

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ім. Г. В. Карпенка

На правах рукопису

ОСИПЮК ВАЛЕНТИ

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ КОВЗАННЯ СТОСОВНО ДО
ОПИСУ ШВИДКІСНИХ ЕФЕКТІВ І ПОВЗУЧОСТІ
МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 01.02.04 - Механіка деформівного
твердого тіла

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів - 1993

AB 20.703

Робота виконана на кафедрі теоретичної механіки Львівського політехнічного інституту (Україна) і на кафедрі основ конструкцій машин Варшавської політехніки (Польща)

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00814014 (1)

- опоненти - академік АН України, доктор технічних наук, професор
ЛЕБЕДЕВ Анатолій Олександрович
- член - кор АН України, доктор фізико-математичних наук, професор
БУРАК Ярослав Йосипович
- доктор фізико-математичних наук, професор
ШАВЛИЙ Олег Миколайович

Провідна установа - Київський політехнічний інститут

Захист відбудеться "15" грудня 1993 р., о 15 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д. 016.42.01 при Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка АН України (290601, м Львів, МПС, вул. Наукова, 5)

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка АН України (290601, м Львів, МПС, вул. Наукова, 5)

Автореферат розісланий "4" листопада 1993 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради

Григорій

НИКИТОР-ЧИН
Григорій Миколайович

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В даний час в умовах зростання вимог в області конструювання багатьох машин та пристроїв, у зв'язку з підвищенням їх експлуатаційних параметрів, все більш необхідним стає врахування тих деформаційних ефектів, які не враховуються в класичних теоріях пластичності і повзучості. Ці ефекти виникають при складних швидкісних режимах навантаження і в багатьох випадках являються основними факторами, що впливають на деформацію металічних матеріалів.

Як свідчать різні експерименти, істотну роль в протіканні процесу незворотньої деформації відіграють внутрішні орієнтовані напруження, врахування яких і пропонується в даній роботі. Внутрішні напруження впливають на початок виникнення пластичних зсувів, на протікання невстановленої повзучості, а також пояснюють ряд деформаційних ефектів.

Наука про повзучість конструкційних матеріалів на початку свого розвитку користувалась досягненнями теорій пластичності. Існуюче до нашого часу поняття чітко визначеної границі текучості є однією з причин відмежування теорій пластичності від теорій повзучості. Загальноприйнято "миттєву" пластичну деформацію і деформацію повзучості описувати різними рівняннями. Результати багатьох досліджень вказують, що природа обох деформацій однакова і застосування окремих рівнянь в цьому випадку не обов'язкове.

В даній роботі залишкова деформація не поділяється на "миттєву" та в'язку частини, а розглядається як незворотня деформація, що протікає в часі. Одержані в роботі результати можуть служити основою розрахунку деталей машин, що працюють

в складних умовах змінного в часі навантаження, а також для розрахунку деяких задач технологічних процесів обробки металів. Виконані дослідження будуть сприяти розвитку науково-технічного прогресу.

МЕТА РОБОТИ. Основною метою даної роботи являється модифікація та розвиток теорії ковзання стосовно до опису швидкісних ефектів і повзучості матеріалів. Напрямок розвитку підкріплюється фізичною інтерпретацією. Сформульовані співвідношення вказують експериментальної перевірки. Програма досліджень побудована таким чином, щоб її можна було використовувати для перевірки інших теорій і для пояснення деяких деформаційних явищ, які по-різному вкладаються в рамки багатьох вже існуючих гіпотез.

НА ЗАХИСТ ВІНОСЯТЬСЯ:

1. Математичні моделі деформівного металічного матеріалу, що враховують внутрішні напруження і дефекти структури.
2. Результати аналітичного опису та експериментальних досліджень модуля довгачаження G_d як функції орієнтаційних внутрішніх напружень.
3. Результати теоретичних та експериментальних досліджень деформаційних ефектів після миттєвої зміни рівня напруження.
4. Нова конструкція пристрою для проведення досліджень деформаційних ефектів.
5. Дослідження впливу історії осевого навантаження на протікання зсувної деформації повзучості при складному напруженому стані.

6. Дослідження релаксації напружень при одноосному і при складному навантаженнях.

7. Дослідження стабілізації матеріалу при пульсуючому спектрі навантаження.

8. Розв'язок технологічної задачі холодної прокатки з використанням теорії ковзання.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ. В роботі використовувався аналіз досягнень фізики твердого тіла та інших наук по проблемі пластичного деформування металевих матеріалів. Пізніше використовувалися аналітичні та експериментальні методи досліджень. Вид поставлених експериментів слідував з аналізу математичних моделей дослідженої теорії. Сформульовані співвідношення зазнали широкої експериментальної перевірки. Наступним завданням була ідентифікація параметрів в прийнятих співвідношеннях так, щоб довести відповідність прийнятої моделі дослідним результатам.

НАУКОВА НОВИЗНА.

1. Розроблено нові математичні моделі, які в рамках теорії ковзання дозволяють дати фізичну інтерпретацію багатьом деформаційним ефектам і описати зворотню повзучість, кутову точку, вплив історії осьового навантаження на асувну деформацію повзучості при складному непропорційному навантаженні і т. д.

2. Проведено нові, оригінальні експерименти в області дослідження поведінки матеріалу при змінних в часі навантаженнях.

3. Буявлено і описано орієнтовний характер внутрішніх

напружень. Бказано на їх істотну роль в процесі протікання початкових стадій незворотньої деформації.

4. Викладено нові співвідношення удосконаленої теорії ковзання, сформульовані на основі фізичної моделі, що відображає дійсні процеси в металічному матеріалі.

5. Приведено фізичну інтерпретацію нового поняття, так званої границі акомодациї, а також визначено, пов'язану з цією границею, умову стабілізації матеріалу.

ДОСТОВІРНІСТЬ ВИСНОВКІВ І ВСТАНОВЛЕНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ підтверджується хорошою збіжністю теоретичних та експериментальних результатів. Ця збіжність одержана для широкого спектру різноманітного експериментального матеріалу, виконаного автором, а також заповиченого з публікацій інших дослідників. Описані результати мають одноманітну фізичну інтерпретацію.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РОБОТИ. Представлена в роботі концепція удосконалення теорії ковзання дає можливість правильно описати і пояснити механізми пластичної деформації, а також ті, які до цього часу не знайшли достатньо однозначної інтерпретації. Ця концепція підтверджується досвідом і на наш погляд, представляє безпосередній інтерес у вивченні пластичних властивостей металічних матеріалів, пізнанні закономірностей протікання незворотньої деформації. Одержані в роботі результати можуть служити основою розрахунку деталей машин, що працюють в складних умовах навантаження, а також розв'язування задач технологічних процесів обробки металів.

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ. Розраховано процес холодної прокатки полеси з алюмінієвого сплаву, а також релаксація болта при складному напруженому стані. Результати цих розрахунків одержали апробацію на технічній нараді та актуально використовуються на заводі ВСК ПЗЛ у Варшаві.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ. Питання, що складають зміст дисертації, доповідались і одержали схвалення на міжнародних конференціях (симпозиумах): по проблемах повзучості матеріалів, Бялисток - 1989 р.; по повзучості і супутніх процесах, Бялисток - 1992 р.; на загальнодержавних конференціях: по реології, Вроцлав - 1987 р., по основах конструкцій машин, Щецин-Свіноуйсьце - 1987 р., по дослідницькій механіці твердого тіла, Варшава - 1988 р.; на наукових семінарах механічних факультетів політехнічних інститутів, Бялисток - 1992 р., Пезнань - 1992 р.; на технічній нараді ВСК ПЗЛ, Варшава - 1992 р.

В повному об'ємі дисертаційна робота викладена і рекомендована до захисту на наукових семінарах кафедр основ конструкції машин і прикладної механіки Бялостокського політехнічного інституту (1992 р.), на науковому семінарі кафедри теоретичної механіки і на міжфакультетському науковому семінарі Львівського політехнічного інституту (1992 р.).

ПУБЛІКАЦІЇ. По темі дисертації опубліковано 15 наукових праць, з них 7 - у вітчизняних та зарубіжних академічних журналах, 2 - в матеріалах міжнародних конференцій, 1 авторське свідчення.

СТРУКТУРА І ОБ'ЄМ РОБОТИ. Дисертаційна робота скла-

дається з вступу, одинадцяти глав і закінчення. Містить 211 сторінок друкованого тексту, 49 рисунків, 5 таблиць і додаток на 1 сторінці. Список використаних літературних джерел включає 120 найменувань, з них 99 на іноземних мовах.

2. ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У ВСТУПІ визначено основну мету і направленість дисертації, показано актуальність проблеми і дано загальну характеристику роботи.

В ДРУГОМУ РОЗДІЛІ " Фізичні основи пластичної деформації металевих матеріалів " приводиться характеристика механізмів неворотної деформації, що горкається як "миттєвою", так і деформації, протікаючої в часі. Вказується на істотну роль внутрішніх мікронапружень в процесі пластичного деформування.

В ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ " Особливості повзучості металевих матеріалів у світлі новітніх наукових досягнень " обговорюється питання затримки повзучості, а також ефекти тимчасового послаблення і тимчасового зміцнення.

В сучасній літературі вживаються синоніми затримки повзучості, а саме: запізнювання текучості, інкубаційний період, запізнювання повзучості. Ефект затримки повзучості полягає в тому, що після достатньо швидкого зниження напруження зразка, який знаходиться в стані повзучості, відмічається інкубаційний період, тобто швидкість повзучості відразу після зниження напруження дорівнює нулю. Такого ж ефекту можна досягти у випадку високошвидкісного навантаження за класичну

статичну границю текучості. Слід зауважити, що питання про затримку повзучості до цього часу не знайшло однозначного пояснення.

