



УДК 621.77.01

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-2-11

**ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ МАТЕРІАЛУ ПРИ ВИСАДЖУВАННІ ЕЛЕМЕНТІВ
ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ**

Михалевич Володимир Маркусович, д.т.н., професор,
Матвійчук Віктор Андрійович, д.т.н., професор,
Колісник Микола Анатолійович, аспірант.
Вінницький національний аграрний університет,

Viktor Mikhalevich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor
Volodymyr Matviychuk, Doctor of Technical Sciences, Full Professor
Mykola Kolisnyk, Postgraduate Student
Vinnytsia National Agrarian University

В статті приведені результати розробки і дослідження технологічних схем висаджування фланців на трубних (кільцевих) заготовках методом штампування обкочуванням циліндричним і конічним валками. Показано, що досягнення значних розмірів різних елементів заготовки можливе за рахунок забезпечення направленої плинності металу шляхом зміни взаємного положення валка і заготовки. Висаджування зовнішніх фланців відноситься до найбільш ефективних операцій штампування обкочуванням, оскільки дозволяє формувати широкий спектр виробів з розвинутими геометричними елементами. Для оцінки технологічних можливостей операції висаджування фланців була встановлена найбільш небезпечна з позицій руйнування зона заготовки і проведений аналіз напружено-деформованого стану матеріалу з використанням методу сіток, вимірювання твердості та мікроструктурного аналізу. За результатами досліджень схематично побудовані шляхи деформування часток матеріалу периферійної поверхні фланця в координатах «інтенсивність деформації – показник напруженого стану». Ці шляхи деформування приведені на тлі кривих граничних деформацій сталей, які побудовані за результатами одновісного стиску і кручення циліндричних зразків та з використанням апробованих апроксимацій. Побудована математична модель траєкторій деформацій, для чого в якості базисної прийнято однопараметричну функцію, що «склесна» з елементарної функції синус та дотичної до неї в деякій точці прямої. Для визначення використаного ресурсу пластичності прийнято модель підсумовування пошкоджень зі степеневою апроксимацією функції пошкоджень. В результаті нами вперше описаний загальний вираз моделі лінійного підсумовування пошкоджень для випадку параметричного завдання шляху деформування. Приведене графічне представлення за побудованою моделлю накопичення пошкоджень в матеріалі небезпечної зони фланця при висаджуванні методом ШО. На основі побудованої моделі можна проводити моделювання накопичення пошкоджень шляхом зміни значень параметрів моделі, для різних матеріалів та шляхів деформування, які, в свою чергу, залежать від відносних геометричних параметрів заготовки та її розташування по відношенню до обкочувального валка.

Ключові слова: штампування обкочуванням, циліндричний і конічний валки, висаджування фланця, напружено-деформований стан, деформовність, модель лінійного підсумовування пошкоджень.

Ф. 25. Рис. 8. Таб. 1. Літ. 12.

1. Постановка проблеми

Підвищення ефективності виробництва в металообробці забезпечується шляхом використання у якості заготівельних операцій процесів обробки металів тиском (ОМТ). Такий підхід дозволяє максимально наблизити форму і розміри заготовки до готової деталі, зробивши виробництво маловідходним і сформувавши вироби із підвищеними технічними характеристиками. Однією з найбільш розповсюджених операцій ОМТ є висаджування, при якій деформуванню осадкою підлягає частина заготовки. Висаджуванням можна отримати з високою точністю складно профільні вироби з розвинутими тонкостінними елементами. При цьому виникає необхідність досягнення значних деформацій, що обумовлює ризик руйнування матеріалу заготовок, в силу його недостатньої деформовності [1].



2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблеми виготовлення складно профільних заготовок із застосуванням операції висаджування значною мірою дозволяє вирішувати процес штампування обкочуванням (ШО) [2,3]. При цьому необхідний профіль заготовки можна отримати шляхом застосування обґрунтованих технологічних схем із використанням конічних або циліндричних валків. Плин матеріалу заготовки в процесах методом ШО достатньо ґрунтовно висвітлено в роботі [4] на прикладах прямого і зворотного витискування. Проте невирішеною залишається проблема оцінки деформовності матеріалу заготовок в процесах висаджування фланців методом ШО.

3. Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є розробка і реалізація схем висаджування зовнішніх фланців на кільцевих заготовках методом ШО і оцінка деформовності матеріалу складно профільних заготовок для запобігання браку від руйнування та забезпечення високих службових характеристик виробів.

4. Основні результати дослідження

Для реалізації поставлених завдань нами був досліджений напружено-деформований стан (НДС) матеріалу заготовок при висаджуванні зовнішніх фланців конічним валком, рис. 1а, а також за комбінованою схемою, що включає висаджування зовнішнього фланця і зворотного витискування тонкостінного елемента циліндричним валком, рис. 1б методом ШО [5, 6].

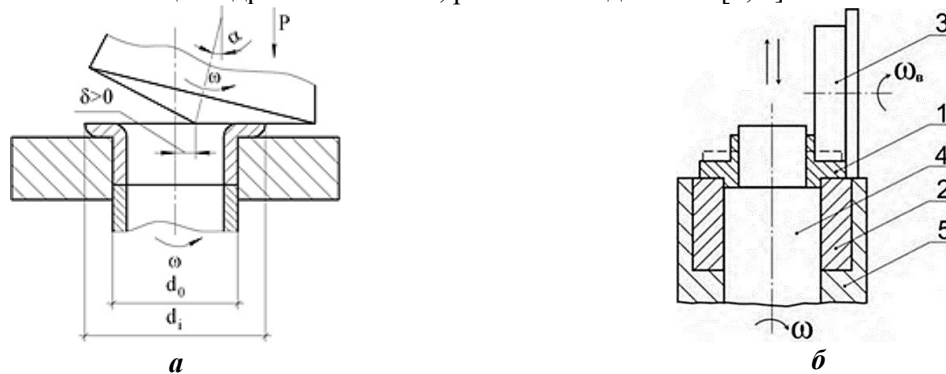


Рис. 1. Технологічні схеми формування зовнішнього фланця методом ШО:

а – висаджування фланця конічним валком зі зміщенням його вершини ($\delta > 0$);
б – комбінована схема висаджування фланця і зворотного витискування тонкостінного елемента циліндричним валком

Схема ШО, що представлена на рис. 1б, забезпечує висаджування фланця та зворотне витискування тонкостінного елемента і реалізується при додатному зміщенні вершини конічного валка [5].

На рис. 2 показано вигляд заготовок та їх поперечних перерізів при штампуванні обкочуванням, реалізованому за схемами, приведеними на рис. 1.



Рис. 2. Вигляд заготовок при штампуванні обкочуванням, реалізованому за схемами рис. 1

Слід відзначити, що форма поверхні периферії фланця і внутрішньої поверхні кільцевої заготовки (рис. 2а), а також форма периферії фланця і інтенсивність плинності матеріалу в зону тонкостінного елемента (рис. 2б) суттєво залежать від величини і 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].

На рис. 3 представлені ізолінії розподілу інтенсивності напружень $\sigma_i = const$ і деформацій $\varepsilon_i = const$, що отримані за результатами вимірювання твердості в перерізах заготовок, виготовлених за технологічними схемами, представленими на рис. 1.

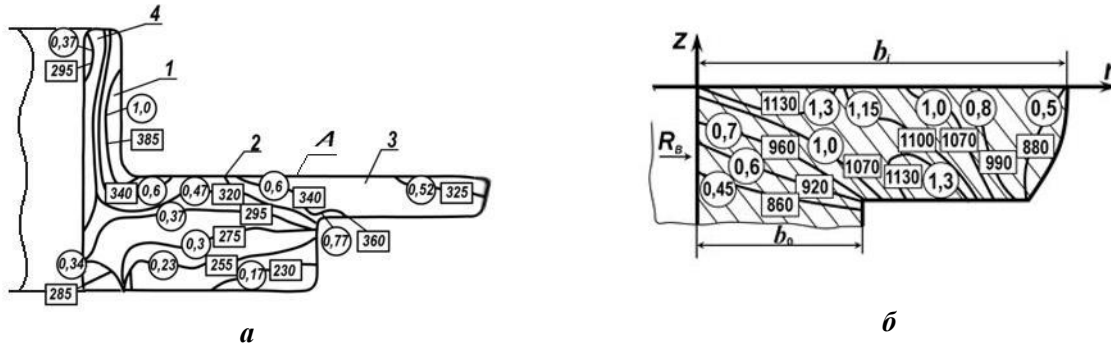


Рис. 3. Розподіл ізоліній $\varepsilon_i = const$ (O) і $\sigma_i = const$ (□) в перерізах сформованих ШО кільцевих заготовок: а) з міді М06, де 1, 2, 3, 4 – характерні зони заготовки; б) зі сталі 30ХГСА

