

УДК 621.77.01

DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-3

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ ЗА РАХУНОК АНАЛІЗУ
МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМОВНОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК**

Михалевич Володимир Маркусович, д.т.н., професор
Штуць Андрій Анатолійович, асистент
Колісник Микола Анатолійович, асистент
Вінницький національний аграрний університет,

Volodymyr Mikhalevich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor
Andrii Shtuts, Assistant
Mykola Kolisnyk, Assistant
Vinnytsia National Agrarian University

У даній науковій статті розглядається актуальна проблема моделювання деформовності матеріалу при використанні процесів штампування обкочуванням (ШО). Основними перешкодами на шляху розвитку цих процесів є вірогідність руйнування заготовок через недостатню пластичність матеріалу та несприятливий напружено-деформований стан, який визначається параметрами технологічного процесу. Таким чином, для ефективного розвитку процесів ШО необхідно використовувати моделювання деформовності матеріалу заготовок.

В статті вказується, що будь-яка модель деформовності матеріалу заготовок в процесах пластичного деформування містить три основні елементи:

Аналітичне представлення кривої або поверхні граничних пластичних деформацій при стаціонарному деформуванні: Цей елемент дозволяє описати, як змінюється пластична деформація матеріалу при стаціонарному деформуванні із зміною інваріантних показників напруженого стану.

Математична модель траєкторії деформування в координатах показник напруженого стану - накопичена до руйнування пластична деформація. Ця модель визначає шлях, яким розвивається деформація матеріалу при зміні показників напруженого стану і залежить від накопиченої пластичної деформації.

Модель підсумовування пошкоджень: Цей елемент враховує накопичені пошкодження в матеріалі і може використовуватися для передбачення руйнування заготовок.

Зокрема, стаття аналізує поверхню граничних пластичних деформацій при стаціонарному холодному деформуванні та використовує термінологію, яка дозволяє описувати залежність накопиченої пластичної деформації до руйнування від інваріантних показників напруженого стану. Термін «стаціонарне деформування» використовується для позначення деформування матеріалу за незмінних значень цих показників.

Ключові слова: штампування, обкочування, деформовність матеріалу, моделювання процесів, аналіз технологічних параметрів.

Ф. 43. Рис. 3. Табл. 1. Літ. 24.

1. Постановка проблеми

Штамування обкочуванням (ШО) є одним із ключових процесів в металообробній промисловості, що здійснюється для виготовлення різноманітних металевих заготовок, таких як деталі автомобільної промисловості, аерокосмічної техніки, електронних пристроїв та багатьох інших виробів. Цей процес полягає в пластичному деформуванні металевих заготовок шляхом їх обкочування та прокачування через спеціально створені матриці та валки.

Незважаючи на великий обсяг застосувань та перспективи виробництва, процеси ШО зіткнулися з численними викликами, серед яких основною є можливість руйнування матеріалу заготовок через недостатню пластичність та несприятливий напружено-деформований стан, що виникає в результаті впливу параметрів технологічного процесу. Враховуючи важливість цих процесів для виробництва, пошук рішень для запобігання руйнуванню та оптимізації параметрів є ключовим завданням у цій галузі.



Для ефективного розвитку та покращення процесів ШО необхідно мати системний підхід до аналізу та моделювання деформовності матеріалу заготовок. В даній науковій статті ми розглядаємо та аналізуємо основні аспекти моделювання деформовності матеріалу при ШО, зокрема, аналітичне представлення кривої граничних пластичних деформацій, математичну модель траєкторії деформування та модель підсумовування пошкоджень.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як було зазначено вище, основною перешкодою на шляху розвитку процесів ШО є вірогідність руйнування заготовок через недостатню пластичність матеріалу й несприятливий напружено-деформований стан, зумовлений параметрами технологічного процесу. Тому для ефективного розвитку процесів ШО необхідно здійснювати моделювання деформовності матеріалу заготовок.

Будь-яка модель деформовності матеріалу заготовок у процесах пластичного деформування містить три основні елементи: 1) аналітичне представлення кривої або поверхні граничних пластичних деформацій при стаціонарному деформуванні; 2) математичну модель траєкторії деформування в координатах «показник напруженого стану - накопичена до руйнування пластична деформація»; 3) модель підсумовування пошкоджень. Розглянемо ці основні елементи більш детально.

Найбільшого поширення отримало представлення кривої граничних деформацій у координатах «показник напруженого стану η – накопичена до руйнування пластична деформація \bar{e}_{fs} ». Тут:

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (1)$$

$$\bar{e}_{fs} = \bar{e}_i(t_{fs}), \quad \bar{e}_i(t) = \int_0^t \dot{\epsilon}_i(\tau) d\tau, \quad (2)$$

де $\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}$; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження; σ_i – інтенсивність напружень;

$\dot{\epsilon}_i$ – інтенсивність швидкостей деформацій; t, τ – час; t_{fs} – час до руйнування заготовки при стаціонарному деформуванні.

В працях наводяться деякі відомі та поширені аналітичні представлення функціональної залежності:

$$\bar{e}_{fs} = \bar{e}_{fs}(\eta). \quad (3)$$

Однопараметрична залежність:

$$\bar{e}_{fs} = 2 \cdot e_p \cdot e^{-0,72 \cdot \eta}, \quad -1 \leq \eta \leq \sqrt{3}, \quad (4)$$

двопараметричні залежності:

$$\bar{e}_{fs} = e_k \cdot e^{a \cdot \eta}, \quad -1 \leq \eta \leq 1, \quad (5)$$

$$\bar{e}_{fs} = \frac{e_c \cdot e_k}{e_c + \eta \cdot (e_c - e \cdot e_k)} \cdot e^{-\eta}, \quad -1 \leq \eta \leq 1, \quad (6)$$

трипараметрична залежність:

$$\bar{e}_{fs} = A + B \cdot \eta + C \cdot \eta^2, \quad (7)$$

де $e_p = \bar{e}_{fs}(\eta=1)$ – гранична пластична деформація рівномірного вісесиметричного розтягу; $e_k = \bar{e}_{fs}(\eta=0)$ – гранична пластична деформація за умови зсуву (звичайно, визначається шляхом кручення до руйнування суцільних циліндричних зразків); $e_c = \bar{e}_{fs}(\eta=-1)$ – гранична пластична деформація рівномірного вісесиметричного стиску; e – основа натуральних логарифмів; A, B, C – деякі матеріальні сталі, що можуть бути визначені, зокрема, на основі значень e_p, e_k, e_c .