Тимчасове послаблення - це процес, викликаний тимчасовим підвищенням швидкості повзучості після стрибкоподібного зростання навантаження, той самий ефект спостерігається при зміні головних напрямків тензора напружень.

Тимчасове зміцнення - це процес зменшення швидкості повзучості безпосередньо після стрибкоподібного зниження навантаження.

Глумачаться поняття порогового напруження, а також зворотного і ефективного напруження.

Обговорені в цьому розділі фізичні явища мають істотне значення для удосконалення теорії ковзання, що розвивається автором. Вони будуть використані в наступних частинах дисертації.

В ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ " Теорії незворотньої деформації, що ґрунтуються на концепції ковзання " представлено огляд і аналіз опублікованих робіт по проблемі.

Основа увага при цьому приділена аналізу існуючих теорій, що ґрунтуються на концепції ковзання.

За останні роки опубліковано праці багатьох авторів, що внесли значний внесок у дослідження процесу незворотньої деформації, а саме: С. Б. Батдорфа, В. Будяньського, Ф. І. Блинова, М. Л. Бернштейна, П. Длужевського, А. М. Жукова, В. А. Займовського, Ю. І. Кадашевича, А. А. Камінського, В. Д. Ключнікова, М. Я. Леонова, Т. Г. Дзя, В. А. Ліхачова, А. К. Малмейстера, М. М. Мишляєва, Б. Поля, Б. М. Ровінського, К. М. Русинка, В. П. Тамужа, Г. А. Тетерса, Г. Дж. Фроста, Й. Чадека, Н. Ю. Швайка, М. Я. Ешбі та

ін.

Приведено опис системи ковзання (рис. 1). Розглядаються теорії ковзання Батдорфа - Будянського, М.Я. Леонова та К.М. Русинка. Представлено основні співвідношення цих теорій.

По Батдорфу і Будянському макроскопічна деформація обчислюється по формулі:

$$\tilde{\gamma}_{ij} = \int_{\Omega} \int_{\omega_1}^{\omega_2} (n_i l_j + n_j l_i) \varphi_{nl} d\Omega d\omega \quad (1)$$

$$(i, j = x, y, z),$$

де Ω - область півсфери, в якій відбувається ковзання;

ω_1, ω_2 - границі віяла ковзань в площинах дотичних до півсфери в області Ω ; n_i, l_j - напрямні косинуси осей n і l відносно фіксованої системи координат x, y, z (рис. 2); $d\Omega = \cos\beta d\alpha d\beta$; φ_{nl} - функція інтенсивності ковзання, яка визначається:

$$\varphi_{nl} = \sum_{p=1}^5 a_p \left(\frac{\tau_{nl}}{\tau_T} - 1 \right)^p \quad \text{при } \tau_{nl} = \tau_{nl}^* > \tau_T$$

$$\varphi_{nl} = 0 \quad \text{при } \tau_{nl} \leq \tau_T$$

$$\frac{d\varphi_{nl}}{d\tau_{nl}} = 0 \quad \text{при } \tau_{nl} < \tau_{nl}^* \quad (2)$$

де τ_{nl} - компонента дотичного напруження в системі n, l ; τ_{nl}^* - найбільше значення τ_{nl} за всю історію навантаження; τ_T - границя текучості при чистому асуві; a_p - постійні матеріалу.

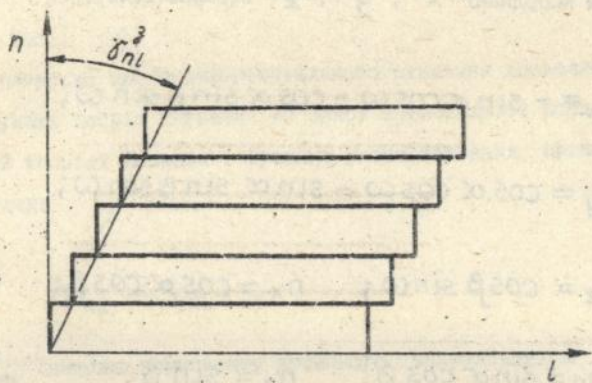


Рис. 1. Схема козвання кристалічного зерна. Вектори n і l визначають систему козвання.

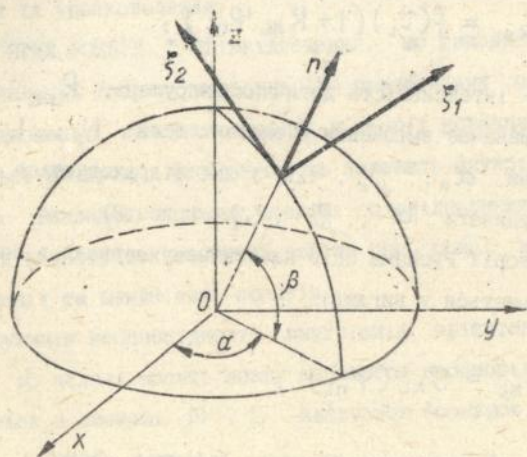


Рис. 2. Координати площини козвання.

Напрямні косинуси осей l і n відносно фіксованої системи координат x, y, z виражаються:

$$l_x = -\sin \alpha \cos \omega - \cos \alpha \sin \beta \sin \omega;$$

$$l_y = \cos \alpha \cos \omega - \sin \alpha \sin \beta \sin \omega;$$

$$l_z = \cos \beta \sin \omega; \quad n_x = \cos \alpha \cos \beta; \quad (2. a)$$

$$n_y = \sin \alpha \cos \beta; \quad n_z = \sin \beta.$$

В теоріях Леонова і Русинка не використовується функція ковзання у вигляді (2), а вводиться поняття опору пластичному зсувові S_{NL} , що визначається по формулі:

$$S_{NL} = f(\tau_i) (1 + R_{NL} \Psi_{nl}),$$

де τ_i - інтенсивність дотичних напружень, R_{NL} - оператор, що визначає зміцнення в системі осей N, L ; заданих кутами $\alpha_0, \beta_0, \omega_0$, які відраховуються так само, як і координати α, β, ω (рис. 2).

В теорії Русинка опір пластичному зсувові в системі N, L приймається у вигляді:

$$S_{NL} = S_{NL}(\Psi_{nl}),$$

де Ψ_{nl} - функція інтенсивності дефектів. Функція Ψ_{nl} зв'язується з Φ_{nl} наступною диференціальною залежністю

$$d\psi_{nl} = \alpha d\varphi_{nl} - R(\lambda)\psi_{nl} dt ,$$

де α - постійна, $R(\lambda)$ - функція гомологічної температури, t - час.

Введення цього диференціального рівняння дозволяє застосовувати теорію ковзання до опису встановленої поважності.

В теоріях Леонова і Русинка умова ковзання приймається у вигляді

$$\tau_{NL} = S_{NL} , \quad (3)$$

де τ_{NL} означає компоненту дотичного напруження в системі N, L .

Автори вищевказаних теорій внесли цінний внесок в розвиток механіки деформівного твердого тіла, але ці теорії не позбавлені деяких недоліків. Автор даної дисертації робить критичний огляд вищевказаних теорій і пропонує нові концепції для їх удосконалення.

П'ЯТИЙ РОЗДІЛ " Співвідношення, що використовуються в удосконаленій теорії ковзання " присвячений опису нових співвідношень, використовуваних в теорії ковзання, яка розвивається автором. Особлива роль належить внутрішнім напруженням. Викладені в цьому розділі співвідношення використовуються в наступних частинах роботи при описі незворотньої деформації та швидкісних ефектів.

Функція неоднорідності внутрішніх орієнтованих напружень, що надалі носить назву параметра неоднорідності, визначається в системі N, L наступною формулою

$$J_{NL} = B \int_0^t \frac{\partial \tau_{NL}}{\partial s} Q(t-s) ds, \quad (4)$$

де B - структуральна постійна матеріалу; $Q(t-s)$ - спадна функція часу; t - моменту більш пізнього, текучого, який досліджується і s - моменту більш раннього, в який відбулася якась дія напруження τ_{NL} .

Приймається

$$Q(t-s) = \exp[-b(t-s)],$$

де b означає постійну матеріалу. Вимоги, що торкаються функції параметра J_{NL} , впливають в характеристики виникнення і поведінки внутрішніх напружень з матеріалі під дією навантаження. Функція (4) характеризує поле активних внутрішніх напружень, орієнтованих згідно закону Ле Шательє. Ця функція відображає мікронапруження, які виникли в результаті впливу конкретного виду напруженого стану.

