

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Південноукраїнський національний педагогічний університет
імені К. Д. Ушинського

СМІРНОВА СВІТЛАНА ВАСИЛІВНА

УДК 669-176+669.721.5:620.177.3+539.32+539.424

**ТЕКСТУРА ТА АНІЗОТРОПІЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ГЕКСАГОНАЛЬНИХ ПОЛІКРИСТАЛІВ З ІДЕАЛЬНИМ
СПІВВІДНОШЕННЯМ c/a .**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Одеса – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фізики Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики **Шкатуляк Наталія Михайлівна**, Державний заклад «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського»

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу спектроскопії поверхні новітніх матеріалів **Хижун Олег Юліанович**, Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича НАН України, м. Київ

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, в. о. завідувача відділу фізики радіаційних процесів **Ясковець Іван Іванович**, Інститут фізики НАН України, м. Київ.

Захист відбудеться «__»_____2016 р. о __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К41.053.07 при Південноукраїнському національному педагогічному університеті імені К. Д. Ушинського Міністерства освіти і науки України за адресою: ауд. 52, корпус 1, вул. Старопортофранківська, 26, м. Одеса, 65020.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Південноукраїнського національного педагогічного університету імені К. Д. Ушинського Міністерства освіти і науки України (вул. Старопортофранківська, 26, м. Одеса, 65020).

Автореферат розісланий «__»_____201_ р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради, к. ф.-м. н., доц. _____ О. Х. Тадеуш

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Важливою проблемою фізики твердого тіла є встановлення фундаментальних характеристик матеріалу таких, як пружні константи монокристалів сплавів. Знання характеристик матеріалу, включаючи пружні модулі, дозволяє проектувати пристрої, властивості яких є передбачуваними та оптимальними з точки зору втоми або руйнування. Проте використання пружних констант монокристала чистого металу для прогнозних оцінок властивостей полікристалів сплаву на основі цього металу може призвести до значних помилок. Вимірюють пружні константи матеріалу на монокристалах досить великого розміру, вирощування яких для сплавів пов'язано з технічними труднощами. Тому знаходження пружних констант монокристалів сплавів є актуальною проблемою фізики твердого тіла. Актуальною науково-технічною проблемою є використання гексагональних металів і сплавів з відношенням близьким до ідеального значення c/a , серед яких магнієві сплави привертають увагу як найбільш легкі доступні металеві конструкційні матеріали. Завдяки своїй низькій густині і відносно високій питомій міцності, магній дає можливість зменшити вагу конструкції, замінюючи сталь і алюміній в аерокосмічній та транспортній галузі. Екологічними цілями зниження ваги є зменшення витрат палива і, отже, зниження виробничих викидів CO і CO₂. Але широкому застосуванню сплавів на основі магнію заважає текстура центрального базисного типу, що утворюється при обробці тиском. Для ослаблення несприятливої текстури магнію та його сплавів з цинком перспективним є модифікування рідкісноземельними металами (РЗМ), такими як церій, неодим, ітрій. Типовим представником є промисловий сплав ZE10 на основі магнію, що містить близько 1,3% Zn, 0,15% Zr та 0,2% суміші РЗМ. Однак багато питань формування текстури при різних видах термообробки та деформації в сплавах магнію з цинком та РЗМ вивчені недостатньо. Іншою альтернативою, що дає можливість послабити базисну текстуру магнію, є літій. В останні роки сплави на основі системи магній-літій, викликали великий інтерес в якості біологічно розкладальних матеріалів, завдяки їх добрій біологічній сумісності, низькому модулю Юнга і підвищеній корозійній стійкості. Висока питома міцність у поєднанні з низькою густиною сплавів на основі Mg-Li робить їх також привабливими для використання в аерокосмічній і транспортній промисловості. Проте широкому впровадженню у виробництво сплавів магнію перешкоджає недолік знань про вплив текстури на анізотропію, зокрема, пружних властивостей та формозміну при певних зовнішніх впливах, зокрема при знакозмінному вигині (ЗВ). Знакозмінний вигин застосовується під час виправлення рулонного та листового металу перед його використанням для забезпечення добрих показників площинності та зменшення внутрішніх напружень. Незважаючи на відносно малу пластичну деформацію в процесі виправлення при ЗВ відбувається зміна структури металу і його механічних характеристик, дослідження яких має важливе прикладне значення. Проте вплив ЗВ на текстуру і анізотропію властивостей металів і сплавів також є мало вивченим. З наукової точки зору, привабливим є те, що застосовуючи ЗВ можливо вивчення змін мікроструктури та текстури при розтягуванні та стисненні на одному і тому ж зразку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертація є частиною експериментальних і теоретичних досліджень процесів формування текстури та анізотропії властивостей, які ведуться на кафедрі фізики Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського». Дисертація виконувалась, зокрема, в рамках наукових тем «Дослідження впливу напружено-деформованого стану та текстуроутворення на анізотропію властивостей твердого тіла» (Державний реєстраційний № 01090000216), а також «Мультимасштабне моделювання процесу пластичної деформації текстурованих полікристалів» (Державний реєстраційний № 0114U000002).

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є встановлення фізико-математичних моделей, що дозволяють кількісний опис впливу деформації прокаткою, екструзією та знакозмінним вигином на розподіл орієнтувань кристалітів та прогнозування анізотропії гексагональних сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li з відношенням параметрів кристалічної ґратки c/a близьким до ідеального.

Досягнення вказаної мети обумовило необхідність вирішення таких конкретних завдань:

1. Встановити закономірності формування кристалографічної текстури та анізотропії пружних та механічних властивостей полікристалів гексагональних сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li з відношенням параметрів кристалічної ґратки c/a близьким до ідеального за режимами обробки теплою прокаткою зі зміною напрямку прокатки на 90° , а також за допомогою екструзії через прямокутну матрицю.

2. Знайти закономірності впливу деформації розтягненням та стисненням при знакозмінному вигині на текстуру та анізотропію пружних та механічних властивостей

3. На основі вищезазначених закономірностей встановити фізико-математичні моделі, що дозволяють кількісний опис зміни анізотропії властивостей сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li під дією знакозмінного вигину.

4. Оцінити коректність використання пружних констант монокристалу чистого магнію для прогнозування анізотропії пружних властивостей деформованих полікристалів сплавів на основі магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li.

5. Розв'язати обернену задачу визначення пружних констант монокристалів сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li за допомогою інтегральних характеристик текстури та експериментальної анізотропії пружних властивостей деформованих полікристалів вищезазначених сплавів.

Об'єкт дослідження. Процеси формування кристалографічної текстури, мікроструктури та анізотропії фізико-механічних властивостей при деформації прокаткою, екструзією, розтягом та стисненням шляхом різної кількості циклів знакозмінного вигину гексагональних сплавів на основі магнію з відношенням параметрів кристалічної ґратки c/a близьким до ідеального значення.

Предмет дослідження. Промисловий сплав магнію з цинком, цирконієм, модифікований рідкісноземельними металами ZE10 (Zn – 1,3%, Zr – 0,15%, РЗМ, в основному, церій – 0,2 %, решта Mg) та бінарний сплав Mg-5 мас. % Li.

Методи дослідження. Рентгенівський аналіз текстури та субструктури кристалічних тіл, металографічний аналіз структури, динамічні та статичні методи вимірювання пружних властивостей, методи механічних випробувань полікристалів, комп'ютерне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в роботі:

1. Встановлені закономірності формування кристалографічної текстури та мікроструктури після різної кількості циклів деформації розтягом та стисненням при знакозмінному вигині та показаний суттєвий їх вплив на анізотропію пружних та механічних властивостей гексагональних сплавів магнію ZE10 та Mg – 5 % Li.

2. Показано, що текстура сплаву магнію ZE10 після обробки, що включає пресування при 350°C, прокатку зі зміною напрямку на 90° і проміжним нагріванням до 350°C після кожного проходу може бути описана як $\{0001\} \pm 40^\circ \text{НП}$ $\frac{10}{\langle \bar{1}0 \rangle} + \{0001\} \pm 40^\circ \text{ПН}$ $\frac{10}{\langle \bar{1}0 \rangle}$ з розсіюванням до 90°, а мікроструктура є рівноосьовою, що характерно для рекристалізації.

3. Показано, що текстура сплаву магнію Mg-5 мас. % Li після обробки, що включає пресування при 350°C, прокатку зі зміною напрямку на 90° і проміжним нагріванням до 350°C після кожного проходу може бути описана як $\{0001\} \pm 15^\circ \text{ПН}$ $\frac{10}{\langle \bar{1}0 \rangle} + \{0001\} \pm 70^\circ \text{ПН}$ $\frac{10}{\langle \bar{1}0 \rangle}$, мікроструктура є рівноосьовою внаслідок динамічної рекристалізації.

4. Показано, що текстура листа сплаву магнію Mg-5 мас. % Li, отриманого, екструзією через прямокутну матрицю при температурі 350°C та подальшою прокаткою вздовж напрямку екструзії з проміжним нагріванням до 350°C, являє собою текстуру відхиленого на 90° в ПН базисного типу $\{0001\} \pm 90^\circ \text{ПН}$ $\frac{10}{\langle \bar{1}0 \rangle}$ з відносно слабким центральним базисним компонентом.

5. Підтверджено, що значну роль у формуванні незвичайної кристалографічної текстури досліджуваних сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li при вальцюванні, екструзії та знакозмінному вигині грають небазисні (c+a) механізми ковзання та двійникування.

6. Встановлено, що використання пружних констант монокристалу чистого магнію для опису анізотропії деформованих полікристалів сплавів на його основі ZE10 та Mg-5 мас. % Li є некоректним і приводить до помилок як у кількісних значеннях, так і в характері анізотропії.

7. За допомогою експериментальної анізотропії модуля Юнга та інтегральних характеристик текстури листових полікристалів сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li розраховані компоненти тензорів пружності монокристалів, що дозволяють прогнозувати анізотропію пружних властивостей листових полікристалів досліджуваних сплавів магнію з відхиленням від експериментальних значень в межах 2 – 5 %.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що результати досліджень деформації зі зміною напрямку прокатки, та екструзією через прямокутну матрицю на текстуру сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li можуть бути використані для виробництва листових полікристалів з текстурами, при яких

кут нахилу та ступінь розсіювання базисних площин в площини вальцювання може змінюватися у широких межах. Отримані текстурні характеристики сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li після вальцювання, екструзії та знакозмінного вигину можуть бути використані для прогнозування анізотропії властивостей міцності та пластичності вищезазначених сплавів. Встановлені режими обробки листових полікристалів сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li знакозмінним вигином під час правки можуть бути використані для мінімізації анізотропії характеристик міцності та поліпшення пластичності для обробки при кімнатній температурі.

