

Ярошенко Л.В.
к.т.н., доцент

Колісник М.А.
асистент

Штуць А. А.
асистент

Присяжнюк Ю.С.
аспірант

**Вінницький національний
аграрний університет.**

Yaroshenko L.
Ph.D., Associate Professor

Kolisnyk M.
assistant

Shtuts A.
assistant

Prysiashniuk Yu.
postgraduate

**Vinnitsia National Agrarian
University**

УДК 621.77.01

DOI: 10.37128/2306-8744-2023-4-8

ОЦІНКА ДЕФОРМАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК ПІД ЧАС ПРЯМОГО ВИТИСКУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ

Оцінка деформаційної стійкості матеріалу заготовок під час прямого витискування за допомогою методу штампування обкочуванням присвячена дослідженню та оцінці деформаційної стійкості матеріалів, які використовуються для виготовлення заготовок під час процесу прямого витискування з використанням методу штампування обкочуванням.

У роботі розглядаються ключові аспекти впливу процесу обкочування на деформаційну стійкість матеріалу та властивості отриманих заготовок. Використовуються експериментальні та аналітичні методи для кількісної оцінки параметрів деформацій та визначення їх впливу на якість та ефективність процесу.

Отримані результати та висновки сприятимуть розумінню механізмів деформаційної стійкості матеріалів у витискувальних процесах, а також допоможуть в оптимізації технологічних параметрів штампування обкочуванням для досягнення оптимальних характеристик та якості виготовлених заготовок. Ця стаття відображає актуальність досліджень у галузі металообробки та розвиток технологій для вирішення проблем деформаційної стійкості матеріалів у процесі штампування.

У даній науковій статті досліджено дві моделі деформовності заготовок для аналізу накопичення пошкоджень матеріалу під час процесів висаджування та прямого витискування методом штампування обкочуванням. Обидві моделі включають аналітичне представлення траєкторії деформування, апроксимацію кривої граничних деформацій та модель підсумовування пошкоджень. Застосовано трипараметричне представлення кривої граничних деформацій та використано степеневу модель та модель лінійного принципу накопичення пошкоджень.

Досліджено процес прямого витискування, конструюючи параметричні рівняння траєкторії деформування. Функціональна залежність для показника напруженого стану включає три сталі, а для накопиченої деформації використано неелементарну функцію з однією сталою, які були визначені з використанням теорії границь функцій. Враховуючи складність траєкторій, обґрунтовано використання степеневі моделі підсумовування з фіксованим значенням показника нелінійності накопичення пошкоджень. Методика визначення цього показника підтвердила його додатні значення менше одиниці для досліджуваних траєкторій, що підтверджує можливість його використання. Числові експерименти показали зростання граничної деформації зі збільшенням цього показника, що вказує на ефективність моделі.

Ключові слова: оцінка, деформаційна стійкість, матеріал, заготовки, пряме витискування, метод штампування обкочуванням.



Постановка проблеми. В сучасному виробництві, особливо в галузі металообробки, однією з ключових задач є забезпечення якості та ефективності процесу виготовлення деталей. Одним із поширених методів для досягнення цієї мети є пряме витискання за допомогою штампування обкочуванням. Важливим аспектом цього процесу є деформовність матеріалу заготовок, яка визначає якість та долю виготовлених виробів.

Незважаючи на широке використання цього методу, існуючі підходи до оцінки деформовності можуть бути недостатньо точними та надійними. Це може призводити до виробничих втрат, зниження якості продукції та загрози для ефективності виробничого процесу в цілому.

Завдання розробити та вдосконалити методи оцінки деформовності матеріалу заготовок при прямому витисканні методом штампування обкочуванням. Це не лише підвищить якість та точність процесу виготовлення, але й сприятиме ефективнішому використанню ресурсів та підвищенню загальної продуктивності в металообробній промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вибір критеріального підходу для оцінки деформовності матеріалу заготовок при ШО залежить, головним чином, від виду деформування: просте чи складне. При прямому витискуванні методом ШО, що представлено технологічною схемою і шляхами деформування видно, що шляхи деформування мають певну особливість. Ця особливість полягає в тому, що на початковому етапі витискування матеріал на лінії ОМ підлягає розтягу при показнику напруженого стану $\eta = 1,73$. При цьому величина інтенсивності деформацій є відносно незначною, досягаючи для вільної поверхні на заключному етапі формоутворення значень $\varepsilon_i = 0,15 - 0,2$.

В подальшому, при контакті з бічною поверхнею каналу матриці, деформування частини часток матеріалу продовжується вже в умовах $\eta = -1,0 - 1,5$. Для найбільш деформованої приконтатної з валком зони заготовки шлях деформування 3 можна представити за середнім у зоні натискання валка значенням показника $\eta = -2,5 \dots -2$.

З метою оцінки деформовності заготовки необхідно застосувати один із критеріїв деформовності. Побудова математичної моделі деформовності вказаних зон заготовки передбачає побудову відповідних шляхів деформування.

Для моделювання шляхів деформування, нами сконструйована параметрично задана функція:

$$\left\{ \begin{aligned} \eta(t) &= \frac{b \cdot (\operatorname{tg}(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + c \cdot t^2}}, \quad t \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right) \\ \bar{e}_{eq}(t) &= m \cdot \int_0^t \sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3} \cdot dx \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де a, b, c, m - параметри апроксимації.

Перевіримо, чи задовольняє запропонована модель шляхів деформування деяким граничним умовам:

$$1. \quad \lim_{t \rightarrow 0+} \eta(t) = 1.7. \quad (2)$$

$$2. \quad \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \eta(t) = -1.5 \div -1. \quad (3)$$

Дійсно, для першої умови маємо:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 0+} \eta(t) &= \lim_{t \rightarrow 0+} \frac{b \cdot (\operatorname{tg}(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + c \cdot t^2}} = \\ &= \lim_{t \rightarrow 0+} \frac{b \cdot \frac{\operatorname{tg}(t)}{\operatorname{tg}(t)} + (a \cdot \sqrt{1+c} - b) \cdot \frac{t}{\operatorname{tg}(t)}}{\sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2(t)}{\operatorname{tg}^2(t)} + c \cdot \frac{t^2}{\operatorname{tg}^2(t)}}} \end{aligned} \quad (4)$$

3 урахуванням першої визначеної границі:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sin(t)}{t} = 1$$

та умови:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \cos(t) = 1,$$

матимемо:

$$\lim_{t \rightarrow 0+} \eta(t) = a. \quad (5)$$

Звідси випливає, що параметр a дорівнює $a = 1.7$.

