

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

На правах рукопису

УДК 539.3

С Л Ю С А Р Ч У К

Юрій Миколайович

ОСНОВНІ СПІВВІДНОШЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ ТА
ПОВЗУЧОСТІ В РАМКАХ СИНТЕЗНОЇ ТЕОРІЇ
НЕЗВОРОТНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

Спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного
твердого тіла

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

ЛЬВІВ-1995

539.3

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00754341 (O)

Дисертація в рукописі

Робота виконана на кафедрі теоретичної механіки Державного університету "Львівська політехніка".

Науковий керівник – Засл. діяч науки і техніки України, доктор фізико-математичних наук, професор
РУСИНКО К.М.

Офіційні опоненти – доктор фізико-математичних наук, професор **ШАБЛІЙ О.М.**,
доктор фізико-математичних наук, професор **ОСАДЧУК В.А.**

Провідна установа – Київський національний університет ім. Тараса Шевченка.

Захист відбудеться "29" I 1996 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.04.17.01 в Інституті прикладних проблем механіки та математики ім. Я.С. Підстригача НАН України (м. Львів, вул. Наукова, 3 "Б").

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту прикладних проблем механіки та математики ім. Я.С. Підстригача НАН України.

Відгук на автореферат просимо надсилати за адресою: 29061, МСП, м. Львів, вул. Наукова, 3 "Б", вченому секретарю спеціалізованої ради.

Автореферат розісланий "22" XII 1995 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради

ШЕВЧУК П.Р.

ДВ - 33.975

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Сучасні конструкційні матеріали в складних умовах термоскладових навантажень, виявляють специфічні властивості: аномальну поведінку границі текучості, ефекти швидко-часових режимів деформування, псевдопружність, аномальну повзучість, ефект пам'яті форми, тощо, які не можливо описати в рамках класичних уявлень. Тому розробка узагальнюючих теорій та методів розв'язування крайових задач для вирішення проблеми математичного опису цих деформаційних процесів, на підставі чого можна було б прогнозувати поведінку матеріалів під дією різноманітних чинників, є актуальною.

Вагомий внесок у розвиток досліджень фізичних та механічних аспектів незворотної деформації внесли А.А.Ільшин, Ю.Н. Работнов, В.Д.Клюшніков, Ю.І.Кадашевич, В.В.Новожилов, В.Т. Трошенко, Ю.М.Шевченко, М.С.Можаровський, О.М.Шаблій, Т.С.Писаренко, С.Б.Ватдорф, Б.А.Будянський, М.Я.Леонов, К.М.Русинко, В.А.Осадчук, А.О.Камінський, А.О.Лебедев та інші.

Особливого інтересу заслуговують теорії, яким вдається поєднати закономірності мікро та макро деформації матеріалів. Такі моделі, що базуються на механіці суцільного середовища, дають можливість отримати більш точний кількісний аналіз деформування для ряду режимів навантаження. До числа згаданих моделей належить синтезна теорія незворотної деформації К.М.Русинка, яка поєднує основні положення теорії ковзання та концепції плину з сингулярною поверхнею навантаження. Визначальні співвідношення синтезної моделі значно простіші, ніж в теорії ковзання.

В класичних інженерних розрахунках непружної деформації, повна деформація часто наближено подається у вигляді суми незалежної від часу пластичної деформації, що обумовлена ростом напруження, та залежної від часу деформації повзучості. Однак, непружна деформація - фізичний процес, що суттєво залежить від часу, швидкості, історії навантаження і визначається єдиними деформаційними механізмами. В рамках синтезної теорії, деформація не розділяється на пластичну та в'язку складові, а розглядається як незворотна, що реалізується в часі.

Метою роботи є:

- розвиток синтезної теорії незворотної деформації сто-

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

совно опису пластичності із врахуванням швидкості навантаження, невстановленої та встановленої повзучості в широкому діапазоні гомологічних температур;

- застосування визначальних співвідношень моделі для розв'язування крайових задач;

- оцінка достовірності отриманих результатів.

Наукова новизна роботи :

- побудовано узагальнену синтетичну модель незворотної деформації для описання впливу температурно-силових умов навантаження, невстановленої та встановленої повзучості;

- описано аномальну поведінку границі текучості полікристалічних матеріалів при швидкісному деформуванні, в широкому інтервалі гомологічних температур; вплив швидкості навантаження на процес деформування; ефекти силової післядії; вплив попередньої пластичної деформації на наступну повзучість, тощо;

- сформульовано співвідношення, що описують деформацію встановленої повзучості, в широкому інтервалі гомологічних температур;

- показано, що при описі повзучості в умовах простого навантаження виконується пропорційність девіаторів тензорів швидкостей деформації та напруження;

- розроблено аналітично-числову методику розрахунку напружено-деформованого стану тонкої циліндричної оболонки за умов пластичності, невстановленої та встановленої повзучості.