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

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

1. Підготовлені зразки та проведені рентгенівські і металографічні дослідження.
2. Встановлені основні закономірності текстурних перетворень сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li, математична обробка результатів.
3. Проведені механічні випробування на вигин і визначені значення модуля Юнга в різних напрямках листових полікристалів після різної кількості циклів знакозмінного вигину та встановлені значущі кореляційні зв'язки та відповідні рівняння регресії з коефіцієнтами надійності апроксимації не менш ніж 0,7 між текстурними та механічними характеристиками досліджуваних сплавів магнію після різної кількості циклів знакозмінного вигину.
4. Показано, що використання характеристик податливості монокристала чистого магнію при розрахунках анізотропії властивостей листів сплавів приводить до суттєвих помилок як у кількісних значеннях, так і в характері анізотропії сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li та розраховані константи тензора податливостей монокристалів, що дозволяють прогнозувати анізотропію пружних властивостей листових полікристалів вищезазначених сплавів магнію з відхиленням від експериментальних значень в межах 2 – 5 %.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались і обговорювались на

10 th International Symposium of Croatian Metallurgical Society. (Šibenik, Croatia 2012);

Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА-2013 (м. Львів, Україна, 2013)

Наукових читаннях імені чл.-кор. РАН І. А. Оди́нга «Механические свойства современных конструкционных материалов», (Москва, Ін-т металургії імені А. А. Байкова РАН, 2014);

Міжнародній конференції «Розвиток інформаційно-ресурсного забезпечення освіти і науки в гірничо-металургійній галузі і транспорті 2014» (м. Дніпропетровськ, 2014);

VI Междунар. конф. «Деформация и Разрушение Материалов и Наноматериалов», (Москва, Ін-т металургії імені А. А. Байкова РАН, 2015).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 12 наукових публікаціях. У тому числі в реферованих наукових міжнародних журналах опубліковано 6 статей, одна з яких надрукована у виданні, яке індексується в базі даних SCOPUS. Додатково результати дисертації висвітлені в 6 тезах і матеріалах доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, кожний з яких закінчується висновками, висновків до дисертації, списку використаних джерел із 112 найменувань. Робота викладена на 125 сторінках і включає 50 рисунків та 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** обґрунтовується доцільність, актуальність теми та вибір об'єктів досліджень. Сформульовано мету і задачі досліджень, відображена новизна одержаних результатів та їх практична цінність. Сформульовані положення, які виносяться автором на захист. Відображений особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проведено огляд літературних джерел щодо моделі гексагональної щільно упакованої (ГЩУ) кристалічної ґратки у вигляді дотичних куль з ідеальним відношенням параметрів $c/a = 1,633$. За цією ознакою всі ГЩУ - метали можна поділити на три класи 1) $c/a > 1,633$ (Zn, Cd); 2) $c/a \approx 1,633$ (Mg, Co); 3) $c/a < 1,633$ (Ti, Zr, Hf и т.д.). Розглянуто роль механізмів пластичної деформації ковзанням та двійникуванням у формуванні кристалографічної текстури в металах та сплавах трьох вищезазначених класів. У металах і сплавах з c/a менше ідеального значення (Zr, Ti), утворюються текстури прокатки, при яких базисні полюса відхилені на $\pm 20 \dots 40^\circ$ від напрямку нормалі (НН) у бік поперечного напрямку (ПН), а напрямки $10 \{ \bar{1} \}$ збігаються з напрямком прокатки (НП). Метали і сплави з майже ідеальним відношенням c/a (Mg і його сплави) при вальцюванні схильні до утворення базисних волокнистих (аксіальних або осьових) текстур базисного центрального типу, коли кристалографічні площини сімейства $[0001]$ розташовані паралельно площині прокатки. У металах і сплавах з c/a більше ідеального значення (Zn, Cd) при вальцюванні утворюються текстури з базисними полюсами нахиленими на $\pm 15 \dots 25^\circ$ від НН у бік НП. Напрямки $11 \{ \bar{2} \}$ збігаються з НП.

Далі розглянуто види текстури, методи її дослідження та опису за допомогою прямих та обернених полюсних фігур, трьохмірної функції розподілу кристалів за орієнтаціями (ФРО) за Г. І. Бунге, а також за допомогою інтегральних характеристик текстури (ІХТ) за А. А. Брюхановим та О. Р. Гохманом. Інтегральні характеристики текстури містять необхідну інформацію для прогнозування тензорних властивостей в будь-якому напрямку.

Відомо, що в полікристалічних матеріалах анізотропія фізико-механічних властивостей обумовлена, в основному, кристалографічною текстурою, яка виникає після механічної, термічної або термомеханічної обробки. Проте вплив знакозмінного вигину на текстуру, структуру та анізотропію властивостей деформованих сплавів магнію з цинком, цирконієм і РЗМ (ZE10) та Mg-5 мас. % Li,

перспективних для застосування в транспортній, аерокосмічній області та біомедичних технологіях, є не вивченим.

У другому розділі описуються матеріали та методи дослідження. Матеріалами для дослідження послужили промисловий сплав магнію з цинком, цирконієм, модифікований рідкісноземельними металами (РЗМ) ZE10 (Zn - 1,3%, Zr - 0,15%, РЗМ 0,2 % - в основному, церій, - решта Mg) і бінарний сплав Mg-5 мас. % Li. Зразки досліджуваних сплавів обробляли за двома різними технологіями А і Б.

За режимом А литі заготовки сплавів ZE10 та Mg-5 мас. % Li після токарної обробки пресували при 350°C та отримали брусок товщиною 6 мм і шириною 60 мм. Потім прокатали вздовж заготовки до товщини 4,5 мм за два проходи. Наступна прокатка була проведена у поперечному напрямку з обтисненням 10% за прохід до товщини 2 мм за 10 проходів з проміжним нагріванням до 350°C після кожного проходу. Далі напрямок прокатки змінювали на 90° і робили один прохід з обтисненням 10%. Потім знову змінювали напрямок прокатки на 90° і в цьому напрямку прокатали до товщини 1 мм.

За режимом Б обробляли тільки сплав Mg-5 мас. % Li. Для забезпечення плоскої деформації заготовку сплаву піддали екструзії через прямокутну матрицю при температурі 350°C. У результаті отримали брусок завтовшки 6 мм шириною 120 мм. Далі брусок прокатали за два проходи вздовж заготовки до 4,5 мм завтовшки. Після кожного проходу заготовку піддавали нагріванню до 350°C. Дресування листів проводили з обтисненням ~ 1-2%.

Машинну правку листових полікристалів моделювали за допомогою знакозмінного вигину на трьох-роликовому пристрої. Діаметр ролика, що вигинає, склав 50 мм. Швидкість руху металу при вигині склала ~ 150 мм/с. Один цикл вигину складався з вигину в одну сторону (0,25 циклу), перегину в іншу сторону (0,75 циклу) та випрямлення (1 цикл ЗВ).

Для вимірювання модуля Юнга з вихідних листів і листів після відповідного числа циклів ЗВ вирізали по три партії з 7 прямокутних зразків розміром 100×10 мм через кожні 15° від НП до ПН. Модуль Юнга вимірювали динамічним методом за частотою власних коливань зразка. Зразки кожної партії обробляли у пакеті для зменшення впливу геометричних розмірів на результати вимірювань. В якості значень модуля Юнга брали усереднену величину по трьом партіям зразків у кожному напрямку. Похибка вимірювань не перевищувала 1%.

Для проведення механічних випробувань з вихідного листа та листів після вигину на 0,5; 1,0; 3,0 та 5,0 циклів вирізали по три партії зразків для механічних випробувань у НП, діагональному напрямку (ДН) (тобто під кутом 45° до НП) та у ПН, а також зразки для дослідження текстури та мікроструктури. Механічні випробування на одноосьовий розтяг проводили за стандартними методиками на розривній машині Zwick Z250/SN5A з силовим датчиком на 20 кН при кімнатній температурі для зразків, вирізаних в НП, ПН та ДН. Загальна довжина зразків 90 мм, ширина робочої частини - 12,5 мм. В якості значень механічних властивостей брали усереднену величину по трьом партіям зразків у кожному напрямку.

Кристалографічну текстуру вивчали рентгенівським методом з побудовою прямих полюсних фігур (ПФ) {0002} і {1010} та обернених полюсних фігур ОПФ НН та ОПФ НП. Зразки без текстури виготовили з дрібної рекристалізованої тирси

досліджуваних сплавів. Прямі ПФ та ОПФ НН знімали на зразках у формі диска діаметром 25 мм, вирізаних з листів. Для зйомки ОПФ НП зразки набирали у вигляді пакету з наклеєних один на одного смужок шириною 3 мм, вирізаних з листів (набірні зразки). Перед зйомкою відповідних полюсних фігур досліджувані поверхні зразків хімічно полірували на глибину 0,1 мм для зняття спотвореного поверхневого шару. Полюсні фігури деформованих знакозмінним вигином зразків знімали з двох сторін після відповідного числа циклів. Нормування ОПФ здійснювали за методикою Морриса, яка враховує нерівномірність полярної сітки.

Мікроструктуру сплаву ZE10 досліджували на відбиття від торцевих поверхонь зразків, вирізаних в НП і ПН. Мікроструктуру сплаву Mg-5 мас. % Li спостерігали від площини прокатки. Зйомку мікроструктури здійснювали за допомогою металографічного мікроскопа МІМ-7, використовуючи Veb-камеру E-TREK DEM 200 для виведення зображення структури на монітор комп'ютера.

Для визначення пружних констант монокристалів досліджуваних сплавів спочатку знаходили інтегральні характеристики текстури (ІХТ).

$$I_1 = \langle \alpha_{13}^2 \rangle, \quad I_2 = \langle \alpha_{23}^2 \rangle, \quad I_3 = \langle \alpha_{33}^2 \rangle, \quad I_4 = \langle \alpha_{13}^4 \rangle, \quad I_5 = \langle \alpha_{33}^4 \rangle, \\ I_6 = \langle \alpha_{13}^2 \cdot \alpha_{23}^2 \rangle, \quad (1)$$

де α_{ik} є напрямними косинусами кутів, які встановлюють орієнтацію кристала щодо координат зразка; кутові дужки означають усереднення по всіх орієнтаціях кристалів. Для орторомбічних полікристалів досліджуваних сплавів з гексагональною кристалічною структурою ІХТ знаходили усередненням комбінацій напрямних косинусів осі c гексагонального кристала по відношенню до системи координат зразка, використовуючи пряму ПФ {0002}.

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

де α, β є полярними координатами ПФ.

Залежності модуля Юнга та зсуву від напрямку в площині листового полікристала (як і будь-якої періодичної функції) можуть бути представлені у вигляді гармонійних рядів Фур'є з парними гармоніками

$$E^{-1}(\gamma) = F_0 + F_2 \cos 2\gamma + F_4 \cos 4\gamma \quad (3)$$

де кут γ відрховується від НП, а F_i є амплітудами гармонік.