Таким чином, в сформованому методом обкочування перерізі заготовки (рис. 3, а) можна виділити наступні характерні зони розподілу НДС:

- найбільш деформованою є зона тонкостінного елемента 1, яка формується у результаті плину металу із зони 2. Незначне подальше деформування зони 1, при збільшенні висоти тонкостінного елемента, відбувається за рахунок послідовних циклічних зсувів в осьовому напрямі, обумовлених особливостями локального навантаження при обкочуванні, та посиленні опору плину металу в зазор між валком і оправкою;
- зона 2, де найбільша степінь деформації спостерігається на контакті з валком (поверхня А), яка поступово зменщується в міру віддалення від контактної поверхні. Метал при цьому із зони 2 поступає в зони 1 і 3, а інтенсивність його плину у тому чи іншому напрямі залежить від взаємного розташування валка і заготовки;
- зона 3 - фланцева частина заготовки, є зоною відносно рівномірної деформації. Найбільш небезпечною з позицій деформовності (руйнування) є периферійна частина фланця, а саме, його вільна поверхня.

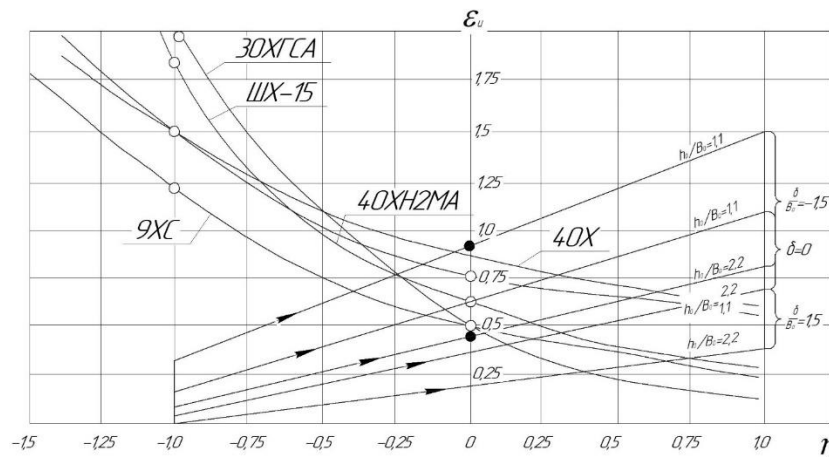


Рис. 4. Криві граничних деформацій сталей —○— і шляхи деформування —→— вільної поверхні периферійної частини фланця при висаджуванні методом ШО (h_0, b_0 – вихідна під обкочування висота і товщина стінки трубної заготовки, δ – величина зміщення вершини конічного валка від осі заготовки (див. рис. 1,а))

При висаджуванні фланця за схемою 1а найбільш жорстка схема напруженого стану також має місце на периферійній, вільній від контакту з інструментом, випуклій поверхні. Тому оцінку



деформовності матеріалу заготовки, для визначення гранично досяжної інтенсивності деформацій ε , або величини використаного ресурсу пластичності ψ_B , слід проводити саме для цієї зони.

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

На рис. 4 представлені криві граничних деформацій сталей і шляхи деформування часток металу вільної поверхні фланця при його висаджуванні, у залежності від параметрів процесу ШО.

Шляхи (траєкторії) деформування на рис. 4 показані в певній мірі 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:

$$\varepsilon_i = f'(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1) + f(\eta_1) . \quad (1)$$

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

$$\varepsilon_i = \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1) . \quad (2)$$

Отже, базисна функція набуває вигляду:

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \sin(\eta), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1), & \eta > \eta_1 \end{cases} . \quad (3)$$

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 (3) за різних значень η_1 наведено на рис. 5.