Для другої умови на основі (1) можемо записати:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \eta(t) &= \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \frac{b \cdot (\operatorname{tg}(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + c \cdot t^2}} = \\ &= \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \frac{b \cdot \frac{\operatorname{tg}(t)}{\operatorname{tg}(t)} + (a \cdot \sqrt{1+c} - b) \cdot \frac{t}{\operatorname{tg}(t)}}{\sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2(t)}{\operatorname{tg}^2(t)} + c \cdot \frac{t^2}{\operatorname{tg}^2(t)}}} \end{aligned} \quad (6)$$

З урахуванням того, що

$$\lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \frac{t}{\operatorname{tg}(t)} = 0,$$

матимемо:



$$\lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \eta(t) = b. \quad (7)$$

Отже, вибір значення параметра b з діапазону, що вказаний у граничній умові 2, визначає стадію процесу деформування заготовки під час її контакту з бічною поверхнею каналу матриці.

Неважко довести, також, що:

$$\lim_{c \rightarrow 0+} \eta(t) = b + (a - b) \cdot \frac{t}{\operatorname{tg}(t)},$$

$$\lim_{c \rightarrow +\infty} \eta(t) = a.$$

Певною мірою, вплив вибору конкретного значення цього параметра на форму траєкторії деформування може бути відображений вибором відповідного значення параметра m

На рис. 1. відображено вплив вибору значень параметрів функції на форму траєкторії деформування.

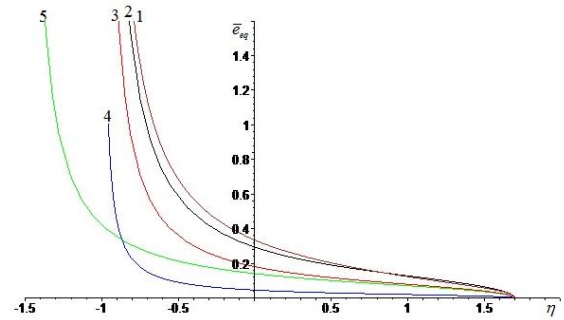


Рис. 1. Траєкторії деформування: розрахунки за (1) $a = 1.7$; $1 \div 4 - b = -1$; $5 - b = -1.5$; 2, 3, 4 - $c = 0.1$; 1 - $c = 30$; 1 - $c = 0.08$; $1 \div 5 -$

$$m = 0.02, 0.065, 0.04, 0.01, 0.04.$$

Для оцінки деформовності матеріалу заготовок побудували модель накопичення пошкоджень, що базується на критерії В. Огороднікова [3] та певної методики побудови апроксимації кривої граничних деформацій [4]:

$$\psi(t) = \int_0^t \frac{n \cdot m^n \cdot \left(\int_0^x \sqrt{\frac{1}{\cos^4 \tau} + 3} \cdot d\tau \right)^{n-1} \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3}}{(\varepsilon_{*s}[\eta(x)])^n} \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3} \cdot dx, \quad (8)$$

$$n = 1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{d\eta}{d\bar{\varepsilon}_{eq}} \right). \quad (9)$$

Використовуватимемо трипараметричну апроксимацію кривої граничних деформацій при стаціонарному деформуванні:

$$\varepsilon_{*s}(\eta) = \varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{\eta}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{\eta^2}{2}}, \quad (10)$$

Тоді крива накопичення пошкоджень у координатах $\eta - \psi$ набуває такого вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned} \eta(t) &= \frac{b \cdot (\operatorname{tg}(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + c \cdot t^2}}, \\ \psi(t) &= \int_0^t \frac{n \cdot m^n \cdot \left(\int_0^x \sqrt{\frac{1}{\cos^4 \tau} + 3} \cdot d\tau \right)^{n-1} \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3}}{\left(\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1)}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)} \right)^{\frac{\eta(x)}{2}} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1) \cdot \bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)}{\varepsilon_{fs}^2(\eta=0)} \right)^{\frac{\eta^2(x)}{2}} \right)^n} \cdot dx, t \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right] \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Похідна $\frac{d\eta}{d\bar{\varepsilon}_{eq}}$ визначається, як похідна

параметрично заданої функції (1). В результаті, модель (7), (8) набуває доволі громіздкого вигляду.

Аналіз траєкторій деформування, що зображені на рис. 1, свідчить, що на початковій стадії деформування, що супроводжується різкою зміною напруженого стану від 1.7 до від'ємних

значень швидкість $\frac{d\eta}{d\bar{\varepsilon}_{eq}}$ можна вважати сталою

та для різних траєкторій змінюється приблизно в діапазоні від -17 до -4. У цьому випадку, відповідно до (8), значення параметра нелінійності n належить діапазону 0.69÷0.73.

На заключній стадії деформування, відповідно до форми траєкторій деформування, показник напруженого стану майже не змінюється на фоні значного збільшення накопиченої деформації. Отже, розрахункова величина



накопичення пошкоджень на цій стадії практично не залежить від значення показника нелінійності накопичення пошкоджень n . Це означає, що моделювання деформовності при прямому витискуванні методом штампування

обкочуванням можна здійснювати за умови $n = n_i = const$.

При $n=1$ – матимемо лінійний принцип накопичення пошкоджень, відповідно якого на основі (10) матимемо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(t) = \frac{b \cdot (tg(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{tg^2(t) + c \cdot t^2}}, \\ \psi(t) = m \cdot \int_0^t \frac{\sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3}}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1)}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)}\right)^{\frac{\eta(x)}{2}} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1) \cdot \bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)}{\varepsilon_{fs}^2(\eta=0)}\right)^{\frac{\eta^2(x)}{2}}} dx, t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \end{array} \right. \quad (12)$$

Результати моделювання деформовності за вказаних умов показано на рис. 2.

Із представлених даних видно, що розрахункові значення координат критичних точок для досліджуваної траєкторії деформування нехтовно мало відрізняються один від одного за значенням показника напруженого стану η та суттєво відрізняються за величиною граничної деформації. В усіх випадках розрахункові значення граничної деформації в 2÷4 рази менше, ніж значення накопиченої деформації в точці перетину даної траєкторії з кривою граничних деформацій при стаціонарному навантаженні.

