

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ

На правах рукопису  
УДК 669.15.28.73:539.376

БАЗЕЛЮК ГЕНАДІЙ ЯКОВИЧ

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУР ТА ЗМІНА  
ВЛАСТИВОСТЕЙ ГЦК-МЕТАЛІВ ПІД ВПЛИВОМ  
НЕСТАЦІОНАРНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ І  
УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПОЛІВ

Спеціальність 05.16.01 - металознавство та термічна обробка  
металів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації для здобуття вченого ступеня  
доктора технічних наук

Київ - 1997

69.017  
21.78

ЛННБ України ім.В.Стефаніка

Дисертація



00376231 (M)

Роботу виконано в Інституті металофізики НАН України

Офіційні опоненти:

- член-кореспондент НАН України доктор фізико-математичних наук, професор Фірстов С. О.
- доктор технічних наук, професор Ошкадьоров С. П.
- доктор фізико-математичних наук, професор Казанцев В. Ф.

Провідна організація: Інститут проблем міцності НАН України

Захист відбудеться "16" 04 1997 р. о 14 годині на засіданні Спеціалізованої Вченої Ради при Інституті металофізики НАН України за адресою: 252680, ДСП, Київ-142, бульвар Академіка Вернадського, 36, конференц-зал Інституту металофізики НАН України.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Інституту металофізики НАН України.

Відгуки на автореферат у двох екземплярах, завірених печаткою організації, просимо надсилати на адресу: 252680, ДСП, Київ-142, бульвар Академіка Вернадського, 36, Інститут металофізики НАН України.

Автореферат розіслано "13" 03 1997 р.

Учений секретар  
Спеціалізованої Ради Д.01.75.02  
кандидат фіз.-мат.наук

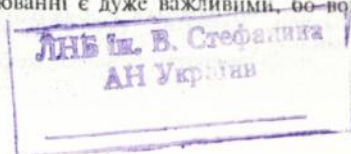
МАДАТОВА Е. Г.

ТВ 37. 2017

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Деталі багатьох сучасних машин діють у складних умовах одночасного впливу внутрішніх напружень, швидких теплових змін та високочастотної вібрації. Перед металофізикою постійно стоять завдання підвищення механічних характеристик та продовження строку служби використовуваних у цих конструкціях металів. Традиційними методами поліпшення міцнісних характеристик металів є різні термомеханічні та механіко-термічні обробки, які приводять до істотних змін макроскопічних розмірів і форми деталей. Тому ці методи не можуть використовуватися для обробки готових виробів. Пошуки інших методів підвищення міцнісних характеристик привели до використання для цього інтенсивного ультразвуку та термоцикування.

Ультразвукове опромінювання і термоцикування створюють широкий спектр структурних станів, які викликають як негативні, так і позитивні зміни механічних характеристик металів та сплавів. Відомо, наприклад, що й теплове, і ультразвукове навантаження можуть викликати явища втоми у металах. Проте, ці знакозмінні навантаження, які використовуються в оптимальних режимах, можуть зміцнювати з одночасною релаксацією внутрішніх напружень, що в комплексі створює передумови для формування рівноважних структурних станів, які підвищують жароміцність металів. Характер формування структур сплавів істотно ускладнюється, коли при знакозмінному навантаженні паралельно з процесом накопичення дефектів кристалічної будови та різними дисипативними процесами наявна й зміна фазового стану матеріалу (наприклад, розпад твердого розчину, тощо). Надлишкова концентрація вакансій та підвищена щільність дислокацій, які виникають у процесі обробки, впливають на кінетику зміни фазового стану, наслідком чого може стати істотна зміна механічних властивостей сплавів. Дані, що є в літературі, часто суперечливі, не дозволяють скласти цілісні уявлення про деформаційні процеси в металах, які відбуваються при термоцикуванні та ультразвуковому опромінюванні, що можна пояснити як складністю цих процесів, так і відсутністю необхідних моделей та механізмів, що враховують специфіку знакозмінного навантаження та зумовлених ним явищ. Вивчення загальних закономірностей та специфічних особливостей процесу мікропластичної деформації та формування структурних станів при термоцикуванні й ультразвуковому опромінюванні є дуже важливими, бо вони



дозволяють виробити алгоритми управління процесами структуроутворення з метою досягнення максимальної працездатності відповідальних вузлів та деталей машин.

Викладене визначає актуальність роботи, в основі якої лежать результати досліджень, зроблених автором в 1965-93 р.р. згідно з планами наукових досліджень, госпдогвірних робіт і конкурсного проекту "Нові литі жароміцні сплави на нікелевій основі з підвищеним опором повзучості і підвищеною втомною міцністю для лопаток авіаційних ГТД" за програмою "Нові металеві матеріали для авіаційної та космічної техніки" ДКНТП України.

Мета роботи у дослідженні кінетики та механізмів формування структурних станів та високотемпературного зміцнення ГЦК-металів та сплавів внаслідок ультразвукового опромінювання і термоциклічної обробки у різних режимах.

Для досягнення цієї мети було необхідно виконати такі завдання:

- дослідити кінетику накопичування дислокацій та особливості структур монокристалів ГЦК-металів, які формуються при термоциклуванні та ультразвуковому опромінюванні;

- вивчити характер деформаційних процесів та механізмів генерації дефектів кристалічного стану при ультразвуковому опромінюванні старіючих сплавів на основі ГЦК-металів з різним станом міжфазних границь;

- дослідити вплив термоциклічної обробки та ультразвукового опромінювання на дислокаційну структуру, внутрішню тертя та густину жароміцного литого нікелевого сплаву;

- дослідити вплив попередньої термоциклічної й ультразвукової обробки на опір високотемпературній повзучості ГЦК-металів та дисперсійно-тверднучих сплавів на їх основі й виявити взаємозв'язок характеристик жароміцності з характером структурних станів, що формуються при вказаних попередніх обробках.

Наукова новизна роботи полягає у виявленні ряду невідомих раніше ефектів, явищ, структур, виявленні нових закономірностей та кореляцій; запропоновано нові моделі та механізми фізичних процесів у кристалах.

В роботі вперше:

- встановлено схожість кінетик зростання щільності дислокацій в монокристалах ГЦК-металів залежно від часу ультразвукового опромінювання при амплітудах деформації, які перевищують певну критичну, та від числа термічних циклів, які здійснюються в жорсткому режимі (наприклад, у режимі багаторазового гартування);

- показано, що при ультразвуковому опромінюванні в режимі біжучих поздовжніх хвиль з амплітудами деформації, які перевищують певну порогову, процеси ковзання та розмноження дислокацій у монокристалах алюмінію проходять переважно в площинах ковзання, паралельних до напрямку поширення ультразвуку в кристалі. При спільному впливі ультразвукового опромінювання та статичних напружень, величина яких може бути істотно нижчою від границі плинності монокристала, вибір системи площин ковзання визначається статичним навантаженням і не залежить від напрямку поширення ультразвуку, роль якого в останньому випадку зводиться до активації процесів ковзання та розмноження дислокацій у вже визначених площинах ковзання;

- встановлено, що попереднє ультразвукове опромінювання в оптимальному режимі (як і оптимальний ступінь попередньої пластичної деформації) та наступне полігонізаційне відпалювання ГЦК-металів у температурному інтервалі реалізації дислокаційної повзучості створюють в цьому інтервалі залежно від часу ультразвукового опромінювання (від ступеня попередньої пластичної деформації) одну область субструктурного зміцнення для металів з низькою енергією дефектів пакування (наприклад, мідь) та дві області субструктурного зміцнення для металів з високою енергією дефектів пакування (наприклад, алюміній);

- встановлено для твердих розчинів Al-1,9 ваг. % Mg і Al-3,2 ваг. % Mg, що обидві області субструктурного зміцнення зміщено в бік малих ступенів попередньої деформації порівняно з областями зміцнення, які виявлено в чистому алюмінії. При цьому зміщення тим більше, чим вищий вміст Mg в Al (у межах розчинності);

- досліджено дію ультразвукового опромінювання на стан когерентних міжфазових меж; на сплаві Cu-3,5 ваг. % Ti показано, що ультразвукове опромінювання з амплітудою деформації  $10^{-3}$  при температурах, близьких до кімнатної, де дифузійні процеси загальмовано, викликає зрив когерентності (на рентгенограмах зникають сателіти і з'являється дифракційна лінія від проміжної тетрагональної  $\alpha'$ -фази), який відбувається за механізмом мікрозсуву у найнапруженіших ділянках кристалічних ґрат, якими є когерентні міжфазові межі, коли рівень когерентних напружень досить високий; спонтанна втрата когерентності в цьому сплаві відбувається при набагато вищих температурах, в інтервалі 743-773 К, де дифузійні процеси сприяють виділенню проміжної тетрагональної  $\alpha'$ -фази; ультразвукове опромінювання в цьому температурному інтервалі прискорює релаксацію когерентних напружень через сильну фрагментацію матричної фази.

- показано, що зрив когерентності кристалічних ґрат матричної та надлишкової фаз при ультразвуковому опромінюванні сплаву Cu-3,5 ваг.% Ti (параметр структурної невідповідності кристалічних ґрат матричної та надлишкової фаз в цьому сплаві є значним і становить  $\delta_m=1,9\%$  як при кімнатних температурах, де дифузійні процеси загальмовано, так і в температурному інтервалі 43-773K, де дифузійні процеси сприяють релаксації когерентних напружень, супроводжується істотним приростом щільності дислокацій та 20%-ним зростанням твердості сплаву. Релаксація когерентних напружень у процесі ультразвукового опромінювання старіючого сплаву Al-2,8 ваг.% Li при різних температурах не приводить до помітного зміцнення сплаву, що зумовлено низьким рівнем когерентних напружень внаслідок малої величини параметру структурної невідповідності в цьому сплаві,  $\delta_m=0,08\%$ ;

- показано, що ультразвукове опромінювання з амплітудою напруження \*80 МПа у процесі старіння сплаву Al-2,8 ваг.% Li у температурному інтервалі 523-553 К приводить до сповільнення процесу коагуляції когерентних упорядкованих виділень  $\delta'$ -фази ( $Al_3Li$ ). При однакових часових витримках у вказаному температурному інтервалі в зістарених під впливом ультразвуку зразках розмір виділень виявляється у 1,4-2,3 раза меншим порівняно зі станом, який одержано старінням без впливу ультразвуку. Останнє, очевидно, зумовлено прискореною ультразвуком релаксацією когерентних напружень, які є рушійною силою процесів зростання й коагуляції когерентних виділень надлишкової фази. Зменшення схильності виділень до процесу коагуляції при підвищених температурах є свідченням стабілізації структурного стану сплаву і стабілізуючого характеру ультразвукового впливу на старіючі сплави;

- при дослідженні температурної залежності внутрішнього тертя загартованого сплаву Cu-3,5 ваг.% Ti, попередньо опроміненого ультразвуком (амплітуда напруження  $\delta=150$  МПа), виявлено великий максимум у температурному інтервалі 423-623 К. Дослідження повернення внутрішнього тертя в цьому температурному інтервалі дозволило обчислити величину його енергії активації, яка дорівнює 0,2 еВ, що близько до відомої з літератури величини енергії зв'язку вакансії в кристалічних ґратах твердого розчину на основі Cu з легуючим атомом Ti. Припускається, що атомно-вакансійні комплекси, які створюються при ультразвуковому опромінюванні, здатні переорієнтуватися під впливом змінних напружень у процесі вимірювання внутрішнього тертя, викликаючи його зростання.

- встановлено, що оптимальне число термічних циклів, які здійснюються у м'якому режимі і збільшують щільність жароміцних нікелевих сплавів але не

викликають їх деформаційне зміцнення, приводить до істотного (на \*50%) збільшення їх довговічності при високотемпературній повзучості і 10-разовому збільшенні довговічності при втомному навантаженні.

#### Наукові твердження, що виносяться на захист:

1. Попереднє ультразвукове опромінювання в оптимальному режимі (як і оптимальний ступінь попередньої пластичної деформації) та наступне полігонізаційне відпалювання ГЦК-металів у температурному інтервалі реалізації дислокаційної повзучості створюють в цьому інтервалі в залежності від тривалості ультразвукового опромінювання (від ступеню попередньої пластичної деформації) одну область субструктурного зміцнення для металів з низькою енергією дефектів пакування (наприклад, мідь) та дві області субструктурного зміцнення для металів з високою енергією дефектів пакування, наприклад, алюміній.

