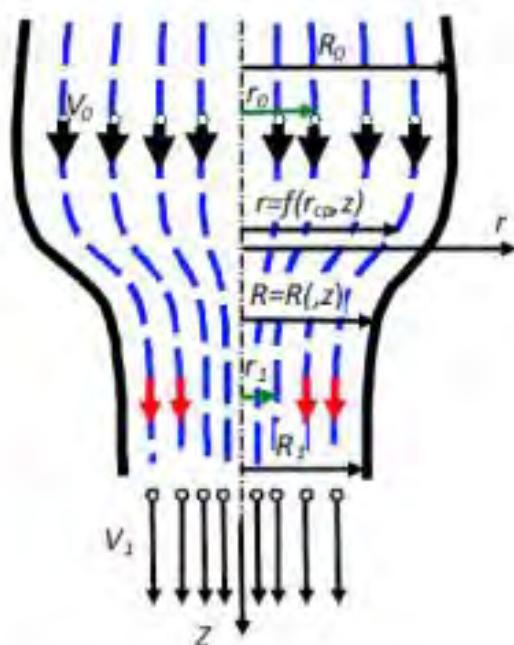


В. А. Огородніков, О. Ю. Співак, О. В. Грушко

## ДЕФОРМАЦІЯ ВОЛОЧІННЯМ І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ТЕРМОПАРНИХ ДРОТІВ



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. А. Огородніков, О. Ю. Співак, О. В. Грушко**

**ДЕФОРМАЦІЯ ВОЛОЧІННЯМ  
І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ  
ТОНКИХ ТЕРМОПАРНИХ ДРОТІВ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2014

УДК 621.778  
ББК 34.622  
О-39

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 26.06.2013 р.).

Рецензенти:

**В. А. Тітов**, доктор технічних наук, професор

**О. В. Нахайчук**, доктор технічних наук, професор

**Огородніков, В. А.**

О-39 Деформація волочінням і фізико-механічні властивості тонких термопарних дротів : монографія / В. А. Огородніков, О. Ю. Співак, О. В. Грушко. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 112 с.

ISBN 978-966-641-560-1

В монографії розглянуто задачі волочіння тонких дротів. Подано загальний аналіз основних положень теорії деформовності відносно сплавів з особливими електрофізичними властивостями. Описані методи отримання тонких дротів зі сплавів, що мають аномальні електрофізичні властивості. Розроблено методику складання технологічних маршрутів волочіння тонких термопарних дротів. Досліджено вплив історії деформування на електрофізичні властивості тонких термопарних дротів зі сплавів хромель, копель, та сплавів системи нікель–молібден, яку запропоновано в якості позитивної вітки термопар для термоелектричних генераторів струму на металевій основі.

УДК 621.778

ББК 34.622

ISBN 978-966-641-560-1

© В. Огородніков, О. Співак, О. Грушко, 2014

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
1 ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ВОЛОЧІННЯ ТОНКИХ ДРОТІВ .....	5
1.1 Вплив технологічної спадковості на фізико-механічні властивості виробів .....	5
1.2 Механіка деформування суцільних матеріалів .....	5
1.3 Деформовність металу в процесах формування заготовок .....	9
1.4 Напружено-деформований стан при волочінні .....	20
1.5 Метали і сплави, що використовуються в термоелектричних генераторах струму (ТЕГ) .....	27
2 ТЕХНОЛОГІЧНІ УМОВИ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ТА ЇХ ВПЛИВ НА РЕЖИМИ ВОЛОЧІННЯ ТОНКИХ ДРОТІВ .....	41
2.1 Руйнування металів, їх пластичність та формування якості виробів при волочінні .....	41
2.2 Напружено-деформований стан матеріалів, що зміцнюються в процесі волочіння .....	47
3 РОЗРОБКА РЕЖИМІВ ВОЛОЧІННЯ ТОНКОГО ТЕРМО-ПАРНОГО ДРОТУ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ДЕФОРМОВНОСТІ .....	58
3.1 Визначення режимів волочіння між термообробками .....	58
3.2 Вибір режимів термічної обробки заготовок .....	66
3.3 Очистка поверхні мікродротів .....	69
3.4 Режими волочіння тонкого дроту перерізом 500–70 мкм з сплавів хромель та копель .....	70
3.5 Розробка технологічних режимів волочіння дротів перерізом (200–70) мкм зі сплавів нікель–молібден .....	73
4 ВПЛИВ РЕЖИМІВ ВОЛОЧІННЯ НА МЕХАНІЧНІ ТА ЕЛЕКТРО-ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ТЕРМОПАРНИХ ДРОТІВ .....	76
4.1 Металеві матеріали та їх використання в якості елементної бази ТЕГ .....	76
4.2 Дослідження впливу деформації волочінням на електрофізичні властивості тонких дротів із сплавів хромель і копель .....	80
4.3 Аналіз даних сплавів нікель–молібден .....	85
4.4 Попередні дослідження технологічних та термоелектричних властивостей сплавів системи нікель–молібден .....	87
4.5 Дослідження температурних та концентраційних залежностей інтегральної термо-е.р.с. ....	93
4.6 Дослідження температурних та концентраційних залежностей диференційної термо-е.р.с. ....	95
4.7 Дослідження температурних та концентраційних залежностей питомого електроопору .....	97
ВИСНОВКИ .....	99
ЛІТЕРАТУРА .....	101