Вірогідність основних наукових результатів забезпечується: використанням апробованих у літературі вихідних гіпотез і співвідношень; строгістю постановки задач і застосуванням математичних методів їх розв'язання; узгодженістю окремих отриманих у дисертації результатів, з результатами, відомими у літературі; погодженням результатів обрахунків з існуючими експериментальними дослідженнями.

Практична цінність роботи полягає в побудові моделі, яка дозволяє описувати пластичність, при швидкісно-силовому навантаженні, невстановлену та встановлену повзучість в широкому інтервалі гомологічних температур. Розроблена методика розрахунку напружено-деформованого стану циліндричних оболонок, які перебувають під дією змінного внутрішнього тиску, може бути використана в практиці науково-дослідних та проектно-конструкторських установ і організацій, при дослідженні та

проектуванні елементів конструкцій, що виготовлені з жароміцних матеріалів.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на II та III Міжнародних семінарах "Прикладні проблеми моделювання і оптимізації" (м.Славськ 1992, 1993 рр.), на наукових конференціях професорсько-викладацького складу Державного університету "Львівська політехніка". В цілому робота обговорювалась на міжфакультетському науковому семінарі "Математичні моделі і методи в механіці суцільного середовища" Державного університету "Львівська політехніка", семінарі кафедри теоретичної механіки цього ж вузу, науковому семінарі "Проблеми механіки" Київського національного університету ім.Тараса Шевченка, спеціалізованому кваліфікаційному семінарі з механіки деформівного твердого тіла в ІПММ ім.Я.С.Підстригача АН України (Львів, 1995р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 6 наукових робіт.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, підсумків, списку літератури, що містить 138 найменувань. Загальний об'єм роботи - 150 сторінок (основний зміст - 135, додатки - 15) і включає 22 рисунка.

Основний зміст роботи

У вступі обгрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, проведено короткий огляд публікацій з даного напрямку, стисло викладений зміст за розділами.

У першому розділі наведений короткий огляд сучасних уявлень з фізики та металургії, стосовно явища незворотної деформації. Зазначається, що процес незворотної деформації залежить від часу та історії навантаження, і визначається, зокрема, мікроструктурними змінами, останні обумовлені рухом дислокацій. Подаються основні співвідношення синтетичної теорії незворотної деформації.

Розглянемо суміщений n -вимірний простір напружень та деформацій Ільющина. Довжини векторів напруження $\bar{S} (S_1, \dots, S_n)$ та деформації $\bar{\epsilon} (\epsilon_1, \dots, \epsilon_n)$: $S = T \cdot \epsilon$; $\epsilon = 3T/2$ (T, Γ - інтенсивності дотичних напружень і деформацій). В кожній точці поверхні пластичності будується дотична площина. Вважається, що рух однієї площини викликає елементарну пластичну деформацію,

нормальну до площини і залежну від величини її переміщення. Зазначимо, що площини можуть рухатись тільки паралельно самим собі. При навантаженні вектор напруження "птовхає" ті з площин, до яких він "досягає". Макродеформація шукається шляхом сумування елементарних складових від руху множини площин. Якщо навантаження відбувається в підпросторі $R^3(S_4 = S_5 = 0)$, які відповідять дотичним напруженням, наприклад $\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$ простору R^6 , компоненти вектора незворотної деформації визначаються таким способом:

$$\epsilon_i = \int_{\alpha} \int_{\beta} \int_{\lambda} m_i f_N \sin\beta \cos\lambda \, d\alpha \, d\beta \, d\lambda, \quad (i=1,3) \quad (1)$$

Тут \bar{m} - нормаль до рухомої площини в R^3 , $m_i = m_i(\alpha, \beta)$ - напрямні косинуси. Функція f_N (інтенсивність незворотної деформації) однозначно залежить від віддалі H_N до площини в R^6 , яка реалізує незворотну деформацію, причому скалярний добуток $\bar{S} \cdot \bar{m}$ - задає віддалі до сліду цієї площини в R^3 . Для площин, до яких вектор \bar{S} "дотикається", маємо

$$H_N = \bar{S} \cdot \bar{m} \cos\lambda, \quad (2)$$

а для площин, до яких вектор \bar{S} не досягає

$$H_N > \bar{S} \cdot \bar{m} \cos\lambda. \quad (3)$$

Область зміни кутів α, β шукається з умови: $\bar{S} \cdot \bar{m} = \sigma_T$; для кута λ , маємо: $0 \leq \lambda \leq \lambda_1$, $\cos\lambda_1 = \sigma_T / \bar{S} \cdot \bar{m}$. Поверхня пластичності в R^3 - сфера, радіусом σ_T .