2. Зрив когерентності кристалічних ґрат матричної та надлишкової фаз при ультразвуковому опромінюванні старіючих сплавів супроводжується тим більшим приростом щільності дислокацій та зміцнення сплавів, чим вищий рівень когерентних напружень до ультразвукового опромінювання.

3. Ультразвукове опромінювання в оптимальних режимах старіючих сплавів на основі ГЦК-металів викликає релаксацію внутрішніх напружень, внаслідок чого відбувається стабілізація дислокаційної структури, зменшується схильність виділень надлишкової фази до коагуляції при підвищених температурах, що в комплексі приводить до створення стабільних структурних станів, які підвищують ресурс жароміцності цих сплавів.

4. Оптимальне число термічних циклів, здійснюваних у м'якому режимі, збільшують щільність жароміцних литих нікелевих сплавів, але не викликають їх деформаційного зміцнення і приводять до істотного збільшення довговічності при високотемпературній повзучості (на \*50%) і 10-разовому збільшенні довговічності при втомному навантаженні цих сплавів.

#### Наукова та практична цінність роботи

Вирішено актуальну наукову проблему, яка полягає в науковому обґрунтуванні використання термоциклічної обробки та ультразвукового опромінювання для підвищення ресурсу жароміцності ГЦК-металів і дисперсійно-твердіючих сплавів на їх основі, призначених для експлуатації в умовах високих температур.

Запропоновано нову схему ультразвукового опромінювання металів згідно з якою розроблено й виготовлено оригінальну установку для ультразвукового опромінювання металів, яка дозволяє контролювати в процесі ультразвукового опромінювання рівень інтенсивності ультразвукових коливань і якість акустичного контакту між опромінюваним зразком та ультразвуковими хвилеводами. Якість і надійність акустичного контакту забезпечується спеціально розробленими електромагнітними пристроями, що діють на постійному струмі. Методика передбачає нагрівання опромінюваного зразка з хвилеводами як піччю опору, так і пропусканням електричного струму більшої величини.

Розроблено режими термопластичної обробки, яка включає попередню пластичну деформацію (або попереднє ультразвукове опромінювання) і наступне полігонізаційне відпалювання для підвищення опору повзучості міді та алюмінію. Розроблено режими термоультразвукової обробки промислового алюмінійового сплаву АК4-1, який використовується для виготовлення поршнів у дизельних двигунах з метою підвищення його жароміцності. Показано, що ультразвукове опромінювання при кімнатних температурах загартованого на твердий розчин сплаву АК4-1 і наступне штучне старіння при температурі 460 К приводить до збільшення його довговічності при високотемпературній повзучості у 2 рази. Істотний приріст довговічності проявляється після ультразвукового опромінювання при температурі штучного старіння 460 К в оптимальному режимі загартованого на твердий розчин сплаву АК4-1.

У цій дисертаційній роботі показано, що термоциклічна обробка в жорсткому режимі ефективно впливає на дислокаційну структуру монокристалів алюмінію та промислового алюмінійового сплаву АК4-1, а в м'якому режимі приводить до заліковування структурних мікрodefektів (наприклад, мікропор відливання) у жароміцних литих нікелевих сплавах. На жароміцному литому нікелевому сплаві ВЖЛ-12У, який використовується при виготовленні лопаток газотурбінних двигунів (ГТД) показано, що оптимальне число термоциклів, які збільшують щільність литого сплаву, але виключають його деформаційне зміцнення, приводить до істотного збільшення експлуатаційних характеристик. Довговічність при високотемпературній повзучості (жароміцність) термоциклованих зразків на 50% перевищує таку після комплексу термообробок, передбаченого зараз існуючою технологією виготовлення лопаток ГТД.

Стендові випробування лопаток ГТД на втомну міцність показали, що при однаковій величині змінних напружень, рівній 230 МПа, втомна довговічність термоциклованих лопаток у 10 і більше разів перевищує цю довговічність після стандартної термообробки.

Таким чином, у цій дисертації показано, що ультразвукове опромінювання і термічна обробка є перспективними методами підвищення комплексу механічних властивостей металів і сплавів.

Міра вірогідності отриманої інформації забезпечується комплексністю проведених експериментальних досліджень, що дозволяє пояснити зміну фізико-механічних властивостей відповідними структурними змінами.

Особистий внесок автора. У дисертації узагальнено результати досліджень, виконаних автором або під його керівництвом за участю ряду співробітників. В останньому випадку автором проводилась постановка роботи, формування мети, завдання і робилися висновки.

Безпосередньо автором розроблено методику ультразвукового опромінювання металів, виконано експериментальні дослідження із застосуванням методів подвійного кристал-спектрометра, рентгенопографічних знімачів за Бер-Барретом, металографії; випробувань на високотемпературну повзучість, твердості та мікротвердості, запропоновано нові моделі та фізичні механізми вперше установлених явищ. Зокрема, дано трактування вперше виявлених кріпових аномалій, які спостерігаються в попередньо деформованих, а також у попередньо опроміненних ультразвуком алюмінії та твердих розчинах алюміній-магній. Серед інших авторові належить також трактування вперше виявленого при виконанні дисертації ефекту ущільнення литих жароміцних нікелевих сплавів при м'якому термоциклуванні.

Розділи 5.1 та 5.2 виконано спільно з к.ф.м.н. Березіною А.Л., 5.3, 5.4 та 7.3 - спільно з к.ф.м.н. Кашевською О.М., 5.5 - спільно з к.ф.м.н Трофімовою Л.М.

Апробація роботи Основні результати роботи доповідались і обговорювались на Всесоюзній акустичній конференції, Москва, 1968 р.; XXIII науковій сесії з проблеми жароміцності сплавів, Москва, 1969 р., VIII Всесоюзній конференції з міцності і пластичності, Куйбишев, 1977 р., 2 семінарі "Міцність матеріалів та елементів конструкцій при звукових і ультразвукових частотах навантаження", Київ, 1978 р., IV Всесоюзній науково-технічній конференції з ультразвукових методів інтенсифікації технологічних процесів, Москва, 1979 р., Всесоюзній науково-технічній конференції ультразвукових методів інтенсифікації технологічних процесів, Москва, 1979 р.

Стендові випробування лопаток ГТД на втомну міцність показали, що при однаковій величині змінних напружень, рівній 230 МПа, втомна довговічність термоциклованих лопаток у 10 і більше разів перевищує цю довговічність після стандартної термообробки.

Таким чином, у цій дисертації показано, що ультразвукове опромінювання і термічна обробка є перспективними методами підвищення комплексу механічних властивостей металів і сплавів.

Міра вірогідності отриманої інформації забезпечується комплексністю проведених експериментальних досліджень, що дозволяє пояснити зміну фізико-механічних властивостей відповідними структурними змінами.

Особистий внесок автора. У дисертації узагальнено результати досліджень, виконаних автором або під його керівництвом за участю ряду співробітників. В останньому випадку автором проводилась постановка роботи, формування мети, завдання і робилися висновки.

Безпосередньо автором розроблено методику ультразвукового опромінювання металів, виконано експериментальні дослідження із застосуванням методів подвійного кристал-спектрометра, рентгенотопографічних знімачів за Бер-Барретом, металографії; випробувань на високотемпературну повзучість, твердості та мікротвердості, запропоновано нові моделі та фізичні механізми вперше установлених явищ. Зокрема, дано трактування вперше виявлених кріпових аномалій, які спостерігаються в попередньо деформованих, а також у попередньо опроміненних ультразвуком алюмінії та твердих розчинах алюміній-магній. Серед інших авторові належить також трактування вперше виявленого при виконанні дисертації ефекту ущільнення литих жароміцних нікелевих сплавів при м'якому термоциклуванні.

Розділи 5.1 та 5.2 виконано спільно з к.ф.м.н. Березіною А.Л., 5.3, 5.4 та 7.3 - спільно з к.ф.м.н. Кашевською О.М., 5.5 - спільно з к.ф.м.н. Трофімовою Л.М.

Апробація роботи Основні результати роботи доповідались і обговорювались на Всесоюзній акустичній конференції, Москва, 1968 р.; XXIII науковій сесії з проблеми жароміцності сплавів, Москва, 1969 р., VIII Всесоюзній конференції з міцності і пластичності, Куйбишев, 1977 р., 2 семінарі "Міцність матеріалів та елементів конструкцій при звукових і ультразвукових частотах навантаження", Київ, 1978 р., IV Всесоюзній науково-технічній конференції з ультразвукових методів інтенсифікації технологічних процесів, Москва, 1979 р., Всесоюзній науково-технічній конференції ультразвукових методів інтенсифікації технологічних процесів, Москва, 1979 р.,

Всесоюзній науково-технічній конференції "Міцність та пластичність матеріалів в ультразвуковому полі", Алма-Ата, 1980 р., Міжнародному симпозиумі з проблеми "Міцність матеріалів та елементів конструкцій при звукових і ультразвукових частотах навантажень", Київ, 1984 р., школі-семінарі "Застосування ультразвукових коливань у технології", Київ, 1982 р., Всесоюзному семінарі "Рентгенодифракційні дослідження об'ємних спотворень у кристалах", Одеса, 1986 р., IV Всесоюзній науково-технічній конференції "Нові конструкційні сталі та сплави й методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів", Запоріжжя, 1989 р., Всесоюзному семінарі "Вплив термоциклічної обробки на структурний стан та механічні властивості металів і сплавів", Київ, 1987 р., Всесоюзному семінарі "Динамічне розсіяння рентгенівських променів у кристалах з динамічними та статичними спотвореннями", Мегрі, Вірменія, 1988 р.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано у 32 роботах, 2 з яких є авторськими свідствами, а 2 - тезами доповідей на конференціях. Усі результати опубліковано в провідних наукових журналах України, колишнього СРСР, а також у збірниках та працях конференцій.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, 7 розділів, закінчення, основних результатів і висновків, переліку використаної літератури та додатку. Роботу викладено на 417 сторінках машинописного тексту, містить у собі 117 малюнків і 11 таблиць. Перелік літератури складається з 369 найменувань вітчизняних та зарубіжних авторів.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі до дисертації обґрунтовано актуальність вибраного напрямку досліджень, сформульовано мету й завдання, відбито наукову новизну, наведено основні положення, що виносяться на захист, наукову та практичну значність отриманих результатів.

У першому розділі дано короткий огляд робіт з впливу термічного циклування та механічного циклування з ультразвуковою частотою на структуру й властивості кристалічних матеріалів. Кожна з цих обробок досить специфічна, але характер зміни властивостей металів після обох обробок багато в чому схожий. Показано, що ультразвукове опромінювання і термоциклічна обробка можуть викликати

зміцнювання відпалених та знеміцнювання попередньо пластично деформованих металів, активують дифузійні процеси у сплавах, викликають релаксацію внутрішніх напружень, а при досить інтенсивних режимах обидві обробки приводять до втомного руйнування матеріалу. За останні роки істотно просунулося розуміння фізичних процесів, зв'язаних з розсіянням енергії високоамплітудних ультразвукових коливань у кристалах. У роботах У.М.Мезона, Н.А. Тяпуніної, В.Ф.Казанцева, Б.Я.Пінеса, І.Ф.Омелянєнка, А.Ф.Сіренка, Б.Лангенеккера, І.А.Гіндіна, І.М.Неклюдова, В.Т.Трошенко, В.П.Северденка, В.В.Клубовича та ін. досліджено внутрішнє тертя, зумовлене рухом та розмноженням дислокацій, виявлено певні особливості дислокаційної структури, що при цьому формується, а також вивчено вплив інтенсивних ультразвукових коливань на деформаційні процеси в металах. На сьогодні склалося уявлення, що розмноження дислокацій у кристалах під впливом інтенсивних ультразвукових коливань відбувається за механізмом Франка-Ріда в усій різноманітності його реалізації в деформаційному процесі (подвійне поперечне ковзання, утворення R-дислокацій, тощо), що й береться за основу при моделюванні мікропроцесів пластичної деформації кристалів в ультразвуковому полі (Н. А. Тяпуніна, В. В. Благовещенький). Проте експериментально недостатньо досліджено відмінність дислокаційних структур, що формуються в умовах стоячої й біжучої ультразвукових хвиль. Дослідженнями А. В. Кулеміна показано, що дифузійні процеси прискорюються ультразвуком, якщо амплітуда змінних напружень перевищує певне порогове значення.