Якщо напруження τ_{NL} задамо по програмі, представлений на рис. 3, параметр неоднорідності в даний момент часу на основі (4) виразиться:

$$\frac{1}{B} J_{NL} = \begin{cases} \int_0^t \dot{\tau}_{NL} Q(t-s) ds & \text{при } 0 \leq t \leq t_1, \\ \int_0^{t_1} \dot{\tau}_{NL} Q(t-s) ds & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2, \end{cases}$$

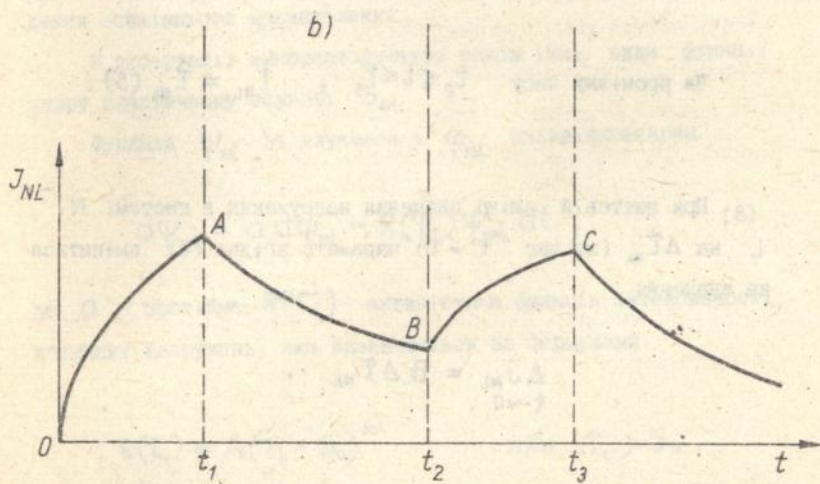
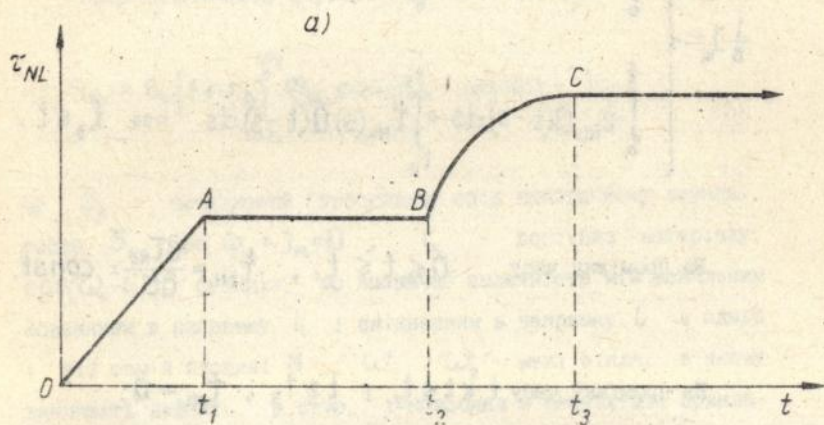


Рис. 3. Наочне зображення параметра, неоднорідності J_{NL} по (4) в залежності від програми навантаження і часу t ;

a) - програма навантаження,

b) - можливий хід параметра при $Q(t-s) = \exp[-b(t-s)]$.

$$\frac{1}{B} J_{NL} = \begin{cases} \int_0^{t_1} \dot{\tau}_{NL} Q(t-s) ds + \int_0^t \dot{\tau}_{NL}(s) Q(t-s) ds & \text{при } t_2 \ll t \ll t_3, \\ \int_0^t \dot{\tau}_{NL} Q(t-s) ds + \int_{t_2}^{t_3} \dot{\tau}_{NL}(s) Q(t-s) ds & \text{при } t_3 \ll t. \end{cases}$$

На проміжку часу $0 \leq t \leq t_1$, $\dot{\tau}_{NL} = \frac{\partial \tau_{NL}}{\partial S} = \text{const.}$

На проміжку часу $t_1 \ll t \leq t_2$, $t \gg t_3$, $\dot{\tau}_{NL} = 0$.

На проміжку часу $t_2 \ll t \leq t_3$, $\dot{\tau}_{NL} = \dot{\tau}_{NL}(s)$.

При миттєвій зміні значення напруження в системі N , L на $\Delta \tau_{NL}$ (за час $t = 0$) параметр згідно (4) зміниться на значення

$$\Delta J_{NL} = B \Delta \tau_{NL} \quad .$$

При постійному напруженні, у випадку, коли $t \rightarrow \infty$, параметр $J_{NL} \rightarrow 0$. Параметр неоднорідності являється основним фактором, що контролює ранні стадії процесу неворотної деформації. В конструйованій моделі деформівного тіла параметр J_{NL} впливає через функцію опору пластичному зсуву S_{NL} при виконанні умови ковзання (3).

Опір пластичному зсувові задається формулою

$$S_{NL} = S_0 \left[1 + r_5 \int_{\omega_1}^{\omega_2} \Psi_{NL} \cos(\omega_0 - \omega) d\omega + J_{NL} \right], \quad (5)$$

де S_0 - початковий (пороговий) опір пластичному зсувові, тобто S_{NL} при $\varphi_{NL} = J_{NL} = 0$; r_5 - постійна матеріалу; $\cos(\omega_0 - \omega)$ - функція, що визначає залежність між локальним ковзанням в напрямку L і зміщенням в напрямку L в одній і тій самій площині N ; ω_1 ; ω_2 - межі віяла, в якому виникають дефекти, а стже, і ковзання в результаті прикладення зовнішнього навантаження.

В дисертації використовуються також інші види функції опору пластичному зсувові S_{NL}

Функція Ψ_{NL} зв'язується з φ_{NL} співвідношенням

$$d\Psi_{NL} = a d\varphi_{NL} - R(\tau_i) \Psi_{NL} dt, \quad (6)$$

де a - постійна; $R(\tau_i)$ - активізуюча функція інтенсивності дотичних напружень, яка визначається за формулами

$$R(\tau_i) = A(\tau_i - S_0)^m \quad \text{при } \tau_i > S_0,$$

$$R(\tau_i) = 0 \quad \text{при } \tau_i \leq S_0,$$

де A і m - постійні матеріалу.

В ШОСТОМУ РОЗДІЛІ " Модуль довантаження G_d як функція орієнтованих внутрішніх напружень " розв'язаного питання

опису модуля G_d . Приведено результати експериментальних досліджень алюмінієвого сплаву. Враховується фактор часу. Довантаження дстичним напруженням проводилось через різні строки витримки під постійним розтягуючим напруженням. Результати проведеного експерименту показують, що із збільшенням часу витримки значення модуля довантаження зменшується. Доводиться, що це зменшення відбувається за рахунок релаксації внутрішніх орієнтованих напружень і дефектів структури. Експерименти проведено на трубчастих зразках, зовнішній діаметр яких 17,5 мм, товщина стінки 0,75 мм, вимірзальна база 75 мм.

Програма проведення досліджень показана на рис. 4. При аналітичному описі використано співвідношення (1), (3), (4), (5), (6). В результаті цього одержано:

- рівняння границі області ковчання Ω (на границі області ковчання $\varphi_{NL} = 0$), у вигляді

$$\sin 2\beta_{1,\epsilon} = \frac{1}{\eta}$$

і відповідно

$$\beta_1 = \frac{1}{2} \arcsin \frac{1}{\eta}, \quad \beta_2 = \frac{\pi}{2} - \beta_1,$$

де

$$\eta = \frac{\sigma_z}{2\sigma_0} + \frac{\frac{1}{2} J_z^m \left[\left(\frac{1}{b} - \frac{1}{R} \right) \left(e^{-b(t-t_1)} - 1 \right) - \frac{1}{R} \right]}{t - t_1 + \frac{1}{R}},$$

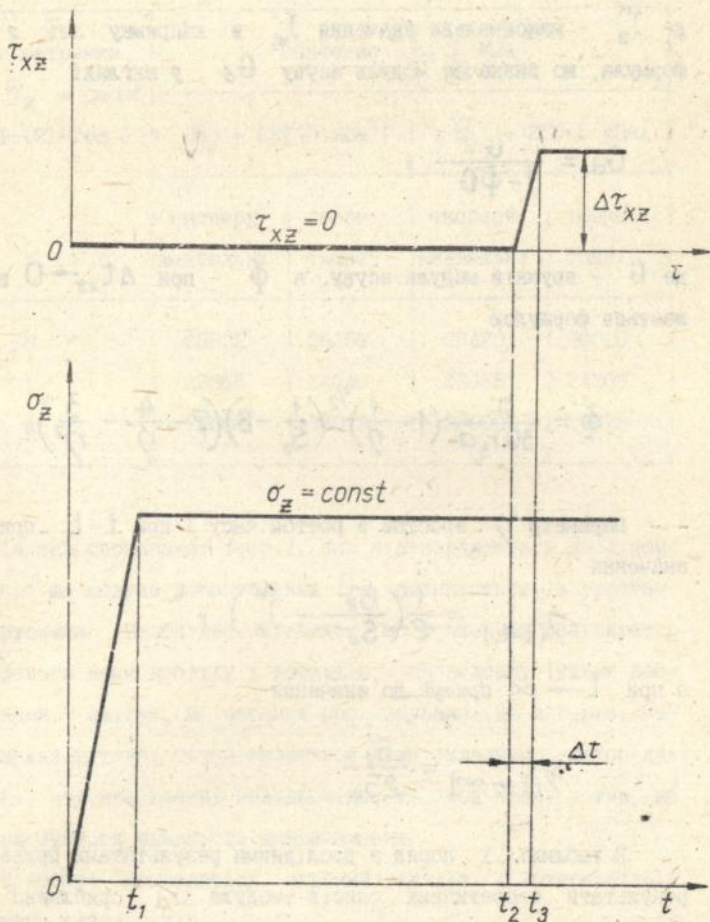


Рис. 4. Програми навантаження (σ_z - 180; 212; 227; 250 МПа) і довантаження ($\Delta\tau_{xz}$). Час витримки ($t_2 - t_1$) при $\sigma_z = \text{const}$ дорівнював 0; 1; 4 год.

