



Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

# Вібрації в техніці та технологіях



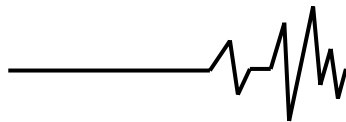
**Всеукраїнський науково-технічний журнал**

**Ukrainian Scientific & Technical Journal**

# **Вібрації в техніці та технологіях**

**№ 2 (93)**

**Вінниця 2019**

**ВІБРАЦІЇ В  
ТЕХНІЦІ ТА  
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального спрямування  
Видавець: Вінницький національний аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та технологіях”  
Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації  
КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

*Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях” / Редколегія:  
Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця, 2019. – 2 (93) – 76 с.*

*Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету  
(протокол № 11 від 12.04.2018 р.)*

*Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань України, що затверджений  
наказом Міністерства освіти і науки України від 21.12.2015 р. № 1328;*

**Головний редактор**

**Калетнік Г.М.** – д.е.н., професор, академік НААН,  
Вінницький національний аграрний університет

**Заступники головного редактора**

**Іскович-Лотоцький Р.Д.** – д.т.н., проф., Вінницький  
національний технічний університет  
**Ловейкін В.С.** – д.т.н., проф., Національний університет  
біоресурсів і природокористування України

**Відповідальний секретар**

**Солона О.В.** – к.т.н., доц., Вінницький національний  
аграрний університет

**Члени редакційної колегії**

**Адамчук В.В.** – д.т.н., проф., акад. НААН, Національний  
науковий центр “Інститут механізації та електрифікації  
сільського господарства”

**Анісімов В.Ф.** – д.т.н., проф., Вінницький національний  
аграрний університет

**Афтаназієв І.С.** – д.т.н., проф., Національний університет  
“Львівська політехніка”

**Бобир М.І.** – д.т.н., проф., Національний технічний  
університет України “Київський політехнічний інститут імені  
Ігоря Сікорського”

**Булгаков В.М.** – д.т.н., проф., акад. НААН, Національний  
університет біоресурсів і природокористування України

**Веселовська Н.Р.** – д.т.н., проф., Вінницький національний  
аграрний університет

**Войтюк Д.Г.** – к.т.н., проф., чл.-кор. НААН, Національний  
університет біоресурсів і природокористування України

**Джемелінський В.В.** – к.т.н., проф., Національний  
технічний університет України “Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського”

**Дирда В.І.** – д.т.н., проф., Інститут геотехнічної механіки  
імені М.С. Полякова НАН України

**Дудніков А.А.** – к.т.н., проф., Полтавська державна  
аграрна академія

**Зав’ялов В.Л.** – д.т.н., проф., Національний університет  
харчових технологій

**Зінковський А.П.** – д.т.н., проф., Інститут проблем  
міцності імені Г. С. Писаренка НАН України

**Ковбаса В.П.** – д.т.н., проф., Вінницький національний  
аграрний університет

**Костоґриз С.Г.** – д.т.н., проф., Хмельницький  
національний університет

**Кузьо І.В.** – д.т.н., проф., Національний університет  
“Львівська політехніка”

**Кушнарєв А.С.** – д.т.н., проф., чл.-кор. НААН, Таврійський  
державний агротехнологічний університет

**Мазоренко Д.І.** – к.т.н., проф., чл.-кор. НААН, Харківський  
національний технічний університет сільського господарства  
імені Петра Василенка

**Матвеев В.В.** – д.ф.-м.н., проф., академік НААН, Інститут  
проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України

**Матвійчук В.А.** – д.т.н., проф., Вінницький національний  
аграрний університет

**Надутьий В.П.** – д.т.н., проф., Інститут геотехнічної  
механіки імені М.С. Полякова НАН України

**Назаренко І.І.** – д.т.н., проф., Київський національний  
університет будівництва і архітектури

**Ольшанський В.П.** – д.ф.-м.н., проф., Харківський  
національний технічний університет сільського  
господарства імені Петра Василенка

**Ройзман В.П.** – д.т.н., проф., Хмельницький національний  
університет

**Сілін Р.І.** – д.т.н., проф., Хмельницький національний  
університет

**Струтинський В.Б.** – д.т.н., проф., Національний  
технічний університет України “Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського”