## ВСТУП

Розробка й впровадження нових ресурсозберігаючих технологій, удосконалення існуючих та підвищення за їх рахунок ефективності виробництва є одними із найважливіших задач сучасної машинобудівної галузі промисловості. Один із шляхів розв'язання цих задач полягає у розвитку безвідходних технологій обробки матеріалів та теоретичного підґрунтя таких способів як волочіння, штампування, холодне видавлювання. Це, в свою чергу, вимагає подальшого розвитку методів оцінки деформовності заготовок і виробів, які дозволяють для проектування технологічних процесів прогнозувати рівень їх пошкодження дефектами руйнування. Точність прогнозування якості та технологічної спадковості готових виробів значною мірою визначається історією деформування, для визначення якої необхідно мати максимальну інформацію про напружено-деформований стан заготовки у процесі формозміни.

Найбільш поширеним безвідходним способом обробки циліндричних металевих заготовок тиском є холодне волочіння, яке дозволяє звести до мінімуму або повністю виключити необхідність наступної обробки деталей різанням. Подальший розвиток методів холодного волочіння та ширше впровадження їх у виробництво можливі на основі використання феноменологічної теорії деформовності, як для розробки нових способів холодної пластичної формозміни, так і для раціонального об'єднання існуючих операцій та створення на їх основі комбінованих процесів.

# **1 ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ВОЛОЧІННЯ ТОНКИХ ДРОТІВ**

## **1.1 Вплив технологічної спадковості на фізико-механічні властивості виробів**

Ефективним методом відновлення запасу пластичності та розширення можливостей процесів холодної обробки металів тиском є проміжне відпалювання, ефективність якого, в основному, залежить від величини використаного ресурсу пластичності. Відомі критерії руйнування не дозволяють оцінювати комплексний вплив немонотонності навантаження та проміжних відпалів на пластичність. Разом з тим, проміжне відпалювання негативно впливає на якість поверхні тонких дротів діаметром (70–100 мкм), для матеріалів з специфічними властивостями: (термоелектричних, резистивних тощо), де властивості поверхні матеріалу дротів мають визначальне значення по відношенню до їх властивостей. У зв'язку з цим проблема прогнозування густини пошкоджень в пластично деформованому металі для розробки комбінованих процесів холодної волочіння з проміжними відпалами і оцінки впливу історії деформування і відпалів на кінцеві властивості тонких термопарних дротів є актуальною.

Експериментальні дослідження виконувались в лабораторних та промислових умовах із застосуванням спеціально розроблених пристроїв і вимірювальних установок та використанням стандартного обладнання. Для дослідження поверхні тонких дротів та структури злиwkів використано метод металографічного аналізу, для дослідження інтегральної термо-е.р.с – метод градуювання термопар, диференційної термо-е.р.с. та електричного опору – стаціонарний зондовий метод. Обробка результатів експериментів та перевірка адекватності теоретичних моделей здійснювались на ПЕОМ із використанням методів обробки експериментальних даних та математичної статистики.

## **1.2 Механіка деформування суцільних матеріалів**

На етапі використання високих технологій різко зростає об'єм виробництва деталей, які виготовляються методами холодної пластичної

деформації (в деяких країнах він сягає 60 % загального об'єму заготовок, котрі отримують методами обробки металів тиском (ОМТ).

Для підвищення ефективності процесів ОМТ необхідний подальший розвиток теорії деформовності, технологічної механіки та методів розв'язання крайових задач сучасної теорії пластичності.

Важливий внесок у розвиток сучасної теорії деформовності зробили І. С. Алієв, Ю. М. Алексеєв, В. А. Бабічков, А. А. Богатов, Я. С. Бейгельзімер, С. І. Губкін, Р. Дж. Грін, В. М. Данченко, Г. Д. Дель, А. М. Дмитрієв, У. Джонсон, Б. А. Друянов, Є. В. Звонарьов, О. О. Ільюшин, А. А. Костава, В. Л. Колмогоров, Ю. Г. Калпін, В. С. Ковальченко, Н. Н. Малінін, Є. М. Макушок, І. Ф. Мартинова, В. М. Михалевич, А. А. Нотич, А. Г. Овчінніков, В. А. Огородніков, Є. О. Попов, А. А. Поздєєв, І. П. Рене, О. О. Розенберг, В. Д. Рудь, І. О. Сивак, Г. П. Сердюк, В. В. Скороход, Г. О. Смірнов-Аляєв, Ю. К. Філіпов, Н. А. Шестаков, М. Б. Штерн, С. П. Яковлев та інші.