де J_z^M - максимальне значення J_{NL} в напрямку осі z
формула, що визначає модуль зсуву G_d , у вигляді

$$G_d = \frac{G}{1 + \Phi G},$$

де G - пружний модуль зсуву, а Φ - при $\Delta\tau_{xz} \rightarrow 0$ виражається формулою

$$\Phi = \frac{\pi}{30 r_5 \alpha} \left(1 - \frac{1}{\eta}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{S_0} - B\right) \left(7 - \frac{4}{\eta} - \frac{3}{\eta^2}\right).$$

Параметр η зростає з ростом часу і при $t = t_i$, приймає значення

$$\eta_{(t=t_i)} = \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{G}_z}{S_0} - J_z^M \right),$$

а при $t \rightarrow \infty$ прямує до значення

$$\eta_{(t \rightarrow \infty)} = \frac{\tilde{G}_z}{2S_0}$$

В таблиці 1 поряд з дослідними результатами приведено результати теоретичних описів модуля G_d (приблизно для $\tilde{G}_z = 227$ і 250 МПа), одержані при наступних значеннях постійних: $\dot{S}_0 = 10$ МПа; $B = 8.8 \cdot 10^{(-2)}$ МПа $^{(-1)}$; $b = 0.33$ год $^{(-1)}$; $m = 6$; $A = 4.1 \cdot 10^{(-13)}$ [МПа 6 * год $^{(-1)}$]; $r_5 = 1140$; $\alpha = 1.5$; $\tilde{G}_z = 76000$ МПа * год $^{(-1)}$.

Сталі B , b , m , A і r_5 визначені з використанням кривої розтягу та основних кривих повзучості.

Таблиця 1

Час витримки при $\sigma_z = \text{const}$ (t ₁ -t ₂) [год.]	Значення G_d [МПа]			
	$\sigma_z = 227$ [МПа]		$\sigma_z = 250$ [МПа]	
	експери- ментальні	теоре- тичні	експери- ментальні	теоре- тичні
0	25932	26259	25420	26020
1	23365	24440	23950	24363
4	22600	24013	23000	23978

Із запропонованої теорії, яка підтверджується дослідом, слідує, що модуль довантаження G_d зменшується із зростанням витримки. Необхідно зауважити, що з аналізу результатів проведеного нами досліді і дослідів, проведених іншими дослідниками, слідує, що питання про існування на поверхні навантаження кутової точки являється дуже складним. Автор дисертації пояснює наявні невідповідності, пов'язані з тим, що не враховується швидкість довантаження.

В роботі приводиться широкий аналіз і інтерпретація одержаних результатів.

СЬОМИЙ РОЗДІЛ " Деформаційні ефекти після миттєвої зміни рівня напруження " присвячений дослідженням поведінки зразків з алюмінієвого сплаву після різного значення розвантаження під час повзучості при одноосному розтязі. Проведений експеримент показує, що на хід деформації після частко-

вого розвантаження сильно впливає час попередньої невстановленої повзучості. Із застосуванням параметра неоднорідності внутрішніх орієнтованих напружень приводиться аналітичний опис і пояснення затримки повзучості.

Експериментальні дослідження проводились з використанням спеціального пристрою, сконструйованого самим автором (є патент), схема якого показана на рис. 5. Застосовувались зразки діаметром 4 мм і вимірною довжиною 40 мм.

Аналітичний опис проведено з використанням співвідношення, яке враховує як невстановлену, так і встановлену повзучість, а саме: (4), (5), (6).

При описі оберненої повзучості умова ковзання (3) приймається у вигляді

$$S_{N,-L} = \tau_{N,-L} .$$

Використовується залежність

$$-J_{NL} = J_{N,-L} .$$

В результаті опису одержано наступну формулу для визначення часу затримки t_3

$$-t_3 = \frac{1}{b_1} \ln \frac{1}{2} \frac{(B_1 |\Delta \sigma_z| - J_z^i)(b_1 - R)}{R \left(\frac{\sigma_z - |\Delta \sigma_z|}{2\sigma_0} + 1 \right)} ,$$

де J_z^i - значення параметра неоднорідності J_{NL} в момент перед частковим розвантаженням $\Delta \sigma_z$ в напрямку осі z ; B_1 і b_1 - постійні матеріалу.

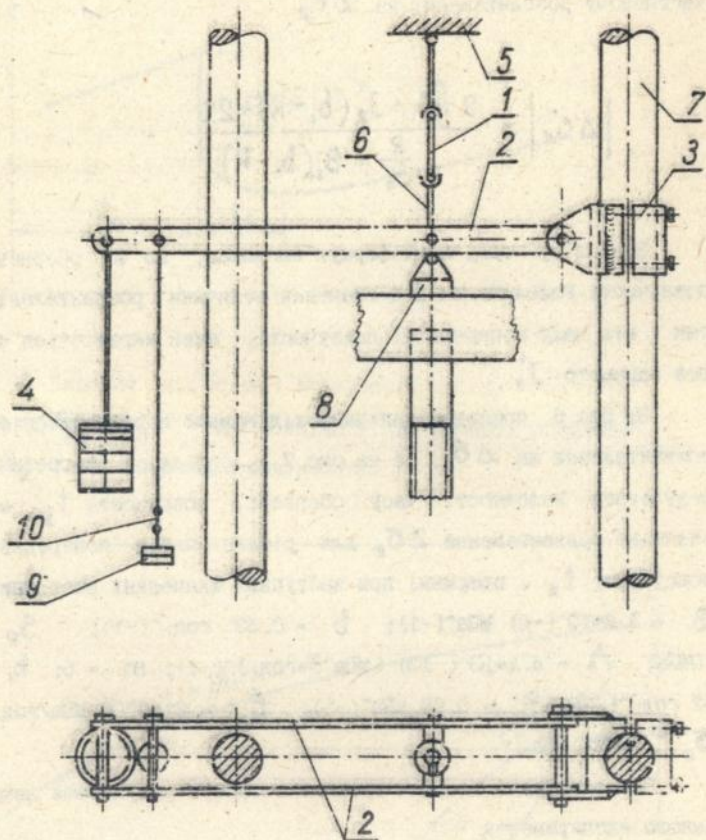


Рис. 5. Пристрій для проведення досліджень деформаційних ефектів при зміні навантаження.

1- зважок, 2- важелі, 3- затискач, 4- головні навантажувальні гири, 5- верхній затискач розривної машини, 6- нижній затискач зразка, 7- колона розривної машини, 8- рухома балка розривної машини, 9- додаткові гири, 10- з'єднувач.

Сформульовано також умову оберненої повзучості при частковому розвантаженні на $\Delta \sigma_z$

$$\left| \Delta \dot{\sigma}_z \right| = \frac{R \frac{\sigma_z}{S_0} + J_z^1 (b_1 - R) + 2R}{\frac{R}{S_0} + B_1 (b_1 - R)}$$

З аналізу одержаних формул випливає, що час оберненої повзучості залежить як від значення величини розвантаження, так і від часу попередньої повзучості, який виражається через параметр J_z^1 .

На рис. 6 показано типичний хід кривої повзучості після розвантаження на $\Delta \sigma_z$, а на рис. 7 - дослідні і теоретичні результати залежності часу оберненої повзучості t_z від значення розвантаження $\Delta \sigma_z$ для різних часів попередньої повзучості t_n , одержані при наступних значеннях постійних: $B = 8.8 \cdot 10^{-2}$ МПа⁻¹; $b = 0.33$ год.⁻¹; $S_0 = 10$ МПа; $A = 4.1 \cdot 10^{-13}$ [МПа⁶ * год.]⁻¹; $m = 6$; $b_1 = 52$ год.⁻¹; $B_1 = 0.98$ МПа⁻¹; $\dot{\sigma}_z = 2169600$ МПа/год.; $\sigma_z^{\max.} = 227$ МПа.

Запропонована теорія правильно описує результати виконаного експерименту.

Проведені дослідження мають принципове значення в питанні існування потенціалу повзучості. У відповідності з концепцією повзучості вважається, що швидкість встановленої повзучості являється однозначною функцією напруженого стану в даній точці незалежно від того, яким чином цей стан досягається. Проведений експеримент доводить, що швидкість повзучості не являється однозначною функцією напруженого стану.

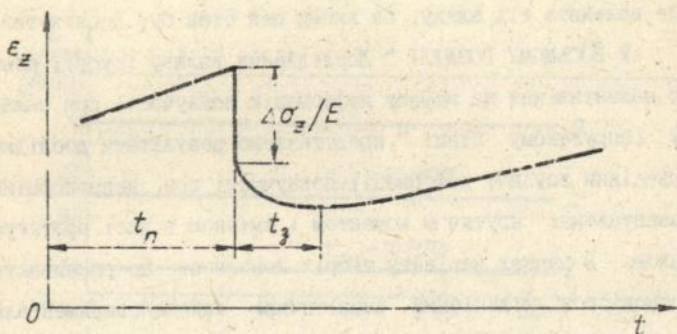


Рис. 6. Типовий хід кривої повзучості після розвантаження на $\Delta\sigma_z$. t_n - час повзучості до моменту розвантаження, t_3 - час оберненої повзучості.

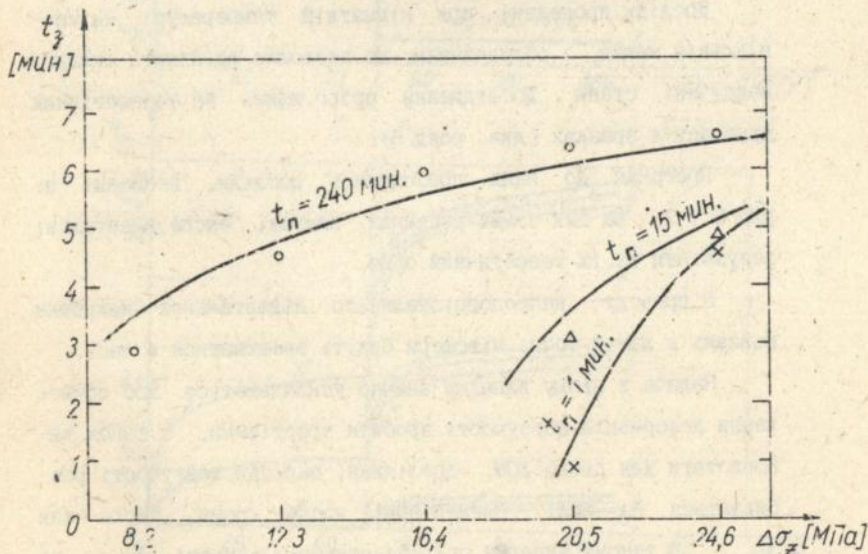


Рис. 7. Залежність часу оберненої повзучості t_3 від розвантаження $\Delta\sigma_z$ і часу попередньої повзучості t_n .