Залежність (4) є простою, а головне – вимагає тільки одне експериментальне значення – граничну деформацію рівномірного вісесиметричного розтягу. В основу цієї залежності поставлено умову $e_k = 2 \cdot e_p$. Числовий коефіцієнт $e^{-0,72}$ підібрано так, щоб стосовно рівномірного вісесиметричного розтягу ($\eta=1$) справджувалася тотожність $\bar{e}_{fs}(\eta=1) = e_p$.



В основу двохпараметричної залежності Г. Д. Деля поставлено умову: що, звичайно, обмежує коло матеріалів, для яких вказана залежність є задовільною.

$$e_p = \frac{e_c \cdot e_k}{2 \cdot e_c - e \cdot e_k},$$

В квадратичній залежності (7) параметри A, B, C можуть бути визначені на основі експериментів при трьох різних значеннях показника напруженого стану η . Звичайно, це випробування на розтяг, стиск та кручення суцільних циліндричних зразків.

Запропоновано, також конструювання сплайн-подібних залежностей:

$$\bar{e}_{fs} = e_k \cdot e^{-0,72 \cdot \eta^2} \cdot \left(\frac{e_k}{e_c} \right)^{\eta(1-\eta)}, \quad 0 \leq \eta \leq 1, \quad (8)$$

$$\bar{e}_{fs} = e_k \cdot \left(\frac{e_p}{e_k} \right)^{\eta^2} \cdot \left(\frac{e_k}{e_c} \right)^{\eta(1-\eta)}, \quad 0 \leq \eta \leq 1, \quad (9)$$

$$\bar{e}_{fs} = e_k \cdot \left(\frac{e_p}{e_c} \right)^{\frac{\eta^2}{2}} \cdot \left(\frac{e_p \cdot e_c}{e_k^2} \right)^{\frac{\eta^2}{2}}, \quad -1 \leq \eta \leq 1, \quad (10)$$

$$\bar{e}_{fs} = e_k \cdot \left(\frac{(1-\eta) \cdot e_c}{2 \cdot e_k} + \frac{(1+\eta) \cdot e_k}{2 \cdot e_p} \right)^{-\eta}, \quad -1 \leq \eta \leq 1. \quad (11)$$

Співвідношення (8) впливає як окремий випадок залежності (9) при $e_p = e_k \cdot e^{-0,72}$. Останні дві трипараметричні залежності відображають властивості матеріалів у більш широкому діапазоні зміни показника напруженого стану.

Авторами [14, 15] на основі власних результатів та літературних джерел систематизовано експериментальні дані по значеннях e_p, e_k, e_c для різних матеріалів.

Так, в [3] розглядається нормалізований критерій Кокрофта-Летема-Оха в загальному вигляді, що базується на залежності:

$$\bar{e}_{fs}(\eta) = \frac{3 \cdot C}{\left\{ \eta + 2 \cdot \cos \left[\frac{1}{3} \cdot \arccos(0,5 \cdot \eta \cdot (3 - \eta^2)) \right] \right\}}, \quad -1 < \eta \leq 2 \quad (12)$$

Очевидно, що це співвідношення є однопараметричною залежністю, яку пропонується використовувати в доволі широкому діапазоні зміни показника напруженого стану. В окремих випадках, залежно від способу ідентифікації параметра C , остання залежність може набувати різних видів.

Слід зазначити, що нормалізований критерій Кокрофта-Летема-Оха в наведеному вигляді вперше отримано в працях [16-18].

За даними [18] однією з найбільш цитованих є праця [13], де запропоновано критерій Райса-Трейсі. Загальний вигляд кривої граничних деформацій, що впливає з цього критерія має такий вигляд:

$$\bar{e}_{fs}(\eta) = C \cdot \exp\left(-\frac{\eta}{2}\right), \quad -2 \leq \eta \leq 2. \quad (13)$$

Відомі також аналітичні представлення кривої граничних деформацій на основі критерію гідростатичного напруження:

$$\bar{e}_{fs}(\eta) = \frac{3 \cdot C}{\eta}, \quad -2 \leq \eta \leq 2, \quad (14)$$

критерій Кліфта [20]:

$$\bar{e}_{fs}(\eta) = \frac{3 \cdot \sigma_m \cdot C}{\eta}, \quad -2 \leq \eta \leq 2, \quad (15)$$

де $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ – середнє напруження.



Очевидно, що всі ці залежності є однопараметричними і не зважаючи на задекларований доволі широкий діапазон їх використання, насправді придатні для описання властивостей або вузького класу матеріалів, або невеликого діапазону зміни показника напруженого стану.

Варто зазначити, що критерії Кокрофта-Летема-Оха, Райса-Трейсі, гідростатичного напруження та Кліфта в наведеному вигляді вперше отримано в працях.

В працях С. І. Сухорукова, І. О. Сивака запропоновано аналітичні представлення поверхні граничних деформацій, зокрема трипараметричний вираз [1, 2]:

$$\bar{e}_{fs}(\eta, \mu_\sigma) = \bar{e}_{fs}(0,0) \cdot e^{\lambda_1 \mu_\sigma - \lambda_2 \eta}, \quad (16)$$

де μ_σ – параметр Лоде; $\bar{e}_{fs}(0,0)$, λ_1 , λ_2 – матеріальні сталі величини.

Автор [7] вважає, що використання параметра Лоде, як другого показника під час характеристики об'ємного напруженого стану, не є достатньо обґрунтованим, оскільки цей показник не залишається незмінним при плоскому напруженому стані. І як більш теоретично обґрунтований пропонує використовувати показник ν :

$$\nu = \cos(3 \cdot \psi_\sigma) - 0,5 \cdot \eta \cdot (3 - \eta^2), \quad (17)$$

де ψ_σ – кут виду напруженого стану.

Запропонований вираз для визначення безрозмірного показника напруженого стану отримано на основі умови $\nu = 0$ для плоского напруженого стану.

Треба зазначити, що відомі аналітичні представлення поверхонь граничних деформацій стосуються, перш за все, листових матеріалів.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є вивчення та оптимізація процесів штампування обкочуванням з використанням чисельного моделювання. Наша мета - розробити більш точні методи та покращити якість виробництва цим шляхом.