В огляді дано класифікацію термічних напружень, які виникають при термоциклуванні металів та сплавів. Показано, що термоциклічна обробка в оптимальному режимі може викликати збільшення щільності дислокацій у металах і сплавах та їх зміцнення, яке певні автори називають термічним нагартуванням (М.М.Штейнберг, Г.О.Трифонов). Л.В.Тихоновим теоретично показано, що окремі дислокації і малі дислокаційні петлі у процесі термоциклування мають тенденцію пересуватися незалежно від знаку вектора Бюргерса переважно до вільної поверхні, що зв'язано зі значним впливом сил зображення у приповерхневих шарах матеріалу. Це пояснює результати тих експериментальних робіт, де показано, що термоциклування попередньо пластично деформованих металів викликає їх знеміцнювання. Л.В.Тихонов із співробітниками експериментально спостерігали розмноження дислокацій в приповерхневих шарах монокристала Ge за механізмом поперечного ковзання. Відомо, що циклічне теплове навантаження, яке

зупинках і запусках реактивних двигунів, а також при переходах з одного режиму на інший, різко знижує термін роботи лопаток газово-турбінних двигунів (ГТД). У зв'язку з цим дослідження впливу термоциклічної обробки на структуру та властивості жароміцних сплавів, які використовуються для виготовлення лопаток, є особливо актуальним. У роботах вітчизняних та зарубіжних дослідників відзначається, що термічна втома є основною причиною утворення тріщин на соплових та робочих лопатках ГТД. Проте вплив м'якої термоциклічної обробки на структуру та властивості жароміцних нікелевих сплавів досліджено недостатньо. Роботи В. С. Біронта з дослідження впливу ультразвукового опромінювання та термоциклічної обробки на структуру і властивості промислових сталей і сплавів сприяли вдосконаленню технології їх зміцнювальних обробок.

У другому розділі наведено методичні розробки, здійснені автором, що зв'язані як з особливостями ультразвукового опромінювання металів та сплавів у твердому стані, так і рентгеноструктурними дослідженнями (наприклад, макронапружень) в поверхневих шарах напівфабрикатів, деталей та елементів силових конструкцій. Автором розроблено установку для ультразвукового опромінювання металів, у якій на відміну від традиційно використовуваної методики [1] застосовується не один, а два магнітострикційні перетворювачі (типу ПМС-15А-18), розташовані назустріч один одному і приєднаних до одного джерела електромагнітних коливань (ультразвуковий генератор УЗГ-10М). При одночасній роботі обох магнітострикторів у металевий зразок, розташований між ними, через спеціально розраховані хвилеводи потрапляють дві біжучі хвилі, які поширюються назустріч одна одній і, складаючись, утворюють стоячу хвилю. Запропонована схема ультразвукового опромінювання дозволяє суттєво збільшити потужність ультразвуку, що впливає на структуру оброблюваного матеріалу. У випадку роботи тільки одного з перетворювачів другий можна використати як приймач ультразвуку, що пройшов через зразок. При цьому в обмотці зустрічного (приймального) перетворювача за рахунок ефекту зворотної магнітострикції виникає електрична сила, з величини якої можна судити як про постійність інтенсивності ультразвуку в процесі опромінювання, так і про якість акустичного контакту між зразком і хвилеводами. Акустичний контакт забезпечується притисканням голівок зразка до торців ультразвукових хвилеводів з допомогою спеціально розроблених електромагнітних пристроїв, а сила притискання регулюється величиною постійного струму, який живить електромагніти.

Для проведення рентгеноструктурних досліджень, наприклад вимірювань макронапружень в поверхневих шарах окремих деталей (напр., лопаток ГТД), які зазнали різних механічних або термічних обробок (напр., термоциклування) автор сконструював рентгенівську камеру, яку було виготовлено на Київському механічному заводі, де й було її впроваджено (акт впровадження в розділі "Додаток" дисертації). На КМЗ камера використовувалася з рентгенівською трубкою від апарату УРС-0,02 для дослідження макронапружень у певних окремих деталях, а також в елементах конструкції крила (центропланів) при проведенні статичних випробувань літаків. Дослідження впливу ультразвукового опромінювання та термоциклічної обробки на дислокаційну структуру ЦПК-металів проводилось на монокристалах алюмінію та міді. Вирощування монокристалів алюмінію (чистота 99,999 ваг.% Al) здійснювалося за методом Бріджмена на оригінальній установці, яка дозволяла вирощувати монокристали під впливом ультразвуку, а також робити ультразвукове опромінювання вирощених монокристалів при підвищених температурах в умовах вакууму. Вирощування монокристалів міді (чистота 99,9 ваг. %) Cu здійснювалося за методом Чохральського.

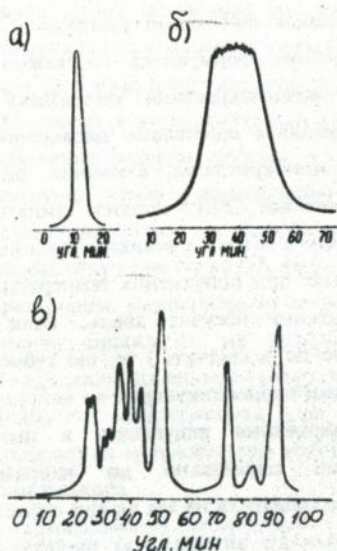
Дослідження дислокаційної структури монокристалів Al та Cu до й після ультразвукового опромінювання та термоциклічної обробки проводили з використанням комплексу рентгенографічних, а також металографічного (з ямок травлення) методів. Одним з основних інструментів рентгенівських досліджень служив двокристалний спектрометр на базі гоніометра ГУР-4. На його основі використовували дифрактометричні методи дослідження: запис кривих хитання, мірювання розподілу дезорієнтацій у різних напрямках. Основними методами вивчення субзернової (блочної) структури були рентгенівська топографія за Бергом-Барретом і метод ямок травлення.

У третьому розділі подано результати дослідження впливу ультразвукового опромінювання та термоциклічної обробки на дислокаційну структуру монокристалів алюмінію й міді.

Перше повідомлення про формування особливої субструктури в монокристалах ЦПК-металів (алюміній) під впливом ультразвуку було зроблено автором цієї дисертації в 1965 р. на Всесоюзній нараді зі зростання металевих монокристалів (м.Київ) [2]. Було показано, що в монокристалах, вирощених під впливом ультразвуку, спостерігається збільшення кількості субмеж, дислокаційних скупчень та істотне збільшення дезорієнтації субзерен порівняно з монокристалами, вирощеними

без впливу. При цьому максимальний ефект спостерігався у тій частині монокристалів, яка була одночасно затравкою вирощуваного монокристала і хвилеводом, через який ультразвукові коливання підводилися до фронту кристалізації, з чого випливало, що спостережуваний ефект виникає при діянні ультразвуку на кристалічну фазу. При цьому дислокаційні скупчення формуються переважно в площинах ковзання, паралельних до напрямку розповсюдження ультразвуку в кристалі. Надалі було показано, що таким же способом орієнтовані дислокаційні скупчення, які мають дифузійний характер, у монокристалах алюмінію після ультразвукового опромінювання з амплітудою деформації  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$  поблизу кімнатної температури. Цей факт, очевидно, зумовлено тим, що у зв'язку з великим згасанням ультразвуку в алюмінії й при кімнатних, і тим більше при підвищених температурах ультразвукове опромінювання відбувається в режимі біжучих хвиль, коли є збільшення дислокацій ультразвуковою хвилею. Про це ж свідчить і те, що субмежі монокристалу, які до опромінювання були орієнтовані перпендикулярно до напрямку розповсюдження ультразвуку, в процесі опромінювання відчувалися в цьому напрямку. Субмежі монокристала, розташовані паралельно до напрямку розповсюдження ультразвуку, мали тенденцію розщеплюватися на дві чи три субмежі. Спостержувані трансформації субмеж, можна пояснити активізацією процесів їх дифузійного переповзання в умовах вакансійного пересичення кристалічних ґрат під впливом ультразвукових хвиль при підвищених температурах. Методом подвійного кристалспектрометра паралельно з опроміненими ультра звуком монокристаллами міді та алюмінію (мал.1) досліджувалися монокристали алюмінію, термоцикловані у жорсткому режимі 803-293 К. Було показано схожість кінетик зростання щільності дислокацій у монокристалах залежно від часу ультразвукового опромінювання (амплітуди деформації  $10^{-4}$ - $8 \cdot 10^{-4}$ ) та від кількості термічних циклів. При цьому для монокристалів міді характерною є залежність щільності дислокацій від часу ультразвукового опромінювання, яка при досить довгому діянні виходить на стадію насичення. При цьому щільність дислокацій на стадії насичення тим вища, чим вища амплітуда деформації при опромінюванні. Для монокристалів алюмінію після досягнення максимуму щільності дислокацій при дальшому збільшенні кількості термоциклів або часу ультразвукового опромінювання спостерігається деяке її зменшення, зв'язане з процесом динамічного повернення в процесі ультразвукового опромінювання або термоциклічної обробки, що зумовлено вищою рухливістю

дислокацій в Al внаслідок високої енергії дефектів пакування. Щільність дислокацій в монокристалах Al і Cu після цих обробок збільшується більш ніж на порядок порівняно з початковим станом (після вирощування).

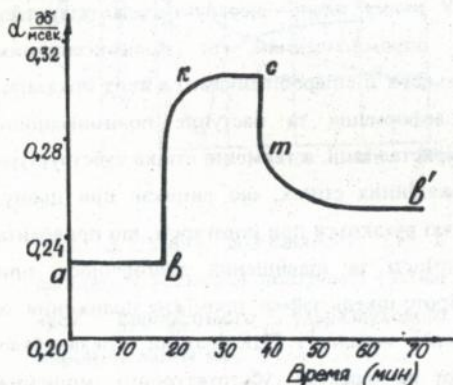


Мал. 1. Криві подвійного відбивання монокристалів Al: а) стан після вирощування б) після опромінення ультразвуком при кімнатній температурі ( $\epsilon=2 \cdot 10^{-4}$ ,  $\tau=30$  хв.) в) після УЗО при 873 К ( $\epsilon \approx 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $\tau=30$  хв.)

Рентгенотопографічним методом Берга-Баррета та методом ямок травлення показано, що зі збільшенням температури й часу ультразвукового опромінювання, як і зі збільшенням кількості термічних циклів посилюється тенденція до створення дислокаційних скупчень та фрагментації монокристалів. При спільній дії ультразвукового опромінювання та статичних напружень, величина яких може бути рівною або істотно нижчою за границю пластичності монокристалів, вибір площин ковзання визначається статичним навантаженням, а роль ультразвуку зводиться до активації процесів ковзання та розмноження дислокацій у площинах ковзання, які проявилися. Проведено дослідження зміни згасання ультразвуку на частоті 10 Мгц в кристалографічному напрямку [100] в процесі ультразвукового опромінювання монокристалів міді й алюмінію на частоті 20 кгц. Показано, що зростання коефіцієнту згасання при включенні інтенсивного ультразвуку та наступної експозиції

опромінюваного монокристалу міді робиться в дві стадії, які характеризуються різкою і повільною з насиченням зміною коефіцієнту згасання (мал.2). При цьому різке збільшення згасання зв'язане, очевидно, з відривом дислокацій від домішкових центрів закріплення і збільшенням довжини осцилюючих дислокаційних сегментів, а повільне збільшення згасання зумовлено зростанням щільності дислокацій у процесі ультразвукового опромінювання кристала. Подібне дослідження на монокристалах алюмінію підвищеної чистоти (Al<sub>5</sub> 99,999) показало відсутність першої стадії зростання коефіцієнту згасання при вмиканні діючого ультразвуку, що, ймовірно, зв'язано зі

зменшенням кількості закріплюючих центрів на дислокаціях. При дослідженні температурної залежності декременту згасання на частотах 5 МГц та 10 МГц



Мал. 2. Зміна коефіцієнта згасання ультразвуку (частота 10 МГц) в монокристалі міді в процесі його опромінювання інтенсивним ультразвуком (частота 20 кгц) ав - до вмикання, вк- в момент увімкнення інтенсивного ультразвуку, ке - в процесі опромінювання ультразвуком, ст - в момент вимкнення ультразвуку, тб - зміна коефіцієнта згасання після вимкнення інтенсивного ультразвуку

монокристалів алюмінію та міді, що зазнали попереднього ультразвукового опромінювання, виявлено максимуми, які зміщуються по температурній осі зі зміною частоти вимірювання. Для опроміненних ультразвуком монокристалів алюмінію максимум спостерігається при 250 К на частоті 5 МГц і при температурі 260 К на частоті 10 МГц. Для опроміненних ультразвуком монокристалів міді максимум спостерігається при 270 К на 5 МГц і при 290 К на 10 МГц. Виявлені максимуми подібні до тих, які спостерігав Бурдоні в деформованих монокристалах ГЦК-металів. Згідно з усталеними уявленнями цей ефект зумовлено термічно активованому подоланню дислокаціями бар'єрів Пайрлса шляхом утворення парних перегинів на дислокаціях. Одержано кількісний збіг енергії активації релаксацийного процесу, визначеної з величини зміщення температурних максимумів у попередньо пластично

деформованих та попередньо опроміненних ультразвуком монокристалах міді (0,12 еВ) та алюмінію (0,1 еВ) в кристалогрфічному напрямку [100].

