

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНИХ ПРОБЛЕМ
МЕХАНІКИ І МАТЕМАТИКИ
ім. Я. С. ПІДСТРИГАЧА

На правах рукопису

БУРНАЄВ
Олексій Михайлович

УДК 539. 3

**МОДЕЛЬ РАДІАЦІЙНОЇ ПОВЗУЧОСТІ
ТЕКСТУРОВАНИХ ПОЛІКРИСТАЛІВ**

Спеціальність — 01. 02. 04 механіка деформівного
твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

ЛЬВІВ 1994

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному Університеті "Львівська політехніка".

Науковий керівник - Засл. діяч науки і техніки України,
доктор фіз.-мат. наук, професор
Русинько К.М.

Офіційні опоненти - доктор фіз.-мат. наук, професор
Шаблій О.М.

- доктор фіз.-мат. наук
Гачкевич О.Р.

Провідна установа - Львівський державний університет
ім. І. Франка


Захист дисертації відбудеться "26" XII 1994 р. о 15⁰⁰
години на засіданні спеціалізованої вченої ради
К.016.59.01 в Інституті прикладних проблем механіки і ма-
тематики ім. Я.С. Підстригача АН України (м. Львів, вул. Нау-
кова, 3 "б").

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інсти-
туту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача АН України (м. Львів, вул. Наукова, 3 "б").

Відгук на автореферат просимо надсилати за адресою:
290601, МСП, м. Львів, вул. Наукова, 3 "б", вченому секретарю
спеціалізованої ради.

Автореферат розіслано "25" XI 1994 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради

 ШЕВЧУК П.Р.

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00777276 (-)

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток атомної енергетики та пов'язані з ним питання підвищення надійності обладнання вимагають дальшого вдосконалення та створення нових математичних моделей поведінки матеріалів при опроміненні, зокрема моделей радіаційної повзучості.

Задачі про формозміну тепловиділяючих елементів та збірок, заклинення труб в графітовій кладці реакторів; розрахунок максимально допустимого ексцентриситету зовнішніх та внутрішніх діаметрів твелів, їх допустимої еліптичності, що не призводить до втрати стійкості ("схлопування") тонкостінної трубки внаслідок повзучості під зовнішнім тиском; в перспективі - розрахунок умов зародження та швидкості поширення корозійної тріщини з повзучістю в околі її вершини в анізотропному матеріалі - ось далеко не повне коло актуальних проблем, що потребують для свого розв'язання побудови моделей радіаційної повзучості, зручних у використанні та встановленні характеристик матеріалу.

Експериментальними дослідженнями та моделюванням міцності, надійності, фізичними та механічними аспектами незворотної деформації, зокрема радіаційної повзучості, займалися Ватдорф В., Березняк П.А., Вудянський С., Ганн В.В., Гачкевич О.Р., Гіттус Й., Зайцев С.І., Ібрагімов Ш.Ш., Карасьов В.С., Кірсанов В.В., Киселевський В.М., Лукашов В.К., Ожигов Л.С., Пархоменко О.О., Писаренко Г.С., Пятілетов Ю.С., Резніченко Е.О., Русинко К.М., Халілов Х.Т., Христов Г.П., Шаблій О.М. та інші.

Приведені в роботі дослідження виконувались в рамках державної теми фундаментальних досліджень ДВ 36/ВР.

Метою роботи є:

1. Поширення рівнянь математичної теорії ковзання та текстуровані полікристалічні матеріали.
2. Запис рівнянь радіаційної повзучості текстурованих полікристалів з використанням феноменологічних даних про

зв'язок напружень та швидкості деформацій в окремій системі ковзання.

3. Запис цих рівнянь з використанням найпростіших фізичних моделей поведінки монокристала при опроміненні.

4. Оцінка достовірності отриманих результатів.

Методика досліджень:

Як показує досвід, при створенні моделі непружного деформування ефективною є "двоступінчата" схема, коли поведінку матеріалу на мікрорівні описують, виходячи з фізичних моделей, а перехід до макроскопічних властивостей виконують тим чи іншим математичним прийомом.

Дослідження останніх років показали, що найбільш перспективним механізмом радіаційної повзучості є механізм переповзання-ковзання дислокацій, та призвели до створення численних фізичних моделей різного ступеня складності.