4. Основні результати дослідження

З огляду на термінологію, що запропонована в [18], під поверхнею граничних пластичних деформацій при стаціонарному холодному деформуванні розумітимемо залежність накопиченої пластичної деформації до руйнування від інваріантних показників напруженого стану. Під стаціонарним деформуванням матимемо на увазі деформування під час незмінних значень вказаних інваріантних показників.

Траєкторії деформування виду:

$$\eta_j = C_j = const \quad (18)$$

відповідають стаціонарному деформуванню.

В [8, 9, 10] отримано експериментальні та розрахункові дані стосовно лінійних траєкторій виду:

$$\bar{e}_i = a + b \cdot \eta, \quad (19)$$

зокрема промені:

$$\bar{e}_i = b \cdot \eta, \quad b > 0,$$

що реалізовані спільним розтягом з крученням суцільних циліндричних зразків.

Представлено результати визначення напружено-деформованого стану матеріалу небезпечної зони заготовки під час ротаційного кування. Згідно отриманим даним траєкторії деформування подано у вигляді квадратичної залежності:

$$\eta = a \cdot (\bar{e}_i)^2 + b \cdot \bar{e}_i + c \quad (20)$$

В [21-24] наведено графіки вказаних траєкторій, проте не наведено значень коефіцієнтів цієї залежності. Проаналізуємо це співвідношення та відтворимо графічне зображення вказаних траєкторій:

1) всі траєкторії виходять з точки $(\eta = -2, e_i = 0)$, отже, $c = -2$;



2) кут нахилу дотичної до будь-якої траєкторії в точці $(\eta = -2, e_i = 0)$ дорівнює $-\frac{\pi}{4}$, отже,

$$\frac{d\bar{e}_i}{\eta} = \frac{1}{\frac{d\eta}{d\bar{e}_i}} = \frac{1}{\operatorname{tg}\left(-\frac{\pi}{4}\right)} = -1$$
, з іншого боку диференціюванням (20) отримуємо $\frac{d\eta}{d\bar{e}_i} = 2 \cdot a \cdot \bar{e}_i + b$, $\frac{d\eta}{d\bar{e}_i} \Big|_{\bar{e}_i=0} = b$, тоді $b = -1$.

3) позначимо через \bar{e}_m максимальне значення накопиченої деформації, що досягається при $\eta = -2.1$, матимемо ще одне рівняння: $-2 = a \cdot (\bar{e}_m)^2 - \bar{e}_m - 2$, звідки $a = \frac{1}{\bar{e}_m}$.

З урахуванням отриманих рівностей співвідношення (20) набуває вигляду:

$$\eta = \frac{1}{\bar{e}_m} \cdot (\bar{e}_i)^2 - \bar{e}_i - 2 \quad (21)$$

На рис. 1 показані траєкторії деформування, що побудовані для частинок матеріалу небезпечної зони заготовки на різних ступенях обтиснення.

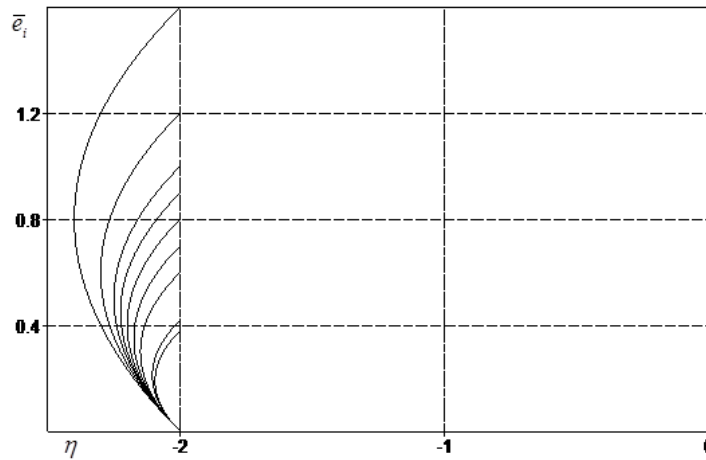


Рис. 1. Траєкторії деформування макрочастинок матеріалу заготовки під час ротаційного кування: розрахунок за (21)

Авторами [19] розглянуто шляхи деформування часток матеріалу заготовки на зовнішній і внутрішній поверхнях циліндричного зразка під час процесу вальцювання на клин. З огляду на те, що вказані шляхи деформування описуються не однозначними функціями $\bar{e}_i = \bar{e}_i(\eta)$, відповідну модель подали у вигляді:

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 + a_1 \cdot \bar{e}_i^s, & 0 \leq \bar{e}_i \leq e_1 \\ \eta_1 + a \cdot \sin(\pi \cdot \omega \cdot (\bar{e}_i - e_1)), & \bar{e}_i > e_1 \end{cases} \quad (22)$$

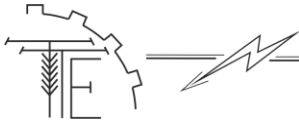
де $\eta_0, (e_1, \eta_1), a_1, a, s, \omega$ – параметри функції, що пов’язані з її особливостями.

Нескладно зрозуміти, що при $\bar{e}_i = 0$ маємо $\eta = \eta_0$, отже, шлях деформування виходить з точки $(\eta_0, 0)$. Аналогічним чином визначається сутність точки з координатами (e_1, η_1) – точка, що відповідає зміні аналітичного вигляду шляху деформування. Оскільки шлях деформування, звичайно, описується неперервними функціями, накладається ще одна умова на значення зазначених параметрів:

$$\eta_0 + a_1 \cdot e_1^s = \eta_1, \quad (23)$$

отже, співвідношення (22) набуває вигляду:

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 + \left(\frac{\bar{e}_i}{e_1}\right)^s \cdot (\bar{e}_i - e_1), & 0 \leq \bar{e}_i \leq e_1 \\ \eta_1 + a \cdot \sin(\pi \cdot \omega \cdot (\bar{e}_i - e_1)), & \bar{e}_i > e_1 \end{cases} \quad (24)$$



Моделювання шляхів деформування можна здійснювати шляхом зміни параметрів співвідношення (23) з урахуванням забезпечення наведених умов. Результати моделювання наведено на рис. 2 значення параметрів моделі – в табл. 1.