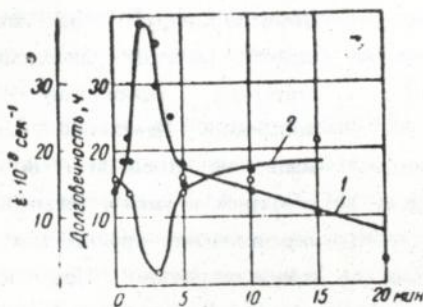
У четвертому розділі подано результати дослідження впливу попередньої пластичної деформації та попереднього ультразвукового опромінювання на опір

повзучості ГЦК-металів, які істотно відрізняються величиною енергії дефектів пакування: міді, алюмінію та твердих розчинів алюміній-магній.

З поглибленням досліджень впливу ультразвуку на субструктуру металів назрівало й ставало все актуальнішим питання про застосування цієї обробки для створення стабільних субструктур у полікристалічних ГЦК-металах для збільшення їх опору високотемпературній повзучості. У цьому плані перспективною здавалася комбінована обробка ультразвуковим опромінюванням та полігонізаційним відпалюванням. Є відомі праці Г.Я.Козирського зі співробітниками, в яких показано, що оптимальна попередня пластична деформація та наступне полігонізаційне відпалювання підвищують температуру рекристалізації, а термічно стійка субструктура у вигляді субмеж і полігональних дислокаційних стінок, що виникає при цьому, становить бар'єрний опір для дислокацій, які рухаються при повзучості, що приводить до зниження швидкості усталеної повзучості та підвищення довговічності при високотемпературній повзучості нікелю. Проте нікель займає проміжне положення за величиною енергії дефектів пакування серед металів з ГЦК-гратами. Цікаво було виявити вплив цього важливого параметру на характер субструктурного зміщення ГЦК-металів, а також зіставити ефективність субструктурного зміщення, одержаного попередньою пластичною деформацією та попереднім ультразвуковим опроміненням.

Для цього як об'єкти дослідження були вибрані мідь, що характеризується низькою енергією дефектів пакування (с.д.п.) та алюміній, що має найбільшу серед ГЦК-металів величину с.д.п.

Показано, що попередня пластична деформація, яка не перевищує 3%, та наступне полігонізаційне відпалювання при 773 К (температура випробування на повзучість) зменшують схильність міді до процесу рекристалізації при повзучості, а субструктура, що виникає при цьому, перешкоджає дислокаціям, які рухаються при повзучості, що підвищує опір міді процесові високотемпературної повзучості. При цьому в області максимального субструктурного зміщення (3% попередньої пластичної деформації) довговічність міді при повзучості порівняно з початковим відпаленим станом зростає в 4 рази, а швидкість усталеної повзучості зменшується в 20 разів (температура випробування 773 К, напруження 15 МПа). Показано також, що попереднє ультразвукове опромінювання в оптимальному режимі та наступне полігонізаційне відпалювання такж сповільнюють процес рекристалізації й формують субструктуру, що знижує швидкість усталеної повзучості міді. При цьому

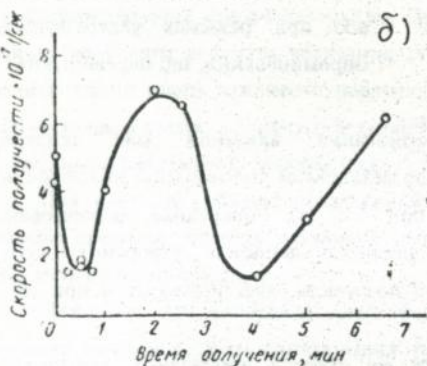
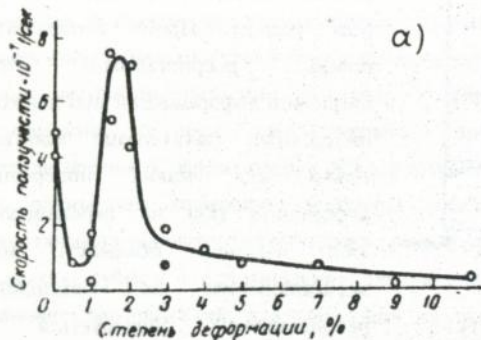


Мал. 3. Зміна довговічності (1) а швидкості усталеної повзучості (2) від часу попереднього ультразвукового опромінювання міді.

довговічність міді при повзучості зростає в 3 рази, швидкість усталеної повзучості знижується в 7,5 раза (мал.3). Проте сповільнити процес рекристалізації при нагріванні деформованої міді шляхом попередньої полігонізації вдається тільки для малих попередніх деформацій (які не перевищують 3%), оскільки схильність міді знеміцнюванню за механізмом рекристалізації збільшується зі збільшенням попередньої деформації або при режимах ультразвукового опромінювання, що перевищують

оптимальний. Навпаки, слабо деформований алюміній має тенденцію знеміцнюватися при нагріванні переважно за механізмом полігонізації, внаслідок чого досить повна полігонізація (1 година при 533 K) попередньо деформованого (опроміненого ультразвуком) алюмінію повністю запобігає утворенню центрів рекристалізації в процесі випробування на повзучість, яке проводиться при тій же температурі.

Уперше показано, що в залежності від ступеня попередньої деформації в алюмінії виникає дві області субструктурного зміцнення, розділених областю знеміцнення (мал. 4а). Першу область зміцнення зумовлена клітинною дислокаційною структурою, що формується в Al вже при малих ступенях попередньої пластичної деформації (~1%) та наступному полігонізаційному відпалюванні. Проте із збільшенням ступеня пластичної деформації в Al різко зростають концентрації надлишкових вакансій, що приводить до пересичення вакансіями кристалічних ґрат, про що свідчить велика кількість призматичних дислокаційних петель. В умовах вакансійного пересичення кристалічних ґрат клітинна дислокаційна структура стає нестійкою й розпадається при нагріванні, що проявляється у різкому зростанні швидкості усталеної повзучості (область знеміцнення). Друга область субструктурного зміцнення алюмінію (при ступенях попередньої деформації, що перевищують 2%)



Мал. 4. Залежність швидкості усталеної повзучості алюмінію від міри попередньої деформації (а) та від часу попереднього ультразвукового опромінювання (б).

зв'язана з появою бар'єрів Ломмера-Коттрела, які закріплюють клітинну дислокаційну структуру, сформовану при попередній пластичній деформації, не дозволяючи їй розповзтися в умовах вакансійного перенасичення кристалічних ґрат при нагріванні. При цьому швидкість усталеної повзучості в першій області субструктурного зміцнення в 6 разів, а в другій області в 15 разів нижча, ніж у початковому відпаленому стані. Спостережувану для Al залежність субструктурного зміцнення від ступеня попередньої деформації виявлено вперше. У зв'язку з цим необхідно відзначити, що в процесі попередньої деформації дислокаційні бар'єри Ломмера-Коттрела створюються й у міді. Проте випереджувальний знеміцнювальний вплив рекристалізації при нагріванні деформованої (або опроміненої ультразвуком) міді

не дозволяє їм проявитися при повзучості.

Встановлено, що попереднє ультразвукове опромінювання та наступне полігонізаційне відпалювання Al також приводить до формування структурних станів, що викликають залежно від часу опромінювання, першу та другу області субструктурного зміцнення, розділених піком знеміцнення (мал. 4б). При цьому швидкість усталеної повзучості в першій області в 3 рази, в другій в 4 рази нижча, ніж у початковому стані. Проте, на відміну від попередньо пластично деформованого в

опромінену ультразвуком алюмінії накопичуються втомні пошкодження (субмікротріщини), які при наступному випробуванні на повзучість прискорюють процес повзучості, що приводить до звуження другої області субструктурного зміцнення.

Досліджено вплив попередньої пластичної деформації різного ступеня та наступного полігонізаційного відпалювання на опір повзучості рівноважних твердих розчинів Al-1,9 ваг.% Mg та Al-3,2 ваг.% Mg. Показано, що залежність швидкості усталеної повзучості від ступеня попередньої деформації аналогічна такій залежності для чистого алюмінію, але зміщена в бік малих ступенів попередньої пластичної деформації. При цьому зміщення тим більше, чим вищим є вміст магнію в алюмінії (у межах розчинності). Спостережуваний ефект зміщення пояснюється тим, що атомний радіус розчиненого елемента (Mg) істотно (на 14%) перевищує атомний радіус елемента матриці. Останнє є причиною утворення в процесі попередньої пластичної деформації атомно-вакансійних комплексів, які при нагріванні дисоціюють, викликаючи вакансійне пересичення кристалічних ґрат та прискорення процесу повзучості.

П'ятий розділ присвячено дослідженню впливу ультразвукового опромінювання на структуру та дисперсійне тверднення бінарних старіючих сплавів на основі міді та алюмінію Cu-3,5 ваг.% Ti та Al-2,8 ваг.% Li, які відрізняються параметром структурної невідповідності кристалічних ґрат фази виділення й матриці.

Вперше проведено дослідження дії ультразвуку на стан когерентних міжфазних меж. Для такого дослідження сплав Cu-3,5 ваг.% Ti особливо зручний, бо він відноситься до того типу старіючих сплавів, на рентенограмах яких разом з бреггівськими рефlekсами наявні додаткові дифузні максимуми-сателіти, появу яких зумовлено створенням у процесі розпаду твердого розчину когерентних виділень.

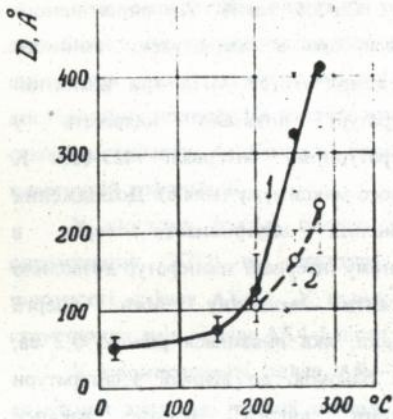
Порушення когерентної спряженості виділень надлишкової фази з матрицею (тобто поява дислокаційної міжфазної межі) приводить до зникнення сателітів та появи дифракційної лінії, проміжної тетрагональної  $\alpha'$ -фази, що відбувається при підвищених температурах, де термічно активовані дифузійні процеси сприяють виділенню цієї фази.

Показано, що ультразвукове опромінювання з амплітудою деформації  $\sim 10^{-3}$  при температурах, близьких до кімнатної, де дифузійні процеси загальмовано, викликає зрив когерентності, який відбувається за механізмом мікрозсуву в найнапруженіших

ділянках кристалографічних ґрат, якими є когерентні міжфазові межі, якщо рівень когерентних напружень досить високий. Рівень когерентних напружень визначається параметром структурної невідповідності кристалічних ґрат матриці та фази виділення  $\delta_m = \frac{\Delta a}{a} = 2 \frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2}$ , де  $d_1$  і  $d_2$  - міжплощинні віддалі кристалічних ґрат фази виділення та матриці відповідно. У сплавi Cu-3,5 ваг.% Тi величина параметру невідповідності є великою,  $\delta_m=1,9\%$  [3], що дозволяє шляхом попереднього старіння при різних температурах одержати структурні стани з різко зростаючим зі збільшенням розмірів когерентних виділень рівнем когерентних напружень. Експеримент показав, що ультразвук з амплітудою деформації  $\sim 10^{-3}$  не приводить до порушення когерентності виділень розміром  $\sim 35\text{А}$  та  $80\text{А}$ , але викликає зрив когерентності виділень розміром  $120\text{А}$  (величина когерентних напружень для виділень цього розміру  $\sim 400\text{МПа}$ ), при цьому на рентгенограмах зникають сателіти й з'являється дифракційна лінія проміжної тетрагональної  $\alpha'$ -фази. Зрив когерентності супроводиться різким збільшенням щільності дислокацій та 20% збільшенням твердості сплаву. Цей результат цікавий тим, що спонтанна втрата когерентності (без будь-яких зовнішніх впливів) відбувається при набагато вищих температурах в інтервалі 743-773 К, де термічно активовані дифузійні процеси сприяють виділенню проміжної тетрагональної  $\alpha'$ -фази.