З іншого боку залежність модуля Юнга виражається через ІХТ та пружні константи монокристалу S_{ij}

$$S_{11} + 2 \left(S_{13} - S_{11} + \frac{1}{2} S_{44} \right) \left(I_1 \cos^4 \gamma + I_2 \sin^4 \gamma + \frac{1}{4} (I_1 + I_2) \sin^2 2\gamma \right) + \\ + (S_{11} + S_{33} - 2S_{13} - S_{44}) \left(I_6 \cos^4 \gamma + I_4 \sin^4 \gamma + 1,5 I_5 \sin^2 2\gamma \right) \\ E(\gamma) = \text{righ} \quad (3a)$$

Константи пружності гексагонального монокристала зв'язані з ІХТ і амплітудами гармонік ряду Фур'є (3)

$$S_{11} = F_0 - \frac{F_2(I_1 + I_2)}{I_1 - I_2} + 4 \frac{F_4(I_6 - I_4)(I_1 + I_2)}{(I_1 - I_2)(I_4 + I_6 - 6I_5)} - 3 \frac{F_4(I_4 + I_6 + 2I_5)}{(I_4 + I_6 - 6I_5)} \quad (4)$$

$$d_1 = \left(S_{13} - S_{11} + \frac{1}{2} S_{44} \right) = \frac{2F_2}{I_1 - I_2} - 8F_4 \frac{I_6 - I_4}{(I_1 - I_2)(I_4 + I_6 - 6I_5)} \quad (5)$$

$$d_2 = (S_{11} + S_{33} - 2S_{13} - S_{44}) = \frac{8F_4}{(I_4 + I_6 + 6I_5)} \quad (6)$$

Якщо експериментально виміряти анізотропію модуля зсуву в площині листового полікристала сплаву, то інші пружні константи монокристала та їх відповідні комбінації виражаються іншими трьома рівняннями, аналогічними (4) - (6). Спільне рішення всіх цих шести рівнянь дозволяє знайти всі необхідні пружні константи.

У третьому розділі представлені результати дослідження впливу режимів деформації вальцюванням зі зміною НП на 90° (режим А), екструзією через прямокутну матрицю (при температурах 350°C) (режим Б), а також знакозмінним вигином при кімнатній температурі на текстуру, мікроструктуру (рис. 1-5) та анізотропію пружних та механічних властивостей (рис. 6-8) листових полікристалів сплавів магнію ZE10 та Mg-5% Li.

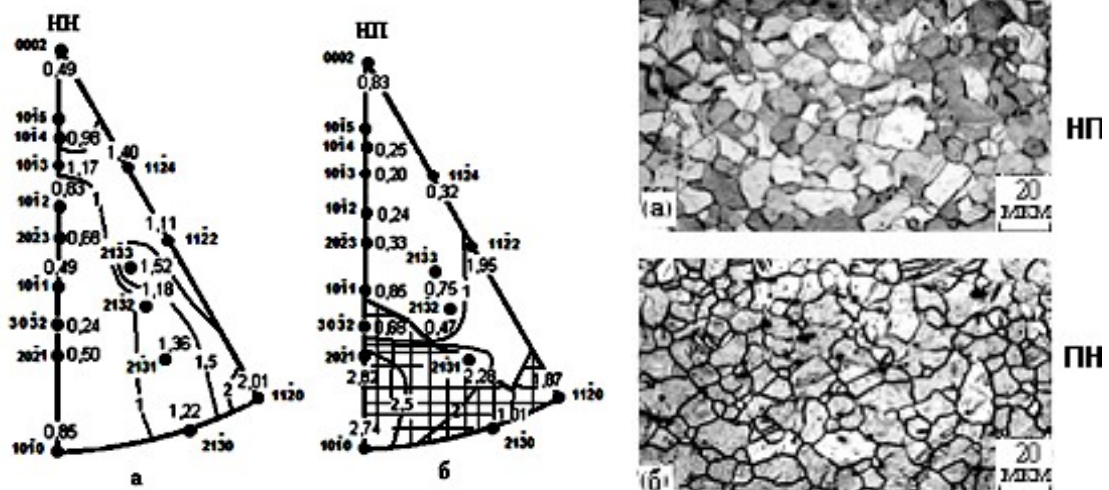
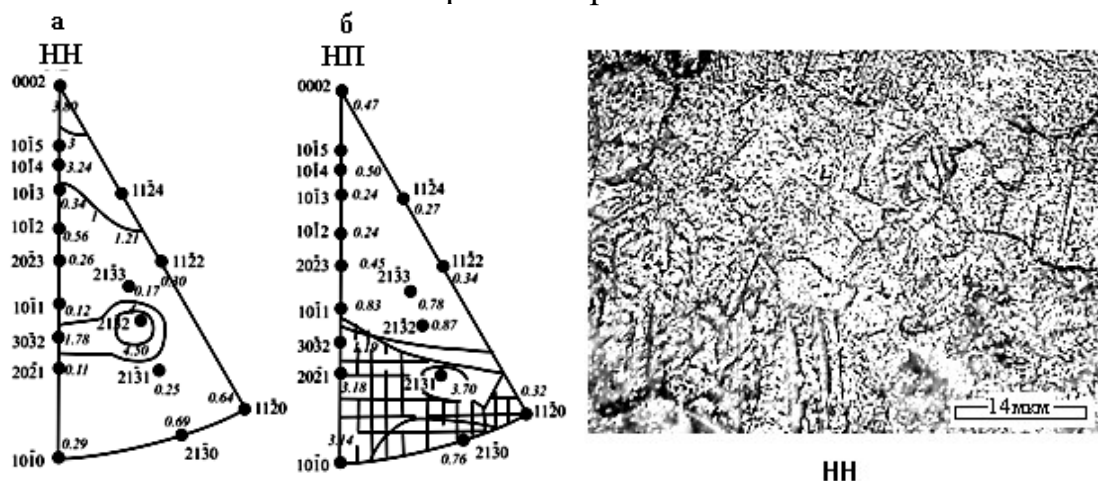


Рис. 1. Експериментальні ОПФ (ліворуч) та мікроструктура (праворуч) сплаву ZE10 після обробки за режимом А.



НН

Рис. 2. Експериментальні ОПФ (ліворуч) та мікроструктура (правопуч) сплаву Mg-5 мас. % Li після обробки за режимом А.

Текстура зразка сплаву ZE10 характеризується широким розсіюванням базисних полюсів у бік ПН з максимальним кутом відхилення 90° і проміжними максимумами відхилення гексагональної призми від НН як у бік ПН на 40° , так і у бік НП на 40° .

Текстура листа сплаву Mg-5 мас. % Li, отриманого за режимом Б, істотно відрізняється від вищеописаної (рис. 3). Обробка сплаву Mg-5 мас. % Li за режимом Б сприяє відхиленню гексагональної призми на 90° у бік ПН за рахунок активізації небазисних механізмів ковзання, зокрема, призматичного $\langle a \rangle$ ковзання дислокацій. Має місце також динамічна рекристалізація, про що свідчать рівноосьові зерна у мікроструктурі.

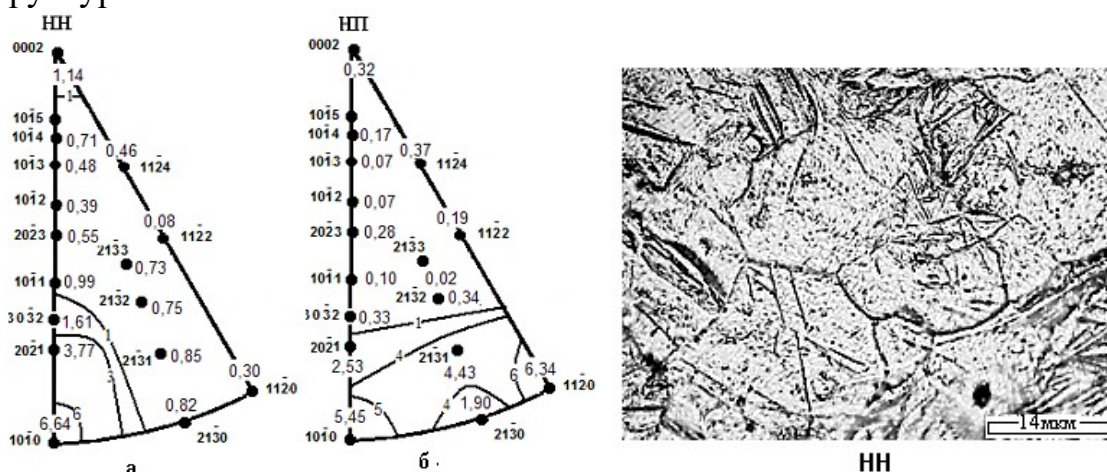


Рис. 3. Експериментальні ОПФ (ліворуч) та мікроструктура (правопуч) сплаву Mg-5 мас. % Li після обробки за режимом Б.

У сплаві Mg-5 мас. % Li при цьому формується базисна текстура за рахунок базисного ковзання, а також компоненти подвійного відхиленого на 70° у бік ПН базисного типу. Має місце також двійникування (заштриховані ділянки на ОПФ НП), що відображається у мікроструктурі (рис. 1).

Знакозмінний вигін листів після обробки за режимом А (тонкий лист). При переході від попереднього циклу ЗВ до подальшого спостерігається певна періодичність у формуванні компонентів текстури на сторонах листів, що розтягуються та стискаються, кількості і типах двійників деформації в мікроструктурі (рис. 4).

Так після 0,5 циклу ЗВ текстура має риси, подібні як вихідної текстури сплаву, так і текстури після $\frac{1}{4}$ циклу ЗВ. Однак розтягнута та стиснута сторона листа після деформації $\frac{1}{4}$ та $\frac{1}{2}$ циклами ЗВ як би помінялися місцями. Після 1 циклу ЗВ текстура подібна текстури після $\frac{1}{2}$ циклу ЗВ. Але розтягнута та стиснута сторони листа знову помінялися місцями. Текстура після 3 циклів ЗВ в цілому аналогічна текстури після 1 циклу. У мікроструктурі збільшується кількість двійників в порівнянні з попереднім етапом ЗВ. Після 5 циклів розтягнута та стиснута сторони листа знову ніби обмінюються місцями. Зросла кількість двійників у відповідній мікроструктурі, що свідчить про збільшення ролі двійникування зі зростанням числа циклів ЗВ (рис. 4).

Аналогічні певні періодичні зміни текстури та мікроструктури спостерігаються після різного числа циклів ЗВ сплаву Mg-5 мас. % Li (рис. 5).