але залежить від шляху, по якому цей стан був досягнутий.

У ВОСЬМОМУ РОЗДІЛІ " Дослідження впливу історії осьового навантаження на зсувну деформацію повзучості при складному напруженому стані " представлено результати дослідження поведінки зсувної деформації повзучості при непропорційному навантаженні крутячим моментом і змінною в часі розтягуючою силою. В рамках варіанту теорії ковзання, що розвивається, проводиться кількісний аналітичний опис експериментальних результатів. Враховується як нерестановлена, так і встановлена повзучість. Деформації обчислюються з використанням ЕОМ. Одержано хорошу відповідність розрахункових і дослідних результатів.

Досліди проведені при кімнатній температурі на спеціальній машині з обладнанням, що дозволяє здійснити складні напружені стани. Дослідження проведено на тонкостінних трубчастих зразках (див. розд. 6).

Програми, по яких проводились досліди, показані на рис. 8 і 9. На цих самих рисунках вказані експериментальні результати та їх теоретичний опис.

З приводу непропорціонального навантаження напрямки ковзання в даній точці півсфери будуть змінюватися в часі.

Задача в цьому випадку значно ускладнюється. Щоб обчислення деформацій повзучості зробити простішими, а також використати для цього ЕОМ, досліджені періоди повзучості розбиваються на малі (елементарні) часові кроки, число яких

k В такому випадку опір пластичному зсувові S_{NL} на k -му кроці (точніше, після k -го кроку часу) залишається наступним чином:

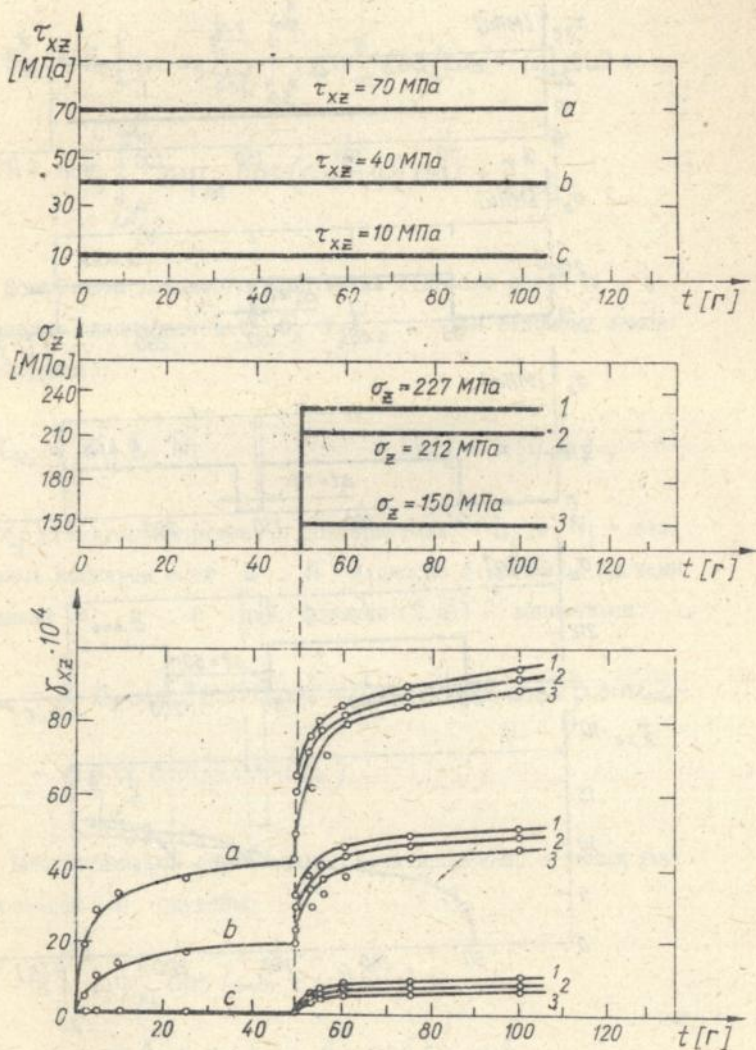


Рис. 8. Програми навантаження і відповідні їм криві всувної повзучості.

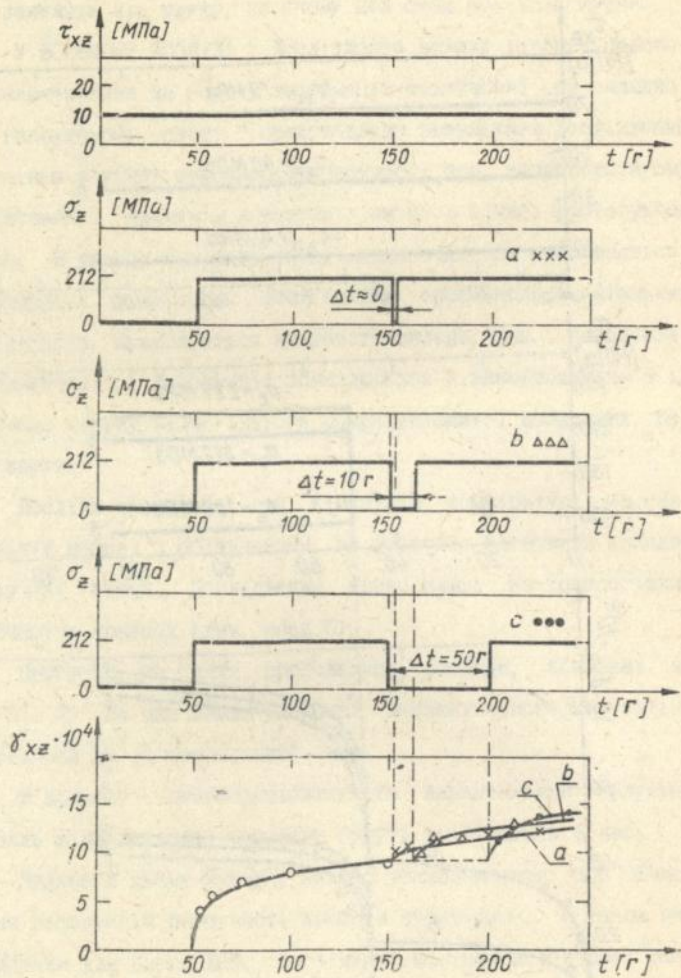


Рис. 9. Програми зміни в часі розтягуючого напруження і відповідні їм криві зсувної повзучості.

$$S_{NL}^k = S_c \left[1 + r_5 \sum_{p=1}^{k-1} \int_{\omega_1^p}^{\omega_2^p} \Delta \Psi_{NL}^p \cos(\omega_0 - \omega) d\omega + \right. \\ \left. + r_5 \int_{\omega_1^k}^{\omega_2^k} \Delta \Psi_{NL} \cos(\omega_0 - \omega) d\omega + J_{NL}^k \right].$$

Компонента дотичного напруження відносно осей N , L у випадку одночасної дії σ_z і τ_{xz} , при відомому законі трансформації:

$$\tau_{NL} = \sigma_{ij} L_i N_j \quad (i, j = x, y, z),$$

де σ_{ij} - тензор напружень в полікристалі, L_i і N_j - на-
равляючі косинуси осей L і N відносно фіксованої системи
координат x , y , z (див. формули (2.а)) - запишеться

$$\tau_{NL} = \frac{1}{2} \sigma_z \sin 2\beta \sin \omega_0 + \tau_{xz} (\cos \alpha \cos 2\beta \sin \omega_0 - \\ - \sin \alpha \sin \beta \cos \omega_0).$$

Використовуючи вищевказані співвідношення, а також умо-
ву ковзання (3), одержимо

$$r_5 \int_{\omega_1^k}^{\omega_2^k} \Delta \Psi_{NL}^k \cos(\omega_0 - \omega) d\omega = \\ = A_1^k \sin \omega_0 + A_2^k \cos \omega_0 - 1, \quad (7)$$

де

$$A_1^k = \left[\frac{\tau_{xz}}{S_0} - J_{xz}^k \right] \cos \alpha \cos 2\beta + \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_z}{S_0} - J_z^k \right] \sin 2\beta -$$

$$- r_5 \sum_{p=1}^{k-1} \int_{\omega_1^p}^{\omega_2^p} \Delta \Psi_{NL}^p \sin \omega \, d\omega,$$

$$A_2^k = \left[J_{xz}^k - \frac{\tau_{xz}}{S_0} \right] \sin \alpha \sin \beta - r_5 \sum_{p=1}^{k-1} \int_{\omega_1^p}^{\omega_2^p} \Delta \Psi_{NL}^p \cos \omega \, d\omega.$$

На основі (4), одержимо

$$J_z^k = B \sigma_z \exp(-bt^{k+1}),$$

$$J_{xz}^k = B \tau_{xz} \exp(-bt^{k+1}).$$

Рівняння (7) являється інтегральним рівнянням Фредгольма першого роду з виродженим ядром. Воно може мати зміст тільки при дискретному значенні ω , причому $\omega \in (\omega_1^k, \omega_2^k)$. Відмітимо, що в рівнянні (7), крім шуканої функції $\Delta \Psi_{NL}^k$, невідомі також границі інтеграла ω_1^k і ω_2^k , які, як і A_1^k , A_2^k , являються функціями кутів α , β і часу t . Розв'язок рівняння (7) представимо у вигляді

$$\Delta \Psi_{NL}^k = \Delta \Psi_N^k \delta(\omega - W^k),$$

де δ - дельта - функція Дірака; $\Delta \Psi_N^k$ і W^k - нові невідомі функції кутів α і β . З розв'язку видно, що $\Delta \Psi_N^k \neq 0$ тільки при $\omega = W^k$, тобто приріст інтенсивності дефектів, а