Динамічне зростання частки холодної ОМТ в технологічних циклах виробництва зумовлюють такі переваги цього процесу:

- можливість отримання складних за формою деталей з підвищеним коефіцієнтом використання металу і багатократно збільшеною витратністю;
- висока точність обробки, яка сягає 1–2 класу;
- покращення механічних характеристик готового виробу;
- зниження вимог до кваліфікації обслуговуючого персоналу;
- підвищення можливості механізації і автоматизації технологічного процесу.

В процесі холодного деформування із збільшенням ступеня деформації змінюються механічні показники оброблюваних металів. Вони зміцнюються, а їх схильність до пластичної деформації зменшується [1, 2].

Холодна обробка металів впливає на мікроструктуру готових виробів і має такі характерні особливості:

- змінюється орієнтація зерен;
- змінюється геометрична форма зерен;
- з'являються залишкові зональні міжкристалічні і серединнокристалічні напруження;

- тиски в деформаційних просторах сягають 1000–2500 МПа, а в деяких ділянках до 3000 МПа.

- нагрів оброблюваного металу внаслідок тертя, температура якого в місці контакту з інструментом може досягати 400 °С;

- збільшуються прояви адгезійних сил між інструментом та оброблюваним металом.

Крім вищеперерахованих явищ, необхідно відмітити можливість внутрішнього і міжкристалічного руйнування металу, а також зміну фізичних властивостей (збільшення магнітопроникності, коерцитивної сили, зміна електрофізичних властивостей тощо). Суттєвим недоліком цього виду обробки є підвищена енергоємність процесу, що залежить від багатьох факторів і впливає на зміну умов деформації (хімічний склад і механічні властивості металу, що обробляється, метод та якість попередньої підготовки металу, вид, форма, якість та геометричні розміри інструмента, ступінь деформації) [3].

Для холодної ОМТ в області контакту між оброблюваним металом та інструментом виникає складний напружений стан, різний для різних видів обробки. Своєрідний характер дії цих напружень зумовлюється умовами тертя на межі метал-інструмент. Для зменшення впливу зовнішнього тертя, а також для зменшення зон утрудненої деформації можна використати два шляхи: або таким чином змінити силове навантаження в місці контакту, щоб сили тертя зосередились в основному на самій поверхні оброблюваного металу, або використати змащувач.

Для опису пластичних деформацій суцільних тіл найбільш достовірні результати дає теорія течії [3, 4]. Згідно з цією теорією напружений стан матеріалу визначають миттєві прирости компонент тензора пластичної деформації. При розвиненій пластичній деформації можна знехтувати ними і отримаємо рівняння Сен-Венана–Мізеса [5].

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \frac{de_u}{\sigma_u} (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma), \quad (1.1)$$

і після ділення на  $dt$  отримаємо:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{e}_u}{\sigma_u} (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma), \quad (1.2)$$



де  $d\varepsilon_{ij}$  – компоненти тензора приросту пластичних деформацій;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  – компоненти тензора швидкостей деформацій;  $e_u$  – ступінь деформації;  $\sigma_u$  – інтенсивність напружень.

Тут швидкості деформацій  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  однозначно при заданні напружень не визначаються. При заданні швидкостей деформацій  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  компоненти дивідатора напружень  $\sigma_{ij}$  визначаються однозначно.

Рівняння (1.1) і (1.2) не зводяться до кінцевих співвідношень між компонентами напружень і деформацій (не інтегруються). Це відображає залежність результатів розрахунку компонент тензора приросту пластичних деформацій і компонент тензора швидкостей деформацій від історії деформування. Ці рівняння також не дають змоги врахувати зміну знака навантаження, при якому проявляється ефект Баушингера.

В найбільш загальному випадку для опису напружено-деформованого стану в пластичній області необхідно визначити 15 функцій

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, y, z, t); \quad \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(x, y, z, t); \quad u_i = u_i(x, y, z, t), \quad (1.3)$$

Ці функції пов'язані диференціальними рівняннями руху та нерозривності

$$\sigma_{ij,i} + \rho g_i = \rho w_i, \quad \frac{d\rho}{dt} + \rho v_{i,i} = 0, \quad (1.4)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу, що деформується;  $g_i$  – компоненти заданої розподіленої масової сили;  $w_i$  – компоненти вектора прискорення

$$w_i = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_{i,j} v_j; \quad (1.5)$$

$v_i$  – компоненти тензора швидкості.

Компоненти тензора деформацій  $\varepsilon_{ij}$  пов'язані з компонентами переміщень співвідношеннями Коші

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (1.6)$$

Функції (1.3) можна знайти, розв'язавши системи (1.4) і (1.6). Проте ця система неповна. Необхідно мати ще шість рівнянь, які б замикали систему. Ними є фізичні рівняння, які в теорії течії беруться у вигляді (1.1) або (1.2), які були отримані більше ста років тому [5]. Проте лише недавно було встановлено, що вони є наслідком фундамен-

тальних постулатів загальної теорії пластичності для процесів із траєкторією деформації малої кривизни, до яких відноситься і волочіння [6].

Задача теорії пластичності для загального випадку тривимірної деформації полягає у визначенні 15 функцій (1.3), які б задовольняли систему з нелінійних 15 рівнянь (1.1), (1.4), (1.6) або (1.2) в частинних похідних. Крім того, розв'язання крайової задачі має задовольняти також відповідні граничні умови, проте розв'язання задачі пластичності в такій постановці поки що не отримано. Тому розроблено низку методів наближених рішень, наприклад [7–9].