В даній роботі теорія ковзання Батдорфа-Будянського, яка описує непружну поведінку макроскопічного тіла за умови, що деформування відбувається шляхом незалежного ковзання крайових дислокацій, поширена на випадок наявності текстури. З застосуванням до одержаних рівнянь моделі переповзання-ковзання, отримані співвідношення, що описують радіаційну повзучість текстурованого полікристалу.

Наукова новизна роботи :

- в теорію ковзання Батдорфа-Будянського введені поняття поверхні ковзання та інтенсивності системи ковзання
- створено алгоритм визначення інтенсивності системи ковзання через експериментально відому функцію розподілу полюсів в полікристалі (полюсну фігуру),
- записані рівняння незворотної деформації текстурованих полікристалів, яка реалізується шляхом ковзання,
- до отриманих рівнянь застосовано феноменологічну та фізичну моделі ковзання, проведено співставлення отриманих результатів з дослідними даними про анізотропію повзучості циркаєвої оболонки твел та деформацію сталеної грані чохла тепловиділяючої збірки,
- на основі отриманих рівнянь запропоновано методику

знаходження параметрів матеріалу, що суттєво зменшує об'єм внутріреакторних випробувань.

Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням апробованих математичних та феноменологічних моделей поведінки монокристалу при опроміненні, строгістю математичного апарату при обрахунку вкладу окремої системи ковзання в повну деформацію та при розв'язанні крайової задачі, співставленням результатів з відомими експериментальними даними.

Практична цінність роботи полягає в створенні моделі радіаційної повзучості текстурованого полікристалічного тіла, яка дозволяє зменшити кількість внутріреакторних випробувань для встановлення параметрів анізотропії. Крім цього, отримані результати дають можливість поширити рівняння теорії ковзання Леонова-Русинко на випадок текстурованого матеріалу.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на I Міжнародному Симпозіумі українських інженерів-механіків (Львів, 1993р.), семінарі лабораторії математичного моделювання радіаційних пошкоджень Національного Наукового центру ХФТІ (Харків, 1993р.), а також в завершеному вигляді на семінарі кафедри теоретичної механіки Університету "Львівська політехніка" (1994р.) та спеціалізованому кваліфікаційному семінарі з механіки деформівного твердого тіла в ІПММ ім. Я.С. Підстригача АН України (Львів, 1994р.).

Публікації. Основні результати виконаних досліджень опубліковані в 4 наукових працях.

Обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 7 розділів, висновків, бібліографічного списку (118 назв), 18 ілюстрацій. Загальний обсяг дисертації складає 105 сторінок.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовується актуальність роботи, формулюється мета досліджень та їх новизна, коротко викладений

зміст за розділами.

В першому розділі приведено огляд сучасного рівня знань про радіаційну повзучість і методи її моделювання.

Другий розділ присвячений поширенню рівнянь математичної теорії ковзання на випадок структурно анізотропних матеріалів:

З цією метою побудовано рівняння, які узагальнюють результати існуючих теорій ковзання, що враховують деформаційну анізотропію матеріалу, на випадок кристалографічної анізотропії полікристалу, тобто переважання систем ковзання одних орієнтацій над іншими. Для цього введено означення:

1) Системою ковзання (l, n) назвемо сукупність площин з нормаллю n , в яких лежать крайові дислокації, що можуть ковзати в напрямку l .

2) Густиною системи ковзання (l, n) прийнято величину

$$\rho(\alpha, \beta, \omega) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{N(\alpha, \beta, \omega)}{\Delta \Omega \Delta \omega},$$

тобто границю відношення кількості N систем ковзання, що містяться в Δ -околі кутів α, β, ω , які задають орієнтацію векторів n та l , до величини цього околу, коли остання прямує до нуля.

3) За інтенсивність $R(\alpha, \beta, \omega)$ системи ковзання (l, n) прийнято відношення густини $\rho(\alpha, \beta, \omega)$ цієї системи ковзання у випадку текстурованості до густини системи у випадку рівномірного розподілу орієнтацій систем ковзання.

$$R(\alpha, \beta, \omega) = \frac{\rho(\alpha, \beta, \omega)}{\iint_{\Omega \omega} \rho(a, b, \omega) d\Omega d\omega}$$

де $\Omega \cdot \omega$ в знаменнику - числове значення діапазону всіх можливих кутів орієнтації.