отже, і ковзань, в даній площині, в певний момент часу може відбуватися лише в одному напрямку ($\omega = W^k = \omega_1^k = \omega_2^k$). Враховуючи, що $S_{NL} \gg \tau_{NL}$, значення кута W^k визначається з умови дотику на площині N кривих опору зсувові S_{NL}^k і дотичного напруження τ_{NL}

$$\frac{\partial S_{NL}^k}{\partial \omega_0} = \frac{\partial \tau_{NL}}{\partial \omega_0}, \quad (\omega_0 = W^k).$$

В результаті диференціювання одержимо

$$\sin W^k = \frac{A_1^k}{\sqrt{(A_1^k)^2 + (A_2^k)^2}},$$

$$\cos W^k = \frac{A_2^k}{\sqrt{(A_1^k)^2 + (A_2^k)^2}}.$$

При непропорційному навантаженні визначеної кутами α і β площини N напрямком ковзань не співпадає з напрямком повного дотичного напруження. Коефіцієнти A_1^k і A_2^k змінюються в часі через зменшення параметру неоднорідності внутрішніх напружень. Змінюється в часі і напрямок ковзань.

Приріст зсувної деформації повзучості на k -му кроці часу буде

$$\Delta \delta_{xz}^k = \iint_{\Omega} (L_x^k N_z + L_z^k N_x) \Delta \varphi_N^k d\Omega, \quad (8)$$

де $\Delta \varphi_N^k$ визначається з допомогою формули (6), а саме

$$\alpha \Delta \varphi_N^k = \Delta \Psi_N^k + A(t_i - s_0)^m \bar{\Delta} \Psi_N^k (t^{k+1} - t^k), \quad (9)$$

де $\bar{\Delta} \Psi_N^k$ означає рівнодійну суми дефектів, що виникли на k -му кроці часу в напрямку W^k . Границю області ковзання Ω^k на довільному k -му кроці визначимо з рівняння (9), використовуючи умову

$$\Delta \varphi_N^k = 0. \quad (10)$$

Крива (10) розділяє півсферу одиничного радіуса на області, в яких на k -му проміжку часу відбуваються ковзання, якщо $\Delta \varphi_N^k > 0$, і області, в яких ковзання відсутні, якщо $\Delta \varphi_N^k \leq 0$.

Поставлену задачу розв'язуємо з допомогою ЕОМ. З цією метою розбиваємо півсферу одиничного радіуса на достатньо малі елементарні поверхні $\Delta \Omega_i = \cos \beta_i \Delta \beta \Delta \alpha$, а інтеграли в (8) заміняємо сумою.

Деформація повзуочості на k -му кроці часу, зумовлена ковзаннями по елементарній i -й поверхні $\Delta \Omega_i$, виразиться формулою

$$(\Delta \gamma_{xz}^k)_i = (L_x^k N_z + L_z^k N_x)_i (\Delta \Psi_N^k)_i \Delta \Omega_i. \quad (11)$$

Після використання формул (2.а), в яких кут ω замінюємо кутом W^k з (11), одержимо

$$(\Delta \gamma_{xz}^k)_i = (\cos \alpha_i \sin W_i^k \cos \beta_i \cos 2\beta_i -$$

$$- \frac{1}{2} \sin \alpha_i \sin 2\beta_i \cos W_i^k (\Delta \varphi_N^k)_i \Delta \alpha \Delta \beta .$$

Аналогічні обчислення проводяться для всіх поверхонь, що утворюють півсферу, а результати сумуються. Одержуємо таким чином значення деформацій на чергових ділянках повзучості, а саме

$$\Delta \gamma_{xz}^k = \sum_{i=1}^r (\Delta \gamma_{xz}^k)_i ,$$

де r - число елементарних поверхонь $\Delta \Omega_i$, в яких відбулися ковзання, тобто $\Delta \varphi_N^k > 0$.

Якщо в даній точці півсфери виконується нерівність $\Delta \varphi_N^k \leq 0$, то в цій точці на k -му кроці часу ковзання відсутні, і приймається $\Delta \varphi_N^k = 0$. Значення W^k і $\Delta \varphi_N^k$ на чергових ділянках часу $k = 1, 2, 3, \dots$ для кожної площини ковзання знаходяться за формулами (7.а) і (9).

Для порівняння теоретичних і експериментальних результатів виконаці числові розрахунки, причому півсфера єдиного радіуса була розбита на 1296 елементарних поверхонь ($\Delta \alpha = \Delta \beta = 5^\circ$). Етапи повзучості розділено на 11 часових кроків, а саме: $(t^{k+1} - t^k) = 0; 0.01; 0.09; 0.2; 0.7; 1.0; 3.0; 5.0; 15.0; 25.0; 50.0$ год. Вказані ділянки часу являються результатами наступних чергових значень часів t^k , прийнятих в обчислювальній програмі на ЕОМ, а саме: $0; 0; 0.01; 0.1; 0.3; 1.0; 2.0; 5.0; 10.0; 25.0; 50.0; 100.0$ год. Два перші нульові значення t^k забезпечують можливість визначення "миттєвої" пластичної деформації при навантаженні, тобто на першому кроці обчислень.

При значеннях постійних матеріалу $\gamma_5 = 1140$; $\sigma = 1.5$; $S_0 = 10$ МПа; $B = 8.8 \cdot 10^{(-2)} \text{МПа}^{(-1)}$; $b = 0.33 \text{год.}^{(-1)}$; $m = 6$; $A = 4.1 \cdot 10^{(-13)} [\text{МПа}^6 \cdot \text{год.}]^{(-1)}$ одержано задовільний опис експериментальних даних, що зображено на рис. 8 і рис. 9.

Експериментальні дослідження показують, що у вигадку $\tau_{xz} > 0$ існує значний вплив розтягуючого напруження σ_z на зсувну деформацію повзучості γ_{xz} . Встановлення взаємодії (впливу σ_z на γ_{xz}) пояснюється існуванням спільних областей ковзань, що виникають в результаті прикладання розтягуючої сили і крутячого моменту. Експеримент, результати якого вказані на рис. 9, показує, що спогад матеріалу про історію навантаження згладжується з часом. В аналітичних розрахунках це враховується з допомогою параметра неоднорідності J_{NL} , який релаксує в часі і при $t \rightarrow \infty$ приймає до нуля. Таким чином, ефекти впливу історії навантаження на повзучість зменшуються із зростанням часу і після достатньо великої витримки елемента тіла під постійним навантаженням стають неістотними.

У ДЕВ'ЯТОМУ РОЗДІЛІ "Релаксація напружень в рамках теорії ковзання" викладено застосування варіанту теорії ковзання, що розвивається, до опису релаксації напружень при одноосному розтязі, а також при одночасній дії одноосного розтягу і кручення. Приведено приклад числового розрахунку релаксації гвинтового з'єднання, яке працює в умовах одноосного напруженого стану з врахуванням пружності з'єднаних елементів. Зроблено кількісне порівняння теоретичних результатів з експериментом, проведеним нами на алюмінієвому сплаві. Приведено якісний опис релаксації циліндричних зразків з

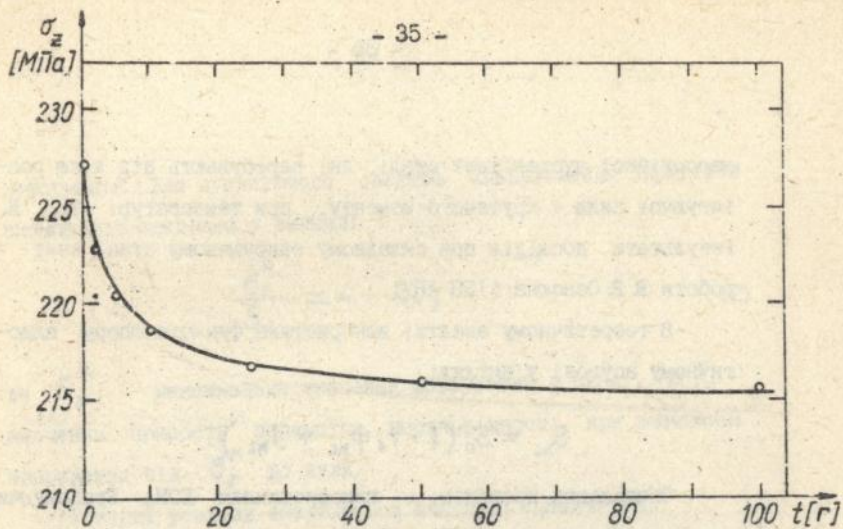


Рис. 10. Залежність релаксуючого напруження σ_z від часу t .