Показано, що ультразвукове опромінювання загартованого сплаву Cu-3,5ваг.% Тi в температурному інтервалі 743-773 К активує дифузійні процеси, прискорюючи зростання частинок проміжної тетрагональної  $\alpha'$ -фази. Одночасно з цим ультразвук прискорює релаксацію когерентних напружень, яка в цьому випадку відбувається шляхом генерації та термо-акустично активованого перерозподілу дислокацій у полі діючих когерентних напружень, у результаті чого формується сильно фрагментована структура матричної фази, що добре фіксується методом мікродифракції електронів. Значну величину твердості сплаву в цьому стані ( $H_v=4500\text{МПа}$ ), зумовлено ймовірно адитивним зміцнюючим впливом дислокаційних субмеж та самих частинок  $\alpha'$ -фази. Традиційні механіко-термічні та термомеханічні методи зміцнення сплаву Cu-4ваг.%Тi приводять до збільшення його твердості до 3500 МПа.

На відміну від сплаву Cu-3,5 ваг.% Тi параметр структурної невідповідності кристалічних ґрат матричної та надлишкової інтерметалічної  $\delta'$ -фази ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ) сплаву Al-2,8 ваг.% Li дуже малий  $\delta_m=0,08\%$ . А тому в процесі зростання когерентних виділень при різних температурах старіння рівень когерентних напружень низький, а



Мал. 5. Залежність середнього розміру частинок  $\delta'$ -фази в сплаві Al-2,8 ваг.% Li від температури старіння у зразках, зістарених звичайно (1) та під впливом ультразвуку (2). Час старіння при кожній температурі  $\tau=15$  хв.

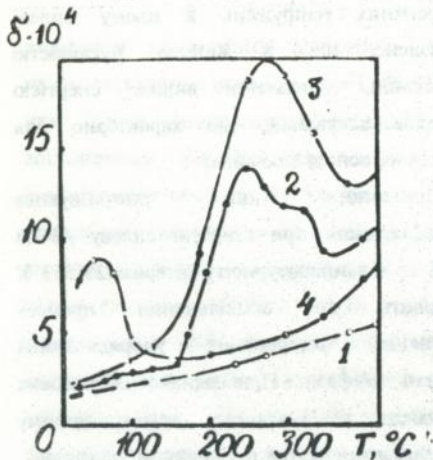
їх релаксація під впливом ультразвукового опромінювання не приводить до істотного приросту щільності дислокацій і збільшення мікротвердості сплаву. До того ж, релаксацію когерентних напружень в цьому сплаві полегшено ще й вищою рухливістю дислокацій, зумовленої вищою енергією дефектів пакування, що характерно для сплавів на основі алюмінію.

Показано, що ультразвукове опромінювання при старінні сплаву Al-2,8 ваг.% Li в температурному інтервалі 23-553 К приводить до сповільнення процесу коагуляції когерентних упорядкованих виділень  $\alpha'$ -фази. При однакових часових витримках у вказаному температурному інтервалі в зістарених під впливом ультразвуку

ку зразках розмір виділень виявляється в 1,4-2,3 рази меншим порівняно зі станом, одержаним старінням без ультразвукового впливу (мал.5). Останнє, очевидно, зумовлено прискороною ультразвуком релаксацією когерентних напружень, які є рушійною силою процесів зростання й коагуляції когерентних виділень. Зменшення схильності когерентних виділень до процесу коагуляції при підвищених температурах є свідченням стабілізації структурного стану сплаву та стабілізуючого характеру ультразвукового впливу на старіючі сплави.

Явище релаксації когерентних напружень та зникнення в зв'язку з цим ефекту аномального розсіяння рентгенівських променів спостерігалось нами також після ультразвукового опромінювання аустенітної сталі X16H11M3 [4] з когерентними виділеннями фази  $Ni_3Mo$ .

Методом внутрішнього тертя виявлено деякі характерні особливості структурного стану, що виникають після ультразвукового опромінювання загартованого сплаву Cu-3,5ваг.% Ti, які відрізняють його від структурного стану, що виникає після односпрямованої пластичної деформації. Дослідження методом резонансних вигинних коливань температурної залежності тертя загартованого



Мал. 6. Температурна залежність внутрішнього тертя сплаву Cu-3,5 ваг.% Тi після різних обробок: 1 - гартування; 2 - гартування + УЗО  $\sigma=150$  МПа, час опромінювання  $\tau=10$  хв; 3 - гартування + УЗО  $\sigma=150$  МПа,  $\tau=18$  хв; 4 - гартування + деформація розтягання на 5 %.

сплаву Cu-3,5 ваг.% Тi, опроміненого ультразвуком з амплітудою змінного напруження  $\sigma=150$  МПа при кімнатній температурі показало наявність у температурному інтервалі 423-623 К більшого максимуму (мал.6). Дослідження повернення внутрішнього тертя в указаному інтервалі температур дозволило обчислити величину його енергії активації, яка виявилася рівною 0,2 еВ, що є близькою до відомої з літератури величини енергії зв'язку вакансії кристалічних ґрат твердого розчину на основі міді з легувальним атомом титану. Утворення атомно-вакансійних комплексів у твердих розчинах заміщення можливе при певних умовах. Однією з таких умов має бути істотна відмінність атомних радіусів матричного й легувального елементів. Для сплаву Cu-Ti ця умова виконується, оскільки атомний радіус Тi на 14% перевищує радіус Cu.

Перебуваючи в кристалічних ґратах твердого розчину атом Тi створює навколо себе поле пружних спотворень. Поява поблизу такого атома вакансії приводить до часткової релаксації цих спотворень, що робить утворення подібних комплексів енергетично вигідним [5]. Другою обов'язковою умовою утворення атомно-вакансійних комплексів є достатня кількість надлишкових вакансій, що й забезпечується попереднім ультразвуковим опромінюванням. Під впливом змінних напруг, що виникають у зразку при вимірюванні внутрішнього тертя методом резонансних вигинних коливань та при умові необхідної термічної активації (максимум спостерігається в температурному інтервалі 423-623 К), атомно-вакансійні комплекси здатні переорієнтуватися, викликаючи релаксацію діючих напружень та збільшення внутрішнього тертя.

При температурах, вищих від указанного інтервалу, атомно-вакансійні комплекси дисоціюють, що приводить до зниження внутрішнього тертя. Подібні максимуми не виникають після односпрямованої пластичної деформації, що виключає його дислокаційну природу. Це означає також, що ультразвукове опромінення сплаву Cu-Ti створює дефекти особливого типу, які не утворюються при односпрямованій пластичній деформації.

У шостому розділі подано результати дослідження впливу ультразвукового опромінення (УЗО) на структуру, кінетику дисперсійного тверднення та опір повзучості сплаву АК4-1. У цьому розділі подано також результати дослідження структурних змін сплаву АК4-1 після термоциклічної обробки в різних режимах.

У промисловості сплав АК4-1 використовується для виготовлення поршнів дизельних двигунів, голівок циліндрів та інших деталей, призначених для роботи в умовах підвищених температур (523-573 К). Складнолегований сплав АК4-1 створено на базі системи Al-Cu-Mg, де зміцнювальна напівкогерентна s'-фаза ( $\text{CuAl}_2\text{Mg}$ ) виділяється при старінні за гетерогенним механізмом переважно на дефектах пакування. Кінетика дисперсійного тверднення проводилась методом вимірювання мікротвердості. Термоультразвукова обробка сплаву проводилась за двома схемами:

1. гартування - УЗО при температурі 2293 К - старіння при 458 К;
2. гартування - старіння під дією ультразвуку при різних температурах.

Встановлено, що ультразвукове опромінювання з амплітудою змінного напруження  $\sigma=150$  МПа загартованого дисперсійно-твердіючого сплаву АК4-1 при кімнатній температурі збільшує щільність дислокацій у ньому. Електронно-мікроскопічні дослідження виявляють також велику кількість гелікоідальних дислокацій та призматичних дислокаційних петель, що свідчить про вакансійне пересічення кристалічних ґрат опроміненого сплаву. Показано, що попереднє ультразвукове опромінювання у вказаному режимі істотно прискорює процес і підвищує рівень дисперсійного тверднення при наступному старінні при температурі 458 К (перша схема обробки) (мал.7). Подібна обробка сплаву АК4-1 істотно збільшує його опір повзучості при 573 К та напруженні навантаження 50 МПа. При цьому існує оптимальна тривалість ультразвукового опромінювання, що дорівнює 4 хв., при якому довговічність сплаву збільшується у 2 рази порівняно з довговічністю після стандартної термообробки, яка включає загартування і старіння. Для практичного використання цього ефекту важливо те, що збільшення довговічності

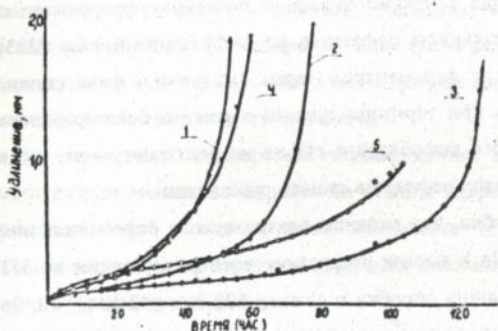


Мал. 7. Залежність мікротвердості сплаву АК4-1, загартованого від 803 К від часу штучного старіння при температурі 458 К:  
 1 - без попереднього опромінювання ультразвуком;  
 2 - попереднє опромінення  $\sigma \approx 150$  МПа, час 3 хв;  
 3 - попереднє опромінення  $\sigma \approx 150$  МПа, час 10 хв.

більшої субструктури, здатної збільшити опір високотемпературній повзучості сплаву.

Досліджено вплив тривалості ультразвукового опромінювання з амплітудою змінного напруження 150 МПа на величину мікротвердості загартованого сплаву АК4-1 при температурах 293 К, 353 К, 403 К та 458 К (друга схема обробки). Показано, що максимальний приріст мікротвердості спостерігається при 403 К. Очевидно, ця температура є оптимальною для дисперсійного тверднення сплаву під впливом ультразвуку в указаному режимі. Оскільки природне старіння в цьому сплаві не відбувається, певний приріст мікротвердості при 293 К може бути зв'язаним зі збільшенням щільності дислокацій та призматичних дислокаційних петель. Ультразвукове опромінювання загартованого сплаву АК4-1 при 458 К приводить до збільшення довговічності при випробуванні на повзучість на 30%, при чому пластичність сплаву не погіршується. На відміну від обробки за першою схемою тут частинки  $\delta'$ -фази виділяються на дислокаціях під впливом ультразвуку, внаслідок чого відбувається релаксація когерентних напружень, що стабілізує структурний стан,

сплаву АК4-1 робиться за рахунок збільшення тривалості усталеної стадії повзучості (мал.8). Логіка першої схеми обробки полягає в тому, що дислокації та призматичні дислокаційні петлі, які з'явилися при ультразвуковому опромінюванні сплаву АК4-1 у загартованому стані, стають у процесі штучного старіння при 458 К додатковими місцями зародження зміцнювальної інтерметалідної  $\delta'$ -фази, внаслідок чого збільшується кількість частинок  $\delta'$ -фази, які закріплюють свіжегенеровані дислокації, що у комплексі приводить до формування ста-



Мал. 8. Криві повзучості сплаву АК4-1:

- 1 - гартування + штучне старіння при 458 К, 12 годин → стандартна термообробка;
- 2 - гартування + УЗО при 293 К, 3 хв. + штучне старіння при 458 К, 12 годин;
- 3 - гартування + УЗО при 293 К, 4 хв. + штучне старіння при 458 К, 12 годин;
- 4 - гартування + УЗО при 293 К, 6 хв. + штучне старіння при 458 К, 12 годин;
- 5 - гартування + УЗО при 293 К, 9 хв. + штучне старіння при 458 К, 12 годин.