Тобто, інтенсивність системи ковзання, це величина, яка показує, в скільки разів в діапазоні $d\Omega d\omega$ кутів α, β, ω при наявності текстури є систем ковзання з даною орієнтацією більше (менше), ніж при рівномірному їх розподілі.

Показано, що завжди і незалежно від R та ρ $\Omega_{\omega} = 4\pi^2$, що співпадає з гіпотетично введеним множником в теорії Ватдорфа - Будянського.

Очевидно, що в граничному випадку в околі довільної точки тіла існує єдиний кристал, орієнтований так, що його площина ковзання співпадає з площиною даної системи ковзання з нормаллю n , а напрямок легкого ковзання в монокристалі - з напрямком l .

Оскільки загальноприйняте означення інтенсивності полюсів кристалу та введене означення інтенсивності систем ковзання ідентичні, то інтенсивність R такої системи ковзання (l, n) рівна інтенсивності полюсів I_{Φ} такого полікристалу. Дані про інтенсивність базисних полюсів (розглядаються тільки матеріали з ГШУ ґраткою, всі інші наближено приймаємо при радіаційній повзучості та малих деформаціях ізотропними) полікристалічного тіла, тобто про розподіл орієнтації осей ГШУ ґратки добре відомі матеріалознавцям, існують спеціальні технологічні прийоми, що дозволяють створювати в матеріалі ту чи іншу перевагу в орієнтації кристалографічних осей.

Враховуючи вищесказане, знайдемо інтенсивність систем ковзання R в залежності від експериментально визначеного I_{Φ} . Для цього необхідно знайти такий ГШУ-кристал, (а точніше, орієнтацію його базисної осі c , бо текстурою, що обмежує поворот навколо c , будемо нехтувати через симетрію напрямків ковзання відносно базисної осі), який би містив задану систему ковзання (l, n) на своїй грані.

В ГШУ кристалах з параметром ґратки $c/a > 1.633$ легке ковзання відбувається по базисних площинах, тобто $n \parallel c$, а впливом текстури на поворот ω навколо базисної осі c нехтуєм через симетрію 6-го порядку ГШУ ґратки відносно ne_1 .

В цьому випадку $R(\alpha, \beta, \omega) = I_{\Phi}(\alpha, \beta)$. Інтенсивність R не залежить від величини кута ω , а визначається лише через α і β .

У випадку матеріалу з $c/a < 1.633$ ковзання відбувається по призматичних площинах, тобто $c \perp n, c \perp l$. Для знаходження $R(\alpha, \beta, \omega)$ необхідно знайти напрям базисної осі c

ГШУ кристалу, призматична грань якого має нормаль n і напрям ковзання l . З цією метою знайдемо векторний добуток A одиничних векторів $n \times l$, а оскільки $A \parallel c$, то, знаючи координати кінця вектора $A(A_x, A_y, A_z)$, з геометричних міркувань знайдено кути орієнтації вектора $c(\alpha_0, \beta_0)$.

В цьому випадку інтенсивність системи ковзання $R(\alpha_0(\alpha, \beta, \omega), \beta_0(\alpha, \beta, \omega))$ залежить і від кута ω .

Таким чином, вважаючи відомою інтенсивність I_Φ базисних осей, можна остаточно встановити інтенсивність системи ковзання R за формулами:

$$R(\alpha, \beta, \omega) = \begin{cases} I_\Phi(\alpha, \beta) \rightarrow \text{ГШУ гратка, } c/a > 1.633 \\ I_\Phi(\alpha_0, \beta_0) \rightarrow \text{ГШУ гратка, } c/a < 1.633 \\ 1 \rightarrow \text{ізотропія} \end{cases} \begin{cases} \text{кубічні гратки, або} \\ \text{рівномірний розподіл} \\ \text{осей довільних граток} \end{cases}$$

Як і в теорії Батдорфа - Будянського, прийнято величину пластичної деформації в точці $O(x, y, z)$ рівною усередненій по всім можливим напрямкам ковзання Ω_ω сумі вкладів F в деформацію кожної з систем ковзання, з врахуванням того, що у випадку кристалографічної анізотропії в різних напрямках α_{ij} існує різна кількість систем ковзання, яка контролюється величиною R :

$$\epsilon_{ij}^p = \frac{1}{\Omega \cdot \omega} \iint_{\Omega_\omega} R(\alpha, \beta, \omega) \cdot F(\tau_{nl}) \cdot \alpha_{in} \alpha_{jl} d\Omega d\omega$$

У випадку ізотропії матеріалу з одержаних рівнянь отримуються рівняння теорій Батдорфа - Будянського чи Леонова-Русинко в залежності від вибору вигляду функції F .