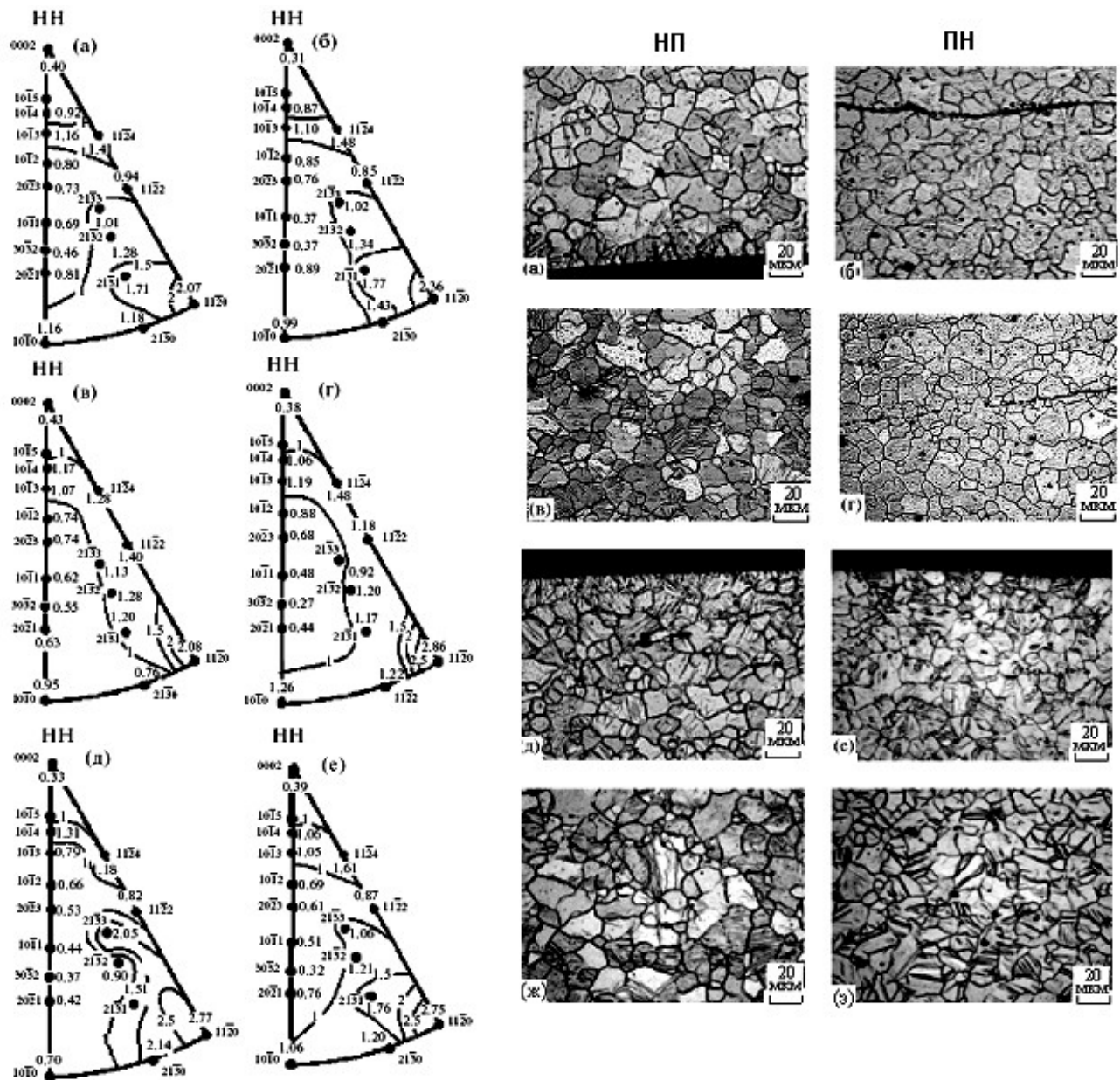


Рис. 4. Експериментальні ОПФ сплаву ZE10 (ліворуч): (а, б) - ¼; (в) – ½; (г) - 1; (д) - 3; (е) - 5 циклів. (а, г, д е) – розтягнута сторона листа; (б, в) – стиснута сторона листа; мікроструктура (праворуч): (а, б) ½; (в, г) – 1; (д, е) – 3 и (ж, з) – 5 циклів, відповідно.

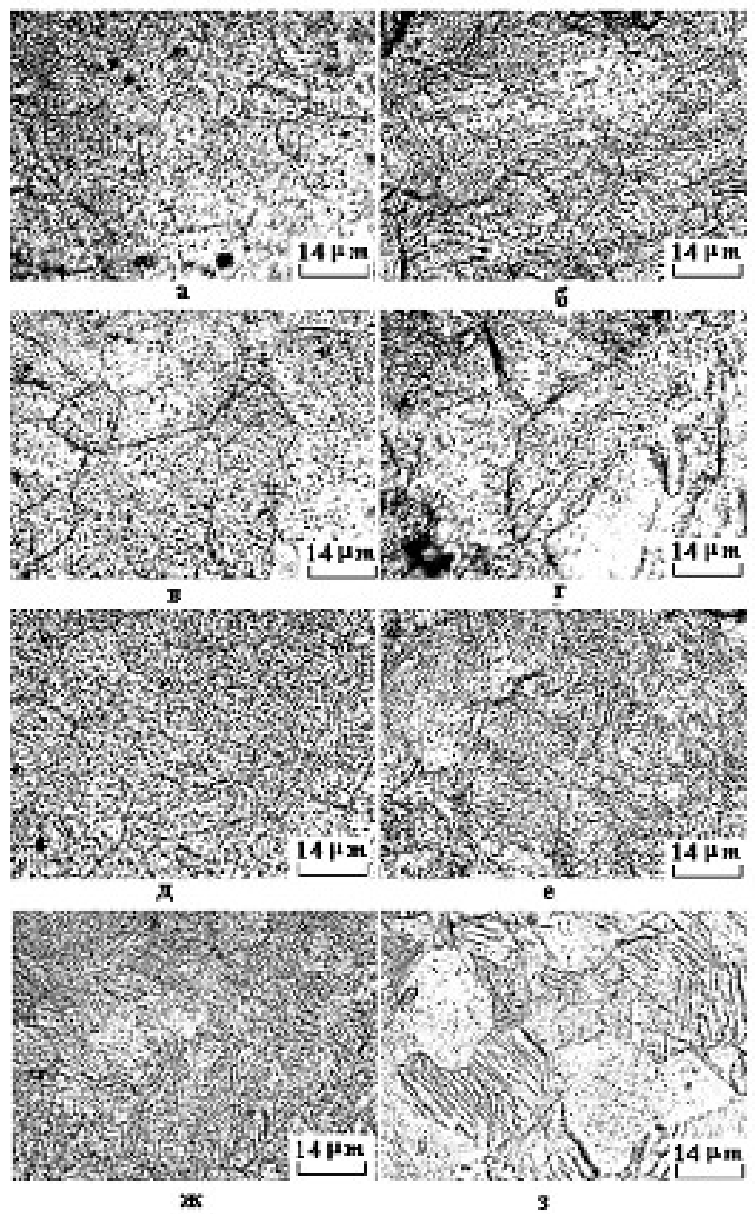
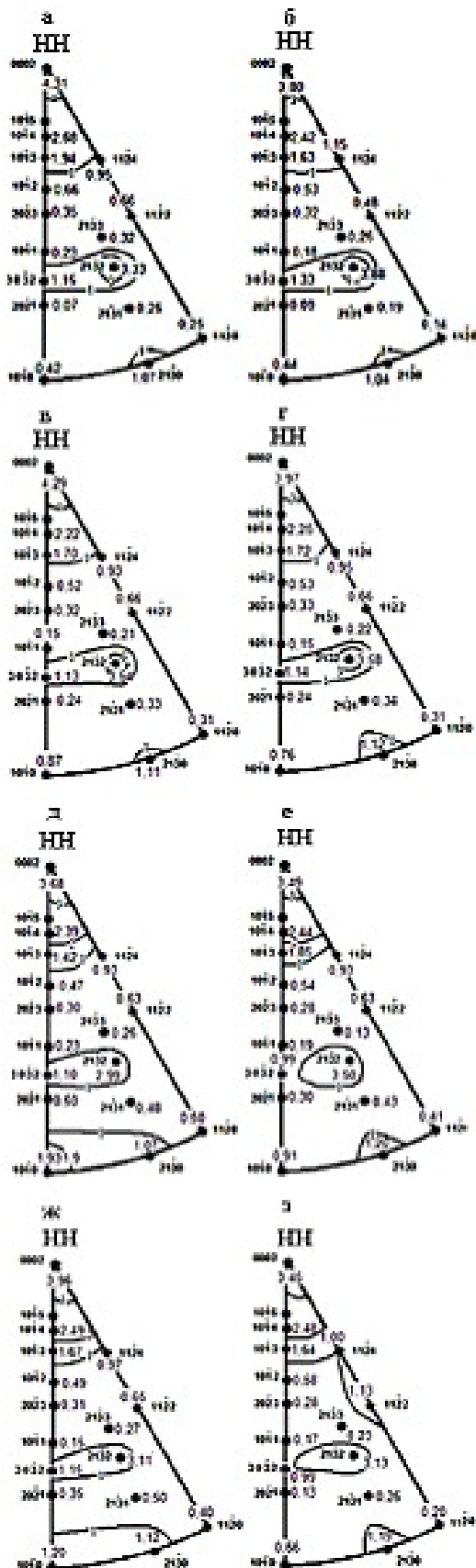


Рис. 5. Експериментальні ОПФ сплаву Mg-5 мас. % Li після різного числа циклів ЗВ (ліворуч): (а, б) - ½; (в, г) - 1,0, (д, е) - 3,0 і (ж, з) - 5,0 циклів. (д, е, ж, з) відповідають розтягнутій стороні листа; (б, в, е, ж) - розтягнута сторона листів сплаву; (а, д, г, з) - стисла сторона, відповідно, та мікроструктура (праворуч): (а, б) - ½; (в, г) - 1,0; (д, е) - 3,0 (ж, з) - 5 циклів; (а, г, д, з) - стисла; (б, в, е, ж) - розтягнута сторона листа.

Пружні та механічні властивості досліджуваних сплавів показані на рис. 6-8.

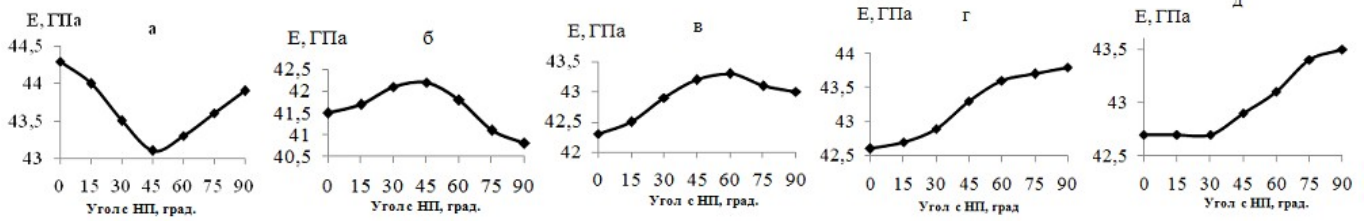


Рис. 6. Пружні властивості листових полікристалів сплаву ZE10: (а) - вихідний лист; (б-д) - після ½, 1, 3 і 5 циклів ЗВ, відповідно.