З отриманих даних випливає, що в порівнянні з лінійним принципом накопичення пошкоджень, розрахунок за моделлю, що базується на критерії В. А. Огороднікова знижує розрахункове значення граничної деформації. В той же час, ігнорування співвідношення (8) та призначення параметру нелінійності накопичення пошкодження значень, що задовольняють умову $n > 1$, призводить до підвищення розрахункового значення граничної деформації в порівнянні з лінійним принципом накопичення пошкоджень.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження полягає в розробці та вдосконаленні методів оцінки деформовності матеріалу заготовок під час прямого витискування методом штампування обкочуванням з метою покращення якості та ефективності виробничого процесу.

Основні результати дослідження. Проведемо оцінку деформовності матеріалу заготовок при операціях висаджування й зворотного витискування методом ШО.

Схема ШО, що представлена, забезпечує висаджування зовнішнього фланця, а схема висаджування фланця та зворотне витискування тонкостінного елемента.

На рис. 3 показано вигляд заготовок та їх поперечних перерізів при штампуванні обкочуванням.

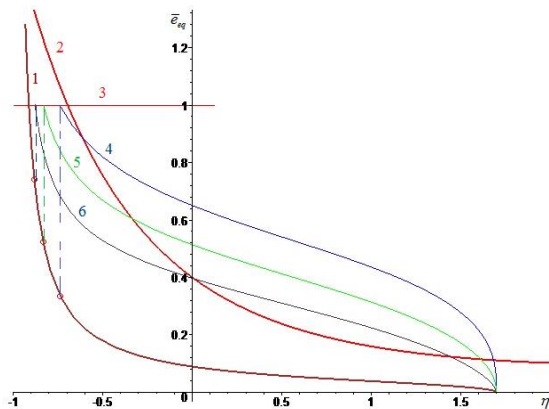
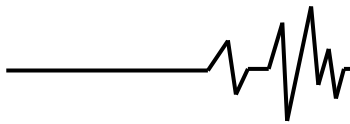


Рис. 2. Дослідження деформовності матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом ШО: 1- траєкторія деформування (1), $a=1.7$, $b=-1$, $c=0.08$, $m=0.02$; 2 – крива граничних деформацій сталі 14X17H2 - розрахунок за (9) при $\varepsilon_{*s}(\eta=-1)=1.6$, $\varepsilon_{*s}(\eta=0)=0.4$, $\varepsilon_{*s}(\eta=1)=0.16$; 4, 5, 6 – криві накопичення пошкоджень - розрахунок за (10) при $n=0.73, 1, 1.27$; \circ - розрахункові значення граничної деформації.



а)

б)

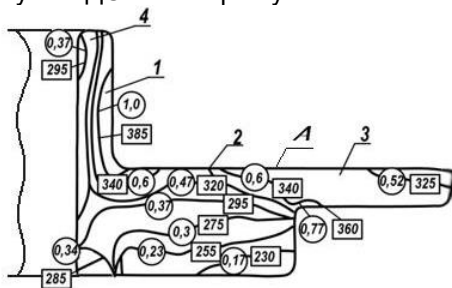
Рис. 3. Видяг заготовок при штампуванні обкочуванням

Необхідно відзначити, що форма поверхні периферії фланця і внутрішньої поверхні кільцевої заготовки, а також форма периферії фланця й інтенсивність плинину матеріалу в зону тонкостінного елемента суттєво залежать від величини й напрямку зміщення валка δ . Відповідно змінюватиметься і НДС матеріалу заготовки, що є головним фактором при оцінці деформовності матеріалу. Тому аналізу НДС матеріалу найбільш

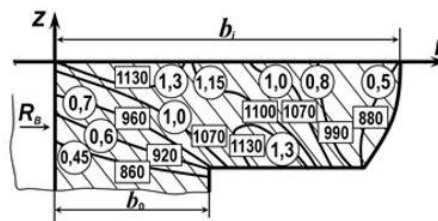
небезпечних зон заготовок була приділена значна увага [2,3,8,9,10].

На рис. 4 представлені ізолінії розподілу інтенсивності напружень $\sigma_i = const$

$\sigma_{ii} = const$ деформацій $\epsilon_i = const$, що отримані за результатами вимірювання твердості $\epsilon_{ii} = const$ в перерізах заготовок, виготовлених за технологічними схемами.



а)



б)

Рис. 4. Розподіл ізоліній $\epsilon_i = const$ $\epsilon_{ii} = const$ (O) і $\sigma_i = const$ $\sigma_{ii} = const$ (□) в перерізах, сформованих ШО кільцевих заготовок: а) з міді М0Б, де 1, 2, 3, 4 – характерні зони заготовки; б) зі сталі 30ХГСА

Таким чином, у сформованому методом обкочування перерізі заготовки (рис.3 а) можна виділити характерні зони розподілу НДС, які описані раніше.

При висаджуванні фланця найбільш жорстка схема напруженого стану має місце на периферійній, вільній від контакту з інструментом, випуклій поверхні. Тому оцінку деформовності матеріалу заготовки, для визначення гранично досяжної інтенсивності деформацій ϵ_s або величини використаного ресурсу пластичності ψ_B , потрібно проводити саме для цієї зони.

Оцінку доформовності проводимо на основі феноменологічної теорії [7,8,9], для чого скористаємося побудованими кривими граничних деформацій і шляхами деформування часток металу небезпечної зони заготовки в координатах « $\epsilon_i - \eta$ ».

На рис. 5 представлені криві граничних деформацій сталей і шляхи деформування часток металу вільної поверхні фланця при

його висаджуванні, у залежності від параметрів процесу ШО.

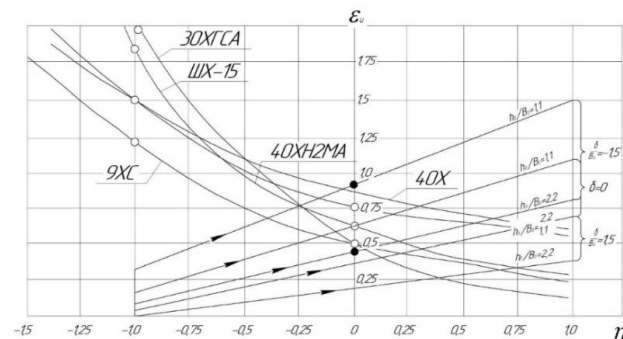


Рис. 5. Криві граничних деформацій сталей —O— і шляхи деформування вільної поверхні периферійної частини фланця при висаджуванні методом ШО (h_0, b_0, h_0, b_0 - вихідна під обкочування висота й товщина стінки трубної заготовки, δ - величина зміщення вершини конічного валка від осі заготовки).