В третьому розділі отримані рівняння узагальненої теорії ковзання застосовані до опису радіаційної повзучості, оскільки її основним механізмом реалізації є переповзання-ковзання дислокацій. Результати, отримані в припущенні лінійної залежності швидкості деформації від напружень, співставлені з експериментальними даними про анізотропію радіаційної повзучості циркалоєвої оболонки твел.

Нехай залежність між дотичним напруженням b_{nl} в системі ковання (n,l) , густиною потоку нейтронів Φ та швидкістю деформації задана формулою

$$\epsilon_{nl} = B \cdot b_{nl} \cdot \Phi$$

Величина дотичного напруження в системі ковання в рамках припущення про однорідний напружений стан в зернах, що містяться в малому околі точки $O(x,y,z)$ тіла, обчислюється за формулою

$$b_{nl} = b_{ij} \alpha_{ni}' \alpha_{lj}'$$

де α_{lj}' , α_{ni}' - напрямні косинуси переходу від системи (x,y,z) до системи (n,l)

Дослідження показали, що в цирконієвих оболонках тепловиділяючих елементів (твел) спостерігається бімодальна переважна орієнтація c -осей ГШУ ґратки. Два максимуми інтенсивності базисних осей c досягаються в радіально-тангенціальній площині стінки твел під кутами $\approx \pm 35^\circ$ від радіального напрямку. Приведена в літературі полюсна фігура для базисних осей c в оболонці твел може бути апроксимована залежністю

$$I_\Phi(\alpha, \beta) = 8.86 \cdot \exp(-(\pi\beta/8)^2) \cdot (\exp(-(\pi\alpha)^2) - 0.7 \cdot \exp(-(2\pi(\alpha-0.02))^2))$$

Приймаючи функцію F в визначальному рівнянні за ϵ_{nl} , запишемо рівняння радіаційної повзучості текстурованого полікристалу в лінійній постановці:

$$\epsilon_{ij} = \frac{B \cdot \Phi}{4\pi^2} \iint_{\Omega_\omega} R(\alpha_0, \beta_0) \cdot (b_{kl} \alpha_{nk}' \alpha_{lm}') \cdot \alpha_{in} \alpha_{jl} \alpha \omega d\omega$$

Одним з критеріїв для оцінки анізотропії повзучості текстурованого матеріалу є відношення швидкостей повзучостей у двох взаємно перпендикулярних напрямках при од-

накових розтягуючих напруженнях. В нашому випадку це швидкості повзучості при розтягу вадовж осі твела або при дії внутрішнього тиску такого, щоб $\sigma_{zz} = \sigma$:

$$K = \frac{\varepsilon_{zz}(\sigma_{zz})}{\varepsilon_{\varphi\varphi}(\sigma_{\varphi\varphi})}$$

Враховуючи властивість напрямних косинусів $\alpha_{ki} = \alpha_{ik}$ та те, що з усіх компонент тензора напружень відмінною від нуля є лише σ_{ii} ($i=z$ або $i=\varphi$), отримаємо :

$$K = \frac{\iint_{\Omega\omega} R(\alpha_0, \beta_0) \cdot (n_z l_z)^2 d\Omega d\omega}{\iint_{\Omega\omega} R(\alpha_0, \beta_0) \cdot (n_x l_x)^2 d\Omega d\omega}$$

Зауважимо, що функція R повинна задовільняти умову

$$\iint_{\Omega\omega} R d\Omega d\omega = 4\pi^2,$$

яка контролює правильність знаходження I_0 з експериментальних досліджень текстури, і може бути легко доведена шляхом інтегрування виразу в означенні інтенсивності систем ковзання по $\Omega\omega$.

Інтеграли обчислені за допомогою ЕОМ методом Монте-Карло. Результати обчислень приведені в таблиці :

Навантаження на твел	Значення $\iint_{\Omega\omega} f(\alpha, \beta, \omega) d\Omega d\omega$	К теорет.	К експер.	Відхилення
Розтяг	$8.464 \cdot 10^{-2}$	1.8	1.7	8 %
Внутрішній тиск	$4.578 \cdot 10^{-2}$			

Як видно з таблиці, оцінка анізотропії, отримана шляхом використання виведених рівнянь, відрізняється від експериментальної на 8 %, що є позитивним результатом.