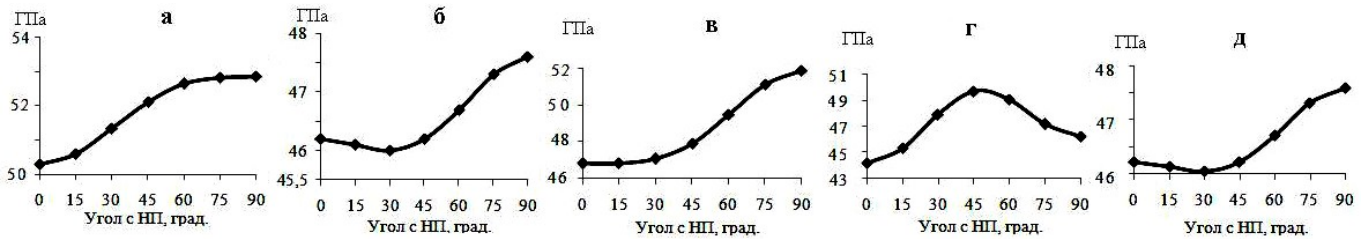


Рис. 7. Пружні властивості листових полікристалів сплаву Mg-5 мас. % Li: (а) - вихідний лист; (б-д) - після ½, 1, 3 і 5 циклів ЗВ, відповідно.

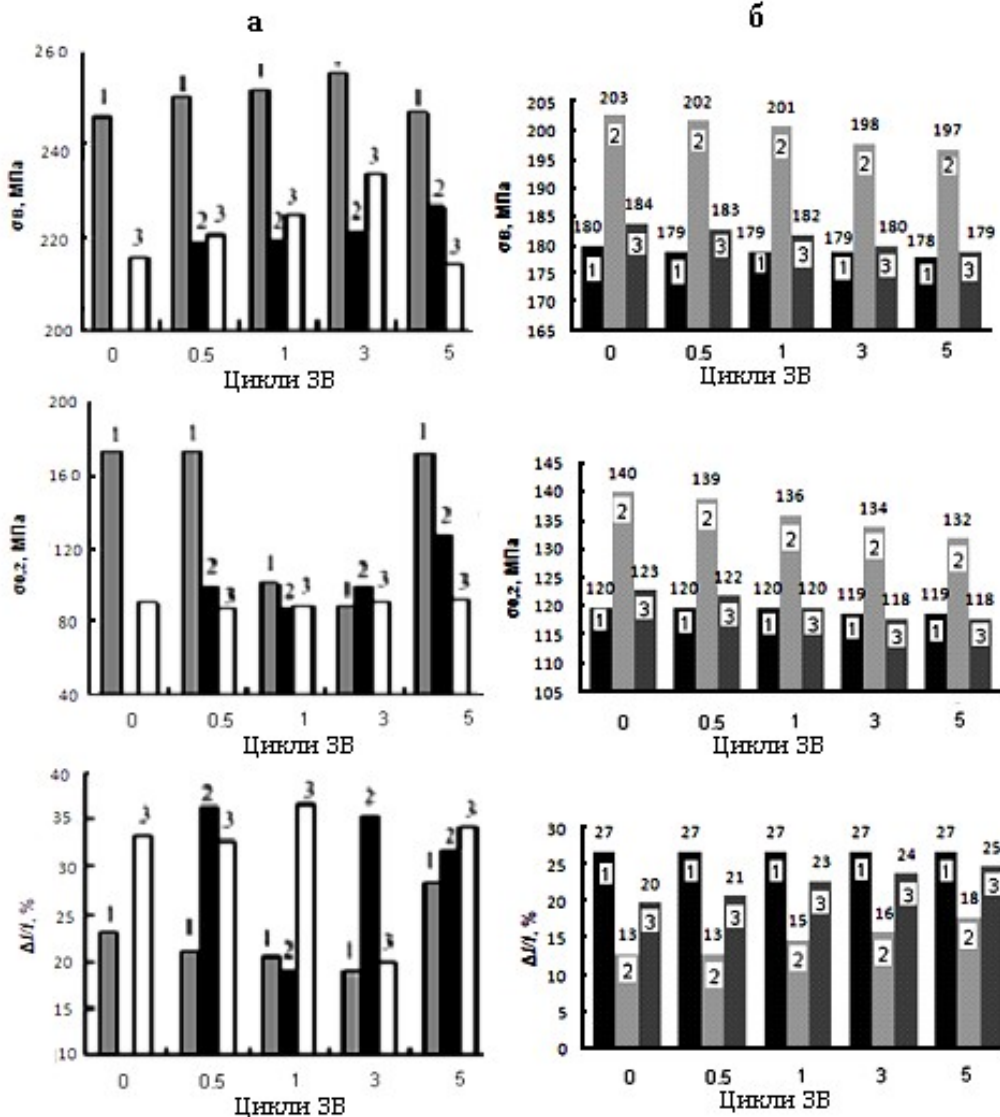


Рис. 8. Механічні властивості сплавів ZE10 (а) та Mg-5 мас. % Li (б).

Описані вище зміни текстури відображаються в поведінці кривих анізотропії пружних властивостей (рис. 6, 7). Кількісно величина анізотропії розраховується за

$$\eta = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\min}} \cdot 100\%$$

співвідношенням , де F – відповідна властивість. У вихідному листовому полікристалі сплаву ZE10 коефіцієнт анізотропії $\eta = 2,7\%$; після деформації $\frac{1}{2}$, 1, 3 та 5 циклами ЗВ $\eta = 3,4; 2,3; 2,9$ і $1,8\%$, відповідно. У вихідному листовому полікристалі сплаву Mg - 5% Li коефіцієнт анізотропії $\eta = 4,5\%$; після деформації $\frac{1}{2}$, 1, 3 та 5 циклами ЗВ $\eta = 3,4\%; 10,7\%; 12,5; 3,3\%$, відповідно. Видно, що коефіцієнт анізотропії пружних властивостей листових полікристалів досліджуваних сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li мінімальний після 5 циклів ЗВ. Таким чином, для мінімізації пружної анізотропії листів сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li можна рекомендувати деформацію знакозмінним вигином числом не менше 5 циклів. У листових полікристалах сплавів також має місце анізотропія механічних властивостей (рис. 8). Характер анізотропії та її величина залежить від числа циклів ЗВ. С ростом числа циклів ЗВ величина анізотропії зменшується. Так, анізотропія міцнісних властивостей сплаву ZE10 мінімальна після 3 циклів ЗВ, а в сплаві Mg-5 мас. % Li – після 5 циклів ЗВ.

Кореляція текстури та механічних властивостей. Для пояснення впливу текстури на механічні властивості прийняли наближення, що внесок у механічні властивості вносять тільки ті компоненти текстури, полюсна щільність яких на ОПФ НН більше одиниці. У такому випадку потрібно призвести перенормування полюсної щільності з урахуванням лише вищевказаних компонентів текстури. З цією метою спочатку знайшли середні арифметичні значення полюсної щільності (що перевищують 1), отримані для двох сторін листів після кожного числа циклів ЗВ на ОПФ (НН). Нормовані відносні значення полюсної щільності, що знайшли за

$$P_{\text{відн.}} = \sum \left(P_{hkl}^{\text{cp}} \times \frac{P_{hkl}^{\text{cp}}}{\sum P_{hkl}^{\text{cp}}} \right)$$

співвідношенням , представлені у табл. 1.

Таблиця 1. Нормовані відносні значення полюсної щільності $P_{\text{відн.}}$

Сплав	Цикли	0	$\frac{1}{2}$	1	3	5
ZE10	$P_{\text{відн.}}$	1,21	1,18	1,30	1,32	1,22
Mg-5 мас. % Li	$P_{\text{відн.}}$	3,43	2,92	2,89	2,51	2,53

Зіставлення $P_{\text{відн.}}$ з відповідними значеннями міцнісних та пластичних властивостей показало, що існують значущі лінійні кореляційні зв'язки між $P_{\text{відн.}}$ та усередненими за напрямком механічними властивостями. Нами отримані лінійні рівняння регресії з коефіцієнтами надійності апроксимації для сплаву ZE10 $R_{\sigma 0.2}^2 = 0,78$, $R_{\sigma B}^2 = 0,70$ $R_{\Delta l/l}^2 = 0,76$:

$$\sigma_{0.2} = -284,9(P_{\text{відн.}}) + 468,9 \quad ; \quad \sigma_B = 40,1(P_{\text{відн.}}) + 182,1 \quad ; \quad \Delta l/l = -40,7(P_{\text{відн.}}) + 78,7 \quad . \quad (7)$$

Для сплаву Mg-5 мас. % Li $R_{\sigma B}^2 = 0,87$, $R_{\sigma 0,2}^2 = 0,84$, $R_{\Delta l/l}^2 = 0,81$:
 $\sigma_B = 3,94(P_{відн.}) + 175,7$; $\sigma_{0,2} = 5,08(P_{відн.}) + 110,8$; $\Delta l/l = -2,74(P_{відн.}) + 29,4$. (8)

Знакозмінний вигин товстолистових полікристалів. Товстолистові (4,5 мм) полікристали сплаву Mg-5 мас. % Li були отримані обробкою литої заготовки за режимом Б, що включав екструзію через прямокутну матрицю. Нам вдалося здійснити тільки 1/2 циклу знакозмінного вигину до руйнування листа.

Текстура та мікроструктура показані на рис. 9, а пружні та механічні властивості представлені на рис. 10.

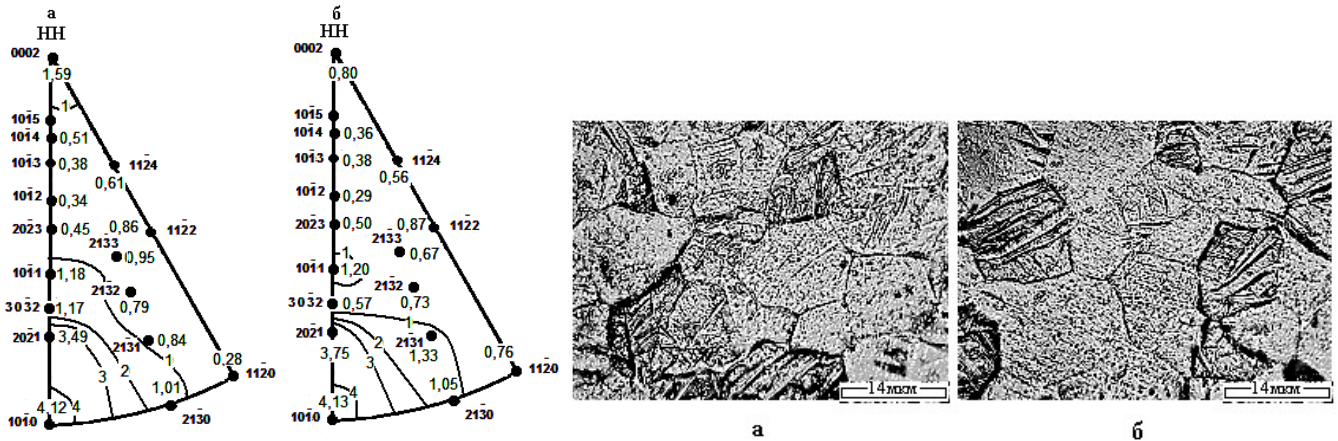


Рис. 9. Експериментальні ОПФ (ліворуч) та мікроструктура листового полікристалу (4,5 мм завтовшки) сплаву Mg-5 мас. % Li після 1/2 циклу ЗВ: (а), (б) - відповідно розтягнута та стиснута сторона листа.