**Шульженко М.Г.** – д.т.н., проф., Харківська національна  
академія міського господарства

**Цуркан О.В.** – к.т.н. доц., Вінницький національний  
аграрний університет

**Франчук В.П.** – д.т.н., проф., Державний ВНЗ  
“Національний гірничий університет”

**Ярошевич М.П.** – д.т.н., проф., Луцький національний  
технічний університет

**Ярошенко Л.В.** – к.т.н., доц., Вінницький національний  
аграрний університет

**Зарубіжні члени редакційної колегії**

**Бабічев А.П.** – д.т.н., проф., чл.-кор. РАН, Донський  
державний технічний університет (м. Ростов-на-Дону, Росія)

**Блехман І.І.** – д.т.н., проф., акад. РАН, Інститут проблем  
машинознавства РАН (м. Санкт-Петербург, Росія)

**Копилов Ю.Р.** – д.т.н., проф., Воронежський державний  
технічний університет (м. Воронеж, Росія)

**Серга Г.В.** – д.т.н., проф., Кубанський державний аграрний  
університет (м. Краснодар, Росія)

**Субач А.П.** – д.т.н., проф., Ризький технічний університет,  
(м. Рига, Латвія)

**Віба Янес** – д.т.н., проф., Ризький технічний університет  
(м. Рига, Латвія)

**Войнаровський Юзеф** – д.т.н., проф., Силезький  
політехнічний інститут (м. Глівіце, Польща)

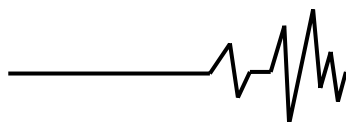
**Яцун С.Ф.** – д.т.н., проф., Курський державний технічний  
університет (м. Курськ, Росія)

Технічний редактор **Кір’янов А.І.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний університет, тел. 46–00–03

Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/>

Електронна адреса: [vibration.vin@ukr.net](mailto:vibration.vin@ukr.net)



## З М І С Т

**I. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН**

<i>Деревенько І.А., Солоня О.В.</i> ВПЛИВ ШВИДКОСТІ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ПРИ РОЗРАХУНКУ ВИКОРИСТАНОГО РЕСУРСУ ПЛАСТИЧНОСТІ.....	5
<i>Полевода Ю., А.Твердохліб І.В.</i> ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ШКАРАЛУПИ ВОЛОСЬКОГО ГОРІХА.....	12
<i>Бандура В. М., Липовий І. Г.</i> МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРАЦІЙНО-ПЛАНЕТАРНОГО ВІДТИСКУВАННЯ В'ЯЗКО- ПЛАСТИЧНОЇ СИРОВИНИ НА ОСНОВІ БЕЗРОЗМІРНИХ КОМПЛЕКСІВ.....	18
<i>Комаха В. П., Галушак О. О., Бурлака С. А.</i> КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ НЕЙТРАЛІЗУЮЧОГО МЕХАНІЗМУ ДИСБАЛАНСУ В ОДНОЦИЛІНДРОВОМУ ДВЗ ТИПУ R.....	24
<i>Карпик А. О.</i> ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЛОПАТКИ НА БАЗІ УСТАНОВЛЕНОЇ МІЖПРОГРАМНОЇ ВЗАЄМОДІЇ РОЗРАХУНКОВИХ КОМПЛЕКСІВ.....	30
<i>Skiba M., Pivovarov A., Vorobyova V.</i> GREEN SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLES USING GRAPE POMACE WASTE FOR THE DEGRADATION OF PHARMACEUTICALS DRUGS AND ORGANIC DYES.....	37
<i>Ольшанський В.П., Ольшанський С.В.</i> РОЗВ'ЯЗОК РІВНЯННЯ УДАРУ ПРУЖНИХ ТІЛ, ОДНЕ З ЯКИХ КОНУС .....	43
<i>Сивак Р.І., Рекечинський В. І.</i> ОСОБЛИВОСТІ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ МЕТАЛІВ ПРИ НЕМОНОТОННОМУ ДЕФОРМУВАННІ.....	50
<i>Любін М. В., Токарчук О.А.</i> ВПЛИВ СПОСОБУ КРІПЛЕННЯ БЕЗСТРУЖКОВИХ МІТЧИКІВ НА ПРОЦЕС ВИТИСКУВАННЯ РІЗЬБИ.....	56
<i>Дудніков А.А., Дудніков І.А., Дудник В.В., Лапенко Т.Г.</i> МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	62
<i>Омельянов О.М.</i> ОБГРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ НА ПРОЦЕС ОБРОБКИ СИПКОЇ МАСИ.....	68







**Деревенько І. А.**

к.т.н., доцент

**Солона О. В.**

к.т.н., доцент

**Вінницький національний  
аграрний університет****Derevenko I.****Solona O.****Vinnitsia National Agrarian  
University****УДК 651.7****ВПЛИВ ШВИДКОСТІ  
НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ  
ПРИ РОЗРАХУНКУ  
ВИКОРИСТАНОГО РЕСУРСУ  
ПЛАСТИЧНОСТІ**

При оцінці граничної формозміни у процесах обробки металів тиском на пластичність істотно впливає швидкість накопичення пошкоджень і їх заліковування у вигляді похідних від показників напруженого стану. Показано, що в умовах складного навантаження, коли швидкість накопичення пошкоджень (перша похідна від показників напруженого стану) більша 5 і кривизна траєкторій деформування частинок матеріалу (друга похідна від показників напруженого стану) більша 1, найбільш достовірні результати розрахунку використаного ресурсу пластичності дають скалярні інтегральні критерії руйнування, що враховують вплив історії деформування на пластичність.