В четвертому розділі приведено рівняння для встановлення тензора анізотропії радіаційної повзучості, який пов'язує напруження і швидкість деформації при їх лінійній залежності і анізотропії матеріалу, з відомої з фізичного експерименту полюсної фігури базисних площин полікристалу.

$$\varepsilon_{ij} = B \cdot T_{ijkl} \cdot \sigma_{km} \cdot \Phi$$

де:

$$T_{ijkl} = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{\Omega_{\omega}} R(\alpha_0, \beta_0) \cdot \alpha_{nk} \cdot \alpha_{lm} \cdot \alpha_{in} \alpha_{jl} \cdot d\alpha d\beta$$

(немає сум по жодних індексах)

Тензор T_{ijkl} названо тензором анізотропії швидкості радіаційної повзучості. Він залежить лише від інтенсивності систем ковзання R , а значить, може бути знайдений з позареакторного експерименту. Залежність швидкості радіаційної повзучості від опромінення контролюється величиною B , що є функціоналом від дози опромінення, типу бомбардуєчих частинок, часу, і т.п. і має бути знайдена з експерименту безпосередньо в реакторі.

Отримана формула дозволяє відмовитись від дорогого та трудомісткого внутріреакторного дослідження повзучості матеріалу при складному напруженому стані. Для знаходження її параметрів необхідний один дослід, скажімо, на розтяг або згин в умовах опромінення для встановлення величини B як функції перерахованих вище параметрів, та стандартне дослідження текстури в позареакторних умовах для встановлення величини I_0 . У випадку зміни текстури при опроміненні необхідно буде розглядати величину I_0 як функцію часу та досліджувати зразки, що набрали різну дозу.

В п'ятому розділі швидкість ковзання в окремій системі встановлена на основі найпростіших фізичних моделей

монокристалу.

Функція $F = \epsilon_{n1}$, необхідна для підстановки в рівняння узагальненої теорії ковзання, залежить від багатьох параметрів, тому її вигляд пропонується шукати не в макроексперименту, а на основі фізичних механізмів радіаційної повзучості.

Пластична деформація полікристалічного тіла під впливом опромінення в діапазоні температур $0,2 \dots 0,6$ Тпл відбувається головним чином шляхом проковзування одних частин монокристалу відносно інших. Розглянуто монокристал, в якому проходять зсуви атомних площин з нормаллю n в напрямі осі l внаслідок руху крайових дислокацій з відомою густиною ρ_d , вектором Бюргерса b та швидкістю ковзання v_d паралельно осі l . В цьому випадку функція F прийнята у вигляді формули Орована :

$$\epsilon_{n1} = b \cdot \rho_d \cdot v_d$$

Швидкість ковзання дислокації v_d можна представити як відношення середньої віддалі L , що проходить за одне проковзування, до середнього часу τ , що витрачається на нього :

$$v_d = \frac{L}{\tau}$$

Середній час ковзання τ складається з двох доданків: часу t_1 , за який дислокація переповажає бар'єр, та часу t_2 , протягом якого вона рухається в площині ковзання. Величина t_2 завжди набагато менша за t_1 , тому нею прийнято нехтувати, вважаючи $\tau = t_1$.

Внаслідок випадкового розміщення сильних та слабких бар'єрів у площині ковзання, віддаль L , на яку ковзає дислокація за один акт, не є рівною середній віддалі між бар'єрами. Як показали дослідження, величина L є функцією дотичного напруження τ_{n1} в системі ковзання та середньої віддалі між бар'єрами, і слабо залежить від температури та інших компонент тензора напружень.

В роботі використано вираз для L з літературних дже-

рел, знайдений шляхом моделювання руху крайової дислокації через сітку випадкових бар'єрів.

Середній розмір сильних бар'єрів, якими є вакансійні пори та міжвузлові петлі, позначено через λ . Середня віддаль, яку необхідно переповзати дислокації, є $\lambda/2$.