Для опису встановленої повзучості, поряд з поняттям інтенсивності незворотної деформації, вводиться функція F_N (інтенсивність зміцнення) наступним диференціальним співвідношенням:

$$dF_N = df_N - K F_N dt, \quad (4)$$

де K - деякий параметр. В цьому випадку, функція інтенсивності зміцнення однозначно залежить від віддалі H_N : $F_N = F_N(H_N / \sigma_c(\theta))$, ($\sigma_c(\theta)$ - границя повзучості, θ - термодинамічна температура). А інтенсивність незворотної деформації f_N визначається з рівняння (4). Для площин, які реалізують незворотну деформацію ($df_N > 0$) виконується рівність (2), в протилежному випадку ($df_N = 0$) справджується нерівність (3). Компоненти вектора швидкості незворотної деформації шукаються за формулою, аналогічною (1), в якій область інтегрування знаходиться з умови: $f_N = 0$.

У другому розділі формується узагальнена модель, що

враховує температурно-силові умови навантаження і деформації невстановленої повзучості. В рамках даної теорії, з позиції єдиних співвідношень, описано ряд ефектів швидкісного навантаження та силової післядії. Проведено співставлення теоретичних розрахунків з результатами існуючих експериментальних досліджень.

Існуючі механічні дослідження показали, що при нестационарних температурно-силових режимах навантаження дисипативні властивості реальних кристалічних тіл залежать від локалізації та релаксації пікових напружень і контролюються закономірностями накопичення енергії "пружних" спотворень ґратки. Характеристикою мікронапруженого стану, в однорідній суцільній моделі твердого тіла, є інтегральний параметр неоднорідності, який отримується шляхом статистичного усереднення питомої пружної енергії формозміни малих частинок, і є мірою інтенсивності локальних пікових напружень, в залежності від режиму навантаження, температури та їх релаксації з часом. Інтегральний параметр неоднорідності визначимо наступною формулою

$$\gamma_N = \int_0^t \frac{a[\bar{\sigma} \cdot \bar{m} \cos \lambda]^2}{\sigma t} Q(t-\tau) dt, \quad (5)$$

Ядро $Q(t-\tau)$, що зменшується з ростом часу t , задамо в експоненційному або полярному вигляді :

$$Q(t-\tau) = c e^{-p(t-\tau)} ; \quad Q(t-\tau) = b \frac{1}{(t-\tau)^q}, \quad (6)$$

де c і b - деякі структурні константи, а $p = p(\theta)$, $q = q(\theta)$ ($q < 1$) - функції температури. Функція (5) представлена таким чином, що γ_N збільшується з ростом швидкості навантаження і рівня досягнутого напруження. Одночас γ_N зменшується, в результаті релаксації ядра $Q(t-\tau)$. Швидкісне зміщення, що є результатом дії локальних пікових напружень - анізотропне, і виникає не в цілому об'ємі матеріалу, а в напрямках реалізації незворотної деформації. Тому параметр (5) характеризується напрямком реалізації незворотної деформації.

В рамках даної теорії, незворотна деформація визначається величиною переміщення площин N_N . Деформаційне зміщення характеризується не тільки рівнем прикладеного напруження, але й температурно-швидкісними умовами навантаження. Тому, віддаль

до площини H_N є функцією інтенсивності незворотної деформації та параметра неоднорідності Z_N , що задає історію зміни швидкості навантаження: $H_N = H_N(\dot{\epsilon}_N; Z_N; \psi)$, ψ - деяка функція структури матеріалу, конкретизація якої надається нижче.

Функцію інтенсивності незворотної деформації задамо співвідношенням:

$$\dot{\epsilon}_N(H_N; Z_N; \psi) = \chi \left[\frac{H_N}{\sigma_c(\theta)} \right] - Z_N - \psi, \quad (7)$$

де χ - характеристична функція матеріалу, що задовільняє умові: при $H_N = \sigma_c(\theta)$, $\chi = 0$; $\sigma_c(\theta)$ - границя повзучості. Використовуючи, запропонований в синтезній теорії пластичності, спосіб представлення функції χ , інтенсивність незворотної деформації запишемо у вигляді:

$$\dot{\epsilon}_N(H_N; Z_N; \psi) = a \left[\left[\frac{H_N}{\sigma_c(\theta)} \right]^2 - 1 - Z_N - \psi \right], \quad (8)$$

де a - деяка константа.

При навантаженні, площини віддаляються від початку координат, хоча вектор \vec{S} до них не дотикається. Початок незворотної деформації визначається з умови досягнення вектором \vec{S} деякої площини, що перемістилась в результаті швидкісного навантаження, тобто виконується рівність (2).