**Ключові слова:** гранична формозміна, показник напруженого стану, кривизна траєкторій деформування, ресурс пластичності, швидкість накопичення пошкоджень..

**Постановка проблеми.** Проблема оцінки деформованості металів і сплавів без руйнування - комплексна проблема, вирішення якої базується на феноменологічній теорії механіки суцільних середовищ. Сучасні уявлення про механізм руйнування не дозволяють оцінювати ступінь деформацій, при яких відбувається руйнування металів в умовах складного навантаження. Під складним навантаженням будемо розуміти процес навантаження в мікрооб'ємах суцільного середовища, що задається шістьма незалежними функціями часу  $\sigma_{ij}(t)$  або п'ятьма девіаторними функціями  $S_{ij}(\bar{t})$ , так як  $S_{ii} = 0$ .

Якщо зазначені функції змінюються пропорційно одному параметру – це просте навантаження, якщо компоненти тензора змінюються непропорційно одному параметру – це складне навантаження (траєкторії середньої кривизни). Допускається зміна знака компонент тензора напружень аж до прояву ефекту Баушінгера (траєкторії великої кривизни).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Слідуючи термінології А.А. Ільюшина [1] при складному навантаженні однією з основних характеристик траєкторії навантаження є її кривизна. Такий опис історії навантаження призводить до необхідності реалізації необмеженої кількості траєкторій і практичне застосування цих функцій в

феноменологічних умовах руйнування стає неможливим. В своїх працях В.А. Огородніков [2, 3] дослідив, що при одних і тих же умовах формозміни, траєкторії навантаження будуть різними. При цьому процес навантаження частинок матеріалу доводиться досліджувати в шестивимірному просторі, що викликає ряд труднощів методичного характеру, зростає трудомісткість і обсяг розрахунків, втрачається наочність. Р.І. Сивак в роботі [4] дослідив підхід, який дозволяє враховувати вплив траєкторій деформацій великої кривизни в межах довжини сліду запізнення на величину компонент девіатора напружень в умовах складного навантаження, але які саме критерії руйнування, що враховують вплив історії деформування на пластичність, дають найбільш достовірні результати розрахунку використаного ресурсу пластичності не уточнюються.

**Мета досліджень.** Створення розрахункового апарату, що дозволяє оцінювати граничне формозмінення в умовах складного навантаження з урахуванням впливу першої і другої похідної від показника напруженого стану на накопичення пошкоджень і їх заліковування в процесах обробки тиском.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Процес навантаження будемо розглядати в просторі безрозмірних показників



напруженого стану. Розглянемо тензор напружень у вигляді [2]

$$\sigma_{ij} = \tau S_{ij}^0 + \sigma \delta_{ij}, \quad (1)$$

де  $\sigma = \frac{\sigma_{ij} \delta_{ij}}{3}$  – гідростатичний тиск;

$S_{ij}^0 = \frac{S_{ij}}{\tau}$  – компоненти направляючого тензора;

$S_{ij}$  – компоненти девіатора напружень;

$\tau$  – інтенсивність девіатора напружень

$$\tau^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2.$$

Поділивши ліву і праву частину виразу (1) на  $\sigma_i$  – інтенсивність напружень, отримаємо

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_i} = \sqrt{\frac{2}{3}} S_{ij}^0 + \frac{\eta}{3} \delta_{ij}, \quad (2)$$

де  $\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i} = \frac{3\sigma}{\sigma_i}$  – показник

напруженого стану, який відображає вплив відносного гідростатичного тиску на пластичність.

Геометричний зміст показника  $\eta$  проілюстровано на рис. 1. Показник  $\eta$  означає нахил вектора OM до гідростатичної осі [2]

$$\text{ctg } \omega_p = \frac{OP}{OD} = \frac{\sqrt{3}\sigma}{\tau} = \frac{\eta}{\sqrt{2}}. \quad (3)$$

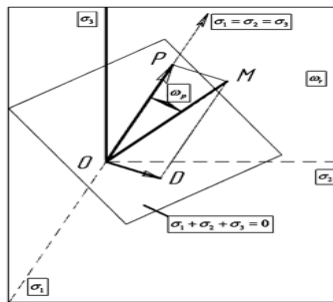


Рис. 1. Гідростатична вісь – ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) і девіаторна площина – ( $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$ )