розділені на 3 партії. Зразки з кожної партії термоцикувались за одним з таких режимів:

1. 573 К - 293 К, швидкість нагрівання 70 град/хв, охолодження у воді 293 К;
2. 673 К - 293 К, швидкість нагрівання 115 град/хв, охолодження у воді 293 К;
3. 803 К - 293 К, швидкість нагрівання 160 град/хв, охолодження у воді 293 К.

Відзначені режими відрізняються максимальною температурою термічних циклів, зі збільшенням якої зростає як термічна активація процесів повернення на стадії нагрівання, так і рівень термічних напружень, що виникають у сплаві внаслідок температурних градієнтів на стадії охолодження при термоцикуванні сплаву, оскільки зі збільшенням максимальної температури циклу збільшується й швидкість охолодження сплаву.

Структура сплаву АК4-1 після стандартної термообробки та термоцикування досліджувалась металографічним і рентенографічним (обернене знімання) методами.

підвищує стійкість дисперсних виділень  $\delta'$ -фази до процесу коагуляції при підвищених температурах.

Оскільки багато деталей, виготовлених зі сплаву АК4-1, експлуатуються в умовах термоцикування, цікаво було дослідити характер структурних змін після термоциклічної обробки, здійснюваної в різних режимах. За початковий був прийнятий стан після стандартної термообробки, що включала гартування від температури 803 К та штучне старіння при 458 К впродовж 12 год. Усі зразки були термооброблені за цим режимом, після чого вони були

Установлено, що після термоцикування в режимі 573 К - 293 К спостерігається укрупнення і зменшення кількості рефлексів на дифракційній лінії (333), що, мабуть, зв'язано з процесом вторинної рекристалізації термоцикування в жорсткішому режимі 673 К - 293 К викликає поряд з рекристалізацією додаткову фрагментацію зерен, про що свідчить збільшення кількості рефлексів на дифракційній лінії (333) порівняно з початковим станом. Ефект фрагментації зерен матричної фази сплаву АК4-1 особливо сильно проявляється при термоцикуванні в режимі багаторазового гартування 803 К - 23 К, внаслідок чого дифракційні кільця на рентгенограмах, що в початковому стані складаються з окремих рефлексів стають суцільними.

Показано, що комбінована обробка, яка включає ультразвукове опромінювання з амплітудою напруження 100-120 МПа в умовах ультразвукового розігрівання до 373 К продовж 5 хв та наступну термоциклічну обробку в режимі 673 К - 932 К (3, 10, 25 термоциклів) приводить до сильно вираженої сфероїдизації й коагуляції частинок надлишкової фази. Таке швидке збільшення частинок надлишкової фази при термоцикуванні попередньо опроміненого ультразвуком сплаву АК4-1 зв'язане з активізацією дифузійних процесів у зв'язку з різким зростанням концентрації надлишкових вакансій при ультразвуковому опромінюванні. Спостережувані великі частинки розташовуються на міжзернових межах, які є стоками для надлишкових вакансій.

Збільшення міри розпаду  $\beta$ -фази поблизу меж зерен спостерігалось нами також при комбінованій обробці, що включає попереднє ультразвукове опромінювання та наступне термоцикування титанового сплаву ВТ22 [6].

Сьомий розділ присвячено дослідженню впливу м'якої термоциклічної обробки та ультразвукового опромінювання на структурний стан та властивості жароміцного литого нікелевого сплаву ВЖЛ-12У, що використовується для виготовлення лопаток газотурбінних двигунів.

Довговічність та експлуатаційна надійність робочих лопаток газотурбінних двигунів (ГТД) є основними факторами, що визначають рівень сучасного авіаційного двигунобудування. Однією з причин, які стримують застосування високоміцних матеріалів у цій галузі є їх низький запас пластичності. Багатокомпонентне легування підвищує механічні характеристики жароміцних сплавів, але одночасно зі зміцненням, як правило, збільшується їх крихкість. Для литих сплавів положення ускладнюється наявністю великої кількості ливарних мікропор, які є головним

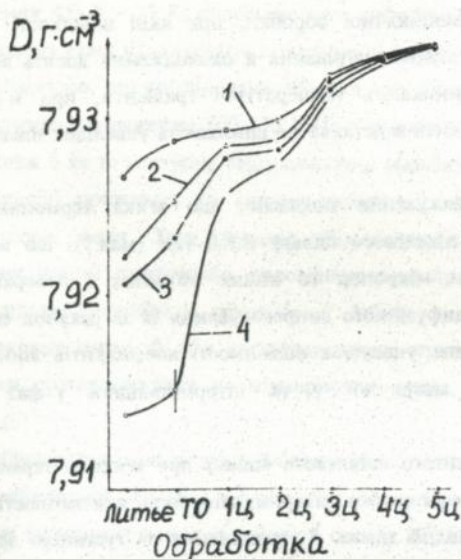
фактором пошкоджуваності лопаток у процесі їх експлуатації. Присутність пор у матеріалі зумовлює наявність розвинутої вільної поверхні та підвищеної поверхневої енергії, що є причиною нестабільності структурного стану. Коагулюючи при робочих температурах у процесі експлуатації двигуна, мікропори можуть прискорити утворення мікротріщин, їх поширення й наступне руйнування лопатки, а тому стабілізація структурного стану й боротьба з випадковими дефектами, якими є ливарні мікропори, набирає особливо великого значення.

На відміну од жорсткої термоциклічної обробки, при якій швидкості зміни температури металевих виробів на стадіях нагрівання й охолодження досить великі, внаслідок чого в цих виробках виникають температурні градієнти, при м'якому термоциклуванні температурні градієнти в деталях не виникають унаслідок плавнішої зміни температури виробу.

Методом гідростатичного зважування показано, що м'яка термоциклічна обробка підвищує густину литого нікелевого сплаву ВЖЛ-12У (мал.9), що можна пояснити заліковуванням ливарних мікропор та інших об'ємних і поверхневих дефектів структури шляхом в'язко-дифузійного випресовування їх за рахунок енергії міжфазних напружень, які виникають унаслідок відмінності коефіцієнтів лінійного термічного розширення (КЛТР) матричної  $\gamma$  та інтерметалідної  $\gamma'$ -фаз при термоциклуванні.

Величина приросту густини литого нікелевого сплаву при м'якому термоциклуванні залежить від величини об'ємної частки ливарних мікропор, яка змінюється зі зміною режиму кристалізації. Як видно з мал. 9, розкидання за густиною зразків сплаву ВЖЛ-12У в початковому стані (після лиття) є істотним. Зі збільшенням кількості термоциклів величини густини зразків прямують до одного значення. У зв'язку з цим приріст густини сплаву внаслідок м'якого термоциклування коливається в інтервалі 0,1 - 0,3%. В ході в'язко-дифузійного випресовування ливарних мікропор завжди існує оптимальна кількість мікроциклів  $n$ , після якої настає  $(n+1)$ -ий термоцикл, коли міжфазні напруження, що виникають унаслідок відмінності КЛТР, матричної  $\gamma$  та інтерметалідної  $\gamma'$ -фаз, викликають уже не тільки ущільнення матричної фази, але й її деформацію, різко збільшуючи щільність дислокацій, що дестабілізує структурний стан при високих температурах.

Дослідження, проведені методами електронної мікроскопії, внутрішнього тертя, дюрометрії, а також випробування на високотемпературну повзучість показали, що оптимальне число термоциклів залежить від початкового стану (розміру частки  $\gamma'$ -



Мал. 9. Вплив ТЦО на зміну густини сплаву ВЖЛ-12У; 1, 2, 3, 4 - криві зразків з істотно різною густиною в початковому стані (стан після лиття).

жує опір високотемпературній повзучості сплаву. Якщо ж початковим є стан з мінімальними розмірами частинок  $\gamma'$ -фази ( $\sim 0,3$  мкм, стан після лиття), процес ушілення зі збільшенням числа термоциклів відбувається плавніше. При цьому на момент закінчення процесу випресовування мікропор частинки зберігають когерентність з кристалічними ґратами матричної фази. Показано, що довговічність при випробуванні на високотемпературну повзучість термоциклованого таким способом сплаву ВЖЛ-12У підвищується в середньому на 50% порівняно з довговічністю сплаву в стані після стандартної обробки, яка включає гартування та

фази) сплаву. Якщо початковим є стан після комплексу термообробок, коли розміри частинок та об'ємна частка зміцнювальної інтерметалідної  $\gamma'$ -фази досить великі, то процес випресовування ливарних мікропор при м'якому термоциклуванні відбувається досить швидко. Маючи досить великі розміри вже в початковому стані, частинки інтерметалідної  $\gamma'$ -фази продовжують збільшуватись у процесі термоциклування. При цьому їхній розмір може перевищити величину  $\sim 0,7$  мкм, при якій виділення  $\gamma'$ -фази (втрачають когерентність з кристалічними ґратами матричної фази, що зни-

старіння сплаву. Спостережуваний ефект збільшення довговічності пояснюється заліковуванням при м'якому термоциклуванні ливарних мікропор та інших об'ємних і поверхневих мікродфектів структури, які можуть прискорити утворення мікротріщин і руйнування зразка при випробуванні на повзучість. А тому максимум збільшення довговічності при високотемпературній повзучості сплаву збігається з максимумом його високотемпературної пластичності, яка змінюється залежно від кількості термоциклів. Крім того, процес випресовування мікропор при м'якому термоциклуванні приводить до зменшення питомого об'єму матричної фази, а отже, до релаксації міжфазних напруг, що стабілізує структурний стан і також підвищує довговічність сплаву.

Дослідження амплітудної залежності внутрішнього тертя сплаву ВЖЛ-12У методом резонансних вигинних коливань показало, що м'яка термоциклічна обробка приводить до підвищення закріплення дислокацій, що проявляється у збільшенні критичної амплітуди деформації відриву дислокацій від центрів закріплення із зростанням кількості термоциклів. У процесі дослідження виявлено два типи закріплювальних центрів, відрив дислокацій від яких відбувається при різних амплітудах деформації. Висловлено припущення, що як слабкі центри закріплення виступають домішкові атоми, а як сильні - частинки карбідної фази, що виділяється в процесі витримки при максимальній температурі циклу.

Збільшення власної резонансної частоти зразків, яке спостерігається при дослідженні внутрішнього тертя сплаву ВЖЛ-12У, що зазнав попередньої м'якої термоциклічної обробки, свідчить про зростання модуля пружності сплаву на 1-3%, що може бути зв'язаним як з підвищенням його густини, так і зі збільшенням закріплення дислокацій частинками карбідної фази.

Механічні випробування на розрив, які було проведено при температурах 293 К і 1223 К показали певне зростання границі плинності сплаві ВЖЛ-12У зі збільшенням кількості термоциклів, що також свідчить про збільшення закріплення дислокацій частинками карбідної фази, яка виділяється на стадії витримки при максимальній температурі циклу. Електронно-мікроскопічне дослідження підтвердило збільшення кількості частинок карбідної фази, що конденсуються на дислокаціях зі збільшенням кількості термоциклів.

Відомо, що втомна міцність металів є структурночутливою характеристикою. У зв'язку з цим було цікаво з'ясувати вплив збільшення щільності сплаву ВЖЛ-12У, зумовленого заліковуванням поверхневих та об'ємних мікродфектів структури при

м'якому термоциклуванні на втомну міцність реальних деталей, а саме робочих лопаток ГТД, які містять значну кількість ливарних мікропор, які є основним фактором пошкоджуваності лопаток у процесі експлуатації авіаційного двигуна. Дослідження втомної міцності лопаток ГТД проводилось за стандартною методикою (ОСТ 1.00870-77). Усього було випробувано 33 лопатки, з них 16 зазнали стандартної термообробки, а 17 - триразового термоциклування. Випробування показали, що при однаковій величині змінного напруження, яка дорівнює 230 МПа, втомна довговічність (за кількістю циклів навантаження) термоциклованих лопаток перевищила довговічність лопаток після стандартної термообробки у 10 і більше разів.