Тоді час переповзання :

$$\tau = \frac{\lambda}{2 v_l}$$

Швидкість переповзання v_l можна визначити, якщо відома кількість атомів та вакансій, що надходять за одиницю довжини дислокації за одиницю часу:

$$v_l = \frac{1}{b} (Z_I \cdot D_I \cdot C_I^O - Z_V \cdot D_V \cdot (C_V^O - C_V^A))$$

Для її знаходження в роботі використані аналітичні розв'язки рівняння дифузії дефектів Френкеля до пор, крайових дислокацій та дислокаційних петель в припущенні про розмірну взаємодію першого порядку між дефектами та стоками.

В шостому розділі компактно приведені визначальні співвідношення радіаційної повзучості текстурованого полікристалу в термінах феноменологічного та фізичного підходу, що виводились в попередніх розділах, та дані рекомендації до їх застосування.

В сьомому розділі проводиться співставлення результатів виведених рівнянь з експериментальними даними про деформацію грані тепловідляючої збірки швидкого реактора з натрієвим теплоносієм.

Проведений аналіз напруженого стану в грані ТВЗ показує, що максимальні напруження ніде не перевищують половину межі текучості, а значить, швидкість радіаційної повзучості лінійно залежить від напружень. В зв'язку з цим справедлива гіпотеза плоских перерізів. Виведене рівняння деформованої лінії грані є аналогом принципу Вольтерра:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{\varepsilon(\delta)}{\delta/2}$$

де ω - непружний прогин,
 x - координата, δ - товщина грані.

Початкові та граничні умови мають вигляд:

$$\omega(x, t) \Big|_{t=0} = 0 \quad - \text{в початковий момент навантаження непружні деформації відсутні,}$$

$$\omega(x, t) \Big|_{x=0} = 0 \quad - \text{умови жорсткого зацімлення}$$

$$d\omega(x, t)/dx \Big|_{x=0} = 0 \quad \text{кінця грані.}$$

Рівняння розв'язане числовим методом скінчених різниць. В позначеннях $\omega(\bar{x}_i, t_j) = \omega_{i,j}$, замінивши похідні скінченими різницями, остаточний розрахунковий вираз отримує вигляд:

$$\omega_{i+1,j+1} = 2(\omega_{i,j+1} - \omega_{i,j}) - \omega_{i-1,j+1} + \omega_{i-1,j} + \omega_{i+1,j} + \frac{h^2 \cdot \Delta t \cdot \varepsilon(\delta(x_i))}{\delta/2}$$

В результаті використання для розрахунків виведеної моделі $\varepsilon(\delta)$ отримано величини прогинів, що задовільно співпадають з експериментальними даними :

Час (дів)	Прогин посередині грані (10^{-3} м)		Похибка
	Розрахунковий	Експерим.	
37	66	96	-31 %
74	139	192	-28 %
111	212	288	-26 %
148	285	384	-26 %
185	358	480	-25 %
222	431	576	-25 %
259	505	672	-25 %
296	578	768	-25 %
333	651	864	-25 %
370	724	960	-25 %

Основні результати і висновки :

1. В математичну теорію ковзання введено поняття поверхні ковзання як чотиривимірної множини точок, що повністю характеризує текстуру матеріалу.

2. Введено поняття та дано алгоритм знаходження інтенсивності систем ковзання як функції від інтенсивності полюсів (полюсної фігури) полікристалічного текстурованого матеріалу.

3. На основі введених понять поверхні ковзання та інтенсивності систем ковзання побудовані рівняння узагальненої теорії ковзання, що поширюють рівняння теорії Батдорфа-Будянського, створені для ізотропного матеріалу, та теорії Леонова-Русинко, що описують деформаційну анізотропію, на випадок кристалографічної анізотропії.

4. Приведений підхід дозволяє моделювати анізотропію матеріалу, користуючись лише експериментальними даними про структуру полікристалу, та рівняннями перетворення їх у необхідну для розрахунків форму, і обмежити кількість трудомістких експериментів по дослідженню складного напруженого стану.

5. Внаслідок застосування до отриманих рівнянь феноменологічної лінійної залежності швидкості деформації радіаційної повзучості від напруження в окремій системі ковзання вдалось отримати лінійні рівняння, що за допомогою тензора анізотропії матеріалу пов'язують тензор деформації та тензор напружень. Компоненти вказаного тензора анізотропії обчислюються інтегруванням рівнянь узагальної теорії ковзання, причому інтегрування проводиться лише один раз, на початку розрахунків, оскільки інтеграли є незалежними від напружень. Цей результат є новим для теорії ковзання, в яких інтеграли необхідно обчислювати протягом всіх кроків розв'язання задачі, що забирає багато машинного часу.