Шляхи (траєкторії) деформування на рис. 4 показані певною мірою схематично, за результатами проведених експериментів. Побудуємо математичну модель цих траєкторій.

Як базисну, візьмемо однопараметричну функцію, що «склеєна» з елементарної функції синус та дотичної до неї в деякій точці.

Загальний вигляд дотичної до графіка функції $\varepsilon_i = f(\eta)$ в точці η_1 має вигляд:

$$\varepsilon_i = f'(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1) + f(\eta_1) \quad (13)$$

Для функції $\varepsilon_i = \sin(\eta)$ рівняння дотичної прямої в точці η_1 матиме вигляд:

$$\varepsilon_i = \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1) \quad (14)$$

Отже, базисна функції набуває вигляду:

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \sin(\eta), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1), & \eta > \eta_1 \end{cases} \quad (15)$$

Отримана функція є сплайн-подібною. Тобто ця функція «склеєна» з двох різних функцій: частин синусоїди та дотичної до неї. В точці «склеєнки» $\eta = \eta_1$ виконується не тільки умова неперервності функції, а й її першої похідної.

Графіки функцій, що описуються рівнянням (13) за різних значень η_1 , наведено на рис. 6.

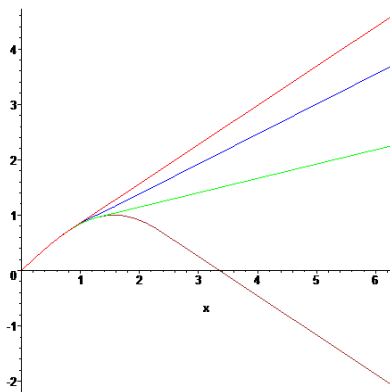


Рис. 6. Графіки математичної моделі траєкторій деформування (13) за різних значень $\eta_1 = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{12}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{3\pi}{4}$.

Аналіз НДС вільної поверхні периферійної частини фланця при висаджуванні методом ШО показав, що початкова ділянка траєкторії деформування близька до вертикальної прямої, отже, для забезпечення цієї умови необхідно графіки кривих, що показані на рис. 4, повернути проти руху годинникової стрілки на деякий кут.

При повороті осей координат на кут α за годинниковою стрілкою формули переходу від старих координат (x, y) до нових (x', y') або від старих до нових мають відповідно вигляд:

$$\begin{cases} x = x' \cdot \cos(\alpha) + y' \cdot \sin(\alpha) \\ y = -x' \cdot \sin(\alpha) + y' \cdot \cos(\alpha) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} x' = x \cdot \cos(\alpha) - y \cdot \sin(\alpha) \\ y' = x \cdot \sin(\alpha) + y \cdot \cos(\alpha) \end{cases} \quad (17)$$

Знайдемо координати $(\eta'_1, \varepsilon'_{i1})$ точки $(\eta_1, \sin(\eta_1))$ в нових осях координат (η', ε'_i) при повороті кривої (13) відносно початку координат на кут α проти годинникової стрілки. Для цього використовуватимемо співвідношення (17):

$$\begin{cases} \eta'_1 = \eta_1 \cdot \cos(\alpha) - \sin(\eta_1) \cdot \sin(\alpha) \\ \varepsilon'_{i1} = \eta_1 \cdot \sin(\alpha) + \sin(\eta_1) \cdot \cos(\alpha) \end{cases} \quad (18)$$

При $\alpha = \frac{\pi}{4}$ попередні співвідношення набувають спрощеного вигляду:

$$\begin{cases} \eta'_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta_1 - \sin(\eta_1)) \\ \varepsilon'_{i1} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta_1 + \sin(\eta_1)) \end{cases} \quad (19)$$

На основі отриманого співвідношення складемо таблицю відповідності між старими та новими координатами для деяких точок при $\alpha = \frac{\pi}{4}$.



Таблиця 1. Відповідність між координатами для деяких точок при $\alpha = \frac{\pi}{4}$

η_1	$\frac{\pi}{4} \approx 0,79$	$\frac{\pi}{3} \approx 1,1$	$\frac{\pi}{2} \approx 1,57$	$\frac{3\pi}{4} \approx 2,36$
$\sin(\eta_1)$	$\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,71$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,87$	1	$\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,71$
η'_i	$\frac{\sqrt{2}\pi}{8} - \frac{1}{2} \approx 0,06$	$\frac{\sqrt{2}\pi}{6} - \frac{\sqrt{6}}{4} \approx 0,13$	$\frac{\sqrt{2}\pi}{4} - \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,4$	$\frac{3\sqrt{2}\pi}{8} - \frac{1}{2} \approx 1,17$
ε'_i	$\frac{\sqrt{2}\pi}{8} + \frac{1}{2} \approx 1,06$	$\frac{\sqrt{2}\pi}{6} + \frac{\sqrt{6}}{4} \approx 1,36$	$\frac{\sqrt{2}\pi}{4} + \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 1,81$	$\frac{3\sqrt{2}\pi}{8} + \frac{1}{2} \approx 2,17$

В нових осях координат (η', ε'_i) рівняння типу (13), з урахуванням формул перетворення (15), набудатиме такого виду:

$$\begin{cases} \eta' = \eta \cdot \cos(\alpha) - \varepsilon_i(\eta) \cdot \sin(\alpha) \\ \varepsilon'_i = \eta \cdot \sin(\alpha) + \varepsilon_i(\eta) \cdot \cos(\alpha) \end{cases} \quad (20)$$

Перепишемо останню систему рівнянь з урахуванням вигляду базисної функції (13):

$$\begin{cases} \eta' = \begin{cases} \eta \cdot \cos(\alpha) - \sin(\eta) \cdot \sin(\alpha), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \cos(\alpha) - [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \sin(\alpha), & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i = \begin{cases} \eta \cdot \sin(\alpha) + \sin(\eta) \cdot \cos(\alpha), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \sin(\alpha) + [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \cos(\alpha), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

При $\alpha = \frac{\pi}{4}$ на основі (19) матимемо:

$$\begin{cases} \eta' = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{cases} \eta + \sin(\eta), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1), & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{cases} -\eta + \sin(\eta), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ -\eta + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

На рис. 7 побудовано графіки математичної моделі траєкторій деформування

(13) за різних значень $\eta_1 = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{12}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{3\pi}{4}$

$$\begin{cases} \eta' = \begin{cases} \eta \cdot \cos(\alpha) - \sin(\eta) \cdot \sin(\alpha) - 1, & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \cos(\alpha) - [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \sin(\alpha) - 1, & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i = \begin{cases} \eta \cdot \sin(\alpha) + \sin(\eta) \cdot \cos(\alpha), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \sin(\alpha) + [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \cos(\alpha), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (24)$$

Графіки функцій, що описуються отриманим рівнянням за різних значень η_1 , наведено на рис. 8.