Згідно з сучасними уявленнями втомне руйнування металів відбувається в дві стадії. На першій стадії незворотні деформаційні процеси викликають збільшення щільності дислокацій та підвищення концентрації надлишкових вакансій, що приводить до створення мікротріщин; на другій стадії відбувається переростання мікротріщин у макротріщини та їх поширення до повного руйнування виробу [7]. Очевидно, що присутність мікропор прискорює протікання як першої, так і другої стадії втомного руйнування матеріалу. Збільшення щільності жароміцних литих нікелевих сплавів за рахунок випресовування ливарних мікропор у процесі м'якого термоциклування дозволяє істотно підвищити довговічність та надійність лопаток ГТД.

Аналогічні результати одержано на жароміцному литому нікелевому сплаві **ЖС6-У**. Щоб підкреслити значущість останнього результату, треба нагадати, що більша частина авіаційних катастроф відбувається через неполадки в двигуні, найуразливішою ланкою якого є лопатки турбіни ГТД. Тому стабілізація структурного стану та боротьба з випадковими дефектами, якими є ливарні мікропори, набирає особливо великого значення. Показано, що ультразвукове опромінювання з амплітудою деформації  $\sigma \cdot 10^{-3}$  в температурному інтервалі 973-1023 К сплаву ВЖЛ-12У приводить до зниження його густини, що зв'язано зі збільшенням концентрації надлишкових вакансій та кількості дефектів, що виникли при їх конденсаціях (призматичні дислокаційні петлі, субмікропори, тощо). Електронно-мікроскопічне дослідження опроміненого ультразвуком сплаву ВЖЛ-12У показало наявність великої кількості призматичних дислокаційних петель поблизу міжфазних  $\gamma'/\gamma$ -меж, які є стоками для надлишкових вакансій, що свідчить про вакансійне пересичення кристалічних ґрат матричної  $\gamma$ -фази.

Показано, що ультразвукове опромінювання викликає стабілізацію деяких структурних станів сплаву ВЖЛ-12У. Рівень когерентних напружень у сплавах цього класу є малим унаслідок невисоких значень параметрів структурної невідповідності ( $\delta_m \approx 0,05$ ). Проте ці сплави містять понад 50% зміцнювальної інтерметалідної  $\gamma'$ -фази, коефіцієнт лінійного термічного розширення (КЛТР) якої істотно відрізняється від коефіцієнта матричної  $\gamma$ -фази. Термічні міжфазні напруження, що виникають при цьому, зростають зі збільшенням розмірів виділень  $\gamma'$ -фази.

Установлено, що попереднє ультразвукове опромінювання в температурному інтервалі 973-1023 К сплаву ВЖЛ-12У з крупними виділеннями  $\gamma'$ -фази (0,8-0,9 мкм) приводить до істотного приросту довговічності при високотемпературній повзучості (на -30%), у той час як ультразвукове опромінювання в тому ж режимі цього сплаву в стані після лиття з мінімальними розмірами виділень  $\gamma'$ -фази (-0,3 мкм) не дає приросту довговічності при високотемпературній повзучості сплаву.

У закінченні узагальнюються дані дослідження структури і властивостей ГЦК-металів та сплавів на їх основі після зміцнюючого й стабілізуючого впливу ультразвукового опромінювання й термоциклічної обробки а також обговорюються пріоритетність і значущість одержаних результатів. Накреслено перспективні напрямки наступних досліджень.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Встановлено схожість кінетик зростання щільності дислокацій в монокристалах ГЦК-металів залежно від часу ультразвукового опромінювання з амплітудами деформацій, які перевищують певну порогову, й кількості термоциклів, здійснюваних у жорсткому режимі (наприклад, у режимі багаторазового гартування). Показано, що зі збільшенням тривалості опромінювання й підвищенням температури, при якій відбувається ультразвукове опромінювання, так і зі збільшенням кількості циклів при термоцикуванні посилюється тенденція до формування дислокаційних скупчень і фрагментації монокристалів.

2. Установлено, що попереднє ультразвукове опромінювання в оптимальному режимі (як і оптимальна міра пластичної деформації, яка дорівнює 3%) з наступною полігонізацією знижують схильність до рекристалізації міді, яка має низьку енергію дефектів пакування, а термічно стійка субструктура, що формується при вказаних попередніх обробках, підвищує її опір високотемпературній повзучості. При цьому в разі попереднього ультразвукового опромінювання в оптимальному режимі

довговічність міді зростає в 3 рази, а в разі оптимальної попередньої деформації - в 4 рази (температура випробування 773 К, напруження 15 МПа). При ультразвуковому опромінюванні в режимах, які перевищують оптимальні (як і при пластичній деформації, яка перевищує оптимальну) сповільнити процес рекристалізації при вказаному режимі випробування не вдається, що приводить до знеміцнювання.

3. Установлено, що залежно від міри попередньої пластичної деформації (від часу ультразвукового опромінювання в оптимальному режимі) в алюмінії, якій має високу енергію дефектів пакування, існують дві області субструктурного зміцнення, що характеризуються 6- та 15-разовим зниженням швидкості усталеної повзучості, розділених областю знеміцнення, де швидкість усталеної повзучості в 1,6 раза перевищує повзучість у відпаленому стані (температура випробування 533 К, напруження 9,6 МПа). Особливість субструктурного зміцнення, викликаного попереднім ультразвуковим опромінюванням, полягає в тому, що втомні пошкодження (субмікротріщини), які виникають у процесі ультразвукового опромінювання, знижують опір повзучості алюмінію, звужуючи другу область субструктурного зміцнення.

4. Досліджено вплив ультразвукового опромінювання на стан когерентних міжфазних меж. На старіючому сплаві Cu-3,5% Ti показано, що ультразвукове опромінювання з амплітудою деформації  $\sim 10^{-3}$  при температурах, близьких до кімнатних, де дифузійні процеси загальмовано, викликає зрив когерентності (на рентгенограмах зникають сателіти й з'являється дифракційна лінія від проміжної  $\alpha'$ -фази), який відбувається за механізмом мікросузу в найнапруженіших ділянках кристалічних ґрат твердого розчину, якими є когерентні міжфазні межі, якщо рівень когерентних напружень є досить високим. Спонтанна втрата когерентності виділеннями надлишкової фази в цьому сплаві відбувається при набагато вищих температурах в інтервалі 743-773 К, де дифузійні процеси сприяють виділенню проміжної тетрагональної  $\alpha'$ -фази. Ультразвукове опромінювання сплаву в цьому температурному інтервалі прискорює релаксацію пружних напружень, зумовлених когерентністю виділень, шляхом сильної фрагментації матричної фази.

5. Показано, що зрив когерентності кристалічних ґрат матричної та надлишкової фаз при ультразвуковому опромінюванні сплаву Cu 3,5% Ti (параметр структурної невідповідності кристалічних ґрат матричної та надлишкової фаз у цьому сплаві є значним і становить  $\delta_m=1,9\%$ ) як при кімнатній температурі, де дифузійні процеси загальмовано, так і в температурному інтервалі 743-773 К, де

дифузійні процеси сприяють процесові релаксації когерентних напружень, супроводиться істотним приростом щільності дислокацій та 20%-ним зростанням твердості сплаву. Релаксація когерентних напружень у процесі ультразвукового опромінювання старіючого сплаву Al-2,8 ваг.% Li при різних температурах не приводить до його істотного зміщення, що зумовлюється низьким рівнем когерентних напружень унаслідок малої величини параметру структурної невідповідності в цьому сплаві ( $\delta_m = 0,08\%$ ).

6. Показано, що ультразвукове опромінювання (амплітуда напруження  $\sigma = 80$  МПа) у процесі старіння сплаву Al 2,8 ваг.% Li в температурному інтервалі 523-553 К приводить до сповільнення процесу коагуляції когерентних упорядкованих виділень  $\delta'$ -фази ( $Al_3Li$ ). При однакових часових витримках у вказаному температурному інтервалі в зістареному під впливом ультразвуку сплаві розміри виділень виявляються в 1,4-2,3 раза меншими порівняно зі станом, одержаним старінням без впливу. Останнє, очевидно, зумовлюється прискореною ультразвуком релаксацією когерентних напружень, які є рушійною силою процесів зростання й коагуляції когерентних виділень надлишкової фази. Зменшення схильності виділень до процесу коагуляції при підвищених температурах є свідченням стабілізації структурного стану сплаву та стабілізуючого характеру ультразвукового впливу на старіючі сплави.

7. Термоультразвукова обробка сплаву АК4-1 за схемою: гартування - ультразвукове опромінювання при 293 К - штучне старіння при 458 К істотно збільшує його опір високотемпературній повзучості. При цьому існує оптимальний режим опромінювання, при якому швидкість усталеної повзучості знижується в 4 рази, а довговічність зростає в 2 рази (температура випробування 573 К, напруження навантаження 50 МПа). Показано, що попереднє ультразвукове опромінювання збільшує щільність дислокацій та призматичних дислокаційних петель, які є сприятливими місцями для гетерогенного зародження виділень зміцнювальної  $s'$ -фази при наступному штучному старінні, внаслідок чого формується стабільний структурний стан, що підвищує жароміцність сплаву.

8. Оптимальна кількість термічних циклів, що здійснюються в м'якому режимі і збільшують густину жароміцних литих нікелевих сплавів, але не викликають їх деформаційного зміщення, приводить до істотного (-50%) збільшення довговічності при температурній повзучості та 10-разового збільшення довговічності при втомному навантаженні.

9. В результаті комплексних експериментальних досліджень та узагальнення даних щодо впливу нестационарних температурних і ультразвукових полів на структуру та властивості ГЦК-металів і старіючих сплавів на їх основі вирішено актуальну наукову проблему, яка полягає в науковому обґрунтуванні застосування термоциклічної обробки та ультразвукового опромінювання для підвищення ресурсу жароміцності ГЦК-металів та дисперсійно-твердіючих сплавів на їх основі, призначених для експлуатації в умовах високих температур.

Основні результати досліджень по темі дисертації опубліковано в таких працях:

1. Влияние ультразвука на степень совершенства монокристаллов алюминия, выращенных из расплава/И.Г.Полоцкий, Д.Е.Овсиенко, З.Л.Ходов,Е.И.Соснина, Г.Я.Базелюк, В.К.Кушнир//ФММ,1966,21,с.35-40.

2. Действие ультразвука на дислокационную структуру монокристаллов алюминия /И.Г.Полоцкий, Г.Я.Базелюк, С.В.Ковш//Сб.Металлофизика, 1968, вып.24, Киев, Наукова думка, с.156-163.

3. Влияние ультразвукового облучения на тонкую структуру и микротвердость монокристаллов алюминия/Н.С.Мордюк, И.Г.Полоцкий,Г.Я.Базелюк//Доклады У1 Всесоюзной акустической конференции, Москва, 1968, с.76.

4.Затухание упругих колебаний в монокристаллах меди в процессе облучения интенсивным ультразвуком/Г.Я.Базелюк, О.И.Запорожец, Н.С.Мордюк//Укр.физ.журнал, 1969, 9, с.1552-1557.

5. Воздействие ультразвука на дислокационную структуру монокристаллов алюминия/И.Г.Полоцкий, Н.С.Мордюк, Г.Я.Базелюк //Сб.Металлофизика, 1970, вып.29, Киев, Наукова думка, с.99-101.

6. Изменение дислокационного затухания в монокристаллах меди и алюминия при облучении интенсивным ультразвуком/Г.Я.Базелюк, О.И.Запорожец, Н.С.Мордюк//Сб. Металлофизика, 1970, вып.30, Киев, Наукова думка, с.94-102.

7. Действие предварительного ультразвукового облучения на высокотемпературную ползучесть и микротвердость меди/Г.Я.Базелюк, Г.Я.Козырский, И.Г.Полоцкий, Г.А.Петрунин//ФММ, 1970, 29, с.508-511.

8. Влияние предварительного ультразвукового облучения и механико-термической обработки на сопротивление ползучести алюминия/Г.Я.Базелюк, Г.Я.Козырский, И.Г.Полоцкий, Г.А.Петрунин//ФММ, 1971, 32, с.145.

9. Действие ультразвука на высокотемпературную ползучесть меди/Г.Я.Базелюк, Г.Я.Козырский, И.Г.Полоцкий, Г.А.Петрунин//Сб. легирование и свойства жаропрочных сплавов, Москва, Наука, 1971, с.53-57.

10. Действие ультразвукового облучения на дислокационную структуру и микротвердость монокристаллов меди /И.Г. Полоцкий, Г.Я. Базелюк //Укр.физ.журнал, 1974, №2, с.208-210.