Зміна швидкості навантаження впливає на поведінку границі текучості σ_T . При навантаженні, в деякий момент часу t_0 , вектор \vec{S} "досягає" площини, яка відповідає за початок виникнення незворотної деформації. Віддаль до цієї площини $\sigma_T = H_N(Z_N(t_0), \psi)$ і визначається із співвідношення (8), з врахуванням $\dot{\epsilon}_N = 0$. В умовах повільного навантаження ($Z_N \approx 0$), границя текучості співпадає з статичною границею повзучості $\sigma_T = \sigma_c(\theta)$. При такому підході константою матеріалу виступає $\sigma_c(\theta)$. Величина σ_T визначається температурно-швидкісними умовами деформування. В результаті чого, залишкова деформація виникає при значенні σ_T , що значно перевищує σ_c , з ростом швидкості навантаження.

Загально відомо, що границя текучості чистих матеріалів монотонно спадає з підвищенням температури і зменшенням швидкості деформації. Однак, при наявності домішок в металі можливий аномальний ефект, що проявляється в інтервалі гомологічних температур $\theta \in [0,3; 0,6]$: з підвищенням температури границя

текучості росте. Тільки після досягнення максимуму спостерігається її плавне зменшення. Положення та величина аномального максимуму залежить від структури матеріалу, температури та швидкості навантаження. Врахування цього ефекту, що визначається впливом мікроструктури полікристалічних матеріалів, вимагає введення у співвідношення моделі функції ψ , яку називатимемо інтенсивністю впливу мікроструктури:

$$\psi(\theta, \nu) = \begin{cases} 0, & \theta \in [0; \theta_1] \cup [\theta_2; 0.75]; \\ \psi_0, & \theta \in [\theta_1; \theta_2]; \theta_1 = 0.3; \theta_2 = 0.6. \end{cases} \quad (9)$$

$$\psi_0 = d \left[- \left[\frac{\theta_1^2 - \xi}{\theta_1^2 - \xi} \right]^2 + 1 \right]; \psi_0^{\max} = d; \xi = \frac{\theta_1^2 + \theta_2^2}{2}; \theta_0 = \xi^{1/2}; Z = Z(\nu).$$

Основні співвідношення моделі (1-3), (5-9) описують вплив історії зміни швидкості навантаження на механічну поведінку матеріалів.

Проведено співставлення результатів обрахунків, на основі запропонованих співвідношень, з експериментальними даними стосовно поведінки границі текучості м'якої сталі (з врахуванням аномальних ефектів) в залежності від температури при різних швидкостях навантаження.

Надалі, розглядаються матеріали для яких аномальні ефекти на границі текучості суттєво не проявляються ($\psi = 0$).

На основі сформульованої моделі, проведено дослідження залежності границі текучості від швидкості деформування та температури. Зазначимо, що вплив швидкості навантаження є суттєвим при навантаженні з незначними швидкостями. В діапазоні високих швидкостей границя текучості змінюється слабо. З ростом температури σ_T зменшується. Таким чином, теорія якісно пояснює поведінку границі текучості в залежності від температурно-швидкісних умов навантаження.

Коли напруження і деформації розглядаються в часі, поняття пропорційного навантаження вимагає уточнення. Введемо поняття узагальнено-пропорційного навантаження. В даному випадку, компоненти напруження змінюються пропорційно деякому параметру з постійною швидкістю (в пластичній області), таким чином вектор навантаження: $\vec{S} = \vec{\nu}t$, $|\vec{\nu}| = \nu$, $\nu = \text{const}$. При такому навантаженні, визначальні співвідношення узагальненої моделі можна зобразити в термінах інтенсивностей

$$\varepsilon_1 = \frac{3}{2} \frac{\Gamma}{T} S_1. \quad (10)$$

Переходячи до компонент девіаторів, отримаємо

$$e_{11} = \frac{S_{11}}{2G}; \quad G(T, \mathcal{J}_N) = \frac{T}{3 \Gamma(T, \mathcal{J}_N)}. \quad (11)$$

Таким чином, в умовах простого навантаження, підтверджується гіпотеза про існування "єдиної кривої" деформування не залежно від вигляду напруженого стану. Співвідношення (10) через параметр \mathcal{J}_N , враховують вплив швидкості навантаження та температури на діаграми $\sigma(\varepsilon)$. Діаграма деформування, яка відповідає деякій швидкості навантаження, розміщується нижче від кривої, побудованої при вишій швидкості. При квазідинамічному навантаженні параметр неоднорідності з експоненційним ядром - обмежений, що забезпечує існування кінцевої динамічної кривої. Даний підхід реалізує концепцію Ю.Н.Работнова та Ю.В.Суворової. На противагу такій точці зору полярне ядро дає необмежений ріст \mathcal{J}_N , з ростом швидкості навантаження, що відповідає концепції В.В. Соколовського.