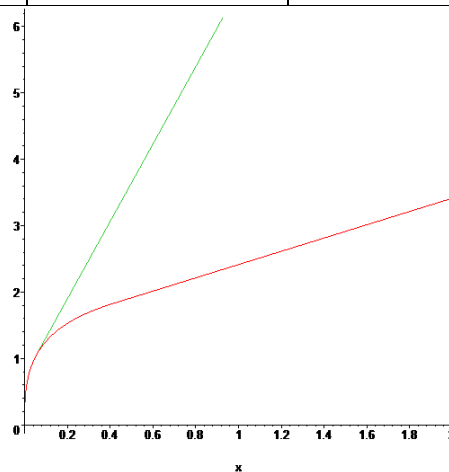
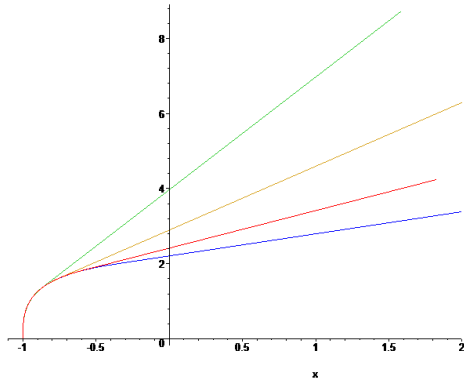


Рис. 7. Графіки математичної моделі траєкторій деформування (13) за різних значень $\eta_1 = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{12}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{3\pi}{4}$.

Зсунемо графік базисної функції ліворуч на 1 так, щоб задовольнити умову:

$$\varepsilon_i(\eta = -1) = 0, \quad (23)$$

Отримаємо:



Узагальнимо останню апроксимацію шляху деформування з метою описання довільного діапазону зміни накопиченої пластичної деформації [1,2,3,4,5,6,7,9]:

Рис. 8. Графіки математичної моделі траєкторій деформування (22) за різних значень $\eta_1 = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{12}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{3\pi}{4}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta' = \begin{cases} \eta \cdot \cos(\alpha) - \sin(\eta) \cdot \sin(\alpha) - 1, & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \cos(\alpha) - [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \sin(\alpha) - 1, & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i = b \cdot \begin{cases} \eta \cdot \sin(\alpha) + \sin(\eta) \cdot \cos(\alpha), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \sin(\alpha) + [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \cos(\alpha), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{array} \right. \quad (25)$$

де b - стала, що залежить від параметрів технологічного процесу.

деякі змінні відповідно до традиційних позначень теорії деформовності, тоді

Для зручності подальшого використання перепозначимо в останньому співвідношенні

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \begin{cases} t \cdot \cos(\alpha) - \sin(t) \cdot \sin(\alpha) - 1, & 0 \leq t \leq x_0 \\ t \cdot \cos(\alpha) - [\sin(x_0) + \cos(x_0) \cdot (t - x_0)] \cdot \sin(\alpha) - 1, & \eta > x_0 \end{cases} \\ \bar{e}_{eq} = b \cdot \begin{cases} t \cdot \sin(\alpha) + \sin(t) \cdot \cos(\alpha), & 0 \leq t \leq x_0 \\ t \cdot \sin(\alpha) + [\sin(x_0) + \cos(x_0) \cdot (t - x_0)] \cdot \cos(\alpha), & t > x_0 \end{cases} \end{array} \right. \quad (26)$$

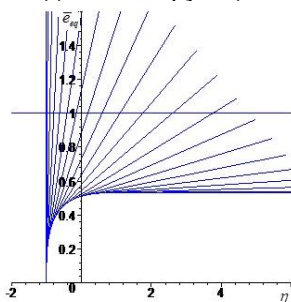
де відповідність між попередніми та новими позначеннями має такий вигляд

трипараметричну модель траєкторії деформацій, що задана параметрично.

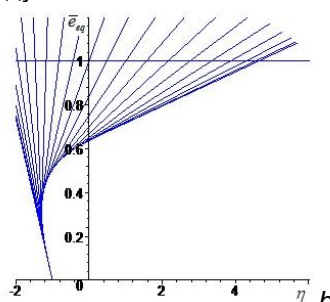
Попередні позначення	η'	ε'_i	η	η_1
Нові позначення	η	\bar{e}_{eq}	t	x_0

Результати моделювання траєкторій деформування за отриманим співвідношенням показано на рис. 9 а, б.

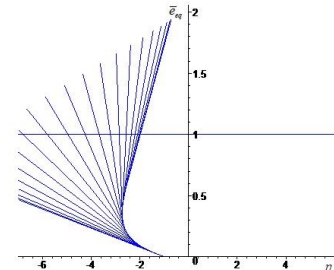
Отже, на базі однопараметричної сплайн-подібної функції ми побудували



$$b=0.24; \alpha = \frac{\pi}{4};$$



$$b=0.24; \alpha = \frac{7}{20}\pi;$$

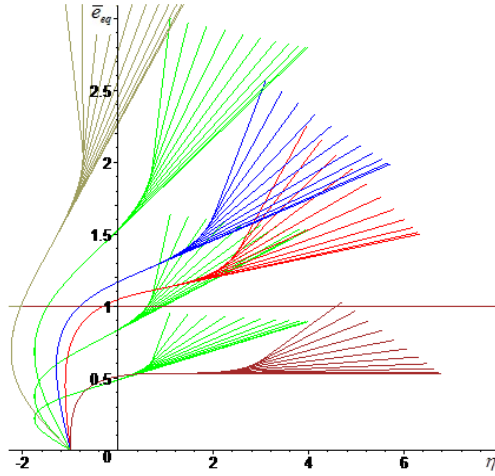


$$b=0.24; \alpha = \frac{13}{20}\pi;$$



$$0, \frac{\pi}{20}, \frac{\pi}{10}, \frac{3\pi}{20}, \frac{\pi}{5}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{10}, \frac{7\pi}{20}, \frac{2\pi}{5}, \frac{9\pi}{20}, \frac{\pi}{2}, \frac{11\pi}{20}, \frac{3\pi}{5}, \frac{13\pi}{20}, \frac{7\pi}{10}, \frac{3\pi}{4},$$