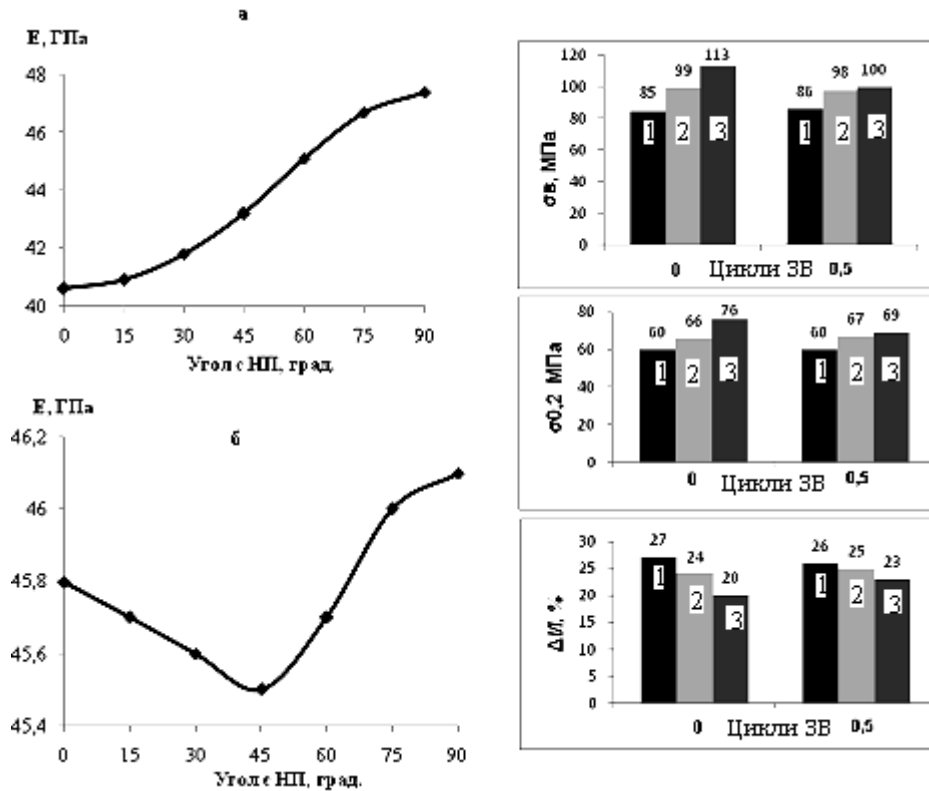


Рис. 10. Пружні (ліворуч) та механічні властивості (праворуч) листового полікристалу сплаву Mg-5 мас. % Li: а – початковий стан; б – після 1/2 циклу ЗВ; 1, 2, 3 – відповідно НП, ДН, ПН.

Тип текстури листа після ЗВ не змінився і відповідає відхиленню гексагональної призми у бік ПН (рис. 9). Видно, що полюсна щільність $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ зменшилася з 6,64 (рис. 3, а) до 4,12-4,13, а розсіювання збільшилося (рис. 9). Таким чином, ЗВ сприяє ослабленню текстури листа. Кількість двійників деформації в мікроструктурі після ЗВ збільшилася порівняно з вихідним станом (рис. 3). Це свідчить про зростання ролі двійникування в процесі ЗВ. При цьому спостерігаються, як і раніше (рис. 3), широкі та гострі на кінцях двійники $\langle 10\bar{1}2 \rangle$ та спарені тонкі двійники $\langle 10\bar{1}1 \rangle$. Вищеописані зміни текстури і мікроструктури знаходять закономірний відгук у пружних та механічних властивостях (рис. 10). Після ЗВ анізотропія властивостей істотно зменшилася. У вихідному листі коефіцієнт пружної анізотропії склав близько 13%, а після ЗВ - близько 2%. У вихідному листі коефіцієнт анізотропії складав для межі міцності $\eta = 34\%$; для межі плинності $\eta = 27\%$; для відносного подовження $\eta = 35\%$. Після ЗВ анізотропія механічних характеристик зменшилася. Коефіцієнт анізотропії склав 16, 15 та 13%, відповідно, для межі міцності, межі плинності та відносного подовження після $\frac{1}{2}$ циклу ЗВ, що відповідає ослабленню текстури та збільшенню її розсіювання. Таким чином, показано, що знакозмінний вигин у товстолистовому полікристалі також сприяє зменшенню анізотропії пружних і механічних властивостей листів гексагонального сплаву Mg-5 мас. % Li за рахунок ослаблення гостроти текстури і збільшення її розсіювання.

У четвертому розділі представлені результати дисертаційного дослідження з визначення компонентів тензора пружності монокристалів сплавів магнію ZE10 та Mg 5% Li за допомогою експериментальної анізотропії модуля Юнга полікристалів та ІХТ (табл. 2), які знайдені з полюсних фігур $\{0002\}$ (рис. 11).

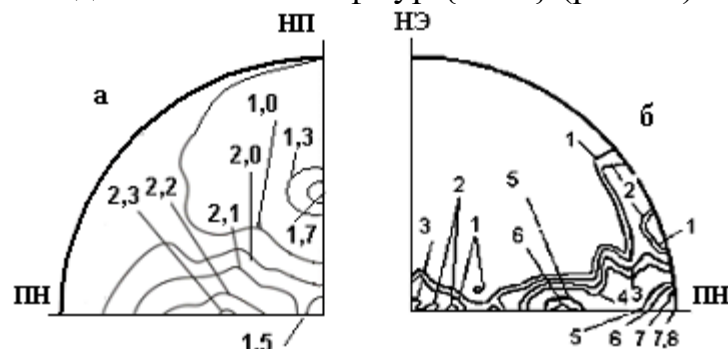


Рис. 11. Експериментальні прямі ПФ $\{0002\}$ листових полікристалів сплавів ZE10 (а) (режим обробки А) та Mg-5 мас. % Li (б) (режим обробки Б).

Таблиця 2. Інтегральні характеристики текстури листів сплавів ZE10 та Mg 5% Li

Сплав	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
ZE10	0,267466	0,327686	0,404848	0,150986	0,191116	0,04711
Mg-5 мас. % Li	0,063019	0,619028	0,317952	0,021757	0,490268	0,031098

Далі ми розрахували анізотропію модуля Юнга у листових полікристалах сплавів ZE10 та Mg - 5% Li за допомогою вищезазначених ІХТ (табл. 2) і пружних констант монокристала чистого магнію за співвідношенню (3а). Результати показані на рис. 12. Видно, що розрахункова крива істотно відрізняється від експериментальної анізотропії не тільки кількісно, але і якісно. Далі розрахували за знайденими раніше коефіцієнтами Фур'є та ІХТ (табл. 2) константу податливості S_{11} та комбінації d_1 і d_2

для сплавів ZE10 і Mg-5 мас. % Li за співвідношеннями (4) - (6). Отримали наступні значення:

$$(S_{11} = 2,287; d_1 = -0,100; d_2 = 0,128) \cdot 10^{-11} \text{Pa}^{-1}, (\text{ZE10}) \quad (9)$$

$$(S_{11} = 2,41; d_1 = -0,307; d_2 = -0,0209) \cdot 10^{-11} \text{Pa}^{-1}. (\text{Mg-5 мас. \% Li}) \quad (10)$$

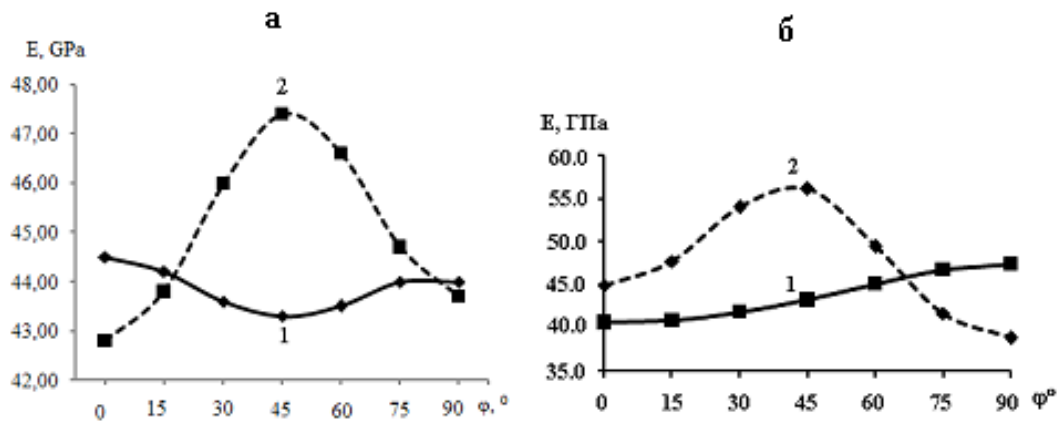


Рис. 12. Анізотропія модуля Юнга в листових полікристалах сплавів ZE10 (а) та Mg - 5% Li: 1-експеримент; 2-розрахунок по пружним константам монокристала Mg.

Далі ми використали пружні константи (9), (10) та ІХТ (табл. 2) для оцінки анізотропії модуля Юнга в листових полікристалах досліджуваних сплавів за співвідношенням (3а) та порівняли з експериментом. Результати показані на рис. 13. Аналіз показав, що відхилення розрахункових і експериментальних даних не перевищує 2% та 4,5% відповідно для ZE10 та Mg-5 мас. % Li.

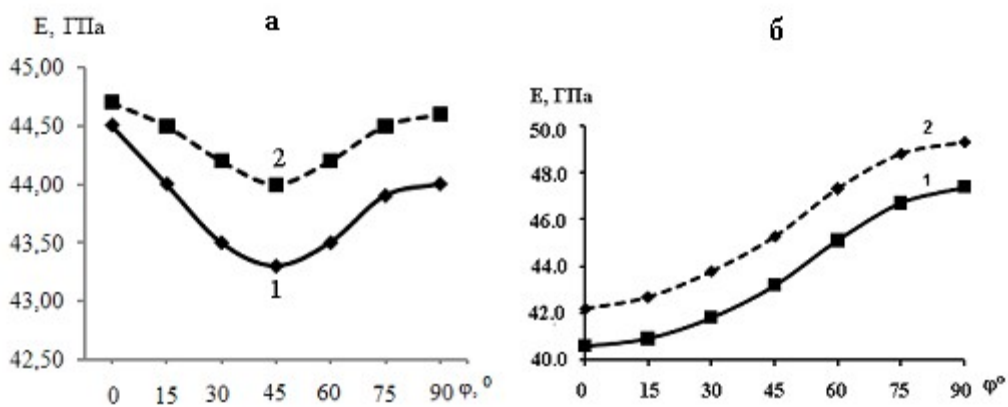


Рис. 13. Анізотропія модуля Юнга в листових полікристалах сплавів ZE10 (а) і Mg-5 мас. % Li (б) 1-експеримент; 2-розрахунок за пружними константами монокристала відповідного сплаву.