В рамках запропонованого підходу, описано явище впливу миттєвого збільшення швидкості навантаження в пластичній області на діаграму $\sigma(\varepsilon)$. Даний ефект полягає в тому, що миттєве збільшення швидкості навантаження зумовлює пружну ділянку, далі, в результаті деформації, крива деформування асимптотично наближається до діаграми, що побудована при постійній, більшій швидкості.

Визначальні співвідношення моделі дають можливість обчислювати деформацію невстановленої повзучості, як різницю між незворотною деформацією в момент часу t та t_1 (t_1 - час припинення зміни навантаження), оскільки $\mathcal{J}_N(t) < \mathcal{J}_N(t_1)$. Відносні відовження вираховуються за однією і тією ж формулою (10), проте при різних значеннях \mathcal{J}_N у відповідні моменти часу.

Описано ефект затримки повзучості при меншому, ніж границя текучості навантаженні, повзучість при ступеневій програмі навантаження, ефект Хаазена-Келі. Розглянуто питання впливу пластичної деформації на повзучість згідно з підходом Ю.М.Работнова, тобто, вважається, що невелика пластична деформація не виявляє зміцнюючої дії на повзучість. Незважаючи на те, що незворотна деформація в результаті "миттєвого" деформування і повзучості описується єдиними співвідношеннями, рівняння моделі враховують яким шляхом відбулося зміцнення ("миттєвою" де-

формація чи повзучість). В залежності від цього залишкова деформація буде різною. Останнє забезпечується наявністю параметра неоднорідності у визначальних співвідношеннях теорії.

З метою перевірки можливостей використання запропонованих співвідношень проведено співставлення теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень: криві границі текучості та деформування відпаленого заліза; криві невідновленої повзучості червоної міді при ступеневій програмі навантаження. Отримані результати дають підставу стверджувати, що теорія задовільно описує експериментальні дані.

Третій розділ присвячений дослідженню деформаційної поведінки матеріалів за умов встановленої повзучості, а також взаємодії попередньої пластичної деформації на наступну повзучість.

В рамках синтезної теорії опис деформації повзучості ґрунтується на співвідношенні (4), яке свідчить, що незворотна деформація визначається двома процесами: зміцненням, яке обумовлене непружною деформацією (перший доданок правої частини), і зворотом, що проявляється в часі (другий доданок). Параметр $X = X(T, \theta)$, що входить в залежність (4), називатимемо відносною швидкістю звороту. Приймемо наступну залежність:

$$X(T, \theta) = f_1(T) f_2(\theta)$$

$$f_2(\theta) = \begin{cases} 0 & , 0 < \theta \leq 0,25 ; \\ \sum_{i=0}^m a_i \theta^i & , 0,25 \leq \theta \leq 0,5 ; \\ \exp\left\{-Q_c / R \theta T^m\right\} & , 0,5 \leq \theta \leq 0,7 . \end{cases} \quad (12)$$

$$f_1(T) = A (T - \sigma_c)^m, T > \sigma_c; \quad f_1(T) = 0, T < \sigma_c$$

де Q_c - енергія активації самодифузії; R - універсальна газова стала; T^m - температура плавлення; A, m - постійні матеріалу. Повзучість посередньо активується температурою - через процес, який керує зворотом. Вважають, що у випадку низьких температур ($0 < \theta \leq 0,25$) повзучість пов'язана із зміцненням, не проявляється ($X = 0$). При абсолютних температурах, більших половини температури плавлення, повзучість контролюється дифузійно. Це дає можливість ввести залежність функції відносної швидкості звороту від температури у вигляді закону Ареніуса, використовуючи фізичні константи матеріалу Q_c і R . В інтервалі температур $0,25 \leq \theta \leq 0,5$ одночасно діють декілька проце-

сів, що контролюють швидкість деформації. Тому температурна залежність функції відносної швидкості звороту апроксимується поліномом. При цьому, коефіцієнти останнього вибираються з умов неперервності $f_2(\theta)$ при переході до відповідних інтервалів температур.

Функція інтенсивності змінення F_N задається співвідношенням (8), а інтенсивність незворотної деформації шукається з рівності (4). Такий підхід дає можливість описати повзучість в широкому діапазоні температур.