$$a) x_0 = \frac{4\pi}{5}, \frac{17\pi}{20}, \frac{9\pi}{10}, \frac{19\pi}{20}, \pi$$



$$b) x_0 = \pi, \frac{21\pi}{20}, \frac{11\pi}{10}, \frac{23\pi}{20}, \frac{6\pi}{5}, \frac{5\pi}{4}, \frac{13\pi}{10}, \frac{27\pi}{20}, \frac{7\pi}{5}, \frac{29\pi}{20}, \frac{3\pi}{2};$$

$$\text{khaki} - b=0.44; \alpha = \frac{11}{20} \pi; \text{green} - b=0.44, 0.24, 0.14; \alpha = \frac{9}{20} \pi;$$

$$\text{blue} - b=0.44; \alpha = \frac{7}{20} \pi; \text{red} - b=0.44; \alpha = \frac{3}{10} \pi; \text{brown} - b=0.24; \alpha = \frac{\pi}{4}.$$

Рис. 9. Траєкторії деформування макрочастинок матеріалу заготовки під час операцій штампування обкочуванням за різними технологічними схемами:

$$x_0 = \pi, \frac{21\pi}{20}, \frac{11\pi}{10}, \frac{23\pi}{20}, \frac{6\pi}{5}, \frac{5\pi}{4}, \frac{13\pi}{10}, \frac{27\pi}{20}, \frac{7\pi}{5}, \frac{29\pi}{20}, \frac{3\pi}{2}$$

Аналіз отриманих результатів показує, що запропонована методика побудови моделі траєкторії деформацій та побудована модель цілком працездатні та доволі ефективні в плані відображення особливостей перебігу зміни напружено-деформованого стану матеріалу

заготовки під час технологічних операцій штампування обкочуванням.

Використаємо окремий, спрощений варіант попереднього співвідношення при

$$\alpha = \frac{\pi}{4} :$$

$$\left\{ \begin{aligned} \eta'(\eta) &= \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta - \sin(\eta)) - 1, & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta - \sin(\eta_1) - \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)) - 1, & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i(\eta) &= b \cdot \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta + \sin(\eta)), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (27)$$

Надалі використовуватимемо модель підсумовування пошкоджень зі степеневою апроксимацією функції пошкоджень:

$$\psi(\bar{\varepsilon}_i) = \int_0^{\bar{\varepsilon}_i} \frac{n \cdot \varepsilon_i^{n-1}}{[\varepsilon_{*s}(\eta(\varepsilon_i))]^n} \cdot d\varepsilon_i \leq 1, \bar{\varepsilon}_i \leq \varepsilon_*, \quad (28)$$



де n – матеріальна стала, що характеризує міру нелінійності підсумовування пошкоджень.

Якщо $n=1$ – нелінійна модель (25) вироджується в модель, що відображує лінійний принцип підсумовування пошкоджень:

$$\psi(\bar{\varepsilon}_i) = \int_0^{\bar{\varepsilon}_i} \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_{*s} [\eta(\varepsilon_i)]} \leq 1, \quad \bar{\varepsilon}_i \leq \varepsilon_{*s}, \quad (29)$$

За умови $n = 1 + 0.2 \cdot \arctg\left(\frac{d\eta}{d\varepsilon_i}\right)$ – нелінійна модель (25) стає тотожною критерію В. Огороднікова [2].

У випадку параметричного рівняння шляху деформування:

$$\begin{cases} \eta = \varphi(t) \\ \varepsilon_i = \omega(t) \end{cases} \quad (30)$$

лінійний принцип підсумовування пошкоджень (26) набуває вигляду:

$$\psi(\bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \frac{\omega'(t) \cdot dt}{\varepsilon_{*s} [\eta(t)]} \leq 1, \quad \bar{t} \leq t_*, \quad \omega(t_*) = \varepsilon_{*s} \quad (31)$$

Таким чином, нами вперше описаний загальний вираз моделі лінійного підсумовування пошкоджень для випадку параметричного завдання шляху

деформування $\eta - \varepsilon_i$.

Використовуватимемо в подальшому трипараметричну апроксимацію кривої граничних деформацій при стаціонарному деформуванні:

$$\varepsilon_{*s}(\eta) = \varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{\eta}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{\eta^2}{2}} \quad (32)$$

Оскільки шлях деформування заданий у вигляді параметричних співвідношень, то останню апроксимацію також запишемо в параметричному вигляді:

$$\begin{cases} \eta(t) = \begin{cases} y_1(t), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ y_2(t), & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon_{*s}(t) = \varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{y_1(t)}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{y_1^2(t)}{2}}, & 0 \leq t \leq \eta_1, \\ \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{y_2(t)}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{y_2^2(t)}{2}}, & t > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (33)$$

де

$$y_1(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (t - \sin(t)) - 1, \quad (34)$$

$$y_2(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (t - \sin(\eta_1) - \cos(\eta_1) \cdot (t - \eta_1)) - 1$$

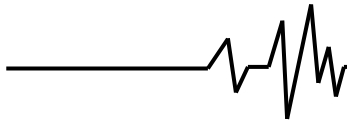
З урахуванням (25), (27) можемо записати:

$$\psi(\bar{t}) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot b \cdot \begin{cases} z_1(\bar{t}), & 0 \leq \bar{t} \leq \eta_1 \cap \bar{t} \leq t_* \\ z_1(\eta_1) + z_2(\bar{t}), & \bar{t} > \eta_1 \cap \bar{t} \leq t_* \end{cases} \quad (36)$$

де

$$\omega'(t) = b \cdot \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (1 + \cos(\eta)), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (1 + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (1 - \eta_1)), & \eta > \eta_1 \end{cases} \quad (35)$$

В результаті модель (28), що базується на лінійному принципі підсумовування пошкоджень, набуває вигляду:



$$z_1(\bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \frac{(1 + \cos(t)) \cdot dt}{\varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{y_1(t)}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{y_1^2(t)}{2}}, \quad (37)$$

$$z_2(\bar{t}) = \int_{\eta_1}^{\bar{t}} \frac{(1 + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1)) \cdot (1 - \eta_1) \cdot dt}{\varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{y_2(t)}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{y_2^2(t)}{2}}. \quad (38)$$

Результати розрахунків накопичення пошкоджень у матеріалі заготовки при ШО за побудованою моделлю наведено на рис. 10, 11.