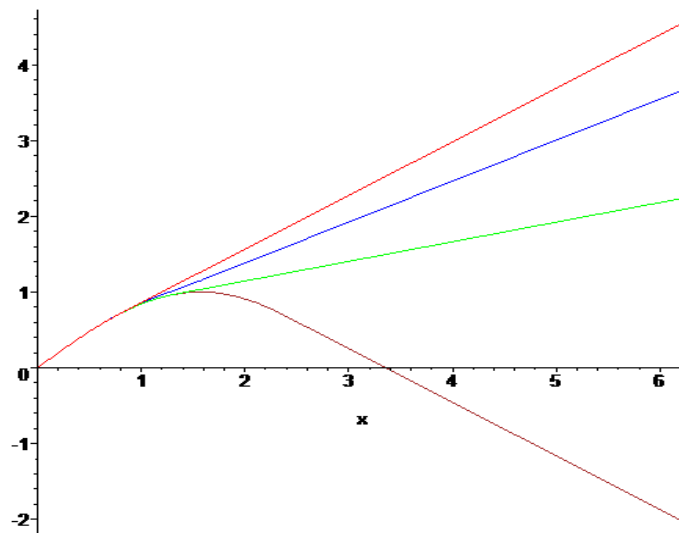
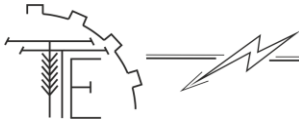


Рис. 5. Графіки математичної моделі траєкторій деформування (3) за різних значень $\eta_1 = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{12}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{3\pi}{4}$

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. 5, 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:

$$\begin{cases} x = x' \cdot \cos(\alpha) + y' \cdot \sin(\alpha) \\ y = -x' \cdot \sin(\alpha) + y' \cdot \cos(\alpha) \end{cases} , \quad (4)$$



$$\begin{cases} x' = x \cdot \cos(\alpha) - y \cdot \sin(\alpha) \\ y' = x \cdot \sin(\alpha) + y \cdot \cos(\alpha) \end{cases} \quad (5)$$

Знайдемо координати $(\eta'_i, \varepsilon'_{i1})$ точки $(\eta_i, \sin(\eta_i))$ в нових осях координат (η', ε'_i) при повороті кривої (3) відносно початку координат на кут α проти годинникової стрілки. Для цього використовуватимемо співвідношення (5):

$$\begin{cases} \eta'_i = \eta_i \cdot \cos(\alpha) - \sin(\eta_i) \cdot \sin(\alpha) \\ \varepsilon'_{i1} = \eta_i \cdot \sin(\alpha) + \sin(\eta_i) \cdot \cos(\alpha) \end{cases} \quad (6)$$

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

$$\begin{cases} \eta'_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta_i - \sin(\eta_i)) \\ \varepsilon'_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta_i + \sin(\eta_i)) \end{cases} \quad (7)$$

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_i	$\frac{\pi}{4} \approx 0,79$	$\frac{\pi}{3} \approx 1,1$	$\frac{\pi}{2} \approx 1,57$	$\frac{3\pi}{4} \approx 2,36$
$\sin(\eta_i)$	$\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,71$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,87$	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 (3), з урахуванням формул перетворення (5), набудатиме такого виду:

$$\begin{cases} \eta' = \eta \cdot \cos(\alpha) - \varepsilon_i(\eta) \cdot \sin(\alpha) \\ \varepsilon'_i = \eta \cdot \sin(\alpha) + \varepsilon_i(\eta) \cdot \cos(\alpha) \end{cases} \quad (8)$$

Перепишемо останню систему рівнянь з урахуванням вигляду базисної функції (3):

$$\begin{cases} \eta' = \begin{cases} \eta \cdot \cos(\alpha) - \sin(\eta) \cdot \sin(\alpha), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \cos(\alpha) - [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \sin(\alpha), & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i = \begin{cases} \eta \cdot \sin(\alpha) + \sin(\eta) \cdot \cos(\alpha), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \sin(\alpha) + [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \cos(\alpha), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