Для оцінки компонентів тензорів податливостей монокристалів досліджуваних сплавів магнію, що залишилися поки невідомими, ми проаналізували значення пружних констант монокристалів гексагональних металів. Аналіз показав, що (зокрема, для Mg) компонент $|S_{13}|$ приблизно в 12 разів менше, ніж компонент S_{44} , а компонент $|S_{12}|$ в три рази менше, ніж S_{11} . Використовуючи вищезазначені емпіричні співвідношення, ми розраховували значення компонентів тензора податливостей для монокристалу сплаву ZE10

$$(S_{11} = 2,29; S_{12} = -0,76; S_{13} = -0,31; S_{33} = 0,97; S_{44} = 3,75) \times 10^{-11} \text{Pa}^{-1}; \quad (11)$$

для монокристалу сплаву Mg-5 мас. % Li

$$(S_{11} = 2,41; S_{12} = -0,80; S_{13} = -0,43; S_{33} = 1,77; S_{44} = 5,05) \times 10^{-11} \text{ Па}^{-1}. \quad (12)$$

Дані з пружних констант сплаву ZE10, на жаль, відсутні в літературі. Ми розраховали анізотропію модуля зсуву та коефіцієнта Пуассона в площині листового полікристала сплаву ZE10, використовуючи ІХТ (табл. 2) та компоненти тензора податливості (11). У різних літературних джерелах значення модуля зсуву для магнію та його сплавів лежать в межах від 16,0 до 17,85 ГПа. Розраховані нами значення модуля зсуву змінюються від 17,45 до 17,80 ГПа, що близько до літературних даних. Величина коефіцієнта Пуассона, за нашими розрахунками, змінюється в межах від 0,25 до 0,35, що досить близько до 0,31 – 0,35 для магнієвих сплавів, що наводяться в літературних джерелах. Таким чином, отримані нами розрахункові значення пружних констант монокристала сплаву ZE10 (11) мають розумні значення.

У літературі ми знайшли тільки 2 джерела, де представлені різні оціночні значення пружних констант подвійних магнієвих сплавів з вмістом літію близько 5 % за масою. У табл. 3 показані деякі літературні, а також розраховані нами компоненти тензора пружності монокристалів C_{ij} сплавів Mg-Li, які ми вирахували з (12) (за співвідношеннями, що можна знайти, наприклад, у книзі Дж. Най, 1960).

Таблиця 3. Компоненти тензора пружності C_{ij} монокристалів сплавів Mg - Li

Сплав	C_{ij} монокристалів сплавів Mg - Li, ГПа				
	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{33}	C_{44}
¹ Mg-15,0 ат. % Li	92,0	10,0	5,0	103,0	42,0
² Mg-15,94 ат. % Li	55,49	24,15	20,22	57,42	15,25
³ Mg-5 мас. % Li	51,2	20,1	17,1	64,7	19,8

¹Clark S.J. (2005); ²Radwan Fae`q A.A. (2011); ³наші розрахунки

У табл. 3 видно, що значення C_{ij} магнієвих сплавів, що містять близько 15,0 ат. % та 15,94 ат. % літію (що складає близько 5 мас. %) відрізняються більш ніж у два рази для різних констант. У табл. 3 також видно, що знайдені нами³ компоненти тензора пружності відрізняються від таких для сплаву Mg-15,94 ат. % Li менше ніж на 8% (для C_{11}), та не більш, ніж на 30% (для C_{44}). Таким чином, отримані нами компоненти тензора пружності монокристала сплаву магнію Mg-5 мас. % Li мають цілком розумні значення.

ВИСНОВКИ

1. Смуги сплаву магнію ZE10 після обробки, що включає пресування при 350°C, прокатку зі зміною напрямку на 90° і проміжним нагріванням до 350°C після кожного проходу, є рекристалізованими. Текстура являє собою комбінацію двійникових орієнтацій і компонентів відхиленого базисного типу з кутами нахилу гексагональної призми як у бік НП на 40°, так і в бік ПН на 40° з розсіюванням до

90°. Текстура може бути описана як $\begin{matrix} [0001] \pm 40^\circ \text{НП} \\ 10 \{ \bar{1} \\ \langle \bar{1} 0 \rangle \end{matrix} + \begin{matrix} [0001] \pm 40^\circ \text{ПН} \\ 10 \{ \bar{1} \\ \langle \bar{1} 0 \rangle \end{matrix}$.

2. Смуги листів сплаву магнію Mg-5 мас. % Li після обробки, що включає пресування при 350°C, прокатку зі зміною напрямку на 90° і проміжним нагріванням до 350°C після кожного проходу, володіють рівноосьовою мікроструктурою внаслідок динамічної рекристалізації в процесі обробки. Текстура являє собою комбінацію двійникових і розщеплених на 15° у бік у ПН базисних полюсів за рахунок базисного ковзання, та компонентів подвійного базисного відхиленого на ~ 70° у бік ПН типу та може бути описана як $\begin{matrix} [0001] \pm 15^\circ \text{ПН} \\ 10 \{ \bar{1} \\ \langle \bar{1} 0 \rangle \end{matrix} + \begin{matrix} [0001] \pm 70^\circ \text{ПН} \\ 10 \{ \bar{1} \\ \langle \bar{1} 0 \rangle \end{matrix}$.

3. Текстура листових полікристалів сплаву магнію Mg-5 мас. % Li, отриманих екструзією через прямокутну матрицю при температурі 350°C та подальшою прокаткою вздовж напрямку екструзії з проміжним нагріванням до 350°C, являє собою текстуру відхиленого на 90° у бік ПН базисного типу $\begin{matrix} [0001] \pm 90^\circ \text{ПН} \\ 10 \{ \bar{1} \\ \langle \bar{1} 0 \rangle \end{matrix}$ з відносно слабким базисним компонентом.

4. Додаток до магнію літію або рідкісноземельних металів змінює баланс механізмів деформації, що в свою чергу, впливає на текстуру. Легування магнію літієм або рідкісноземельними металами сприяє зменшенню відносини осей c/a і тим самим додатково до базисного ковзання активує небазисні механізми ковзання, зокрема, призматичне $\langle a \rangle$ $\begin{matrix} 10 \{ \bar{1} \\ 21 \{ \bar{1} \\ \langle \bar{1} 0 \rangle \langle \bar{1} 0 \rangle \end{matrix}$ та пірамідальне $\langle a+c \rangle$ $\begin{matrix} 11 \{ 2 \\ \langle \bar{1} 2 \rangle \\ 11 \{ 2 \\ \langle \bar{1} 3 \rangle \end{matrix}$ ковзання дислокацій при деформації.

5. У процесі знакозмінного вигину листових полікристалів сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li має місце періодичність у формуванні компонентів текстури на сторонах смуг, що розтягуються та стискаються при вигині, кількості та типах двійників деформації у мікроструктурі, що обумовлене динамічною рівновагою призматичного та пірамідального ковзання, з одного боку, та двійникування, з іншого боку.

6. Має місце анізотропія пружності, характеристик міцності та пластичності як у вихідних смугах листових полікристалів сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li, так і зміна характеру анізотропії після деформації різним числом циклів знакозмінного вигину. Анізотропія модуля Юнга мінімальна після 5 циклів знакозмінного вигину. Коефіцієнти анізотропії умовної межі плинності та міцності мінімальні після 3 циклів знакозмінного вигину.

7. Прогнозування механічних властивостей досліджуваних сплавів при знакозмінному вигині може бути проведено на основі встановлених значущих лінійних кореляційних зв'язків (з коефіцієнтами надійності апроксимації, що перевищують 0,7) між усередненими за напрямками величинами $\sigma_{0,2}$, σ_B , $\Delta l/l$, і нормованими відносними значеннями полюсної щільності $P_{\text{відн.}}$, що перевищують одиницю на обох сторонах листів на обернених полюсних фігурах напрямку нормалі.

8. Використання пружних констант монокристалла чистого магнію для опису анізотропії властивостей полікристалів сплавів на основі магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li є некоректним і призводить до помилок, як у кількісних значеннях, так і в характері анізотропії.

9. Знайдені пружні константи монокристалів сплавів магнію ZE10 і Mg - 5% Li дозволяють прогнозувати анізотропію пружних властивостей листових полікристалів досліджуваних сплавів магнію. Прогнозні величини близькі до експериментальних значень в межах 5%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шкатуляк Н. М. Текстура та її зміни під дією знакозмінного вигину сплаву магнію ZE10 / Н. М. Шкатуляк, О. А. Драгомерецкая, **С. В. Санькова** // ЕВРИКА-2013: міжнар. наук. конф. студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики: тези доп. – Львів, 2013. – С. 14.

2. Шкатуляк Н. М. Влияние знакопеременного изгиба на текстуру, структуру и механические свойства листа сплава магния с цинком и цирконием / Н. М. Шкатуляк, В. В. Усов, Н. А. Волчок, А. А. Брюханов, **С. В. Санькова**, М. Родман, М. Шафер, Х. Клёзе // Физика металлов и металловедение.– 2014.– Т. 115, №6. – С.648–655. DOI: 10.7868/S0015323014060126

3. Шкатуляк Н. М. Влияние вида деформации на текстуру бинарного сплава магний-литий / Н. М. Шкатуляк, **С. В. Санькова**, В. В. Усов // Механические свойства современных конструкционных материалов: междунар. науч. чтения им. чл.-корр. РАН И. А. Одингга, 4-5 сент. 2014 г.: сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2014. – С. 333 – 336.

4. **San'kova S. V.** The Elastic Constants of the Single Crystal of the Mg-Zn-Zr-REM Alloy from the Data of the Elastic Anisotropy and the Texture of the Polycrystalline Sheet / **S. V San'kova**, N. M. Shkatulyak, V. V. Usov, N. A. Volchok // International Journal of Metals. – 2014. – Vol. 2014, Article ID 142920, 6 pages. doi:10.1155/2014/142920.

5. Shkatulyak N. M. Effect of Reverse Bending on Texture, Structure, and Mechanical Properties of Sheets of Magnesium Alloys with Zinc and Zirconium / N. M. Shkatulyak, V. V. Usov, N. A. Volchok, A. A. Bryukhanov, **S. V. San'kova**, M. Rodman, M. Shaper, C. Klose // The Physics of Metals and Metallography. – 2014. – Vol. 115, No. 6. – P. 609–616. DOI: 10.1134/S0031918X1406012X.

6. Шкатуляк Н. М. Текстура деформации сплавов магния / Н. М. Шкатуляк, А. И. Соколенко, **С. В. Санькова** // Развитие информационно-ресурсного обеспечения образования и науки в горно-металлургической отрасли и на транспорте: междунар. конф. DIRPSEMMTS 2014, Днепропетровск, 27-28 сент. 2014 г. – С. 130-137. – Режим доступу: <http://sci-forum.net.ua/DIRPSEMMTS2014/>

7. **Санькова С. В.** Определение упругих постоянных монокристалла сплава по упругой анизотропии текстурированного поликристалла / **С. В. Санькова** // – Физико-химия и технология неорганических материалов: междунар. конф. молод.

