магнієвих сплавів невеликий.

Зі зміною схеми напружено-деформованого стану можуть включатися й інші двійникові системи. Також з'являється можливість вторинного двійникування. Усе це призводить до можливості реалізації деформації двійникування на етапі стиснення матеріалу. Активність двійникування під час стиснення виявляється більшою, ніж під час розтягування. Конкуренція з боку ковзання є чинником, що обмежує розвиток двійникування. Зупинка двійника всередині кристалу найчастіше відбувається внаслідок різноманітних взаємодій його з дислокаціями. Дислокації можуть проникнути в двійник або залишитися на його поверхні. Так чи так, це гальмує двійник. У свою чергу, двійникування викликає ковзання акомодатії у своїй площині і перешкоджає ковзанню в інших системах. Ковзаючі дислокації можуть релаксувати напругу, не даючи можливості досягти порогу двійникування. Співвідношення між двійникуванням і ковзанням істотно залежить від деформації, орієнтування, і, в свою чергу, впливає на її зміну. Реалізація того чи того виду пластичної деформації буде визначатися співвідношенням між критичними напругами

зсуву за двійникування та ковзання, а величина відношення  $\sigma_{\text{двойн.}} / \sigma_{\text{скольж.}}$  буде змінюватись у процесі деформування як за рахунок накопичення і перебудови дефектів, так і в результаті перетворення текстури.

Критична зсувна напруга (КЗН) магнію для базисного ковзання лежить в межах 0,45-0,81 МПа. Двійникування має КЗН в 2-4 рази вище, а призматичне ковзання – в 48-87 разів. Легуючі елементи алюміній і цинк змінюють співвідношення між КЗН для основних систем деформації. КЗН двійникування стає приблизно такою ж, як для базисного ковзання, і 6-8 разів менше – для призматичного.

При деформації одноосним розтягуванням відпалених листів спочатку основний внесок має базисне ковзання. Вклади інших – небазисного ковзання і двійникування – незначні. Вони підтримують локальну сумісність, відкриваючи шлях розвитку небазисного ковзання по мірі того як напруга течії зростає. Базисне ковзання квазібезтекстурного агрегату і призводить до того, що спостерігається на ПФ текстурі центрального базисного типу. Крім того, на наведених ПФ спостерігається значне розсіювання базисних осей в НП, яке обумовлює анізотропію властивостей у площині гарячекатаних листів сплаву і може бути зумовлене активізацією пірамідального ковзання ( $\langle c+a \rangle$ )  $\langle \bar{1}\bar{1}23 \rangle$ .

Оскільки текстура листів після гарячої прокатки характеризується, в основному, високою концентрацією базисних полюсів у центрі ПФ, при деформації розтягуванням і стисненням будуть створюватись умови для активації систем двійникування. Оскільки КЗН двійникування стисненням менше такого для розтягування, то в шарах металу, які лежать в основі увігнутої частини листа, двійників буде більше, ніж на опуклій частині, що і спостерігається на наших ПФ. Для кристалів, орієнтованих гексагональною віссю в область розсіювання, деформація буде протікати за рахунок базисного

ковзання. Після одного повного циклу текстура в поверхневих шарах з обох сторін листа залишається неоднаковою, хоча різниця в характеристиках текстури значно менше, ніж після 0,25 циклів деформації ЗЗ.

Порівняння експериментальних зворотних ПФ з теоретичними, отриманими для двійникових переорієнтації, свідчить про домінуючу роль двійникування на етапі стискання шарів і базисного ковзання – при розтягуванні. При цьому основою двійникової системи на першому етапі (0,25 циклу ЗЗ) є двійникування  $\begin{matrix} 10 \{ \bar{1} \\ \bar{2}1 \} \langle \bar{1}012 \rangle \end{matrix}$ , а не типове для магнію  $\begin{matrix} 10 \{ \bar{1} \\ \bar{2}2 \} \langle \bar{2}1 \rangle \end{matrix}$ , оскільки воно може реалізуватися як первинне тільки при розтягуванні, а при стисненні – як вторинне. На другому етапі стиснення можливе включення інших систем двійникування, що, очевидно, є однією з причин стабілізації призматичного орієнтування. Ще однією причиною збереження такого орієнтування може бути нерозвиненість ковзання по системі  $\begin{matrix} 10 \{ \bar{1} \\ 11 \{ \bar{2} \\ \bar{2}0 \} \langle \bar{2}0 \rangle \end{matrix}$ . Формування на початкових етапах деформування (стиснення) орієнтування  $(0001)_{\pm\alpha}$  НН-НП з невеликим відносно куту  $\alpha$  може бути пов'язано з ковзанням в не щільно запакованих напрямках  $\langle \bar{1}\bar{1}23 \rangle \langle \bar{c} + \bar{a} \rangle$ . Стабілізація та посилення цього орієнтування при збільшенні кута його відхилення можливо пов'язана з комплексною дією систем двійникування і базисного ковзання. Зокрема, у сплавах магнію стабілізацію такого орієнтування спостерігали за відносно малих швидкостях деформування, при яких ковзання менш розвинене. При цьому двійники за звичайних оптичних збільшеннях металографічно можуть і не виявлятися, оскільки якщо двійникування йде разом з розвиненим ковзанням, то двійники будуть дрібними.