### **1.3 Деформовність металу в процесах формоутворення заготовок**

**1.3.1 Міра пластичності матеріалу.** Дослідження умов граничного формоутворення заготовок складного профілю, підвищення працездатності і якості деталей пов'язано з питаннями оцінки пластичності металів. Методики прогнозування пластичності металів для різних умов реалізації холодного деформування тільки тоді мають найбільшу вірогідність, коли вони базуються на узагальнених теоретичних і експериментальних даних. Це приводить до необхідності розробки і створення математичних моделей, які враховують взаємодію матеріалу заготовки, що деформується, з формоутворюючим інструментом з врахуванням обґрунтованих фізико-математичних підходів. Зазначені моделі повинні найбільш повно описувати властивості матеріалів, від зміни яких залежить механізм зміцнення металу, що деформується, процес накопичення і заліковування пошкоджень і, отже, ефективність процесу формоутворення і якість готового виробу. В даний час базові напрямки розв'язання зазначених задач розробляються на основі технологічної механіки, системні підходи якої відображені в роботах [2, 10–12]. Тому в технологічній практиці широке застосування знайшли феноменологічні теорії, в основу яких покладено гіпотезу про залежність пластичності від історії навантаження, що певним чином задається в просторі напружень [10–16]. Теоретичні основи цього напрямку представлені в роботах С. І. Губкіна [17], який встановив, що в умовах розвинутого пластичного деформування критерієм руйнування може бути ступінь деформації, яка не повинна перевищувати деякого критичного значення, яке він визначив як пластичність. Важ-

ливим в його роботах є поняття про діаграму пластичності, а також необхідність обґрунтування застосування двох незалежних показників інваріантів напружень при визначенні впливу на пластичність напруженого стану.

В роботах Л. Д. Соколова [18] обґрунтовано, що схема напруженого стану впливає як на зусилля при деформуванні, так і на пластичність, при цьому існує функціональна залежність між середнім нормальним напруженням на контакті з інструментом та граничною деформацією, яку може витримати матеріал без руйнування. Г. А. Смірнов-Аляев вперше ввів в якості міри пластичності накопичену до моменту руйнування пластичну деформацію [19]

$$e_p = \int_0^{t_p} \dot{\epsilon}_u d\tau, \quad (1.7)$$

де  $\dot{\epsilon}_u$  – інтенсивність швидкостей деформації;  $t_p$  – час деформування до руйнування.

Таким чином, під пластичністю будемо розуміти здатність металу змінювати свою форму без руйнування у вигляді макроскопічного порушення суцільності, а мірою пластичності буде накопичена до моменту руйнування пластична деформація, обумовлена співвідношенням (1.7). Величину  $e_p$  можна також розглядати як довжину траєкторії деформації.

При простому деформуванні, коли немає повертання головних осей деформації, накопичена інтенсивність деформації (ступінь деформації) дорівнює інтенсивності логарифмічних деформацій [10]

$$e_u = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2}, \quad (1.8)$$

де  $e_1, e_2, e_3$  – головні логарифмічні деформації.

В цій роботі будуть розглянуті процеси, що супроводжуються активною пластичною деформацією, а також проведені дослідження з встановлення залежностей накопиченої інтенсивності деформації, виду напруженого стану від основних технологічних факторів досліджуваних процесів.

**1.3.2 Характеристики напруженого стану.** Відомо, що пластичність залежить від багатьох факторів, серед яких, крім фізико-механічних характеристик самого металу, основними є термомеханічні параметри процесів: температура, швидкість деформування, схема напружено-деформованого стану [10]. Результати багатьох досліджень в галузі обробки металів тиском показують, що для холодної обробки металів вплив схеми напруженого стану є одним із найважливіших факторів впливу на пластичність металу при формоутворенні виробу.

По мірі розвитку технологічної механіки розроблялися різні підходи до оцінки пластичності в залежності від схеми напруженого стану. Так в класичних дослідях П. Бріджмена [20] вперше проведено дослідження впливу напруженого стану на пластичність, подальші дослідження проводили Б. І. Береснев [21, 22], Х. П'ю та ін. на установках великого тиску. Однак слід зазначити, що тиск рідини, в якій проводили дослідження, не є повноцінним параметром напруженого стану металу в місці його руйнування, а лише частково характеризує умови його навантаження.

В роботі [23] М. А. Зайков і В. Н. Перетятко запропонували показник

$$\eta = \frac{\sigma_1}{\mu_\sigma \sigma_u}, \quad (1.9)$$

де  $\sigma_u$  – інтенсивність напружень;  $\mu_\sigma$  – параметр Надаї-Лоде.

Однак, це співвідношення не враховує впливу середнього напруження.