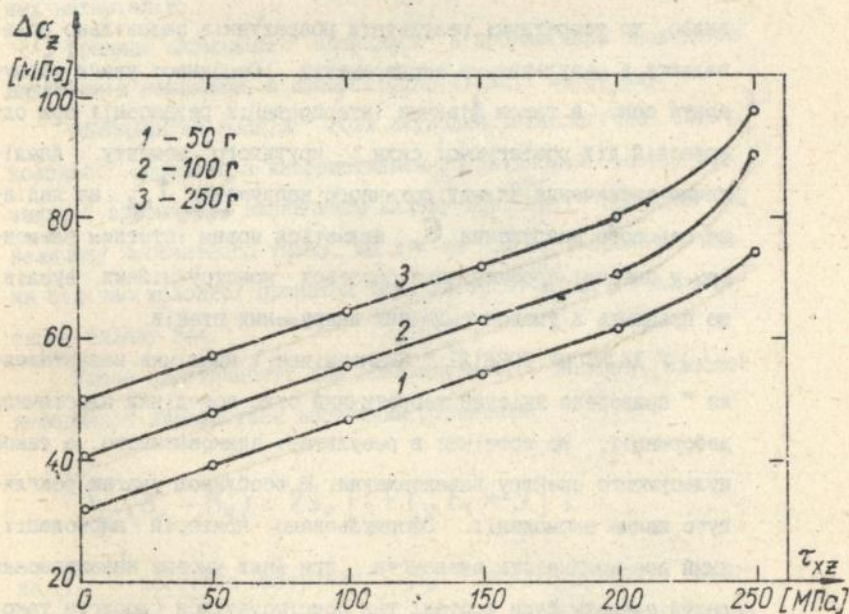


Рис. 11. Залежність падіння осьового напруження $\Delta\sigma_z$ від значення початкового дотинного напруження τ_{xz} через різні проміжки часу.

жаростійкої аустенітної сталі, які перебувають під дією розтягуючої сили і крутячого моменту, при температурі 923 К. Результати дослідів при складному напруженому стані взяті з роботи В. В. Осасюка (ІПІ АНУ).

В теоретичному аналізі використана функція опору пластичному зсувові у вигляді

$$S_{NL} = S_0 (1 + r_1 \varphi_{NL} + J_{NL}).$$

Обчислення проведені з використанням ЕОМ. Враховуючи деяку аналогію між обчислювальними методами цього і попереднього розділів, тут приведено лише кінцеві результати розрахунків, які зображені на рис. 10 і рис. 11. З рисунків видно, що теоретичні результати розрахунків задовільно співпадають з результатами експерименту. Особливої уваги заслуговує опис, а також фізична інтерпретація релаксації при одночасній дії розтягуючої сили і крутячого моменту. Аналітичне визначення впливу дотичного напруження τ_{xz} на падіння осевого напруження σ_z являється новим істотним елементом у питанні проектування багатьох конструкційних вузлів, що працюють в умовах складних напружених станів.

У ДЕСЯТОМУ РОЗДІЛІ " Знакомінне і циклічне навантаження " приведено якісний теоретичний опис поведінки пластичної деформації, що протікає в результаті знакозмінного, а також пульсуючого спектру навантаження. З особливою увагою розглянуто явище акомодатії. Сформульовано критерій акомодатії, який дає можливість визначити, при яких умовах навантаження даний елемент буде в стані так пристосуватися (досягти такої стабілізації), що будь-яка кількість змін навантаження в межах цих умов не викличе наступного нагромадження пластичних

деформацій. Для пульсуючого спектра навантаження критерій акомодациі одержано у вигляді

$$\frac{\sigma_z^m}{S_0} = 4 + \Delta J_z, \quad (12)$$

де σ_z^m - максимальне значення напруження в циклі, ΔJ_z - значення приросту параметра неоднорідності при зменшенні напруження від σ_z^m до нуля.

В кінці розділу висуваються наступні припущення:

границя акомодациі повинна враховуватись як одна з основних постійних, що характеризують властивості конструкційних матеріалів;

границя акомодациі являється відображенням поведінки внутрішніх напружень в процесі стабілізації матеріалу.

ОДИНАДЦЯТИЙ РОЗДІЛ " Розв'язування технологічної задачі холодної прокатки з використанням співвідношень теорії ковзання " присвячена визначенню впливу швидкості прокатки на величину контактного тиску, що діє на полосу і прокатні валки під час холодної прокатки тонколистової жерсті з алюмінієвого сплаву РА4.

Умова пластичності для розглядуваного випадку плоскої деформації виражається наступним рівнянням:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_x - \sigma_y) = 2S_0 [1 + r_{11} \bar{\epsilon}_i + J],$$

де r_{11} - постійна матеріалу, S_0 - початковий опір пластичній деформації, $\bar{\epsilon}_i$ - інтенсивність логарифмічної деформації, J - параметр неоднорідності внутрішніх напружень, який в нашому випадку визначається за формулою

$$J = B_2 \int_0^t \frac{\partial \bar{\epsilon}_t}{\partial s} Q(t-s) ds \quad ,$$

де B_2 - постійна матеріалу.

Схема подовжньої прокатки і основні позначення вказані на рис. 12.

В розрахунках враховується присутність у вогнищі деформації двох зон - зони відставання і зони випередження. Кожна з цих зон поділяється на три підзони, а саме: ковзання, гальмування і прилипання. Задача розглядається як одномірна. Проводяться числові розрахунки з використанням ЕОМ, при наступних даних: радіус прокатних валків $R = 40$ мм; коефіцієнт тертя $\mu = 0.05$; $\alpha_1 = 2^\circ 30'$; $h_1 = 0.20$ мм; $h_2 = 0.12$ мм; $\sigma_0 = 10$ МПа; $b = 0.33 \text{ год.}^{-1}$; $B_2 = 11$; $\gamma_{11} = 0.18$; $b_{x_1} = b_{x_2} = 0$. Дані, що стосуються геометричних розмірів, взяті з конкретного шестивалкового прокатного стану, актуально працюючого на заводі. Інші дані прийняті на основі експериментів, представлених нами в попередніх розділах цієї роботи. При $\mu = 0.05$ відзони гальмування в нашому випадку не виникли.

На рис. 13 зображено епюри контактного тиску p та інтенсивності сил тертя T в залежності від висоти прокатуваної полоси h .

На рис. 14 представлено залежність контактного тиску p від швидкості прокатки V_1 . З рисунку видно, що тиск при швидкостях, які перевищують 100 м/год., практично не змінюється. Це означає, що прокатка при таких швидкостях не викликає збільшення одиничного використання енергії.

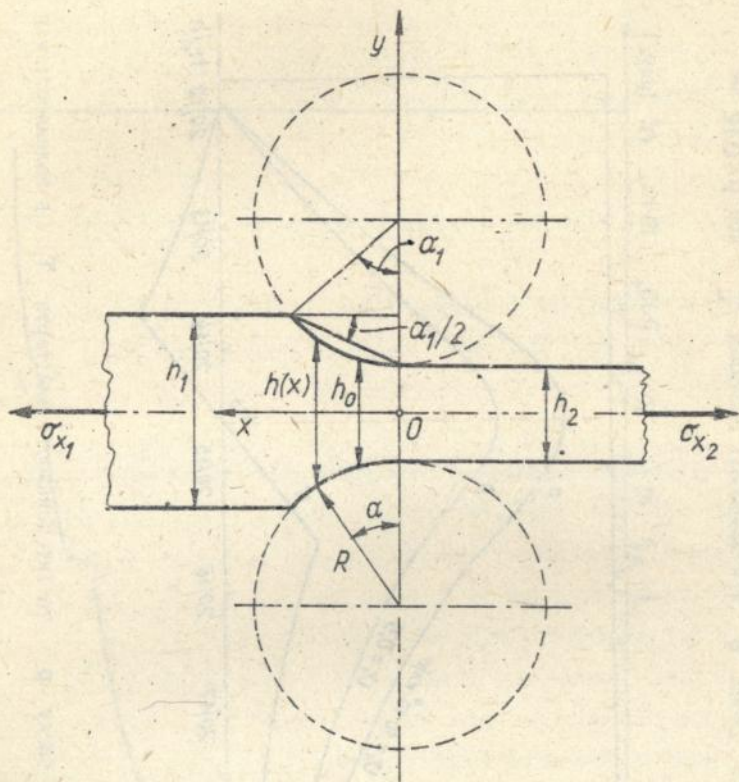


Рис. 12. Схема прокатки і основні позначення.

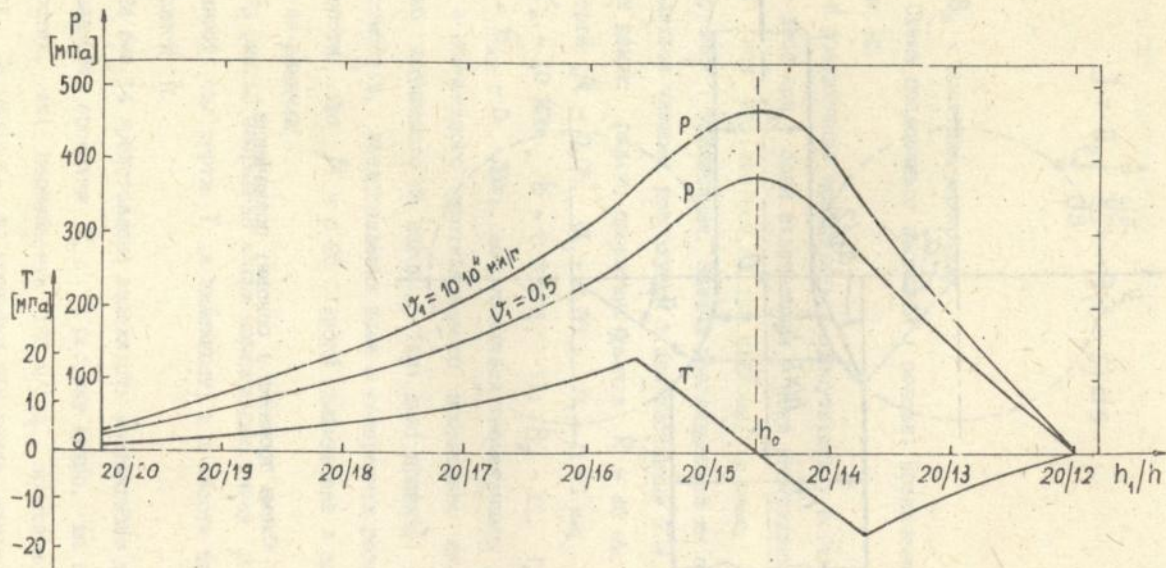


Рис. 13. Епюри контактного тиску p та інтенсивності сил тертя T в залежності від співвідношення h_1/h .