6. На основі приведених лінійних рівнянь та експериментальних даних про текстуру оболонки теплоізоляційного елемента із стопу цирконію з ніобієм, що має ГШУ ґратку з

призматичними площинами легкого ковзання, проведені розрахунки коефіцієнта анізотропії швидкості деформації радіаційної повзучості при навантаженні твела в осьовому та тангенціальному напрямку (розтяг трубки та навантаження внутрішнім тиском). Отриманий результат відрізняється від експериментального на 8 %.

7. Зроблена спроба виведення формули для швидкості ковзання в окремій системі із застосуванням фізичної моделі переповзання-ковзання дислокацій. Приведені рівняння допускають уточнення шляхом використання більш досконалих моделей мікроструктури.

8. Для тестування отриманих рівнянь проведено числовий розв'язок задачі про деформацію шестигранної труби тепловідляючої збірки швидкого реактора з натрієвим теплоносієм в умовах опромінення і внутрішнього тиску. Отримані результати співставлені з даними, отриманими з експерименту виключенням з повної деформації внаслідок опромінення складової, викликаної розпуханням матеріалу. Розбіжність не перевищує 25 %, що для моделі повзучості є допустимим.

9. Таким чином, проведені дослідження дозволили поширити математичну теорію ковзання на випадок радіаційної повзучості полікристалічних текстурованих матеріалів.

Додатки містять програми, по яких проводились розрахунки.

Основні результати дисертації опубліковано в роботах:

1. Бурнаєв О.М. Узагальнення рівнянь теорії ковзання на текстуровані полікристали/Держ.унів. "Львівська політехніка". - Львів, 1994. - 6 с. Деп. в ВИНІТИ 3.10.94, N 1923 - Ук 94.

2. Бурнаєв О.М. Моделювання анізотропії радіаційної повзучості зтопу цирконію/Держ.унів. "Львівська політехніка". - Львів, 1994. - 5 с. Деп. в ВИНІТИ 3.10.94, N 1922 - Ук 94.

3. Бурнаєв О.М. Тензор анізотропії радіаційної повзучості текстурованих полікристалів/Держ.унів. "Львівська політехніка". - Львів, 1994. - 4 с. Деп. в ВИНІТИ 3.10.94, N

1924 - Ук 94.

4. Бурнаєв О.М., Воднар Ю.І., Вілобран Н.Б. Математична модель повзучості конструкційних матеріалів під впливом радіоактивного опромінення, силового навантаження і температури. - 1 Міжн. симп. укр. інж.- мех., Тези доп., - Львів, 1993. с.107 .

Abstract. Burnaiev A.M. Model of the radiation creep of textured polycrystals. A dissertation submitted for the Candidate of physics and mathematics degree with the speciality 01.02.04 - mechanics of hard body of the Ukrainian National Academy of Sciences, Lviv, 1994.

Theory of irreversible deformation of the textured polycrystalline bodies based on the generalisation of slip theory created by Batdorf and Budiansky. Result has been used for description of the radiation creep in anisotropic bodies, and was checked on the authentic.

Аннотация. Бурнаев А.М. Модель радиационной ползучести текстурированных поликристаллов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела. Институт прикладных проблем механики и математики им. Підстригача НАН України, Львов, 1994.

На основе теории скольжения Батдорфа-Будянского построена обобщенная теория необратимой деформации текстурированных поликристаллов. Полученные результаты применены к описанию радиационной ползучести анизотропных тел, проверена достоверность результатов.

Ключові слова: Теорія ковзання, повзучість, анізотропія, опромінення, модель.

Handwritten text at the top of the page, possibly a title or header, which is mostly illegible due to blurring and fading.

Faint, illegible text at the bottom of the page, possibly a footer or a page number, which is mostly illegible due to blurring and fading.

Handwritten text at the bottom right corner of the page, possibly a signature or a date, which is mostly illegible due to blurring and fading.

АВ 31.412

Підписано до друку 23. 11. 94. Формат 60×84 1/16.
Друк офсетний. Ум. др. арк. 2. 02. Тираж 100. Зам. 2075.
Друк. ПТУ № 58. 290008. Львів, Ів. Федорова, 9.