На сьогодні віддають перевагу таким підходам, в яких напружений стан характеризують безрозмірними показниками, які визначаються через інваріанти тензора або девіатора напружень [10, 11, 16, 24–26]. В роботі [17] С. І. Губкін запропонував показник напруженого стану, що враховує вплив відносного середнього напруження на пластичність; його використовували В. А. Бабічков у вигляді [27]

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{2}\sigma_u}; \quad (1.10)$$

Г. А. Смірнов-Аляєв [14] –

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3}I_2(D_\sigma)} = \frac{3\sigma}{\sigma_u}; \quad (1.11)$$

В. Л. Колмогоров [12] –

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{3\sqrt{I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{3}\sigma_u}. \quad (1.12)$$

Показники (1.10–1.12) складені з інваріантів тензора та девіатора напружень, що враховують вплив середнього напруження, яке істотно впливає на пластичність і інтенсивність дотичних напружень, що визначають пластичну течію металу.

Однак, в роботах В. А. Огороднікова [10, 11], В. Л. Колмогорова [12], Ю. Г. Важенцева [28] обґрунтовано й експериментально доведено, що  $e_p$  неоднозначно залежить від показника напруженого стану  $\eta$  при об'ємному напруженому стані.

В. А. Огородніков [11] відзначає, що оскільки напружений стан характеризується трьома основними інваріантами, вид напруженого стану можна описати двома показниками при зміні напружень в умовах простого навантаження. Один з них може бути  $\eta$ , другий показник  $\eta_2$  повинний залежати від третього інваріанта  $T_\sigma$  чи девіатора  $D_\sigma$  напружень.

У роботі [29] при дослідженні залежності умови пластичності від середнього головного напруження  $\sigma_2$  введено величину (параметр Надаї–Лоде)

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad 0 \quad (1.13)$$

В роботі [11] параметр Надаї–Лоде представлено у вигляді

$$\mu_\sigma = \eta_2 = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_u}, \quad (1.14)$$

де  $I_3(T_\sigma)$  – третій інваріант тензора напружень.

**1.3.3 Діаграми пластичності і їхня апроксимація.** Залежність пластичності від параметра, що характеризує жорсткість схеми напруженого стану, називають діаграмою пластичності. Вперше науково обґрунтований підхід до побудови діаграм пластичності представлений у роботах С. І. Губкіна [17, 30], де показана можливість встановлення кількісної залежності між показником напруженого стану і граничною деформацією, а також висунуто припущення, що на пластичність поряд із впливом показників  $\eta$  впливає також вид напруженого стану, обумовлений параметром Надаї–Люде  $\mu_\sigma$  чи  $\mu_\epsilon$ . В зв'язку з цим С. І. Губкін запропонував будувати діаграму пластичності в координатах  $e_p = f(\mu_\sigma, \eta)$ .

Графічне представлення діаграми показано в роботі Л. Д. Соколова [18] і В. А. Скуднова [31] в координатах  $e = f(k_n)$ , де  $e$  – максимальна логарифмічна деформація;  $k_n$  – показник схеми напруженого стану, що визначається відношенням середнього питомого тиску  $p_{cp}$  на метал до його межі текучості  $\sigma_s$ . Обробивши дані П. Бріджмена [20], Г. А. Смірнов-Аляєв побудував діаграму пластичності в координатах  $e_p$ - $\eta$ , причому в області від'ємних значень запропонував будувати діаграми шляхом досліджень циліндричних зразків на осьове стиснення матеріалів зі змащенням і без змащення контактних поверхонь [32].

Перші апроксимації діаграми пластичності за результатами досліджень зразків на розтягнення, стиснення, вигинання і кручення аж до руйнування представлені А. А. Лабутінін [33]

$$e_p = 2e_p(\eta = 1)e^{(-0,72\eta)}, \quad (1.15)$$

де  $e_p(\eta = 1)$  – гранична деформація при розтягуванні;

Г. Д. Козловим [34]

$$e_p = 2e_p(\eta = 0)e^{(b\eta)}, \quad (1.16)$$

де  $0 \leq \eta \leq 1$ .

Коефіцієнт  $b$  визначався випробуванням циліндричних зразків на стиснення зі зміщенням.

Подальший розвиток методики побудови діаграм пластичності одержали в роботах В. Л. Колмогорова [12], де запропоновано випро-

бовувати матеріал в умовах розтягування з концентратором, розтягування під гідростатичним тиском тощо.

Вагомий внесок у методики побудови діаграм пластичності (спільні розтягування і кручення, випробування зразків у камері високого тиску тощо) і їхньої апроксимації внесли Г. Д. Дель [2] і В. А. Огородніков [10, 11, 35]. В області зміни показника напруженого стану  $-3 \leq \eta \leq 1$  діаграма пластичності задовільно описується рівнянням, запропонованим Г. Д. Делем [2]

$$e_p(\eta) = \frac{e_p(\eta=0)e_p(\eta=-1)e^{(-\eta)}}{e_p(\eta=-1) + \eta[e_p(\eta=-1) - 2,72e_p(\eta=0)]}, \quad (1.17)$$

де  $e_p(\eta=0)$  і  $e_p(\eta=-1)$  – пластичність матеріалу відповідно при осьовому стиску зі зміщенням і чистим зсувом.