Розглянута траєкторія деформування фактично відображає процес, що відбувається в два етапи.

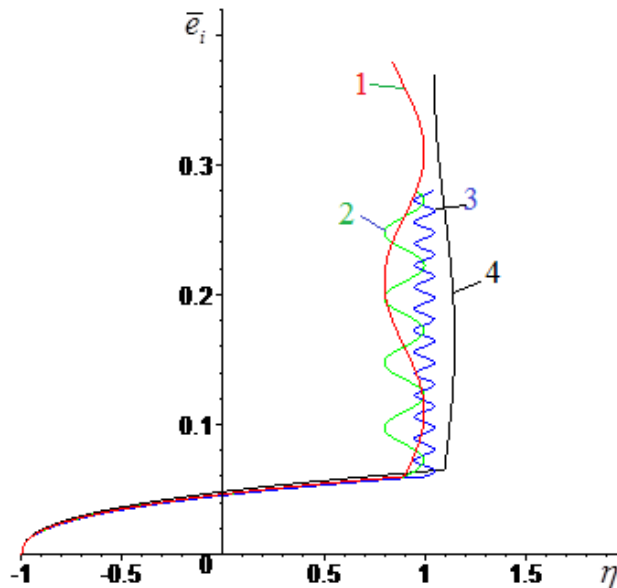


Рис. 2. Траєкторії деформування макрочастинок матеріалу на зовнішній і внутрішній поверхнях циліндричного зразка під час процесу вальцювання на клин: розрахунок за (24)

Таблиця 1

Числові значення параметрів моделі під час моделювання шляхів деформування в процесі вальцювання на клин

Шлях деформування	η_0	η_1	e_1	s	a	ω
1	-1	0.9	0.06	0.4	2.5	10
2	-1	0.9	0.06	0.4	2.5	40
3	-1	1.0	0.06	0.4	2.5	120
4	-1	1.0	0.065	0.4	2.5	5

На основі досліджень НДС пластичної зони під час виготовлення криволінійних заготовок холодним вальцюванням також запропоновано описувати траєкторію деформування різними аналітичними виразами на кожному з двох окремих етапах. На першому етапі деформування макрочастинки небезпечної зони перебувають в умовах одноосового розтягу. Після досягнення величини накопиченої деформації значення $\bar{e}_i = 0.44$, траєкторія деформування може бути представлена лінійною залежністю:

$$\bar{e}_i = -0,071 \cdot \eta + 0,5117.$$

Цю траєкторію деформування, на наш погляд, зручніше можна представити в такому вигляді:

$$\eta = \begin{cases} 1, & 0 \leq \bar{e}_i \leq 0.44 \\ -14,08 \cdot \bar{e}_i + 7,2, & \bar{e}_i > 0.44 \end{cases} \quad (25)$$

В цілій низці окремих випадків аналітичні представлення траєкторій деформування можна отримувати більш ефективним способом, що полягає в розробці диференціального рівняння між компонентами приростів пластичних деформацій, подальшому розв'язанню цього рівняння та ідентифікації його параметрів на основі експериментальних даних.

З метою дослідження напружено-деформованого стану та граничних деформацій матеріалу бічної поверхні циліндричного зразка при торцевому стисненні за умови бочкоутворення розглянуто низку диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = -\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{m^2}{\varepsilon_\varphi^2 + m^2}, m > 0. \quad (26)$$



$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = -\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{p^2}{\varepsilon_z^2 + p^2}, p > 0 \quad (27)$$

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = -\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot e^{-\varepsilon_\varphi/m}, m > 0 \quad (28)$$

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = -a \cdot e^{-b \cdot \varepsilon_\varphi}, a > 0, b > 0 \quad (29)$$

де $\varepsilon_z, \varepsilon_\varphi$ – осьова та колова деформації.

Узагальнення співвідношення (26) з метою більш адекватного описання фінішного етапу для деяких схем процесу вальцювання запропоновано в [14].

Перевага такого підходу полягає у зручній можливості врахування низки граничних та інших умов, що сприяють підвищенню коректності, точності та достовірності визначення напружено-деформованого стану матеріалу заготовки.

Розв'язанням наведених диференціальних рівнянь отримано відповідні залежності між компонентами осової та колової деформації:

$$\varepsilon_z = -\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_\varphi - \frac{3}{2} \cdot m \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{\varepsilon_\varphi}{m}\right) \quad (30)$$

$$\varepsilon_\varphi = -2 \cdot \varepsilon_z + 3 \cdot p \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{\varepsilon_z}{2 \cdot p}\right) \quad (31)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_\varphi + \frac{3 \cdot m}{2} \cdot (e^{-\varepsilon_\varphi/m} - 1) \quad (32)$$

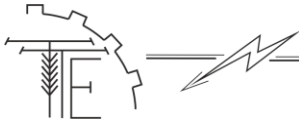
$$\varepsilon_z = \frac{a}{b} \cdot (e^{-b \cdot \varepsilon_\varphi} - 1) \quad (33)$$

Із застосуванням відомого підходу на основі теорії течії, відповідно до наведених диференціальних рівнянь, отримано аналітичні представлення траєкторій деформування параметри рівнянь мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(t) = \frac{1 - 3 \cdot \cos^2(t)}{\sqrt{1 + 3 \cdot \cos^4(t)}}, \\ \bar{\varepsilon}_i(t, m) = m \cdot \int_0^t \sqrt{3 + \frac{1}{\cos^4(x)}} \cdot dx, \end{array} \right. t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \quad (34)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(t) = \frac{3 \cdot \sin^2(t) - 1}{\sqrt{1 + 3 \cdot \sin^4(t)}}, t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right], \\ \varepsilon_u(t, p) = p \cdot \int_0^t \sqrt{\left(\frac{4}{\cos^2(x)} - 3\right)^2 + 3} \cdot dx, \end{array} \right. t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \quad (35)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(t) = \frac{3 \cdot t - 2}{\sqrt{1 + 3 \cdot (1-t)^2}}, \\ \bar{\varepsilon}_i(t, m) = \frac{m}{2} \cdot \left(4 + \ln \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{\sqrt{1 + 3 \cdot (1-t)^2} + 1}{\sqrt{1 + 3 \cdot (1-t)^2} - 1} \right) - \right. \\ \left. - 2 \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot (1-t)^2} \right), \end{array} \right. t \in [0, 1] \quad (36)$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(t) = \frac{2 \cdot [1 - a \cdot (1-t)]}{\sqrt{1 + \frac{1}{3} \cdot (1 - 2 \cdot a \cdot (1-t))^2}}, t \in [0, 1[\\ \bar{\epsilon}_i(t, a, b) = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot b} \cdot \left\{ \sqrt{a^2 - a + 1} - \sqrt{a^2 \cdot (1-t)^2 - a \cdot (1-t) + 1} - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot a - 1 + 2 \cdot \sqrt{a^2 - a + 1}}{2 \cdot a \cdot (1-t) - 1 + 2 \cdot \sqrt{a^2 \cdot (1-t)^2 - a \cdot (1-t) + 1}} \right) + \right. \\ \left. + \ln \left(\frac{2 \cdot (1 + \sqrt{a^2 \cdot (1-t)^2 - a \cdot (1-t) + 1}) - a \cdot (1-t)}{(1-t) \cdot [2 \cdot (1 + \sqrt{a^2 - a + 1}) - a]} \right) \right\}, \end{array} \right. \quad (37)$$