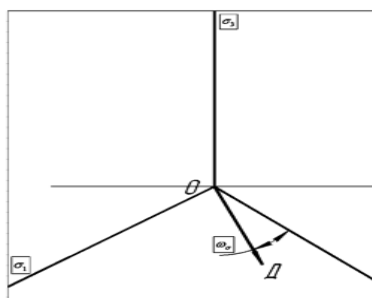


Рис. 2. Проекції координатних осей на девіаторну площину і кут  $\omega_\sigma$  напруженого стану

Положення OD в девіаторній площині визначається величиною кута виду напруженого стану  $\omega_\sigma$  (рис. 2), який пов'язаний з параметром Надаї-Лоде співвідношенням [5]

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 = -\sqrt{3} \text{ctg} \left( \omega_\sigma + \frac{4}{3} \pi \right). \quad (4)$$

В просторі головних напружень (2) має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} &= \frac{1}{3} \left( \eta - \frac{\mu_\sigma - 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}} \right), \\ \frac{\sigma_2}{\sigma_i} &= \frac{1}{3} \left( \eta + \frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}} \right), \\ \frac{\sigma_3}{\sigma_i} &= \frac{1}{3} \left( \eta - \frac{3 + \mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Якщо використовувати криву течії, то від (5) перейдемо до головних напружень:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma - \sigma_i \frac{\mu_\sigma - 3}{3\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \\ \sigma_2 &= \sigma + \sigma_i \frac{2\mu_\sigma}{3(\mu_\sigma^2 + 3)}, \\ \sigma_3 &= \sigma - \sigma_i \frac{3 + \mu_\sigma}{3(\mu_\sigma^2 + 3)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким чином, з (5) випливає, що траєкторії навантаження можна задавати в тривимірному просторі з координатами  $e_i, \eta, \mu_\sigma, \chi$ .

Залежності  $\eta(e_i), \mu_\sigma(e_i)$  а також показник

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sigma_i} = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{I_2(D_\sigma)}}, \quad (7)$$

введені в роботі [2] з метою врахування третього інваріанта тензора напружень на пластичність при об'ємному напруженому стані. Також введено термін «шляхи деформування», на відміну від терміну «траєкторії навантаження» в просторі напружень, «траєкторії деформацій» (в просторі деформацій).

З аналізу (5) також слідує, що при  $\eta = \text{const}$  і  $\mu_\sigma = \text{const}$  навантаження буде простим, а при  $\eta = \eta(e_i), \mu_\sigma = \mu_\sigma(e_i)$  – складним.

У загальному випадку напруженого стану залежність пластичності від схеми



напруженого стану можна задати поверхнею  $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ , координати якої (ступеню деформацій в момент руйнування) визначаються феноменологічними критеріями руйнування [2]. Саме тому, феноменологічні критерії руйнування дозволяють будувати граничні поверхні. Однак при цьому необхідно задавати кривизну шляхів деформування частинок матеріалу в небезпечних зонах заготовок, що деформуються.

Головна перевага задання траєкторій навантаження в просторі безрозмірних показників напруженого стану  $\eta, \mu_\sigma, \chi$ , полягає в тому, що в цьому випадку вид шляху деформування однозначно визначається умовами формозміни, характерними для досліджуваного процесу і практично не залежить від механічних властивостей матеріалу [3]. Це дозволяє моделювати процеси обробки тиском на модельних матеріалах. В цьому випадку необхідно мати у своєму розпорядженні криві

$$\psi = \int_0^{e_i^*} \left( 1 + a \arctg \left( \frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right) \right) \frac{[e_i(\eta, \chi)]^{a \arctg \left( \frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right)}}{[e_p(\eta, \chi)]^{1 + a \arctg \left( \frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right)}} \leq 1 \quad (8)$$

за допомогою якого оцінюють використований ресурс пластичності або граничну ступінь деформації в процесах обробки тиском в умовах об'ємного напруженого стану при складному навантаженні. У зазначений критерій входять перші похідні від показників напруженого стану, що характеризують швидкість накопичення пошкоджень. Розглянемо їх вплив на накопичення пошкоджень та їх заліковування.

В роботі [2] наведені експериментальні дані, отримані шляхом випробування циліндричних зразків з матеріалів що не утворюють «шийку» в умовах одновісного розтягу. Це швидкокорозійні сталі Р6М5, Р12, 40Х, 45 випробувані в умовах спільного кручення і розтягу в умовах змінного гідростатичного тиску (до 20000 атм) при цьому реалізували програми деформування, які забезпечують або сталість показників напруженого стану, або їх зміну по різних траєкторіях деформування в координатах «накопичена інтенсивність деформацій - показник напруженого стану». У випадку коли  $\eta = const, \chi = const$  в момент руйнування

$e_i = f(\eta)$  утворює діаграму пластичності (механічна характеристика матеріалу). Якщо реалізувати шляхи деформування матеріалу у вигляді прямих, нахилених до осі деформацій (див. рис. 3) слідує функції

$$\eta = B e_i, \quad (9)$$

зміцнень  $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$  і діаграми пластичності  $\varepsilon_p = f(\eta, \mu_\sigma, \chi)$  [3].