В області зміни показника  $0 \leq \eta \leq 2$  діаграму можна апроксимувати рівнянням В. А. Огороднікова [11]

$$e_p = e_p(\eta=0)e^{(-\eta\lambda_i)}, \quad (1.18)$$

де  $\lambda_i$  – коефіцієнт чутливості пластичності до схеми напруженого стану

$$\lambda_1 = \ln \frac{e_p(\eta=0)}{e_p(\eta=1)}; \quad \lambda_2 = \ln \frac{e_p(\eta=-1)}{e_p(\eta=0)},$$

де  $e_p(\eta=0)$ ,  $e_p(\eta=1)$ ,  $e_p(\eta=-1)$  – відповідно граничні деформації при крученні, розтягуванні та стискуванні відповідно.

При цьому в області зміни показника  $0 < \eta \leq 1$  в рівняння (1.18) підставляють величину  $\lambda_1$ , а в області зміни показника  $-1 < \eta \leq 0$  в рівняння підставляють величину коефіцієнта чутливості  $\lambda_2$  [32].

Ці коефіцієнти отримані також в роботі В. А. Скуднова [31], виходячи з фізичних уявлень про поведінку матеріалу для різних способів пластичного деформування.

Для проміжних значень, коли відомі дві точки діаграми пластичності, що належать інтервалу  $0 \leq \eta \leq 2$ , але відмінних від  $e_p(\eta=0)$  і  $e_p(\eta=-1)$ , можливе застосування апроксимуючої функції

$$e_p(\eta) = e_p(\eta=\eta_1) \exp\left(-\ln \frac{e_p(\eta=\eta_1)\eta - \eta_1}{e_p(\eta=\eta_2)\eta_2 - \eta_1}\right), \quad (1.19)$$

де  $e_p(\eta = \eta_1)$  і  $e_p(\eta = \eta_2)$  – гранична деформація при показнику напруженого стану, рівного відповідно  $\eta_1$  і  $\eta_2$  (за незмінності показника  $\eta$  протягом всього часу деформування є простим).

Оцінка пластичності матеріалів заготовок для різних процесів обробки металів тиском припускає розвиток методів побудови діаграм пластичності. Так для процесів листового штампування і трубчастих заготовок з невеликою товщиною стінки діаграми пластичності будують за результатами іспитів зразків, виготовлених з досліджуваного матеріалу чи листа труби на розтягування, розтягування з концентраторами напружень, двохосьове розтягування [11, 22, 28]. При цьому показник напруженого стану змінюється в межах  $1 \leq \eta \leq 2$ .

Для оцінки пластичності в більш широкому діапазоні зміни  $\eta$  (наприклад, для процесу чистової вирубки), де  $\eta < 0$ , розроблено методику, в основу якої покладені випробування спеціальних зразків на розтягування і стиснення, виготовлених з листових матеріалів. Тоді граничну деформацію можна визначити так [11]:

$$e_p(\eta = 0) = 0,18 \left( 1,8 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{3}} \right) + 1, \quad (1.20)$$

де  $\alpha$  – кут відхилення горизонтальної риски, нанесеної на зразок в області перемички.

В роботі [11] В. А. Огородніков представив методику використання діаграм пластичності, побудованих в умовах плоского або лінійного напруженого стану, для оцінки пластичності металів, що деформуються в умовах об'ємного напруженого стану. Для того, щоб за даними діаграми пластичності  $I_3(T_\sigma) = 0$  передбачити поведінку металу, що деформується в умовах об'ємного напруженого стану ( $I_3(T_\sigma) \neq 0$ ) без проведення трудомістких експериментальних досліджень в камерах високого тиску, була введена функція  $f(\eta)$

$$f(\eta) = \eta_2 / (\Delta\eta - \eta), \quad (1.21)$$

де значення  $\eta_2$  можна визначити із залежності (1.14); а  $\Delta\eta$  визначається «зміщенням» вздовж осі  $\eta$  кривої  $e_p = f(\eta)$ , побудованої при  $I_3(T_\sigma) = 0$  [37].



Отже, діаграми пластичності можуть бути побудовані за результатами випробувань стандартних зразків при простих видах деформування з подальшою їх апроксимацією.

**1.3.4 Критерії руйнування при монотонному деформуванні.** На сучасному етапі розвитку машинобудування особливого значення набувають дослідження, з аналізу умов руйнування і методів розрахунку на міцність деталей машин [10, 11, 12, 16, 38–43].

На міцність впливає структура деформованого матеріалу, наявність мікро- і макропошкоджень, характер зовнішніх умов (навантаження, температура тощо). Тому визначення факторів, що приводять до руйнування, а також його прогнозування є комплексною проблемою, яка розв'язувалась дослідниками в областях фізики твердого тіла, механіки суцільних середовищ і матеріалознавства. Оскільки фізичними методами не вдається навіть якісно описати багато особливостей руйнування [44], застосовують кількісні оцінки міцності матеріалів, використовуючи підходи механіки суцільних середовищ, зокрема, новий перспективний напрямок – створення феноменологічних теорій накопичення пошкоджень [10, 11, 16, 39, 45].