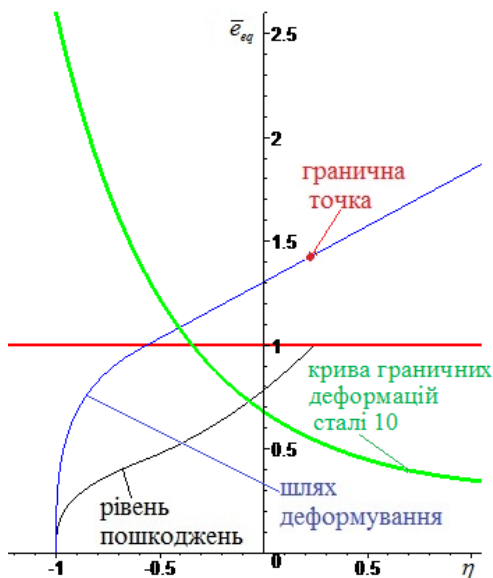


Рис. 10. Графічне представлення за побудованою моделлю накопичення пошкоджень у матеріалі небезпечної зони фланця при висаджуванні методом ШО заготовки із сталі 10.

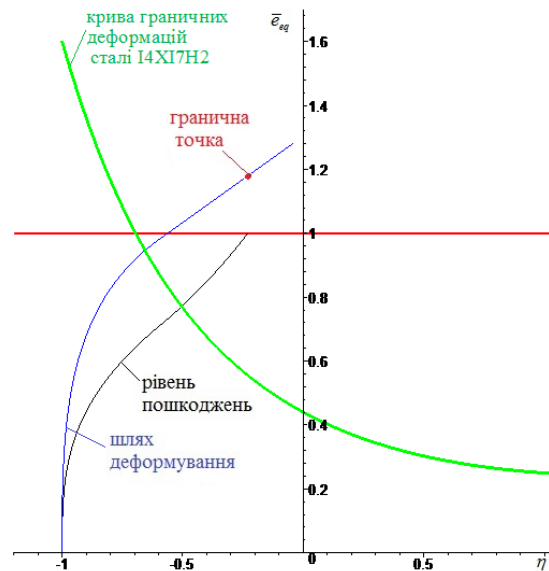


Рис. 11. Графічне представлення за побудованою моделлю накопичення пошкоджень в матеріалі небезпечної зони фланця при висаджуванні методом ШО заготовки із сталі I4X17H2.

Висновки:

Побудовані дві моделі деформовності заготовок з метою описання накопичення пошкоджень матеріалу небезпечних ділянок заготовки під час процесів висаджування та прямого витискування методом штампування обкочуванням. Кожна з моделей складається трьох базисних елементів: аналітичного представлення траєкторії деформування в координатах «показник напруженого стану – накопичена пластична деформація»; апроксимації кривої граничних деформацій та моделі підсумовування пошкоджень.

В обох моделях використовується одне те саме трипараметричне представлення кривої граничних деформацій при

стаціонарному деформуванні. В якості моделей підсумовування обрано степеневу модель та її окремі варіанти: модель В. А. Огороднікова та модель, що базується на лінійному принципі накопичення пошкоджень. Траєкторії деформування подано окремими параметричними співвідношеннями, що побудовані за різними методиками. Кожна з моделей включає функціональну залежність рівня накопичених пошкоджень із змінною показника напруженого стану. Моделі деформовності, що базуються на моделі лінійного принципу накопичення отримано як окремі варіанти кожної з побудованих моделей.

Стосовно процесу прямого



виготовлення сконструйовано параметричні рівняння траєкторії деформування. Функціональна залежність для показника напруженого стану від деякого параметра містить три сталі. Функціональна залежність для накопиченої деформації подана неелементарною функцією з однією сталою. Конкретні значення вказаних сталей або діапазон їх можливих значень визначали на основі граничних умов із використанням елементів теорії границь функцій. Оскільки модель деформовності, що базується на моделі підсумовування В. А. Огороднікова набуває вельми громіздкого виду, доволі складного для проведення обчислювальних експериментів, з урахуванням особливостей цих траєкторій обґрунтовано можливість використання ступеневої моделі підсумовування із сталим значенням показника нелінійності накопичення пошкоджень. Запропонована методика обчислення значення цього показника для конкретної траєкторії деформування та з'ясовано, що для досліджуваних траєкторій показник нелінійності накопичення пошкоджень набуває додатних значень, менших одиниці. Числові експерименти із значеннями цього показника, рівними та більше одиниці, показали значну монотонно зростаючу залежність розрахункової величини граничної деформації.

Список використаних джерел

1. Bonora N. Identification and measurement of ductile damage parameters. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 1999. №34(6). P.63 - 78.
2. Гунько М. І., Соколов Л. Н. Вплив форми інструменту на продуктивність процесу розкочування кілець зовнішнім діаметром більше 2500 мм. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. праць*. Краматорськ: ДДМА. 2008. № 3Е(14). с. 46 - 49.
3. Огородніков В. А. Деформованість та руйнування металів при пластичній формозміні. Київ. УМК ВО. 1989. 150 с.
4. Огородніков В. А., Грушко О. В., Федотов В. О. Напружено-деформований стан в процесі формутворення крутозігнутих колін методом пластичного деформування. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні* : Краматорськ. 2003. С. 424-428.
5. Kupchuk I., Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M., Didyk A. Experimental evaluation stress-strain state for billets during rolling stamping by rollers. *Colloquium-journal*. 2021. № 16 (103). 40-48.
6. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the

Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. № 66 (1). P. 51–58.

7. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 844. P. 168-181.

8. Cocroft M. G., Latham D. J. Ductility and the workability of metals. *Journal of the Institute of metals*. 1968. Vol. 96. P.33 - 39.

9. Матвійчук В.А., Колісник М.А., Штуць А.А. Побудова кривих граничних деформацій матеріалів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2 (105). С. 84-90.

10. Огородніков В. А., Нахайчук О. В., Любін М. В., Бабак М. В. Використаний ресурс пластичності металу при вдавлюванні внутрішньої метричної різі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 1998. №1 (18). С. 68-72.

11. Михалевич В. М., Краєвський В. О. Формулювання варіаційної задачі для моделі накопичення пошкоджень при гарячому деформуванні *Обробка матеріалів тиском* : Краматорськ, 2009. № 2. С. 12-16.