Повернення на етапі 0,5 циклу ЗЗ до текстури близької до початкової пов'язано з так званими альтернативними для звичайної пластичності «механізмами непружності». Відомо, що при стисненні або розтягуванні раніше продвійникового ГПУ металу, деформація може реалізуватися стрибками за рахунок зникнення двійників. Такий процес називається роздвійникуванням. Деформація викликана двійникуванням може бути релаксована роздвійникуванням під дією аналогічного розтягування. Напруга, необхідна для роздвійникування, менше, ніж для утворення зародків двійників, але більше, ніж потрібно для їх росту. При циклічному навантаженні двійникування і роздвійникування відбувається чергуючись. Повністю двійники не зникають. Після великої кількості циклів ЗЗ двійників менше, ніж після одного згину на увігнутій стороні листа.

Деформації ЗЗ трьома і більше циклами помітно текстуру не змінюють. Текстура поверхневих шарів характеризується одними і тими ж характеристиками. Спостерігається лише проникнення поверхневої текстури вглиб металу. У середній частині листа (поблизу нейтральної лінії) текстура зберігається такою ж, як і в початковому стані.

Стабілізація текстури в поверхневих і приповерхневих шарах пояснюється динамічною рівновагою між орієнтаційними змінами, викликаними послідовними деформаціями стисненням і розтягуванням.

Розглянуті механізми деформації узгоджуються з результатами дослідження субструктури листів AZ31. Аналіз профілів ліній (0002) та (0004) засвідчив, що в їх розширення основний внесок вносять мікронапруження. У шарах, підданих деформації розтягом при 33 (сторона 1 після 0,25 і 1 циклів 33, а сторона 2 після 0,5 і 0,75 циклу) рівень мікронапружень і щільність дислокацій вище, ніж у шарах, підданих деформації стиском. Цей факт пов'язують із розвитком множинного ковзання. Стиск на початкових етапах, коли двійникування є основним механізмом пластичної деформації, супроводжується зменшенням зазначених характеристик, що пов'язано, очевидно, з подрібненням зерен, яке спостерігали, а також виходом дислокацій на межі зерен.

Висновки щодо механізмів двійникування і розтягування, які чергуються, узгоджуються з результатами модельного подання такого механізму деформації, запропонованого Ван Лі.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Деформація гарячою прокаткою магнієвого сплаву AZ31 формує в листах текстуру центрального базисного типу за рахунок подавлення двійникування і кращого ковзання по базисним площинам. Представлення текстур у вигляді інтегральних характеристик і статистичного кута нахилу гексагональної осі до площини листа дозволяє прогнозувати значення властивостей у будь-якому напрямку полікристалів орторомбічної симетрії, а в сукупності з даними Фур'є-аналізу анізотропії властивостей знайти монокристалні характеристики твердих розчинів з гексагональною решіткою, які для пружних властивостей сплаву AZ31 складають:  $(s_{11}=0,99; s_{12}=-0,495; s_{33}=0,672; s_{44}=2,31; s_{13}=-0,21) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$ .

2. При знакозмінному згині в листах сплаву AZ31 з вихідною базисною текстурою центрального типу поряд із базисним ковзанням відбувається інтенсивне двійникування. У шарах, підданих стисненню на етапі першого вигину (0,25 циклу), виявляється найбільша кількість двійників, а в шарах, що зазнають розтягування, відбувається інтенсивне базисне ковзання. Зміна знака навантаження при переході від стиснення до розтягування супроводжується стрибкоподібним зникненням двійників за рахунок процесу роздвійникування. Перехід від розтягування до стиснення викликає ефекти, подібні ефектам при стисненні у вихідному стані, але з меншою кількістю двійників.