Як зазначено вище, процеси навантаження будемо розраховувати в просторі безрозмірних показників напруженого стану, при цьому перша похідна від показників напруженого стану характеризує швидкість накопичення пошкоджень (або їх заліковування, в залежності від знака похідної) –

$$\left( \frac{d\eta}{de_i}, \frac{d\chi}{de_i}, \frac{d\mu_\sigma}{de_i} \right),$$

а друга похідна від

$$\left( \frac{d^2\eta}{de_i^2}, \frac{d^2\chi}{de_i^2}, \frac{d^2\mu_\sigma}{de_i^2} \right) -$$

характеризує кривизну шляху деформування.

Швидкість накопичення пошкоджень або їх заліковування входить у вигляді функцій в критерій В.А. Огороднікова [2]

де  $B=1, 4; 2; 2,86; 5$ , то руйнування настане не в момент зустрічі з діаграмою пластичності, а

пізніше, інакше кажучи, якщо  $\frac{d\eta}{de_i} > 0$  - йде

заліковування дефектів. У разі якщо  $\frac{d\eta}{de_i} < 0$

(див. рис. 4), то руйнування настає до зустрічі прямолінійних променів з діаграмою пластичності, тобто йде поглиблення дефектів. На рис. 4 показані шляхи деформування

$$\frac{d\eta}{de_i} > 0 \text{ і } \frac{d\eta}{de_i} < 0$$

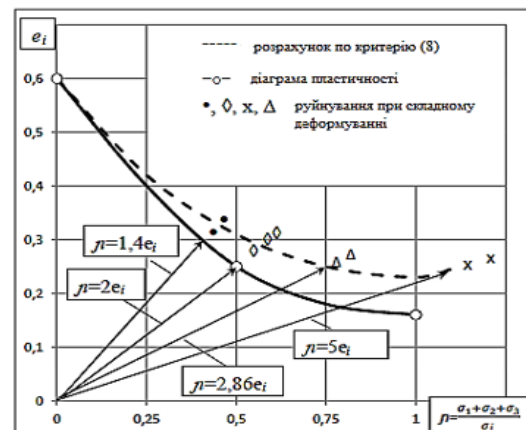


Рис. 3. Вплив швидкості накопичення пошкоджень на пластичність сталі Р12 [2]



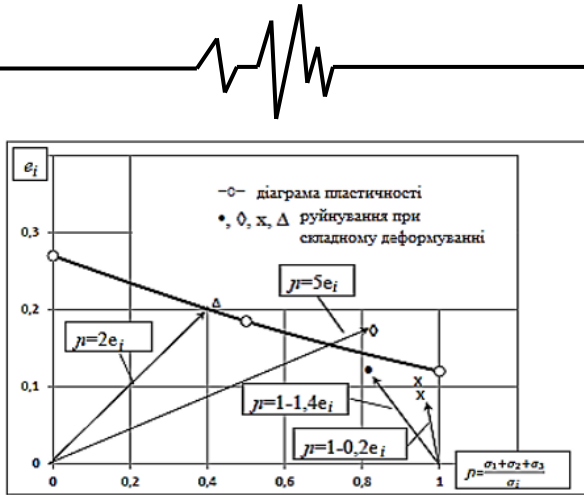


Рис. 4. Вплив швидкості шляхів деформування на пластичність сталі P9 [2]

В роботі [2] введений коефіцієнт впливу історії деформування (першої та другої похідної від показників напруженого стану за інтенсивністю деформацій) на граничну ступінь деформації. Коефіцієнт  $w$

$$w = \frac{e_p(\eta)}{e_p(\eta = const)}, \quad (10)$$

де  $e_p(\eta)$  - гранична ступінь деформації з урахуванням історії деформування,  $e_p(\eta = const)$  - гранична ступінь деформації при  $\eta = const$ .

На рис. 5 показана отримана нами залежність коефіцієнта впливу історії деформування  $w$  від швидкості зміни показника

напруженого стану  $\frac{d\eta}{de_3}$  для сталі P18 за

даними отриманим в роботі [2].

На рис. 6 показана залежність коефіцієнта впливу історії деформування  $w$  від кривизни шляху деформування  $\frac{d^2\eta}{de_i^2}$ . Як

впливає з рис. 5 зі зростанням першої похідної від показника напруженого стану зростає вплив коефіцієнта  $w$ .

При  $\frac{d\eta}{de_i} > 5$  для сталі P18  $w$  досягає

величини 1,8. З рис. 6 випливає, що кривизна шляху деформування також впливає на пластичність. Так для сталей 45 і P9 коефіцієнт  $w$  досягає величини 1,4. Однак для сталі 45 максимальне значення коефіцієнта  $w = 1,4$  досягається при  $\chi \geq 2$ , а для сталі P9 це ж значення  $w = 1,4$  досягається при кривизні  $\chi = 5$ .