12. Михалевич В. М., Краєвський В. О., Добранюк Ю. В. Моделювання граничних деформацій на вільній бічній поверхні під час високотемпературного торцевого осадження. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця : ВНТУ, 2015. № 2. С. 54–60.

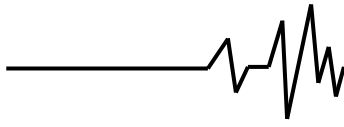
13. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Трач Є. А. Аналітичне представлення радіуса торців циліндричних заготовок під час вісесиметричного осадження. *Обробка матеріалів тиском*. Краматорськ : ДГМА, 2015. № 2. С. 56–62.

14. Матвійчук В.А., Колісник М.А. Формування якісних показників виробів процесами штампування обкочуванням. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 4 (115). С. 75-83. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-8.

15. Колісник М.А., Служалюк М.О. Дослідження методики розрахунку і вибору технологічних параметрів штампування обкочуванням складнопрофільних виробів з використання комп'ютерного моделювання. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 2 (108) С. 123-133.

References

1. Bonora N. (1999). Identification and measurement of ductile damage parameters. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. No. 34(6). P.63 - 78. [in Switzerland].
2. Gunko M. I., Sokolov L. N. (2008). The



influence of the shape of the tool on the productivity of the rolling process of rings with an outer diameter of more than 2500 mm. *Bulletin of the Donbas State Machine-Building Academy: coll. of science works* Kramatorsk: DDMA. No. 3E(14). with. 46 - 49. [in Ukrainian].

3. Ogorodnikov V. A. (1989). Deformation and destruction of metals during plastic deformation. Kyiv. UMK VO. 150 p. [in Ukrainian].

4. Ogorodnikov V. A., Hrushko O. V., Fedotov V. O. (2003). The stress-strain state in the process of forming steeply bent knees by the plastic deformation method. *Improvement of pressure treatment processes and equipment in metallurgy and mechanical engineering*: Kramatorsk. P. 424-428. [in Ukrainian].

5. Kupchuk I., Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M., Didyk A. (2021). Experimental evaluation stress-strain state for billets during rolling stamping by rollers. *Colloquium-journal*. No. 16 (103). 40-48. [in Romania].

6. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. (2022). Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. No. 66 (1). P. 51–58. [in Switzerland].

7. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. (2020). Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. *Key Engineering Materials*. Vol. 844. P. 168-181. [in Switzerland].

8. Cocroft M. G., Latham D. J. (1968). Ductility and the workability of metals. *Journal of the Institute of metals*. Vol. 96. P.33 - 39. [in Switzerland].

9. Matvijchuk V.A., Kolisnyk M.A., Shtuts A.A. (2022). Construction of curves of limit deformations of materials. *Vibrations in engineering and technology*. No. 2 (105). P. 84-90. [in Ukrainian].

10. Ogorodnikov V. A., Nakhaichuk O. V., Lyubin M. V., Babak M. V. (1998). The used resource of plasticity of metal when pressing an internal metric cut. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*. No. 1 (18). P. 68-72. [in Ukrainian].

11. Mikhalevich V. M., Kraevsky V. O. (2009). Formulation of the variational problem for the model of accumulation of damage during hot deformation. *Processing of materials by pressure*: Kramatorsk, No. 2. P. 12-16. [in Ukrainian].

12. Myhalevich V. M., Kraevsky V. O., Dobranyuk Yu. V. (2015). Modeling of boundary deformations on the free side surface during high-temperature end deposition. *Herald of mechanical engineering and transport*. Vinnytsia: VNTU, No. 2.

P. 54–60. [in Ukrainian].

13. Myhalevich V. M., Dobranyuk Yu. V., Trach E. A. (2015). Analytical representation of the radius of the ends of cylindrical workpieces during axisymmetric deposition. *Processing of materials by pressure*. Kramatorsk: DGMA, No. 2. P. 56–62. [in Ukrainian].

14. Matvijchuk V.A., Kolisnyk M.A. (2021). Formation of quality indicators of products by rolling stamping processes. *Technology, energy, transport of agricultural industry*. No. 4 (115). P. 75-83. [in Ukrainian].

15. Kolisnyk M.A., Sluzhaliuk M.O. (2020). Study of the method of calculation and selection of technological parameters of stamping by rolling of complex profile products using computer simulation. *Technology, energy, transport of agricultural industry*. No. 2 (108) P. 123-133. [in Ukrainian].

ASSESSMENT OF MATERIAL DEFORMATION RESISTANCE IN BLANKS DURING DIRECT EXTRUSION USING THE DIE FORMING METHOD

In this scientific article, two deformation models for analyzing the accumulation of material damage during upsetting and direct extrusion using the die forming method are investigated. Both models include an analytical representation of the deformation trajectory, approximation of the boundary deformation curve, and a damage accumulation model. A three-parameter representation of the boundary deformation curve is applied, utilizing a power-law model and a linear damage accumulation model.

The process of direct extrusion is examined by constructing parametric equations for the deformation trajectory. The functional dependence for the stress state indicator involves three constants, while a non-elementary function with a single constant is used for the accumulated deformation, determined using the theory of limit functions. Considering the complexity of trajectories, the use of a power-law accumulation model with a fixed nonlinearity indicator value is justified. The methodology for determining this indicator confirms its positive values less than one for the investigated trajectories, affirming its applicability. Numerical experiments demonstrate an increasing dependence of the limiting deformation with the increase of this indicator, indicating the effectiveness of the model.

Key words: assessment, deformation resistance, material, blanks, direct extrusion, die forming method.

**Відомості про авторів**

Ярошенко Леонід Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету, Службова адреса: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008, e-mail: volvinlv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0261-006X>

Колісник Микола Анатолійович – асистент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: kolisnik30@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5502-6556>).

Штуць Андрій Анатолійович – асистент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Присяжнюк Юрій Сергійович – аспірант за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380964117015, prisaznuku13@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3351-3676>).

Yaroshenko Leonid – candidate of technical sciences, associate professor of the department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics of Vinnitsa national agrarian university, Service address: Vinnitsa, st. Sonyachna 3, VNAU 21008, e-mail: volvinlv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0261-006X>

Kolisnyk Mykola – Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: kolisnik30@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5502-6556>).

Andrii Shtuts – Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Yurii Prysiashniuk – postgraduate in specialty 133 «Sectoral Mechanical Engineering» of Vinnitsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnitsia, 21008, Ukraine, +380964117015, prisaznuku13@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3351-3676>).