3. У текстурі листів двійникування проявляється у формуванні призматичного орієнтування  $\begin{matrix} 10 \\ \{0\} \end{matrix}$  і виділення з області розсіювання орієнтування з відхиленням полюсів  $[0001]$  на кут 20-30° від НН до НП. Роздвійникування, разом з базисним ковзанням, сприяє відновленню базисної текстури, а накопичення деформації в наступних циклах супроводжується розвитком вторинних систем двійникування і ковзання, стабілізацією орієнтувань, які забезпечуються чергуванням процесів двійникування і роздвійникування (при зменшенні ролі останнього) в поєднанні з ковзанням і проникненням текстури всередину. Зміни текстури за циклічної деформації

вигином узгоджуються з феноменологічною моделлю двійникування і роздвійникування Мін Лі.

4. Деформація листів сплаву AZ31 періодичним стискуванням і розтягуванням істотно змінює механічні властивості листів. Листи стають анізотропними. Межа текучості в НП різко падає до 3 циклів, а потім зростає до деякої величини. Межа текучості в ПН за малоцикловою деформації змінюється мало, а після деформації більше 1 циклу зростає також до деякої стабільної величини. Межа міцності мало змінюється в ПН, але в ПН та НП + 45° різко зростає після деформації 33 більше 1 циклу, а потім, як і решта, стабілізується на деякому рівні. Відносно рівномірне подовження і відносно подовження у всіх трьох напрямках падають після деформацій до 3 циклів, а потім зростають, стабілізуючись на деякій величині.

5. Анізотропія межі текучості може бути задовільно описана тензорами другого рангу. Для межі міцності такий опис може бути використано для деформацій до 3 циклів знакозмінного згину. Для відносного рівномірного подовження такий опис буде задовільним тільки для деформацій не більше 1 циклу, а відносного подовження – для деформації 5,5 циклами 33. Анізотропія властивостей для таких деформацій задовільно описується тензорами четвертого рангу.

#### **ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСВІТЛЕНО В ТАКИХ ПУБЛІКАЦІЯХ АВТОРА:**

- 1. Стоянов П.П.** Вплив ізгібної деформації на текстурні характеристики магнієвого сплаву AZ31/ Т.С. Совкова, П.П. Стоянов // Вісник Львівського університету. Серія фізична.–2009.–Вип. – С. 65-67
- 2. Стоянов П.П.** Анизотропия механических свойств листов магниевого сплава AZ31 в результате деформации знакопеременным изгибом / **А.А. Брюханов, Ю.В. Зильберг, М. Шапер, П.П. Стоянов и др.** // *Металлургическая и горнорудная промышленность.*- 2010.-**261**.-№3.-С. 75-78
- 3. Стоянов П.П.** Механизм пластической деформации листов сплава AZ31 при знакопеременном малоцикловом изгибе / **А.А. Брюханов, М. Родман, А.Ф. Тарасов, П.П. Стоянов, М. Шапер, Д. Борманн** // *ФММ.*- 2011.- 111.-.№6.- С.1-8.
- 4. Stoyanov P. P.** Mechanism of the Plastic Deformation of the AZ31 Alloy upon Low – Cycle Reverse Bending /**А. А. Bryukhanov , М. Rodman , А. F. Tarasov , P. P. Stoyanov , М. Shaper , and D. Bormann** // *Physics of Metals and Metallography*,-2011.-Vol. 111.- No. 6.- P. 651-658.
- 5. Стоянов П. П.** Влияние холодной правки на текстуру и анизотропию свойств листов магниевого сплава AZ31 / **А. А. Брюханов, Ю. В. Зильберг, М. Шапер, М. Родман, М. Хепке, Д. Родман** // *Деформация и разрушение материалов* №8 за 2010 С.-34-41.

6. **Стоянов П.П.** Интегральные характеристики гексагональных текстур / **С.И. Иовчев, Н.А. Волчок** // Вісник Львівського нац. ун-ту. Серія фізична.-2010.-Вип 39.-С.294-299.
7. **Стоянов П.П.** Интегральные характеристики гексагональных текстур / **С.И. Иовчев, Н.А. Волчок** // International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics. HEUREKA-2009. Book of abstracts. May 20-22, 2009 Lviv. Ukraine. Lviv: LNU. p.A19.
8. **Стоянов П.П.** К вопросу о механизме пластической деформации листов сплава AZ31, деформированных знакопеременным изгибом / **А.А. Брюханов, Ю.В. Зильберг, Т.С. Совкова, П.П. Стоянов**: Сб. трудов 5 Евразийской научно-практ. конф. [«Прочность неоднородных структур» ПРОСТ-10.], (20-22 апреля 2010).-М.:МИСиС.-С.34.