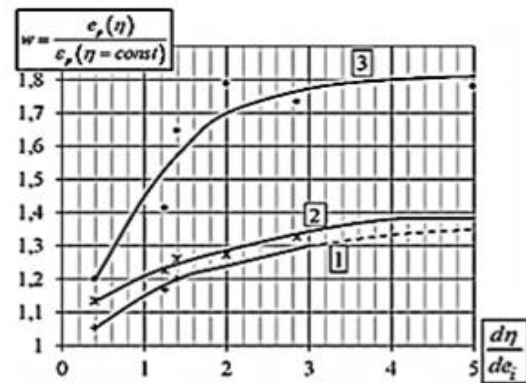


Рис. 5. Залежність коефіцієнта впливу історії деформування  $w$  від швидкості зміни показника напруженого стану

$\frac{d\eta}{de_i}$  (Сталь P18)

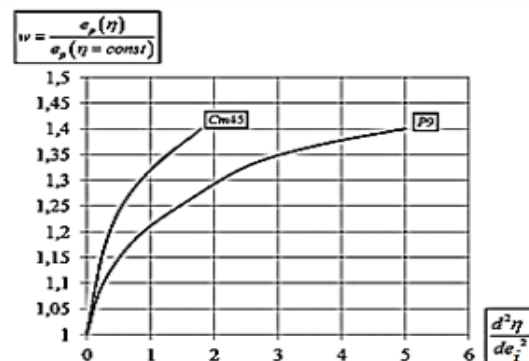


Рис. 6. Залежність коефіцієнта впливу історії деформування  $w$  від кривизни шляху

деформування  $\frac{d^2\eta}{de_i^2}$

Таким чином, кривизна шляхів деформування частинок матеріалу істотно впливає на накопичення пошкоджень і їх заліковування. Це слід враховувати при використанні феноменологічних критеріїв руйнування. Розрахунок граничних деформацій за допомогою критерію (8) враховує вплив історії деформування, дає близькі до експерименту результати. Так на рис. 3 пунктирна крива деформування граничних деформацій відображає результат розрахунку граничних деформацій за критерієм (8).

Слід зазначити, що представлені на рис. 3 прямолінійні шляхи деформування де  $B = 1, 4; 2; 2,86$  в просторі А.А. Ільюшина виявляються траєкторіями малої кривизни  $\gamma = \gamma(e_z)$ , де  $\gamma$  - кут зсуву,  $e_z$  - осьова деформація (кручення з розтягуванням, досліди М + Р).

При цьому кривизна траєкторій  $\gamma = \gamma(e_z)$  практично не впливає на граничний ступінь деформації. Таким чином, кривизна



$\chi$  по показнику  $\eta$  не є кривизною траєкторії по теорії А.А. Ільюшина.

Отже, аналіз результатів викладених експериментальних досліджень показує, що похідні деформування істотно впливають на накопичення пошкоджень і їх заліковування, а отже, на міру пластичності.

Зауважимо також, що функція  $\eta = \eta(e_i)$  включає змінність двох параметрів - відносного гідростатичного тиску і кривизни траєкторії деформацій  $\chi = 1/p$ .

Щоб виділити вплив кожного параметра, нами побудовані залежності кривизни траєкторії деформацій  $\chi = \chi(e_z)$  від осьової деформації  $e_z$  для зразків, що деформуються в умовах складної деформації (4 зразки)  $\eta = e_i^2, \eta = 0, 4e_i, \eta = \sqrt{e_i}, \eta = 2,86e_i$  в просторі  $\eta = \eta(e_i)$ . У просторі деформацій - це траєкторії з різними кривизнами. На рис 7, 8 показані ці залежності.

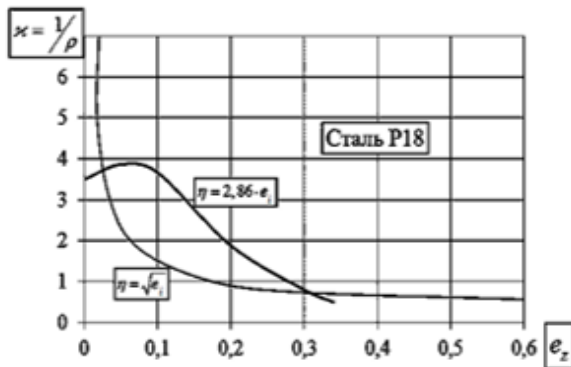


Рис. 7. Залежність кривизни траєкторії деформацій  $\chi$  від осьової деформації  $e_z$  циліндричних зразків, що піддаються крученню спільно з розтягом сталі P18 при  $\eta = \sqrt{e_i}, \eta = 2,86e_i$