За умов встановленої повзучості, при узагальнено-пропорційному навантаженні отримаємо пропорційність дівіаторів тензорів швидкостей деформацій та напруження

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{3}{2} \frac{\Gamma}{T} S_i; \dot{\epsilon}_{ij} = \frac{S_{ij}}{2A}; \Lambda(T, T_N, K) = \frac{T}{3 \Gamma(T, T_N, K)}. \quad (13)$$

В класичних теоріях повзучості постулюється виконання цієї гіпотези. В рамках сформульованої моделі, пропорційність дівіаторів тензорів швидкостей деформацій та напружень впливає із співвідношень теорії.

У цьому ж розділі розглянуто питання впливу попередньої пластичної деформації на наступну повзучість. Як демонструють експериментальні дослідження, попередня пластична деформація суттєво підвищує опір матеріалу повзучості, причому ефект взаємодії між повзучістю і пластичністю стає більш вагомим при великих попередніх пластичних деформаціях.

Явище впливу попередньої пластичної деформації на наступну повзучість є принциповим для питання існування потенціалу повзучості. У відповідності з концепцією потенціалу повзучості вважається, що швидкість встановленої повзучості є однозначною функцією напруженого стану в даній точці, незалежно від того, яким чином цей напружений стан був досягнутий. Даний ефект вказує на те, що такий підхід не дозволяє вірно розуміти і моделювати процес повзучості. Деформації повзучості слід співставляти з величинами миттєвої пластичної деформації, яка обумовлена історією зміни напруження.

Далі проводиться співставлення результатів, одержаних на основі виведених співвідношень, з експериментальними даними про деформацію нержавіючої сталі 316, в умовах сумісної дії пластичності та повзучості. Побудовані криві пластичності та повзучості задовільно співпадають з експериментальними кривими.

У четвертому розділі викладається методика розв'язання задачі розрахунку напружено-деформованого стану тонкої циліндричної оболонки, що перебуває під дією змінного внутрішнього тиску, за умов пластичності, невідновленої та відновленої повзучості.

Під дією осесиметричних розподілених зовнішніх навантажень, у відповідності з гіпотезою Кірхгофа-Лява, в круговій циліндричній оболонці виникає напружено-деформований стан: меридіональне σ_1 , колове σ_2 , дотичне τ_{12} напруження; та деформації ϵ_1, ϵ_2 . Приріст деформації складається з двох частин: $d\epsilon_1 = d\epsilon_1^E + d\epsilon_1^N$, тобто пружної і непружної складової деформації. Із моделі (11), (13), згідно з напружено-деформованим станом оболонки, прирости непружної деформації визначаються співвідношенням

$$d\epsilon_1^N = \frac{d\Gamma}{2T} \left[2\sigma_1 - \sigma_2 \right]; \quad d\epsilon_2^N = \frac{d\Gamma}{2T} \left[2\sigma_2 - \sigma_1 \right].$$

Для розв'язування задачі застосуємо метод змінних параметрів пружності, розбиваючи процес навантаження на n скінченних етапів. Напруження та деформації на деякому n -му етапі складаються із суми відповідних величин на $(n-1)$ -му і їх приростів на n -му етапах навантаження. Прирости напружень на n -му кроці

$$\Delta\sigma_1 = \langle \eta_{22} \rangle \Delta\epsilon_1 + \langle \eta_{12} \rangle \Delta\epsilon_2 + \langle \eta_{13} \rangle \Delta\tau_{13} + \langle \eta_{14} \rangle \Delta t;$$

$$\Delta\sigma_2 = \langle \eta_{12} \rangle \Delta\epsilon_1 + \langle \eta_{11} \rangle \Delta\epsilon_2 + \langle \eta_{23} \rangle \Delta\tau_{13} + \langle \eta_{24} \rangle \Delta t.$$

"Параметри пружності" $\langle \eta \rangle$ на кожному етапі коректуються методом послідовних наближень.

Використовуючи геометричні співвідношення та рівняння рівноваги для приростів зусиль і моментів оболонки сталої товщини, отримаємо крайову задачу для системи звичайних диференціальних рівнянь $\frac{d\bar{Y}}{dx} = A\bar{Y} + \bar{F}$ з умовами жорстко закріпленого та вільного контурів

$$x = 0 : \Delta u = \Delta v = \Delta w = 0; \quad x = L : \Delta Q = \Delta M_1 = 0.$$

Тут $\Delta u, \Delta w$ - прирости переміщень в меридіональному та коловому напрямках, $\Delta v = \frac{d\Delta w}{dx}$; $\Delta Q, \Delta M_1$ - прирости поперечного зусилля та згинаючого моменту в перерізі $x = \text{const}$, L - довжина твірної оболонки. За допомогою методу пристрілки крайова задача зводиться до задачі Коші. Остання розв'язується методом Піра.