## АНОТАЦІЯ

**Стоянов П.П.** Розвиток текстури і анізотропії властивостей в гексагональних полікристалах **Mg-3Al-1%Zn**

На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – Фізика твердого тіла. – Державний заклад «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д.Ушинського» МОНмолодьспорту України, Одеса, 2012 р.

У дисертації вивчено вплив деформації розтягуванням та стисненням на кількісні інтегральні характеристики текстури (ІХТ) та статистичний кут нахилу призми до площини прокатки і анізотропію пружних та механічних властивостей листів магнієвого сплаву AZ31 (Mg-3Al-1%Zn). Показано некоректність використання констант податливості монокристалу магнію для розрахунку властивостей текстурованих полікристалів сплавів на його основі. Розрахунково-експериментальним методом знайдено константи монокристалу сплаву і розраховано властивості полікристалу в різних напрямках після його деформації знакозмінним згином. Деформація листів сплаву AZ31 періодичним стисканням і розтягуванням істотно змінює механічні властивості листів. Листи стають анізотропними. Анізотропія межі текучості може бути задовільно описана тензорами другого рангу. Для межі міцності такий опис може бути використано для деформацій до 3 циклів знакозмінного згину. Для відносного подовження такий опис буде задовільним тільки для деформацій не більше 1 циклу, а відносного стиснення – для деформації 5,5 циклами ЗЗ. Анізотропія властивостей для таких деформацій задовільно описується в поданні тензорів четвертого рангу. При знакозмінному згині в листах сплаву AZ31 з вихідною базисною текстурою центрального типу поряд з базисним ковзанням відбувається інтенсивне двійникування. У шарах, підданих стисненню на етапі першого згину (0,25 циклів), виявляється найбільша кількість двійників, а в шарах, що зазнають розтягування, відбувається інтенсивне базисне ковзання. Зміна знака навантаження при переході від стиснення до розтягування супроводжується стрибкоподібним зникненням двійників за рахунок процесу

роздвійникування. Перехід від розтягування до стиснення викликає ефекти, подібні ефектам при стисненні з вихідного стану, але з меншою кількістю двійників. У текстурі листів двійникування проявляється у формуванні призматичного орієнтування  $10\{1\bar{1}0\}$  і виділення з області розсіювання орієнтування з відхиленням полюсів  $[0001]$  на кут  $20-30^\circ$  від НН до НП. Роздвійникування, разом з базисним ковзанням, сприяє відновленню базисної текстури, а накопичення деформації в наступних циклах супроводжується розвитком вторинних систем двійникування і ковзання, стабілізацією орієнтувань, які забезпечуються чергуванням процесів двійникування і роздвійникування (при зменшенні ролі останнього) у поєднанні з ковзанням і проникненням текстури всередину листа сплаву.

**Ключові слова:** текстура, полюсна фігура, інтегральні характеристики, анізотропія, модуль Юнга, межі плинності і міцності, відносне подовження і звуження, ряди Фур'є, двійникування, роздвійникування.

## АННОТАЦІЯ

**Стоянов П.П. Развитие текстуры и анизотропии свойств в гексагональных поликристаллах Mg-3Al-1%Zn. Рукопись.**

**Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07**

**Физика твердого тела. Государственное заведение «Южноукраинский национальный педагогический университет имени К.Д.Ушинского», МОНмолодьспорта Украины. Одесса 2012 г.**

Изучено влияние деформации растяжением и сжатием на количественные интегральные характеристики текстуры (ИХТ) и статистический угол наклона призмы к плоскости прокатки и анизотропию упругих и механических свойств листов магниевое сплава AZ31 (Mg-3Al-1%Zn). Показана некорректность использования констант податливости монокристалла магния для расчета свойств текстурованных поликристаллов сплавов на его основе. Расчетно-экспериментальным методом найдены константы монокристалла сплава и рассчитаны свойства поликристалла в различных направлениях после деформации его знакопеременным изгибом. Деформация листов сплава AZ31 периодическим сжатием и растяжением существенно изменяет механические свойства листов. Листы становятся анизотропными. Анизотропия предела текучести может быть удовлетворительно описана тензорами второго ранга. Для предела прочности такое описание может быть использовано для деформаций до 3 циклов знакопеременного изгиба. Для относительного равномерного удлинения такое описание удовлетворительно только для деформаций не более 1 цикла, а относительного удлинения - для деформации 5,5 циклами ЗИ. Анизотропия свойств для таких деформаций удовлетворительно описывается в представлении тензоров четвертого ранга. При знакопеременном изгибе в листах сплава AZ31 с исходной базисной текстурой центрального типа наряду с базисным