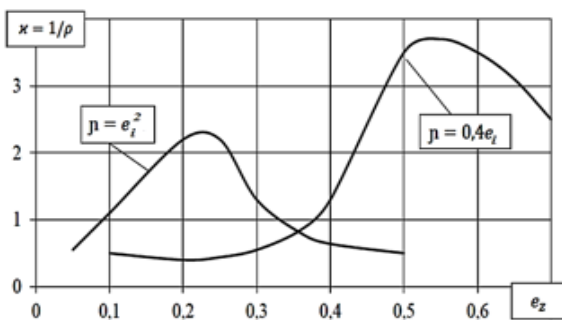


Рис. 8. Залежність кривизни траєкторії деформацій  $\chi$  від осьової деформації  $e_z$  циліндричних зразків, що піддаються крученню спільно з розтягом сталі P18 при  $\eta = e_i^2, \eta = 0,4e_i$

Як впливає з рис. 7, 8 кривизна траєкторії деформацій для шляхів деформування

$$\eta = e_i^2, \eta = 0, 4e_i, \eta = \sqrt{e_i}, \eta = 2,86e_i \quad (\text{рис.9})$$

виявляється істотно різною. При цьому показник напруженого стану  $\eta$  змінюється практично однаково для відповідних шляхів деформування (рис. 9). Збіг граничних деформацій при руйнуванні зразків  $\eta = e_i^2, \eta = 0, 4e_i, \eta = \sqrt{e_i}, \eta = 2,86e_i$  відповідно дозволяє припустити, що на пластичність основний вплив має похідна від показника напруженого стану, а не кривизна траєкторій деформацій.

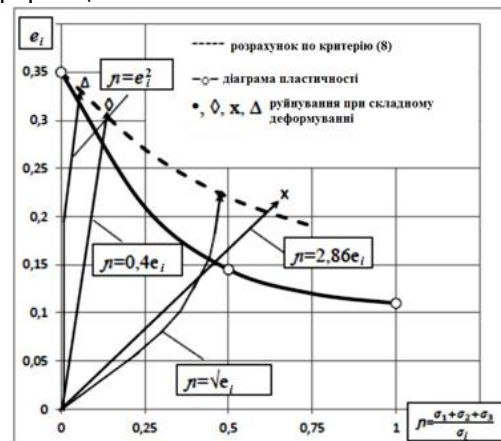


Рис. 9. Вплив історії деформування на пластичність сталі P18 [2]

Це відноситься до траєкторій малої або середньої кривизни (за термінологією А.А. Ільюшина). Випадки зламу траєкторій, прояв ефекту Баушінгера - це особливий випадок і нами не розглядається. Що стосується шляхів деформування близьких до  $\eta = const$  (траєкторії малої кривизни), то оцінку граничних деформацій можна здійснити за допомогою критерію Г.А. Смірнова-Аляєва [5]

$$\psi = \frac{e_i}{e_p(\eta)} \leq 1, \quad (11)$$

який не враховує впливу історії деформування на пластичність.

При зміні першої похідної в межах  $0,5 \leq \frac{d\eta}{de_i} \leq 1,75$  задовільну точність дає критерій В.Л. Колмогорова [6]

$$\psi = \int_0^{e_p^*} \frac{d\bar{e}_i}{[e_p(\bar{e}_i)]} \leq 1. \quad (12)$$

При цьому застосування критерію В.Л. Колмогорова (12) доцільно, якщо кривизна



шляху деформування знаходиться в межах

$$0,25 \leq \frac{d^2\eta}{de_i^2} \leq 2.$$

У випадку зміни параметра  $\frac{d\eta}{de_u} \geq 2$

найбільшу точність дає критерій (8).

При цьому застосування критерію (8) доцільно, якщо кривизна шляху деформування

знаходиться в межах  $\frac{d^2\eta}{de_i^2} \geq 3$ .

**Висновок.** 1. Пропонується розглядати процеси пластичного деформування в просторі: накопичена інтенсивність деформацій - безрозмірний показник напруженого стану. У зазначених координатах накопичення пошкоджень або їх заліковування залежить від кривизни траєкторій деформування, що характеризується першою і другою похідною показників напруженого стану від накопиченої інтенсивності деформацій.

2. При  $\frac{d^2\eta}{de_u^2} = 0$  можна використовувати

скалярний неінтегральний критерій руйнування,

при  $0 \leq \frac{d^2\eta}{de_u^2} \leq 1$  - скалярний інтегральний

критерій, заснований на лінійній теорії накопичення пошкоджень.