Розрахунки проводились для оболонки, виготовленої з нер-

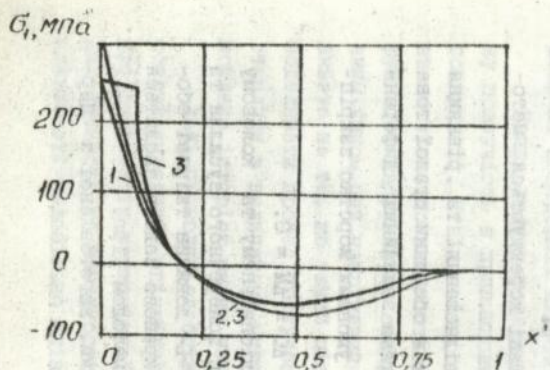


Рис. 1.

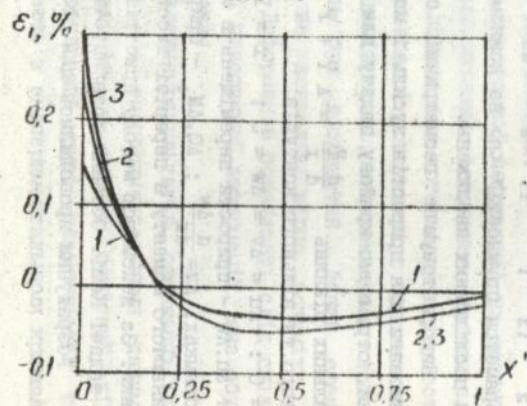


Рис. 3.

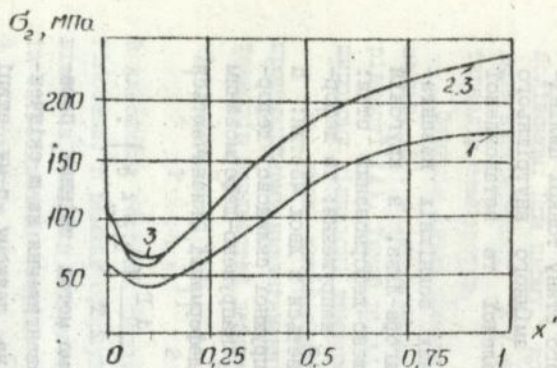


Рис. 2.

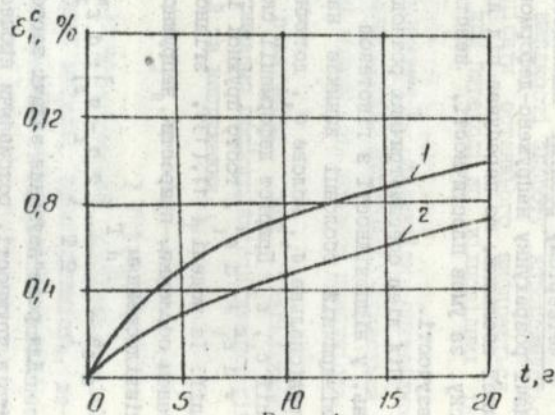


Рис. 4.

жавіючої сталі 316 радіуса $R=50\text{мм}$, товщини $h=1\text{мм}$, довжини $L=40\text{см}$, внутрішній тиск $P = \nu t$, $\nu = 47 \text{ КПа/с}$, з використанням визначених в 3 розділі параметрів моделі. На рис. 1-3 зображено розподіл напружень та деформацій по довжині твірної оболонки в точці $-h/2$. Криві 1,2 відповідають моментам часу $t= 72\text{с}$, 102с . Крива 3 - повзучість на протязі 20 год. (при зовнішньому тиску, досягнутому за час навантаження $t=102\text{с}$). На рис.4 представлені результати розрахунків на повзучість в точці $x=0, -h/2$. Криві 1,2 - повзучість при постійному внутрішньому тиску, досягнутому за час навантаження $t=102\text{с}$. Крива 2 - деформація повзучості, що реалізується після миттєвого розвантаження від значення попередньої пластичної деформації за час навантаження $t=106\text{с}$. Отримані результати демонструють збільшення опору матеріалу повзучості (до 30%) після попереднього пластичного деформування.

У підсумках сформульовано основні результати роботи.

Основні результати та висновки.

1. Розширено синтезну модель непружної деформації на описання ефектів температурно-швидкісного навантаження та невстановленої повзучості.

2. В рамках синтезної теорії незворотної деформації, за умов узагальнено-пропорційного навантаження, отримано підтвердження гіпотези про існування "єдиної кривої" деформування незалежно від характеру напруженого стану з врахуванням швидкості навантаження.

3. На основі введеної в синтезну теорію функції впливу мікроструктури, описано аномальну поведінку границі текучості.

4. Приведений підхід дозволяє розглядати деформацію встановленої повзучості в широкому інтервалі (0,25 - 0,75) гомологічних температур.