скольжением происходит интенсивное двойникование. В слоях, подвергнутых сжатию на этапе первого изгиба (0,25 цикла), обнаруживается наибольшее количество двойников, а в слоях, испытывающих растяжение, происходит интенсивное базисное скольжение. Изменение знака нагрузки при переходе от сжатия к растяжению сопровождается скачкообразным исчезновением двойников за счет процесса раздвойникования. Переход от растяжения к сжатию вызывает эффекты, подобные таковым при сжатии из исходного состояния, но с меньшим количеством двойников. В текстуре листов двойникование проявляется в формировании призматической ориентировки  $10\{1\bar{1}\}$   $(\bar{2}0)$  и выделении из области рассеяния ориентировки с отклонением полюсов  $[0001]$  на угол 20-30° от НН к НП. Раздвойникование, вместе с базисным скольжением, способствует восстановлению базисной текстуры, а накопление деформации в последующих циклах сопровождается развитием вторичных систем двойникования и скольжения, стабилизацией ориентировок, обеспечиваемых чередованием процессов двойникования и раздвойникования (при уменьшении роли последнего) в сочетании со скольжением и проникновением текстуры внутрь.

**Ключевые слова:** текстура, полюсная фигура, интегральные характеристики, анизотропия, модуль Юнга, пределы текучести и прочности, относительное удлинение и сужение, ряды Фурье, двойникование, раздвойникование.

#### ANNOTATION

**Stoianov P.P. Development of texture and properties anisotropy in hexagonal polycrystals Mg – 3Al – 1%Zn. Manuscript. Dissertation for an academic degree of candidate of Physics – Mathematical Sciences. Specialty 01.04.07 Physics solid. – K.D. Ushinskiy state institution «Southukrainian National Pedagogical University». Odessa, 2012yr.**

An effect of the tensile and compressing deformations on the quantitative integral characteristics of the texture (ICT), statistical inclination angle of a prizm to the rolling plane and on the elastic and mechanical properties of the magnesium AZ31 (Mg – 3Al – 1%Zn) alloy sheets has been studied.

An incorrectness of using of the Mg mono-crystal compliance constants to calculate the properties of the textured polycrystals Mg alloys has been shown. It have been found by the calculation – experimental method the constants of the alloy monocrystal and the polycrystal properties in the different directions after alternating bending deformation have been calculated. The deformation of the AZ31 alloy sheets by repeated extension and compressing essentially changes their mechanical

properties. The sheets become anisotropic. The yield strength anisotropy may be satisfactorily described by the tensors of order two. The same description may be used up to 3 cycles alternating bending deformation for the ultimate strength. For the relative uniform extension and for the relative extension that is only up to cycle and 5,5 cycles AB accordingly. The properties anisotropy for such deformation is described satisfactorily in presentation of the tensors order four. In the sheets of AZ31 alloy with initial basic texture of a central type under the AB, side by side with the basic sliding, occurs intensive twinning. The most quantity of the twins is detected in the lagers, which were subjected to compression, under the first bending (0,25 of a cycle), but in the testing the extension lagers take place intensive basic sliding. The sign alteration from the compression to the extension is accompanied by spasmodic disappearance of the twins at the expense of untwining. The transition from the extension to the compression induces the effects similar that under the compression from the initial state, but with the lesser quantity of the twins. The twinning in the sheets texture becomes apparent in formation of a prismatic orientation  $\{100\}$  and in a separation of the orientation with the poles  $[001]$  deviation by the angle  $20-30^\circ$  from ND to RD. The untwining, to get her with the basic sliding, promotes to a reduction of the basic texture, and an accumulation of the deformation in the following cycles causes a development of the secondary systems of the twinning and sliding, the orientations stabilization, provided by the alternation of the twinning and the untwining processes (at the decrease of a role of last) in the combination with the sliding and the texture penetration inside.

**Key words:** texture, pole figure, integral characteristics of texture, anisotropy, yield strength, relative uniform extension, relative extension, Fourier series, tensor, untwining.