Деформування тіл супроводжується накопиченням пошкоджень, умови розвитку яких недостатньо вивчені. Це приводить до пошуків характеристик пошкоджуваності, критерієм вірогідності яких є відповідність теорії експериментальним даним.

Критерії руйнування застосовують для кількісної оцінки впливу напруженого стану на імовірність руйнування, під яким розуміється поява мікротріщини, що приводить до непоправного бракування виробу.

В перших роботах з оцінки граничного стану використовувались підходи класичної теорії міцності, згідно з якими руйнування відбувається при досягненні матеріалом деяких граничних значень поверхневих напружень [46].

Так, згідно з критерієм Шлейхера–Надаї [47] інтенсивність дотичних напружень  $\tau$  при руйнуванні є визначеною величиною для даного матеріалу функцією середнього напруження  $\sigma$ . Критерій Я. Б. Фрідмана [46] враховує одночасний вплив на руйнування дотичних і нормальних напружень. Однак, критерії [46, 47] не враховують вплив історії навантаження на пластичність.

Принципи розробки критеріїв, що враховують накопичення пошкоджень (лінійне їхнє підсумовування), узагальнені і застосовані Е. Робінсоном [48] і Ю. Н. Работновим [49] для матеріалів, повзучість яких супроводжується зміцненням. Зазначені принципи лягли в основу існуючих критеріїв деформовності металів без руйнування, розвиток яких показано в роботах С. І. Губкіна [17], А. А. Ільюшина [38], С. А. Смірнова-Аляєва [19], В. Л. Колмогорова [12], Г. Д. Деля [39], В. А. Огороднікова [10, 11], Ю. Г. Калпіна [40] та інших.

Умова деформування матеріалу без руйнування має вигляд

$$\psi = \frac{e_u}{e_p(\eta)}, \quad (1.22)$$

де  $\psi$  – використаний ресурс пластичності, який при деформуванні без руйнування менший одиниці;  $e_u = \int_0^t \dot{\epsilon}_u d\tau$  – ступінь деформації;  $e_p(\eta)$  –

гранична деформація в момент появи перших візуально видимих тріщин.

Цей критерій не враховує історію деформування; відомо, що гранична деформація залежить від температури випробувань, швидкості деформування, показника напруженого стану  $\eta$ , якому відповідає момент руйнування матеріалу.

Скалярну модель руйнування для дослідження деформовності застосував В. Л. Колмогоров у роботі [12], де використано гіпотезу про пропорційну залежність між накопиченням пошкоджуваності і ступенем збільшення деформації у вигляді

$$\psi = \int_0^{t_p} E(t-\tau)B(\tau) \frac{\dot{\epsilon}_i}{e_p[\eta(\tau)]} d\tau = 1, \quad (1.23)$$

де  $E(t-\tau)$  – коефіцієнт, що враховує самозаліковування дефектів при високих температурах і який монотонно зменшується від 1 до 0 при збільшенні аргументу;  $B(\tau)$  – величина, що враховує швидкість розвитку тріщин і їхнє заліковування при холодному деформуванні;  $\dot{\epsilon}_i$  – інтенсивність швидкості деформації.

Можна також відзначити, що при простому навантаженні критерій (1.23) аналогічний критерію А. А. Ільюшина [38]

$$\int_0^{t_p} \frac{d\tau}{t_r(\sigma(\tau))} = 1, \quad (1.24)$$

де  $t_r(\sigma)$  – час руйнування зразка в умовах повзучості (при постійному значенні  $\sigma$ );  $t_p$  – час деформування до руйнування.

Критерій (1.24) подібно (1.22) відповідає лінійному закону накопичення пошкоджень і не враховує вплив історії навантаження на інтенсивність накопичення пошкоджень.

**1.3.5 Критерії руйнування при немонотонному деформуванні.** В роботі Г. Д. Деля, В. А. Огороднікова, В. Г. Нахайчука [15] досліджено залежність граничної пластичності від виду напруженого стану, історії деформування і градієнта пластичних деформацій, запропонований критерій деформовності, що враховує нелінійний характер накопичення пошкоджень і різні шляхи навантаження металу

$$\psi = \int_0^{e_u} n \frac{e_u^{n-1}}{e_p(\eta)^n} de_u = 1, \quad (1.25)$$

$$\text{де } n = 1 + 0,2 \frac{d\eta}{de_u}; \quad (1.26)$$

$e_p(e_u)$  – значення діаграми пластичності, що відповідає значенню  $e_u$  шляху деформування.

Експериментальна перевірка [15] показала, що критерій (1.25) дає значні розбіжності для шляхів деформування великої кривизни, тому В. А. Огородніковим співвідношення (1.26) представлено у вигляді

$$n = 1 + 0,2 \arctg(d\eta / de_u). \quad (1.27)$$

Для оцінки деформовності заготовок в умовах об'ємного напруженого стану, врахування третього інваріанта тензора напружень можливе у вигляді [11]

$$\psi = \int_0^{e_u} (1+f) \frac{e_u^f}{e_p^*[\eta_k(e_u)]^{1+f}} de_u = 1, \quad (1.28)$$

де  $f = 0, 2 \arctg \left[ \frac{d\eta_1}{de_u} + \frac{d\eta_2}{de_u} \right]$ ;  $e_p^*[\eta_k(e_u)]$  – ділянка діаграми пластичності, побудована з врахуванням третього інваріанту тензора напружень за методикою [11].