Як видно, доволі просте диференціальне рівняння (29) породжує, порівняно з іншими моделями, доволі громіздке аналітичне представлення траєкторії деформування. Необхідно відзначити, також, що це останнє співвідношення, на відміну від інших однопараметричних аналітичних представлень траєкторій деформування, є двохпараметричним.

На основі проведеного аналізу вважаємо, що із всіх розглянутих найбільш ефективним є підхід до пошуку аналітичного представлення траєкторії деформування на основі розробки диференціального рівняння між компонентами приростів пластичних деформацій, із подальшим розв'язанням цього рівняння та ідентифікації його параметрів на основі експериментальних даних. Однак ефективність застосування цього підходу суттєво залежить від того, наскільки вдало підібрано вихідне диференціальне рівняння.

Векторні моделі не отримали широкого використання. Отже, розглянемо скалярні та тензорні моделі.

Використанню скалярних моделей підсумовування пошкоджень для розв'язання задач оцінки деформовності заготовок при технологічних процесах обробки тиском присвячено низка праць [8].

Різні варіанти тензорних моделей підсумовування пошкоджень були розроблені багатьма вченими. Вдосконаленню тензорних моделей та їх використанню під час розв'язання задач оцінки деформовності заготовок при технологічних процесах обробки тиском присвячено праці [10, 11].

Очевидний та найпростіший спосіб оцінки деформовності заготовок пов'язують з [12]:

$$\bar{\epsilon}_i(t_0) = \bar{\epsilon}_{i0} = \int_0^{t_0} \dot{\epsilon}_i(\tau) d\tau \leq \bar{\epsilon}_{fs}(\eta_0), \quad (38)$$

де $\bar{\epsilon}_{fs}(\eta_0)$ – гранична деформація за кривою граничних деформацій, що відповідає напруженому стану макрочастинки в момент появи перших ознак досягнення граничного стану. Ці ознаки, звичайно, пов'язують з появою тріщин, що виявляються візуально.

Найчастіше останню умову записують у вигляді:

$$\psi = \frac{\bar{\epsilon}_{i0}}{\bar{\epsilon}_{fs}(\eta_0)} \leq 1, \quad (39)$$

де ψ – використаний ресурс пластичності.

Подібна оцінка цілком коректна за умови незмінності показника напруженого стану під час деформування. Якщо ж деформування супроводжується зміною напруженого стану, то, як свідчать фізично обґрунтовані теорії руйнування та численні експериментальні дані, цей простий спосіб може занижувати або завищувати реальні показники в два і більше рази.

Перша модель, що заснована на нелінійному принципі підсумовування пошкоджень була запропонована [10]. За основу було взято степеневу модель:

$$\psi(\bar{\epsilon}_{i0}) = \int_0^{\bar{\epsilon}_{i0}} \frac{nx^{n-1} dx}{(\bar{\epsilon}_{fs}[\eta(x)])^n}, \quad \psi(0) = 0, \quad \psi(\bar{\epsilon}_f) = 1, \quad (40)$$



та на основі унікальних експериментальних даних на спільний розтяг з крученням за спеціально спроектованими траєкторіями деформування суцільних циліндричних зразків визначено вираз для показника нелінійності підсумовування пошкоджень n :

$$n = 1 + 0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_u} \quad (41)$$

У такому представленні важливо, що показник нелінійності підсумовування пошкоджень n виявився не матеріальною сталою, а, в загальному випадку, величиною, що залежить від величини накопиченої деформації. В окремих випадках, що відповідають лінійним траєкторіям деформування, цей показник є сталою величиною впродовж процесу деформування.

З наведених моделей підсумовування пошкоджень розв'язані численні прикладні задачі теорії та технології обробки тиском.

В [12] запропоновано низку різних моделей нелінійного підсумовування пошкоджень, зокрема, експоненційна та степенево-експоненційна моделі:

$$\psi(\bar{e}_{i0}) = \int_0^{\bar{e}_{i0}} \frac{n \cdot \exp\left(n \cdot \frac{x}{\bar{e}_{fs}[\eta(x)]}\right)}{\bar{e}_{fs}[\eta(x)] \cdot (\exp(n) - 1)} dx, \quad \psi(0) = 0, \quad \psi(\bar{e}_f) = 1, \quad (42)$$

$$\psi(\bar{e}_{i0}) = \int_0^{\bar{e}_{i0}} \frac{n \cdot s \cdot \left(\frac{x}{\bar{e}_{fs}[\eta(x)]}\right)^{s-1} \cdot e^{n \cdot \left(\frac{x}{\bar{e}_{fs}[\eta(x)]}\right)^s}}{\bar{e}_{fs}[\eta(x)] \cdot (\exp(n) - 1)} dx, \quad \psi(0) = 0, \quad \psi(\bar{e}_f) = 1. \quad (43)$$

На рис. 3. наведені вище, результати моделювання деформованості заготовки в процесі виконання операції висаджування методом штампування обкочуванням. Ці результати надзвичайно важливі для розуміння та оптимізації цього технологічного процесу. Вони вказують на рівень деформації, який виникає під час висаджування і дають можливість визначити потрібні корекції технологічних параметрів та обладнання для досягнення бажаних результатів..