3. При значеннях  $\frac{d\eta}{de_i} \geq 5$  пластичність

зростає в порівнянні з пластичністю при

$\eta = const$ , при значеннях  $\frac{d\eta}{de_i} \leq 5$  пластичність

знижується. При цьому критерій деформуємі (8), що враховує вплив історії деформування дає результати близькі до експерименту.

#### Список використаних джерел

1. Ильюшин А.А. Об одной теории длительной прочности / А.А. Ильюшин // Механика твердого тела. – 1967. – №3. – С. 21–35.

2. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением : монография / В. А. Огородников. – Головне вид-во «Вища школа», 1983. – 175 с.

3. Ресурс пластичности металлов при холодном объёмном формоизменении: монография / В.А., Огородников, И.А. Деревенько, Л.И. Алиева. – Винница: ВНТУ, 2016. – 176 с.

4. Сивак Р.І. Развитие научных основ механики немонотонного пластичного деформування та удосконалення технологічних процесів обробки металів тиском: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском» / Роман Іванович Сивак; Вінницький нац. техн. ун-т – Вінниця, 2019. – 40 с.

5. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов: монография / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1978. – 368 с.

6. Колмогоров В. Л. Напряжения. Деформации. Разрушение.: монография / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.

#### References

1. Ilyushin, A.A. (1967). *Ob odnoj teorii dlitelnoj prochnosti [On a theory of long-term strength]*. Moscow [in Russian].

2. Ogorodnikov V.A.(1993). *Ocenka deformiruемости металлов при обработке давлением [Evaluation of metal deformability during pressure treatment]*. Kyiv:Golovne vid-vo «Visha shkola» [in Ukrainisan].

3. Ogorodnikov V.A., Derevenko I.A., Alieva L.I. (2016). *Resurs plastichnosti metallov pri holodnom obyomnom formoizmenenii: monografiya [Resource of plasticity of metals at cold volumetric change]*. Vinnicya: VNTU [in Ukrainisan].

4. Sivak R.I. (2019) *Rozvitok naukovih osnov mehaniki nemonotonnogo plastichnogo deformuvannya ta udoskonalennya tehnologichnih procesiv obrobki metaliv tiskom [Development of scientific fundamentals of mechanics of nonmonotonic plastic deformation and improvement of technological processes of metal treatment by pressure]*. Vinnicya: VNTU [in Ukrainisan].

5. Smirnov-Alyayev G. A. (1978). *Mehanicheskie osnovy plasticheskoy obrabotki metallov [Mechanical bases of plastic processing of metals]*. Leningrad.: Mashinostroenie [in Russian].

6. Kolmogorov V. L. (1970). *Napryazheniya. Deformacii. Razrusheniya [Voltage. Deformations Destruction]*. Moscow: Metallurgiya [in Russian].

#### ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ИСПОЛЬЗОВАННОГО РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ

При оценке предельного формоизменения в процессах обработки металлов давлением на пластичность существенно влияет скорость накопления





повреждений и их залечивание в виде производных от показателей напряженного состояния. Показано, что в условиях сложного нагружения, когда скорость накопления повреждений (первая производная от показателей напряженного состояния) больше 5 и кривизна траекторий деформирования частиц материала (вторая производная от показателей напряженного состояния) больше 1, наиболее достоверные результаты расчета использованного ресурса пластичности дают скалярные интегральные критерии разрушения, учитывающие влияние истории деформирования на пластичность.

**Ключевые слова:** предельное формоизменение, показатель напряженного состояния, кривизна траекторий деформирования, ресурс пластичности, скорость накопления повреждений.

#### THE INFLUENCE OF RATE OF DAMAGE ACCUMULATION IS USED IN THE CALCULATION OF DUCTILITY RESOURCE

*In assessing marginal change in the process of metal forming, plasticity is significantly affected by the rate of damage accumulation and their healing as derivatives of the stress state indicators. It is shown that under complex loading conditions, when the damage accumulation rate (the first derivative of the stress state indicators) is more than 5 and the curvature of the material deformation trajectories (the second derivative of the stress state indicators) is greater than 1, the scalar integral criteria give the most reliable results destruction, taking into account the influence of the history of deformation on plasticity.*

**Key words:** marginal deformation, stress state indicator, curvature of deformation paths, plasticity resource, damage accumulation rate.

#### Відомості про авторів

**Деревенько Ірина Анатоліївна** – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: i.a.derevenko@gmail.com).

**Деревенько Ирина Анатольевна** – кандидат технических наук, доцент, старший преподаватель кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: i.a.derevenko@gmail.com).

**Derevenko Iryna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection, Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyschaya St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: i.a.derevenko@gmail.com).

**Солона Олена Василівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри загально технічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail:solona\_o\_v@ukr.net).

**Солона Елена Васильевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: solona\_o\_v@ukr.net).

**Solona Olena**–Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection, Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyschaya St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: solona\_o\_v@ukr.net).