Як уже було відзначено, у критеріях (1.22)–(1.28) передбачається, що накопичення пошкоджень в деформованому металі описується скаляром. Однак, існують процеси обробки металів тиском, в яких мають місце багатоперехідні операції, що характеризуються немонотонними навантаженнями з розвантаженнями, деформаційною анізотропією, в яких необхідно враховувати вплив ефекту Баушингера. Тому виникає необхідність застосування більш складних критеріїв руйнування, в яких в якості міри пошкоджень пропонується тензор другого рангу, тобто, в загальному випадку критерій руйнування повинний враховувати спрямованість характеру пошкоджень. Цей напрямок досліджень представлений в роботах О. А. Ільюшина, Г. Д. Деля, В. М. Михалевича, [38, 39, 43], А. Д. Кийко [41], А. А. Мішуліна [42] та ін. Ідея врахування спрямованого характеру пошкоджень за допомогою тензора пошкоджень належить О. А. Ільюшину. Г. Д. Дель [39], виходячи з експериментальних даних, знайшов вид підінтегральної функції тензора пошкоджень і запропонував тензорно-лінійну модель накопичення пошкоджень при холодному пластичному деформуванні тіл, що мають в початковій стадії ізотропію граничних деформацій. У роботі [39] наведено критерій деформовності

$$\Psi_{ij} = \int_0^{e_u} \left[ 1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta)} \right] \beta_{ij} \frac{de_u}{e_p(\eta)}, \quad (1.29)$$

причому повинна виконуватись умова

$$\Psi_{ij} \Psi_{ij} = 1, \quad (1.30)$$

де  $\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\dot{\epsilon}_{ij}}{e_u}$  – направляючий тензор швидкостей деформацій;

$a = \text{const}$  – коефіцієнт, який підбирається, щоб задовольнити умові (1.30).

В роботах А. А. Мішуліна, В. М. Михалевича одержали розвиток тензорно-нелінійні підходи до оцінки накопичення пошкоджень для визначення граничних деформацій [42, 43]

$$\psi_{ij} = \int_0^{\epsilon_u} \left[ A\beta_{ij} + B \left( \beta_{ik}\beta_{kj} - \frac{1}{3}\delta_{ij} \right) \right] d\epsilon_u, \quad (1.31)$$

де  $A$  і  $B$  – деякі функції.

При простому деформуванні ( $\beta_{ij} = \text{const}$ ), співвідношення (1.31) набуває вигляду

$$\psi_{ij} = a\beta_{ij} + b \left( \beta_{ik}\beta_{kj} - \frac{1}{3}\delta_{ij} \right), \quad (1.32)$$

де  $a$  і  $b$  – первинні функції  $A$  і  $B$ , що виражаються через функцію накопичення пошкоджень, яка монотонно зростає.

Використовуючи тензорні моделі, можна прогнозувати технологічну спадковість матеріалу у вигляді залишкової пластичності одержуваної деталі. Якщо в процесі пластичного формоутворення компоненти тензора пошкоджень в цій точці заготовки складають  $\psi_{ij}$ , то при наступному випробуванні на розтяг в напрямку осі  $X_1$  в даній точці компоненти тензора  $\psi_{ij}$  зміняться на величину  $\Delta\psi_{ij}$ . Тоді умову руйнування можна записати у вигляді

$$(\psi_{ij} + \Delta\psi_{ij})(\psi_{ij} + \Delta\psi_{ij}) = 1, \quad (1.33)$$

Тензорні представлення про накопичення пошкоджень дають більш повний опис процесів і високу точність відповідності до реальних моделей, особливо для випадків немонотонного, складного деформування анізотропних матеріалів зі складною реологією.

#### 1.4 Напружено-деформований стан при волочінні

В області розвинутого пластичного деформування відбувається зміна знаків швидкостей деформацій  $\dot{\epsilon}_z, \dot{\epsilon}_r, \dot{\epsilon}_\phi$ . Згідно з визначеннями А. А. Ільюшина, Г. А. Смірнова-Аляєва [6, 19] деформація часток монотонна або навантаження буде простим, якщо в процесі формозміни головні швидкості деформації  $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$  весь час зв'язані з одними і

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-560-1>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-560-1>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-560-1>

*Наукове видання*

**Огородніков Віталій Антонович  
Співак Олександр Юрійович  
Грушко Олександр Володимирович**

**ДЕФОРМАЦІЯ ВОЛОЧІННЯМ  
І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ  
ТОНКИХ ТЕРМОПАРНИХ ДРОТІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено О. Співаком

Підписано до друку 4.03.2014 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 6,47  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) прим. Зам № В2014-08

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.  
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.