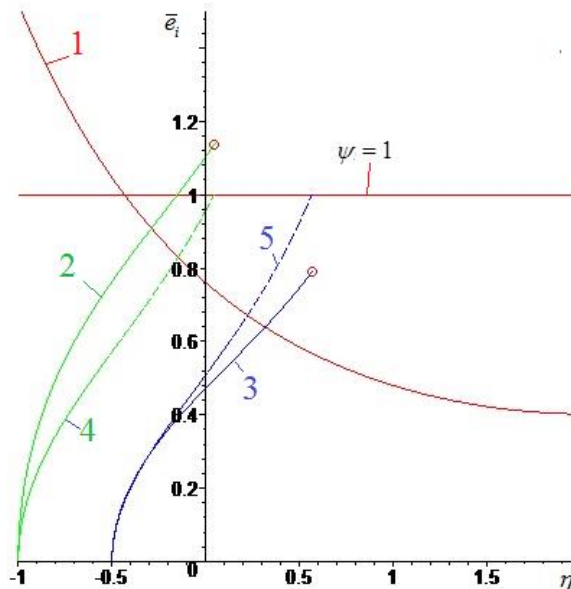


Рис. 3. Моделювання деформованості заготовки із сталі 40ХН2МА:

1 – крива граничних деформацій (розрахунок за (41), $e_c, e_k, e_p = 1.52; 0.76; 0.48$);
2, 3 – траєкторії деформування (розрахунок за (44)); 4, 5 – криві накопичення пошкоджень (розрахунок за (45); ($m = 0.5; \theta = 1; 0.35$)).

Ретельний аналіз отриманих результатів розкриває цікавий аспект: відхилення вершини кінцевого валка від центральної осі заготовки може суттєво впливати на режим напруженого стану і, відповідно, на накопичену до руйнування деформацію. Наприклад, для траєкторій деформування 2 і 3 ми



зафіксували значення граничної накопиченої деформації, які становлять 1.15 і 0.8 відповідно. Це свідчить про помітне зниження рівня деформованості на 30% в порівнянні з іншими параметрами [3-6].

Це важливе відкриття може мати велике практичне значення для покращення процесу штампування обкочуванням. Можливо, застосування спеціальних корекційних заходів для підтримки вертикального положення вершини валка або оптимізація форми і розмірів заготовки дозволить досягти більш ефективного і якісного процесу обкочуванням. Це може призвести до зменшення витрат і покращення якості виготовленої продукції в даній технологічній галузі.

5. Висновки

Моделювання процесів пластичного деформування, включаючи процеси штампування обкочуванням, є важливим і перспективним напрямком досліджень у сучасній інженерії та промисловості. Воно стає все більш популярним завдяки своїм можливостям дослідження властивостей матеріалів та оптимізації технологічних процесів, включаючи процеси штампування обкочуванням. Це дозволяє інженерам та виробникам здійснювати реалістичні симуляції пластичного деформування без необхідності проведення фізичних експериментів. Внаслідок цього вдається економити час та ресурси, а також підвищується загальна якість та ефективність виробництва, включаючи процеси штампування обкочуванням.

Проте існують деякі проблеми, які потрібно враховувати при використанні моделювання процесів штампування обкочуванням. По-перше, вже опубліковані результати моделювання залишаються фрагментарними і не завжди містять достатньо інформації про використані матеріали та параметри процесу. Це ускладнює відтворення та порівняння результатів між різними дослідженнями та унеможливує повністю оцінити їх об'єктивність.

Крім того, важливим є відсутність результатів, які стосуються траєкторії деформацій для різних типів заготовок під час процесу штампування обкочуванням. Форма і розміри заготовок можуть значно впливати на процес деформування, і, отже, детальні дані про цю деформацію є критично важливими для подальшого розроблення оптимальних технологій та конструкцій, зокрема в області штампування обкочуванням.

У підсумку, моделювання процесів штампування обкочуванням, є обіцяючим інструментом для покращення якості та ефективності виробництва. Проте для досягнення максимальної користі від цього підходу необхідно розвивати інтегровані дослідження та співпрацю між вченими і промисловими партнерами для розроблення загальних стандартів та методологій, а також для отримання більш детальної інформації про деформації різних типів заготовок.

Список використаних джерел

1. Grushko A. V., Kukhar V. V., Slobodyanyuk Y. O. Phenomenological model of low-carbon steels hardening during multistage drawing. *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 265. P. 114–123.
2. Grushko O., Slobodyanyuk Y. Microstructure of low-carbon steel wire and its welding and fabrication properties. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. Vol. 11. P. 44–50
3. Kupchuk I., Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M. Development of the technological process of forming rings from sheet samples by stamping rollers and rotary hood. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*. 2021. Vol. 14, № 63(2). P. 1–13.
4. 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. Vol. 16, № 103. P. 40–48.
5. Lebedev A. A., Mikhalevich V. M. On the Choice of Stress Invariants in Solving Problems of Mechanics : Strength of Materials. *Strength of Materials*. 2003. Vol. 35. P. 217–224. <https://doi.org/10.1023/A:1024605520187>.
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. *Key Engineering Materials. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 66, № 1. P. 51–58.
7. Matvijchuk V., Mikhalevich V., Shtuts A. Analysis of stress-strain state (sss) of billet material in the course of setting by resource-saving method of roll stamping. *Vibrations in engineering and technology*. 2023. № 1 (108). P. 63–72. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-7 <http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/May2023/kVbXGt7oZFDiQXkau0n6.pdf>
8. Matvijchuk V., Shtuts A. Construction of curve boundary deformations of metals. In: *Traditional and innovative approaches to scientific research: theory, methodology, practice: Scientific monograph*: Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2022. P. 90–113. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-241-8-4>.