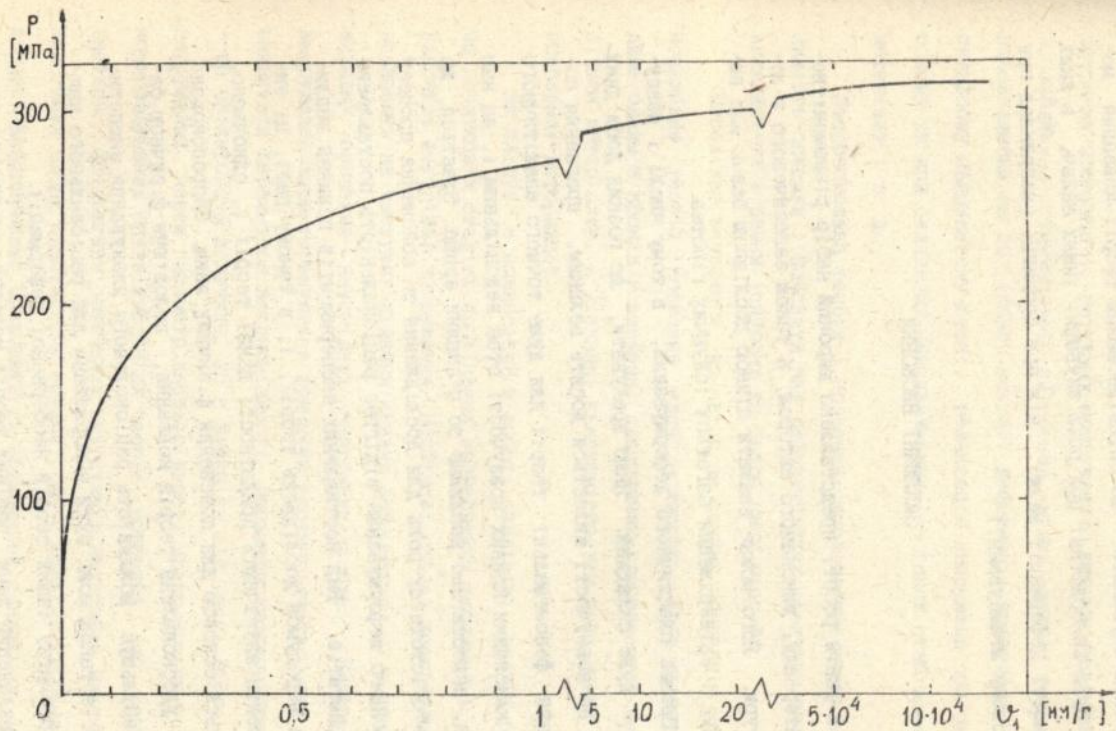


Рис. 14. Залежність контактної тиску p від швидкості прокатки v_1 при $h=0,16$ мм.

Слід зауважити, що співвідношення теорії ковзання можуть бути використані при розв'язуванні інших задач, в яких швидкості деформації менші, ніж при прокатці (наприклад при листовому штампуванні).

ЗАКЛЮЧНІ ВИСНОВКИ

В даній роботі представлено широкий набір різноманітного матеріалу, виконаного автором, а також запозиченого з літератури. Його можна вважати цінною дослідною базою для пояснення і затвердження багатьох існуючих гіпотез.

Процес пластичного деформування, в тому числі і повзучості, дуже складний. Якщо врахувати, що розкид дослідних даних по повзучості являється досить великим, прагнення побудувати феноменальні теорії для дуже точного аналітичного опису класичних кривих повзучості стає недоцільним і, на наш погляд, недостатньо наближає до пізнання явища. Здається, що набагато істотнішу роль для дослідження та пояснення процесу пластичного деформування відіграє раціональність поставлених експериментів. Вид поставлених експериментів повинен впливати в передумов досліджень теорії, і, в такому разі, ці експерименти визначають придатності даної теорії і, одночасно, являються основою для пояснення фізичних явищ. Запропонована нами, удосконалена теорія ковзання, володіючи фізичною базою, збільшує можливість раціонального планування експериментів, а також може бути використана для раціонального напрямку розвитку інших теорій необерненої деформації.

Викладений нами варіант теорії ковзання правильно описує результати проведених експериментів, а саме: пряму та

обернену повзучості, затримку повзучості, ефекти тимчасового послаблення і тимчасового зміцнення, вплив історії осьового навантаження на протікання зсувної деформації повзучості при складному напруженому стані, релаксацію напружень при одноосному та при складному навантаженнях, а також стабілізацію матеріалу і т. д.

Запропонована теорія і проведені дослідження дають можливість описати і пояснити ряд деформаційних ефектів, які не вкладаються в рамки існуючих до цього часу теорій.

Необхідно зауважити, що автор не вважає концепцію удосконалення теорії ковзання єдиною можливою - вона являється лише одним з кроків у вивченні пластичних властивостей металічних матеріалів, а пізнання закономірностей протікання необерненої деформації.

Як слідує з приведених в роботі аналізів, ведучу роль на початкових стадіях протікання необерненої деформації відіграють внутрішні напруження. Початкові стадії деформування впливають на наступні ділянки кривих деформації, і в такому випадку значення внутрішніх напружень зростає. Внутрішні напруження характеризуються функцією неоднорідності, яка називається параметром неоднорідності. Параметр неоднорідності - це орієнтована величина, що є функцією від часу. Внутрішні напруження через параметр неоднорідності враховуються у використовуваних співвідношеннях теорії ковзання, що розвивається. Збільшення активних внутрішніх напружень викликає зростання опору пластичному зсувові, що у випадку здійснення процесу деформування приводить до збільшення одиничного споживання енергії.

По вищевказаних причинах співвідношення удосконаленої

теорії ковзання можуть бути застосовані в розрахунках технологічних задач пластичності та повзучості, в яких швидкість деформації і одичичне споживання енергії являються істотними.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ
ОПУБЛІКОВАНІ В НАСТУПНИХ ПРАЦЯХ:

1. Осипюк В. Затримка повзучості алюмінієвого сплаву після пониження напруження. // Матеріали 23 симпозиуму основ конструкцій машин, Щецин-Свіноуйсьце: 1987, с. 312-313. (на польській мові).

2. Осипюк В. Деформаційні ефекти після пониження напруження під час повзучості алюмінієвого сплаву Р44. // Матеріали 10 симпозиуму реології, Вроцлав: 1987, с. 79-83. (на польській мові).

3. Осипюк В. Невстановлена повзучість в рамках теорії ковзання. // Матеріали 13 симпозиуму експериментальної механіки твердого тіла. т.1, Варшава: 1988, с. 240-243. (на польській мові).

4. Осипюк В. Експериментальні дослідження оберненої повзучості після часткового розвантаження. // Матеріали 3 міжнародного симпозиуму проблем повзучості матеріалів, Бялосток: 1989, с. 343-349. (на польській мові).

5. Осипюк В. Обернена повзучість в рамках теорії ковзання. // Розправи інженерськє, ПАН ГІПТ, 1990, 38, 2, с. 259-271. (на польській мові).

6. Осипюк В. До визначення модуля довантаження в рамках теорії ковзання. // Прикладна механіка, 1990, т. 26, N 11,

с. 99-104. (на російській мові).

7. Осипюк В., Качинські Р. Пристрій для навантаження і дослідження повзучості. АС. РІЛ N 47480, 1990.

8. Осипюк В. Поведінка алюмінієвого сплаву РА4 під час довантаження. // Механіка теоретична і стосована, 1991, т. 29, N 3-4, с. 509-517. (на польській мові).

9. Осипюк В. Вплив розтягуючого напруження на зсувну деформацію повзучості. // Енґінг. Транс. ПАН ІЛПТ, 1991, 39, 2, с. 181-190. (на англійській мові).

10. Осипюк В. Релаксація напружень в рамках теорії ковзання. // Архів машинобудування, 1991, т. 38, с. 223-231. (на англійській мові).

11. Осипюк В. До питання пояснення і аналітичного опису затримки повзучості. // Прикладна механіка, 1991, т. 27, с. 52-57. (на російській мові).

12. Осипюк В. Про повзучість в пружній області деформування при складному навантаженні. // Прикладна механіка, 1991, т. 27, N 10, с. 67-75. (на російській мові).

13. Осипюк В. Релаксація в плоскому напруженому стані. // Матеріали 4 міжнародного симпозиуму по повзучості і супутніх процесах, Бялосток: 1992, с. 185-191. (на англійській мові).

14. Осипюк В., Рогозінські Т. Деформаційне зміцнення в рамках теорії ковзання. // Наукові зошити БП, Механіка, 1993, N 10, с. 17-25. (на польській мові).

15. Осипюк В., Ярошевич Є. Вплив історії навантаження на хід нестановленої повзучості алюмінієвого сплаву. // Наукові зошити БП, Механіка, 1993, N 11, с. 28-35. (на польській мові).

У.О.Яр

Підп. до друку 12.10.93 . Формат 60x84^I/16
Папір друк. № 2. Офс. друк. Умовн. друк. арк. 2,75
Умовн. фарб.-відб. 2,75 Умовн. видав. арк. 2,65
Тираж 100 прим. Зам. 223 . Безплатно

ДУЛП 290646 Львів-ІЗ, Ст.Бандери, 12

Дільниця оперативного друку ДУЛП
Львів, вул. Городоцька, 286

AB 28.469