5. Показано, що розглянутий варіант теорії незворотної деформації достовірно описує криві деформування при різноманітних режимах навантаження, особливості деформаційної поведінки матеріалів при меншому, ніж границя текучості навантаженні, та невстановлену повзучість при ступеневому навантаженні.

6. Отримано підтвердження виконання пропорційності девіаторів тензорів швидкостей деформацій та напруження при описі

повзучості для простого навантаження в умовах складного напруженого стану.

7. Досліджено особливості деформаційної поведінки твердих тіл за умов сумісної дії пластичності і повзучості. Показано, що даний підхід описує вплив попередньої пластичної деформації на наступну повзучість.

8. На основі приведеної моделі розроблено аналітично-числову методику розрахунку напружено-деформованого стану тонкої циліндричної оболонки, що перебуває під дією змінного внутрішнього тиску за умов сумісної дії пластичності та повзучості.

Основні результати дисертації відображено в публікаціях:

1. Слюсарчук Ю.Н. Необратимая деформация при кручении в рамках синтетической модели пластической среды. // Прикл. пробл. моделир. и оптимиз.: Матер. II Междунар. семинара, Славское, 1-6 марта, 1992. / Ин-т кибернет. АН Украины. - Киев, 1992. - с.200-202. - Деп. в ВИНИТИ 12.08.92, N 2628-В92.
2. Слюсарчук Ю.Н. Математическая модель пластичности и установившейся ползучести в рамках синтетической теории скольжения и течения. / Львов. политехн. ин-т, - Львов, 1993. - 16с. - Рус. - Деп. в УкрИНТЭИ 18.03.93, N 562-Ук93.
3. Слюсарчук Ю.Н. О температурно-скоростной зависимости границы текучести металлов / Львов. политехн. ин-т. - Львов, 1993. - 10 с. - Рус. - Деп. в УкрИНТЭИ 18.03.93, N 561-Ук93.
4. Русинко К.М., Слюсарчук Ю.М. Миттєва деформація і встановлення повзучість у межах синтетичної теорії ковзання і плину. // Вісник Львів. політехн. ін-ту. - 1993.-N 269, -с.169-172.
5. Слюсарчук Ю.М. Незворотна деформація твердого тіла з врахуванням швидкості навантаження // Вісник Державного ун-ту "Львів. політех." - 1994. - N 277, с.128 - 131.
6. Слюсарчук Ю.Н. Математическая модель пластичности и неустановившейся ползучести в терминах синтетической теории скольжения и течения // Прикл. пробл. моделир. и оптимиз.: Матер. III Междунар. семинара, Славское, 1-5 марта, 1993. / Ин-т кибернет. АН Украины. - Киев, 1994. - с.130-134. - Деп. в ВИНИТИ 8.02.94, N 345-В94.

Аннотация

Слюсарчук Ю.Н. Основные соотношения пластичности и ползучести в рамках синтетической теории необратимой деформации. 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. Я.С.Подстригача НАН Украины, Львов, 1995.

На основе синтетической теории необратимой деформации построена модель неупругой деформации поликристаллических тел, для описания влияния температурно-силовых условий нагружения, неустановившейся и установившейся ползучести в широком интервале гомологических температур. Полученные определяющие уравнения использованы для решения задачи определения напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки, которая находится под действием переменного внутреннего давления, в условиях пластичности и ползучести.

Annotation

Slusarchuk Yu.M. Principal plasticity-creep relations within the framework of synthesis theory of irreversible deformations. Thesis for Candidate's degree (Physico-Mathematical Sciences) in speciality 01.02.04 - Mechanics of strained solid body. Ya.S.Podstrygach Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, 1995.

On the base of synthesis theory of irreversible deformation the model of polycrystalline body unelastic deformation has been built up to describe the effect of temperature-force conditions of loading, unstationary and stationary creep in a wide range of homologic temperatures. The defining equations are used for solving the task of defining of the stressed-strained state of cylindrical shell effected by alternated internal pressure under plasticity and creep conditions.

Ключові слова: незворотна деформація, пластичність, швидкість навантаження, невстановлена повзучість, встановлена повзучість.

Слющ

ЛНМ ім. В. Стефанька
АН України

Handwritten text at the top of the page, possibly a page number or title, appearing as "157 E. 55th".

Faint, illegible text located in the lower middle section of the page, possibly bleed-through from the reverse side.

Handwritten text at the bottom right corner of the page, appearing as "157 E. 55th".

Ав 33.975

Ав 33.975

Підписано до друку 12.12.95р.
Формат 60x84 ¹/₁₆. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 1,0. Тираж 100. Зам. 1137.
Друк. ПТУ-58. 290008. Львів. Ів. Федорова, 9