9. Matviychuk V. A., Aliyeva L. I. Development of technological process of flanges upsetting on tubular billets by face rolling. *Produkcya i Zarzadzanie w Hutnictwie. XIV : Miedzynarodowa Konferencya Naukowo-Techniczna : Politechnika Czestochowska*. Szczyrk 28 czerwca. 1 lipca. 2006. P. 132–136.
10. Mikhalevich V. M., Dobranuk Y. V., Kraevsky V. A., Mikhalevich O. V. Dependence of plastic ultimate strain from a friction at end faces at axisymmetric compression. *Bulet. Inst. Politehnic Din Iasi Tomul LIV(LVIII)*. 2008. Fasc. 3-4. P. 49–53.
11. Mikhalevich V. M., Lebedev A. A. Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression. *Strength of Materials*. 2011. Vol. 43, No. 6. P. 591–603.
12. Бубновська І. А. Аналіз напруженого стану заготовок при вальцюванні. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2019. № 2 (105). С. 80–85. DOI: 10.37128/2520-6168-2019-2-11
13. Прикладна механіка / Булгаков В. М. та ін. Київ : Центр учбової літератури, 2020. 906 с.
14. Гожій С., Кривда Л. Штампування обкочуванням як засіб ресурсозбереження. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2006. Т. 46, № 2. С. 55–60.
15. Кухар В. В., Бурко В. А. Зміщені обсяги при осаді циліндричних заготовок опуклими плитами. *Обробка металів тиском: збірник наукових праць*. 2008. № 1. С. 177–182.
16. Кухар В. В., Діамантопуло К. К. Чисельні розрахунки параметрів формозміни при профілюванні заготовок поздовжнім вигином. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії та машинобудуванні*. 2004. 4 с.
17. Кухар В. В., Діамантопуло К. К., Бурко В. А. Напружено-деформований стан та ступінь використання запасу пластичності на бічній поверхні обложених заготовок за різних умов. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії та машинобудуванні*. 2007. С. 157–162.
18. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Бубновська І. А. Оцінка деформованості матеріалу заготовок при вальцюванні за схемами в два і більше переходів. *Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності* : Міжнар. наук.-метод. Інтернет-конф. Вінниця ВНТУ, 2018. С. 246–249. URL : https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/pmovc/pmovc-2018_netpub.pdf.
19. Матвійчук В. А., Штуць А. А., Явдик В. В. Розвиток технологічних можливостей процесів штампування обкочуванням. *Технічні науки : Збірник наукових праць. ВНАУ*. 2015. № 1 (89). С. 27–32.
20. Спосіб визначення пластичності металів вальцюванням циліндричних зразків на клин : пат. 109984 Україна : МПК G01N 3/08, № u201601270 ; заявл. 15.02.2016 ; опубл. 26.09.2016, Бюл. № 18.
21. Спосіб виготовлення криволінійних заготовок вальцюванням : пат. 120472 Україна : МПК G01N 3/08, B22F3/00 № u201701818 ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 10.11.2017, Бюл. № 21.
22. Огородніков В. А. Деформованість та руйнування металів при пластичній формозміні. Київ : УМК ВО, 1989. 150 с.
23. Огородніков В. А. Оцінка деформованості металів під час обробки тиском. Київ : Вища школа, 1983. 174 с.
24. Огородніков В. А., Грушко О. В., Гуцалюк О. В. Історія деформування, що визначає застосування феноменологічних критеріїв руйнування у процесах обробки тиском. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. № 1. С. 67–77.

References

- [1] Grushko, A.V., Kukhar, V.V., Slobodyanyuk, Y.O. (2017). Phenomenological model of low-carbon steels hardening during multistage drawing. *Solid State Phenomena*, 265, 114–123. [in English].
- [2] Grushko, O., Slobodyanyuk, Y. (2016). Microstructure of low-carbon steel wire and its welding and fabrication properties. *Metallurgical and Mining Industry*, 11, 44–50. [in English].
- [3] Kupchuk, I., Kolisnyk, M., Shtuts, A., Paladii, M. (2021). Development of the technological process of forming rings from sheet samples by stamping rollers and rotary hood. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*, 14, 63(2), 1–13. [in English].
- [4] 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*, 16 (103), 40–48. [in English].
- [5] Lebedev, A.A., Mikhalevich, V.M. (2003). On the Choice of Stress Invariants in Solving Problems of Mechanics : Strength of Materials. *Strength of Materials*, 35, 217–224. <https://doi.org/10.1023/A:1024605520187>. [in English].
- [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. *Key Engineering Materials. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 66 (1), 51–58. [in English].