11. Действие ультразвука на прочностные характеристики дисперсионно-твердеющего сплава АК4-1 /Г.Я. Базелюк, О.Н. Кашевская, Д.Г. Шерман, И.Г. Полоцкий, И.Н. Нестерова //ФММ, 1976, 42, 1, с.860-863.

12. Релаксационные явления и изменение упругих свойств сплава Cu-3,5вес. % Ti при старении /Г.Я. Базелюк, Т.Я. Бениева, О.Н. Кашевская, И.Г. Полоцкий, К.В. Чуистов //Укр.физ.журнал, 1977, 22, №1, с.76-80.

13. Действие ультразвукового облучения на структуру и твердость сплава Cu-3,5вес% Ti с когерентными выделениями/Г.Я.Базелюк, А.Л. Березина, И.Г. Полоцкий, К.В. Чуистов /Укр.физ.журнал, 1977, 22, №4, с.541-545.

14. Внутреннее трение в предварительно деформированном ультразвуковым распадающемся сплаве Cu-3,5вес.% Ti /Г.Я.Базелюк, О.Н.Кашевская, К.В.Чуистов, И.Г.Полоцкий //Укр.физ.журнал, 1978, 23, №1, с.144-146.

15. Некоторые особенности структуры и свойств сплава Cu-3,5вес. % Ti, состаренного при ультразвуковой деформации /Г.Я. Базелюк, А.Л. Березина, К.В. Чуистов, И.Г. Полоцкий //Физ. и хим. обр. материалов, 1978, №3, с.116-119.

16. Влияние ультразвукового облучения на изгибную деформацию пластинок сплавов D16 и B95 /Г.Я. Базелюк, А.М. Любчик, С.Я. Мациевская, Л.В.Тихонов //Проблемы прочности, 1982, №6, с.117-121.

17. Влияние ультразвукового облучения на обратное мартенситное превращение и твердость сплава Fe-29вес.% Ni /Г.Я. Базелюк, Ю.П. Барабанов, В.Г. Горбач, С.Я. Мациевская, Л.В. Тихонов //Укр. физ. журнал, 1985, 30, с.46-150.

18. Влияние ультразвукового воздействия на кристаллоструктурные изменения сплава H29 при обратном мартенситном превращении /Г.Я. Базелюк, Ю.П. Барабанов, В.Г. Горбач, С.Я. Мациевская, Л.В.Тихонов /Металлофизика, 1986, 8, №1, с.53-57.

19. Изменение характеристик ползучести сплава АК4-1 вследствие предварительной термоультразвуковой обработки. /Г.Я. Базелюк, В.И.

Ковпак, С.Я. Мациевская, И.Г. Полоцкий //Проблемы прочности, 1977, №11, с. 63-66.

20. Влияние предварительного ультразвукового облучения на микроструктуру и высокотемпературную ползучесть сплава АК4-1 /Г.Я.Базелюк, В.И.Ковпак, С.Я.Мациевская, И.Г.Полоцкий //Сб. докладов 2-го семинара "Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах", Киев, 1978, с.35.

21. старение сплава Al-2,8 вес. % Li в ультразвуковом поле. Особенности процесса выделения. /Г.Я.Базелюк, Л.Н.Трофимова, К.В.Чуистов//ФММ, 1979, 48, с.962-968.

22. Влияние ультразвуковой деформации на фазовые и структурные изменения в стареющих сплавах /Г.Я.Базелюк, Л.Н.Трофимова, К.В.Чуистов//Препринт АН УССР, ИМФ, Киев, 1979, с.32.

23. Дислокационная структура сплава Al-2,8 вес.% Li, состаренного в ультразвуковом поле /Г.Я.Базелюк, Л.Н.Трофимова, К.В.Чуистов// Металлофизика, 1980, №3, с.105-108.

24. рентгенопографическое исследование эволюции субструктуры монокристаллов алюминия в процессе термоциклической обработки /Л.В.Тихонов, Г.Я.Базелюк, С.Я.Мациевская, Р.Г.Гонтарева // Сб. докладов "Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в кристаллах с динамическими и статическими искажениями", Изд. Арм. ССР, Ереван, 1990, с.14-20.

25. Влияние мягкой термоциклической обработки на структурное состояние и твердость сплава ВЖЛ-12У /Г.Я.Базелюк, Р.Н.Гонтарева, А.М.Любчик, Г.А.Петрунин, Л.В.Тихонов, О.А.Кушенко //Проблемы прочности, 1995, №3, с.35-40.

26. Исследование структуры, внутреннего трения и упругих характеристик сплава ВЖЛ-12У после мягкого термоциклирования /Г.Я.Базелюк, О.Н.Кашевская, А.М.Любчик // Металлофизика и новейшие технологии, 1994, 16, №5, с.17-21.

27. Влияние ультразвукового облучения на процесс старения и упрочнение сплава Al-2,8 вес.% Li /Г.Я.Базелюк, Л.Н.Трофимова, К.В.Чуистов// В кн. Ультразвуковые колебания и их влияние на механические характеристики конструкционных материалов, Киев, Наукова думка, 1986, с.25-30.

28. Рентгеновская камера для определения внутренних напряжений /Г.Я.Базелюк, Л.В.Тихонов// Информационный листок о научно-техническом достижении, УкрНИИНТИ, 1986.

29. Способ обнаружения поверхностных дефектов изделий /Б.Я.Винокуров, А.Н.Краснов, В.В.Заякина, Л.В.Тихонов, Г.Я.Базилук, Н.Л.Макаровский // Авторское свидетельство № 1165151 от 1.08.85.

30. способ термической обработки изделий из жаропрочных никелевых сплавов /Б.Я.Винокуров, Э.А.Калмыков, Л.В.Тихонов, Г.Я.Базелюк, Л.М.Романова//Авторское свидетельство № 1450393 от 8.09.1988.

31. Влияние ультразвуковых колебаний на деформационные процессы в пластинах стареющих сплавов Д16 и В93 / Г.Я.Базелюк, С.Я.Мациевская, Л.В.Тихонов/ Тезисы докладов 4-й Всесоюзной конференции по ультразвуковым методам интенсификации технологических процессов, ч.11, Москва, 1979, с.89.

32. Влияние термоциклической обработки на структурное состояние и механические свойства жаропрочного сплава ВЖЛ-12У /Л.В.Тихонов, Б.Я.Винокуров, Г.А.Петрунин, Г.Я.Базелюк//тезисы докладов I Всесоюзного симпозиума "Новые жаропрочные и жаростойкие металлические материалы", ч.1 "Жаропрочные сплавы на никелевой основе", Москва, 1989, с.95.

У додатку подано акти впровадження, одержані від зацікавлених підприємств, з якими автор співпрацював у процесі виконання роботи.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Ультразвук и диффузия в металлах /А.В.Кулемин, Москва, Металлургия, 1978, 199 с.

2. Влияние ультразвука на совершенство растущих из расплава монокристаллов алюминия / И.Г.Полоцкий, Д.Е.Овсиенко, З.Л.Ходов, Е.И.Соснина, Г.Я.Базелюк, В.К.Кушнир // тезисы докладов Всесоюзного совещания по росту металлических кристаллов, Киев, 1965, с.23.

3. Модулированные структуры в стареющих сплавах /К.В.Чуистов //Изд-во Наукова думка, Киев, 1975, 232 с.

4. Комбинированное воздействие термоциклической обработки и ультразвукового облучения на структурное состояние и механические свойства стали Х16Н11М3 /Г.Я.Базелюк, Р.Г.Гонгарева, О.И.Козырский и др.// Проблемы прочности, 1980, №9, с.77-81.

5. Дефекты в твердых растворах, стабилизирующиеся при понижении температуры/М.А.Кривоглаз// ФТТ, 1970, 12, №8, с.2445-2451.

6. Влияние термоциклирования и ультразвукового облучения на структурное состояние сплава ВТ22 /Л.В.Тихонов, Р.Г. Гонтарева, Г.Я.Базелюк и др. //Физ. и хим. обр. материалов, 1989, №1, с.134-139.

7. Роль дефектов в сплавах для газовых турбин /С.Р. Холдсворт//В кн. "Жаропрочные сплавы для газовых турбин", Москва, Металлургия, 1981, с.292-309.

## SUMMARY

Baselyuk Gennady Yakovlevich. Structure and properties of FCC metals under influence of non stationary thermal and ultrasonic fields. Thesis for the degree of doctor of technical sciences. The speciality: 05.16/01 -physical metallurgy and heat treatment of metals. Institute for Metal Physics, National Academy of Sciences, Ukraine, Kiev, 1977.

32 papers are applied in which structure and physical mechanical properties of metals, solid solutions, binary alloys, complex FCC precipitation hardening alloys were investigated by means of different methods ( double crystal spectroscopy, X-ray topography, light and electron microscopy, internal friction). They were carried out in wide range of temperatures after strengthening and stabilizing ultrasonic influence, thermal cyclic treating, plastic deformation and complex treating. Ultrasonic influence in an optimum regime and polygonal annealing of FCC metals with a low stacking fault energy (copper) were shown to lead to thermally stable substructure. They increase recrystallization temperature and high-temperature creep strength. In FCC metals with a high stacking fault energy (aluminium and hard Al-Mg alloys) two region of substructural strengthening were found after the same types of preliminary treatment. Ultrasonic treatment of ageing alloys (Cu-3,5%wt. Ti, Al-2,8wt%.Li, AK4-1) causes coherent stress relaxation with subsequent creation of equilibrium dislocation structures decreases ability to coagulation of oversaturated phase, leads to creation of stable structures and increase high-temperature strength. Moderate thermal cyclic treating was found to increase density of high-temperature nickel alloys (ВЖЛ-12У) with subsequent 50% increase of endurance during high-temperature creeping and 10 times increase of fatigue life.

## АННОТАЦИЯ

Базелюк Геннадий Яковлевич "Формирование структур и изменение свойств ГЦК-металлов под влиянием нестационарных температурных и ультразвуковых "полей".

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 0.16.01-металловедение и термическая обработка металлов

Защищаются 32 работы в которых различными методами исследования (двойной кристалл-спектрометр, рентгеновская топография оптическая и электронная микроскопия, внутреннее трение и др.) изучались структура и физико-механические свойства металлов, твердых растворов, бинарных и сложно-легированных промышленных дисперсионно-твердеющих сплавов, в том числе и жаропрочных, с ГЦК-решеткой в широком интервале температур после упрочняющего и стабилизирующего действия ультразвукового облучения и термоциклической обработки в различных режимах, а также, после пластической деформации и комбинированных обработок. Показано, что ультразвуковое облучение в оптимальном режиме (как и оптимальная степень пластической деформации) и последующий полигонизационный отжиг ГЦК-металлов повышают температуру рекристаллизации и формируют термически устойчивую субструктуру, увеличивающую и сопротивление высокотемпературной ползучести. При этом в металлах с низкой энергией дефектов упаковки (медь) возникает в зависимости от степени предварительной деформации (или от времени ультразвукового облучения) одна область субструктурного упрочнения, а в металлах с высокой энергией дефектов упаковки (Al и твердые растворы Al-Mg) обнаружено две области. Показано, что при ультразвуковом облучении стареющих сплавов (Cu-3,5 вес. %Ti, Al-2,8 вес % Li, АК4-1) происходит релаксация упругих напряжений, обусловленных присутствием когерентных выделений избыточной фазы, вследствие чего формируется более равновесная дислокационная структура и уменьшается склонность выделений избыточной фазы к коагуляции, что приводит к созданию стабильных структурных состояний, повышающих ресурс жаропрочности сплавов. При исследовании сплава Cu-3,5 вес. %Ti, облученного ультразвуком обнаружен большой пик внутреннего трения, природа которого связывается с атомно-вакансионными комплексами, образующимися в процессе предварительного ультразвукового облучения. Установлено, что мягкая термоциклическая обработка повышает плотность жаропрочных литых никелевых

сплавов (ВЖЛ-12У, ЖС6-У), що приводить до зростання довговечності при високотемпературній ползучості на 50% і десятикратному зростанню довговечності при усталостному напруженні.

Ключові слова: метали, термоцикування, ультразвук, дислокація, релаксація напружень, рентген, сплави, деформація

*Жуков*

Підп. до друку 28.01.1997р. Формат 60x84 1/16. Об'єм 2.2 друк арк. Тираж 140 е

Надруковано в ІМФ НАН України ім. Г.В.Курдюмова, 252680, Київ-142,  
бульв. ак. Вернадського 36

108786

AB 37.227