науч. сотруд. и аспирантов: сборник материалов, 16-19 окт. 2014 г. – М: ИМЕТ РАН. – С. 168-170.

8. Shkatulyak N. M. Single crystal magnesium lithium alloy elastic constants / N. M. Shkatulyak, V. V. Usov, **S. V. Smirnova** // International Journal of Advances in Materials Science and Engineering (IJAMSE). – 2015. – Vol. 4, No. 4. – P. 1 – 11.

9. Shkatulyak N. M. Effect of alternating bending on texture, structure, and elastic properties of sheets of magnesium lithium alloy / N. M. Shkatulyak, **S. V. Smirnova**, V. V. Usov // International Journal of Metals – 2015. – Vol. 2015, Article ID 349810, 8 pages. doi:10.1155/2015/349810

10. Шкатуляк Н. М. Определение упругих констант монокристалла гексагонального сплава магния по анизотропии упругости и характеристик текстуры поликристалла / Н. М. Шкатуляк, **С. В. Смирнова**, В. В. Усов // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: междунар. конф. 10-13 ноября 2015 г.: сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2015. – С. 210-212.

11. Усов В. В. Текстура, структура и упругие свойства листов сплава магния с литием после малоциклового знакопеременного изгиба / В. В. Усов, Н. М. Шкатуляк, **С. В. Смирнова** // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: междунар. конф. 10-13 ноября 2015 г.: сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2015. – С. 194-195.

12. **Смирнова С. В.** Вплив деформації знакозмінним вигином на структуру та механічні властивості листів сплаву магнію з літієм / **С. В. Смирнова**, Н. М. Шкатуляк, В. В. Усов // Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика. Електроніка. – Фізика. Електроніка. – 2015. – Т. 4, вип.1. – С. 60-66.

Смирнова С. В. Текстура та анизотропія фізико-механічних властивостей гексагональних полікристалів з ідеальним співвідношенням c/a . – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07. – фізика твердого тіла. – Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського, Одеса, 2016.

Дисертація присвячена встановленню фізико-математичних моделей, що дозволяють кількісний опис впливу деформації прокаткою, екструзією, знакозмінним вигином на текстуру та прогнозування анизотропії властивостей гексагональних сплавів магнію ZE10 та Mg-5 мас. % Li. Показано, що текстура сплавів ZE10 та Mg - 5 мас. % Li після екструзії та вальцювання істотно відрізняється від базисної текстури чистого магнію. Після пресування при 350°C та подальшого вальцювання зі зміною напрямку на 90° та проміжним нагріванням до 350°C після кожного проходу текстура сплаву ZE10 являє собою комбінацію двійникових орієнтацій та текстури з відхиленням базисних полюсів як у бік НП, так і у бік ПН на 40° з розсіюванням до 90°, а текстура сплаву Mg - 5% Li являє собою текстуру відхиленого на 90° у бік ПН базисного типу з відносно слабким центральним компонентом. Фізичною причиною утворення таких текстур є те, що добавка до магнію літію або рідкісноземельних металів сприяє зменшенню відносини осей c/a і тим самим додатково до базисного активує небазисні механізми

ковзання, зокрема, призматичне $\langle a \rangle$ $\begin{matrix} 10 \{ \bar{1} \\ 21 \{ \bar{1} \\ (\bar{2} 0) \langle \bar{2} 0 \rangle \end{matrix}$ та пірамідальне $\langle a+c \rangle$ $\begin{matrix} 11 \{ \bar{2} \\ (\bar{2} 2) \end{matrix}$

. Показано, що на сторонах смуг ZE10 та Mg-5 мас. % Li, що розтягуються та стискаються при знакозмінному вигині, має місце періодичність у формуванні компонентів текстури, кількості та типах двійників деформації в мікроструктурі, обумовлене динамічною рівновагою призматичного та пірамідального ковзання, з одного боку, та двійникування, з іншого боку. Встановлені значущі лінійні кореляційні зв'язки (з коефіцієнтами надійності апроксимації, що перевищують 0,7) між усередненими за напрямками величинами меж міцності, плинності та відносного подовження та усередненими з обох сторін листів значеннями полюсної щільності, що перевищують одиницю на обернених полюсних фігурах напрямку нормалі. Знайдені лінійні кореляційні зв'язки пропонуються для прогнозування механічних властивостей досліджуваних сплавів. Вирішено проблему визначення пружних констант монокристалів сплавів ZE10 та Mg-5 мас. % Li на основі експериментальної пружної анізотропії відповідних листових полікристалів та інтегральних характеристик текстури (IXТ). Таки IXТ являють собою відповідні комбінації напрямних косинусів кристалу відносно системи координат орторомбічного зразка, усереднені за всіма напрямками. IXТ розраховували з прямих полюсних фігур $[0002]$. Показано, що розрахункова на основі отриманих констант монокристалів вищезазначених сплавів пружна анізотропія листових полікристалів близька до експериментальних даних в межах 5 %.

Ключові слова: сплави магнію, знакозмінний вигин, текстура, анізотропія, пружні константи монокристалів.

Smirnova S. V. Texture and anisotropy of physical and mechanical properties of hexagonal polycrystals with the ideal ratio of c/a . - Manuscript.

Thesis for candidate's degree of physical and mathematical sciences by specialty 01.04.07 - Solid state physics. - South Ukrainian National Pedagogical University named after K. D. Ushinsky, Odessa, 2016.

Dissertation is devoted to the finding of physical and mathematical models that allow quantify to evaluate the effect of deformation by rolling, extrusion and alternating bending on the texture and anisotropic properties in hexagonal magnesium alloys ZE10 and Mg-5 wt. % Li.

It is shown that texture of alloys ZE10 and Mg – 5 wt. % Li after extrusion and after rolling significantly different from the texture of the basal central type of pure magnesium. Texture of alloy ZE10 is a combination of twins' orientations and basal poles that are shifted toward RD and TD on 40° with the scattering up to 90° . Texture of alloy Mg - 5% Li is represented by basal poles that are shifted on 90° toward TD and also arise the weak basal component after processing by the pressing at 350°C and rolling with the change of rolling direction on 90° with heating to 350° after each passage. Addition to magnesium of lithium or rare earth metals reduces the relationship axes c/a and thus activates not basal mechanisms of slip, including prismatic $\langle a \rangle$ $\begin{matrix} 10 \{ \bar{1} \\ 21 \{ \bar{1} \\ (\bar{2} 0) \langle \bar{2} 0 \rangle \end{matrix}$ and pyramidal $\langle a+c \rangle$

slip of dislocation during deformation in addition to the basal slip. These are the physical causes of formation above-mentioned textures. It is shown that during the alternating bending there is a periodicity in the formation of texture components

as well as in the number and types of deformation twins in the microstructure. This is caused by the dynamic equilibrium of prismatic and pyramidal slip, on the one hand, and twinning, on the other hand, on sides that are stretched and contracted during bending of bands ZE10 and Mg-5 wt. % Li. Significant linear correlations (with reliability coefficients of approximation are not less 0,7) between values of averaged over both sides of sheets pole density on inverse pole figures of normal direction and averaged over directions values of tensile strength, yield strength and relative elongation are found after different number of cycles alternating bending. These linear correlations are proposed to use for prediction of mechanical properties of investigated alloys. Here it resolved the problem of determining the elastic constants of single crystals of alloys ZE10 and Mg-5 wt. % Li on the base of experimental elastic anisotropy of corresponding polycrystalline sheets and integral characteristics of texture (ICT). ICT represent certain combinations of direction cosines of hexagonal axis crystal averaged over all orientations with respect to the coordinate system of sample. ICT were calculated from direct pole figures $[0002]$. It is shown that the calculated elastic anisotropy of polycrystalline sheets based on found elastic constants of single crystals of above-mentioned alloys is close to the experimental data within 5 %.

Keywords: magnesium alloys, alternating bending, texture, anisotropy, elastic constants of single crystals.

Смирнова С. В. Текстура и анизотропия физико-механических свойств гексагональных поликристаллов с идеальным соотношением c/a . - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела. – Южно-украинский национальный педагогический университет имени К. Д. Ушинского, Одесса, 2016.

Диссертация посвящена установлению физико-математических моделей, позволяющих количественное описание влияния деформации прокаткой, экструзией, знакопеременным изгибом на распределение ориентировок кристаллитов и прогнозирование анизотропии свойств гексагональных сплавов магния ZE10 и Mg-5 масс. % Li. Текстура вышеназванных сплавов существенно отличается от центральной базисной текстуры чистого магния. После прессования при 350°C и прокатки с изменением направления на 90° с промежуточным нагреванием до 350°C после каждого прохода текстура сплава ZE10 характеризуется наличием двойниковых ориентаций и отклонением базисных полюсов в НП и ПН на 40° с рассеянием в ПН до 90°. Текстура сплава Mg-5 масс. % Li характеризуется отклонением базисных полюсов на 90° в ПН с относительно слабым центральным компонентом. Добавка к магнию лития или редкоземельных металлов способствует уменьшению отношения осей c/a и тем самым дополнительно к базисному скольжению активирует при деформации небазисное, в частности, призматическое $\langle a \rangle$ $\begin{matrix} 10 \{ \bar{1} \\ 21 \{ \bar{1} \\ (\bar{2} 0) \} \end{matrix} \langle \bar{2} 0 \rangle$ и пирамидальное $\langle a+c \rangle$ $\begin{matrix} 11 \{ \bar{2} \\ (\bar{2} 2) \} \end{matrix}$ $\begin{matrix} 11 \{ \bar{2} \\ \langle \bar{2} 3 \rangle \} \end{matrix}$ скольжение. На растягивающихся и сжимающихся при знакопеременном изгибе сторонах полос имеет место периодичность в формировании компонентов текстуры, количестве и типах двойников деформации в микроструктуре. Найдены значимые линейные корреляционные связи (с коэффициентами надежности аппроксимации,

превышающими 0,7) между усредненными по направлению величинами предела прочности, предела текучести и относительного удлинения и усредненными по обеим сторонам листов значениями полюсной плотности, превышающими единицу на обратных полюсных фигурах направления нормали. Эти корреляционные связи предложены для прогнозирования механических свойств исследуемых сплавов. Рассчитаны упругие константы монокристаллов исследуемых сплавов на основе экспериментальной упругой анизотропии соответствующих листовых поликристаллов и интегральных характеристик текстуры (ИХТ), которые были найдены из прямых полюсных фигур $[0002]$. Показано, что расчетная анизотропия упругих свойств листовых поликристаллов на основе полученных упругих констант монокристаллов вышеупомянутых сплавов близка к экспериментальным данным в пределах 5 %.

Ключевые слова: сплавы магния, знакопеременный изгиб, текстура, анизотропия, упругие константы монокристаллов.