- [7] Matviychuk, V., Mikhalevich, V., Shtuts, A. (2023). Analysis of stress-strain state (sss) of billet material in the course of setting by resource-saving method of roll stamping. *Vibrations in engineering and technology*, 1 (108), 63–72. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-7 <http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/May2023/kVbXGt7oZFDiQXkau0n6.pdf>. [in English].
- [8] Matviychuk, V., Shtuts, A. (2022). Construction of curve boundary deformations of metals. In: *Traditional and innovative approaches to scientific research: theory, methodology, practice: Scientific monograph*: Riga, Latvia: Baltija Publishing, 90–113. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-241-8-4>. [in English].
- [9] Matviychuk, V.A., Aliyeva, L.I. (2006). Development of technological process of flanges upsetting on tubular billets by face rolling. *Produkcyia i Zarzadzanie w Hutnictwie. XIV : Miedzynarodowa Konferencya Naukowo-Techniczna : Politechnika Czestochowska*. Szczyrk 28 czerwca. 1 lipca. 132–136. [in English].
- [10] Mikhalevich, V.M., Dobranuk, Y.V., Kraevsky, V.A., Mikhalevich, O.V. (2008). Dependence of plastic ultimate strain from a friction at end faces at axisymmetric compression. *Bulet. Inst. Politehnic Din Iasi Tomul LIV(LVIII)*. Fasc. 3-4. 49–53. [in English].
- [11] Mikhalevich, V.M., Lebedev, A.A. (2011). Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression. *Strength of Materials*, 43 (6), 591–603. [in English].
- [12] Bulhakov, V.M., Adamchuk, V.V., Chernysh, O.M., Berezovyi, M.H., Kaletnik, H.M., Yaremenko, V.V. (2020). *Prykladna mekhanika [Applied mechanics]*. Kyiv : Tsentr uchbovoi literatury. [in Ukrainian].
- [13] Hozhii, S., Kryvda, L. (2006). Shtampuvannia obkochuvanniam yak zasib resursozberezhennia [Stamping by rolling as a means of saving resources]. *Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut»*, 46 (2), 55–60. [in Ukrainian].
- [14] Kukhar, V.V., Burko, V.A. (2008). Zmishcheni obsiahy pry osadi tsylindrychnykh zahotovok opuklymy plytamy [Displaced volumes during deposition of cylindrical blanks by convex plates]. *Obrobka metaliv tyskom: zbirnyk naukovykh prats*, 1, 177–182. [in Ukrainian].
- [15] Kukhar, V.V., Diamantopulo, K.K. (2004). Chyselni rozrakhunky parametriv formozminy pry profiliuvanni zahotovok pozdovzhnim vyhynom [Numerical calculations of shape change parameters during profiling of blanks by longitudinal bending. Improvement of pressure treatment processes and equipment in metallurgy and mechanical engineering]. *Udoskonalennia protsesiv ta obladnannia obrobky tyskom u metalurhii ta mashynobuduvanni*. pp. 4. [in Ukrainian].
- [16] Kukhar, V.V., Diamantopulo, K.K., Burko, V.A. (2007). Napruzhenno-deformovanyi stan ta stupin vykorystannia zapasu plastychnosti na bichnii poverkhni oblozhenykh zahotovok za riznykh umov [The stress-strain state and the degree of use of the plasticity reserve on the lateral surface of deposited workpieces under different conditions]. *Udoskonalennia protsesiv i obladnannia obrobky tyskom u metalurhii ta mashynobuduvanni*, 157–162. [in Ukrainian].
- [17] Kukhar, V.V., Diamantopulo, K.K., Burko, V.A. (2007). Napruzhenno-deformovanyi stan ta stupin vykorystannia zapasu plastychnosti na bichnii poverkhni oblozhenykh zahotovok za riznykh umov [The stress-strain state and the degree of use of the plasticity reserve on the lateral surface of deposited workpieces under different conditions]. *Udoskonalennia protsesiv i obladnannia obrobky tyskom u metalurhii ta mashynobuduvanni*, 157–162. [in Ukrainian].
- [18] Matviichuk, V.A., Mykhalevych, V.M., Bubnovska, I.A. (2018). Otsinka deformovanosti materialu zahotovok pry valtsiuvanni za skhemamy v dva i bilshe perekhodiv [Evaluation of material deformability of blanks during rolling according to schemes of two or more transitions]. *Problemy vyshchoi matematychnoi osvity: vyklyky suchasnosti : Mizhnar. nauk.-metod. Internet-konf. Vinnytsia VNTU*, 246–249. URL : https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/pmovc/pmovc-2018_netpub.pdf. [in Ukrainian].
- [19] Matviichuk, V.A., Shtuts, A.A., Yavdyk, V.V. (2015). Rozvytok tekhnolohichnykh mozhlyvostei protsesiv shtampuvannia obkochuvanniam [Development of technological capabilities of rolling stamping processes]. *Tekhnichni nauky : Zbirnyk naukovykh prats. VNAU*, 1 (89), 27–32. [in Ukrainian].
- [20] Matviichuk, V.A., Mykhalevych, V.M., Dobraniuk, Yu.V., Bubnovska, I.A. (2016). *Sposib vyznachennia plastychnosti metaliv valtsiuvanniam tsylindrychnykh zrazkiv na klyn [The method of determining the plasticity of metals by rolling cylindrical samples on a wedge]* : pat. 109984 Ukraina : MPK G01N 3/08, № u201601270 ; zaiavl. 15.02.2016 ; opubl. 26.09.2016, Biul. № 18. [in Ukrainian].
- [21] Matviichuk, V.A., Rubanenko, O.O., Bubnovska, I.A. (2017). *Sposib vyhotovlennia kryvoliniinykh zahotovok valtsiuvanniam [The method of manufacturing curved blanks by rolling]* : pat. 120472 Ukraina : MPK G01N 3/08, B22F3/00 № u201701818 ; zaiavl. 27.02.2017 ; opubl. 10.11.2017, Biul. № 21. [in Ukrainian].
- [22] Ohorodnikov, V.A. (1989). *Deformovanist ta ruinuvannia metaliv pry plastychnii formozmini [Deformation and destruction of metals during plastic deformation]*. Kyiv : UMK VO. [in Ukrainian].



- [23] Ohorodnikov, V.A. (1983). *Otsinka deformovanosti metaliv pid chas obrobky tyskom [Estimation of deformability of metals during pressure treatment]*. Kyiv : Vyshcha shkola. [in Ukrainian].
- [24] Ohorodnikov, V.A., Hrushko, O.V., Hutsaliuk, O.V. (2015). *Istoriia deformuvannia, shcho vyznachaie zastosuvannia fenomenolohichnykh kryteriiv ruinuвання u protsesakh obrobky tyskom [The history of deformation, which determines the application of phenomenological criteria of destruction in pressure processing processes]*. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu, 1*, 67–77. [in Ukrainian].

INVESTIGATION OF STAMPING BY WRAPPING PROCESSES THROUGH MATERIAL DEFORMATION MODELING ANALYSIS

This scientific article addresses the pressing issue of material deformation modeling in the context of stamping by wrapping processes (SWP). The main challenges in the development of these processes include the likelihood of workpiece failure due to insufficient material plasticity and unfavorable stress-strain states, determined by technological process parameters. Thus, effective SWP process development requires the utilization of material deformation modeling.

The article indicates that any material deformation model in plastic deformation processes comprises three main elements:

Analytical representation of the curve or surface of boundary plastic deformations during stationary deformation: This element describes how the material's plastic deformation changes during stationary deformation with alterations in the invariant stress state indicators.

Mathematical model of the deformation path in coordinates of stress state indicators - accumulated plastic deformation. This model determines the path along which material deformation develops with changing stress state indicators and is dependent on accumulated plastic deformation.

Damage accumulation model: This element takes into account accumulated damage in the material and can be used to predict workpiece failure.

Specifically, the article analyzes the surface of boundary plastic deformations during stationary cold deformation and employs terminology to describe the dependence of accumulated plastic deformation until failure on invariant stress state indicators. The term "stationary deformation" is used to denote material deformation under unchanged values of these indicators.

Key words: *stamping, wrapping, material deformability, process modeling, analysis of technological parameters.*

F. 43. Fig. 3. Table. 1. Ref. 24.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Михалевич Володимир Маркусович – доктор технічних наук, професор, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: mykhalevych@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1557-7331>).

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

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

Mykhalevych Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3 Solnechna St., Vinnitsa, 21008, e-mail: mykhalevych@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1557-7331>)

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

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