При $\alpha = \frac{\pi}{4}$ на основі (9) матимемо:

$$\begin{cases} \eta' = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{cases} \eta + \sin(\eta), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1), & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{cases} -\eta + \sin(\eta), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ -\eta + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$



На рис. 6 приведено графіки математичної моделі траєкторій деформування (3) за різних значень $\eta_1 = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{12}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{3\pi}{4}$

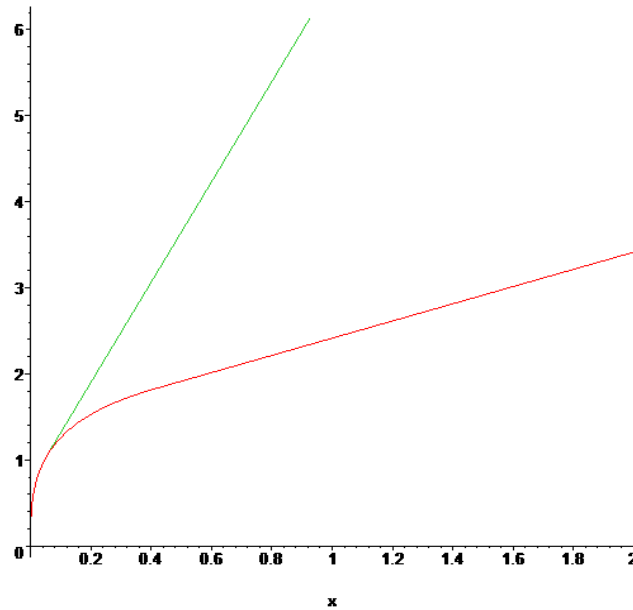


Рис. 6. Графіки математичної моделі траєкторій деформування (3) за різних значень $\eta_1 = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{12}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{3\pi}{4}$

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

$$\varepsilon_i(\eta = -1) = 0, \quad (11)$$

Отримаємо:

$$\begin{cases} \eta' = \begin{cases} \eta \cdot \cos(\alpha) - \sin(\eta) \cdot \sin(\alpha) - 1, & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \cos(\alpha) - [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \sin(\alpha) - 1, & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i = \begin{cases} \eta \cdot \sin(\alpha) + \sin(\eta) \cdot \cos(\alpha), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \sin(\alpha) + [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \cos(\alpha), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

Графіки функцій, що описуються отриманим рівнянням за різних значень η_1 наведено на рис. 7.

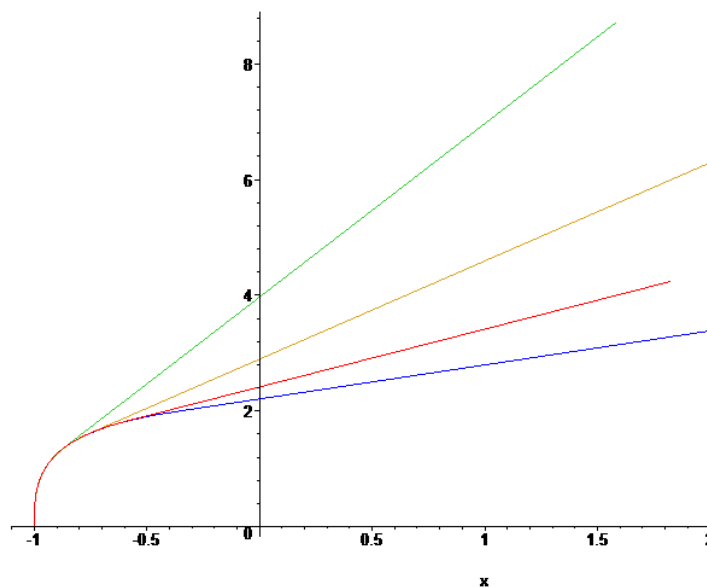
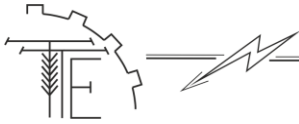


Рис. 7. Графіки математичної моделі траєкторій деформування (12) за різних значень $\eta_1 = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{12}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{3\pi}{4}$



Узагальнимо останню апроксимацію шляху деформування з метою описання довільного діапазону зміни накопиченої пластичної деформації:

$$\begin{cases} \eta' = \begin{cases} \eta \cdot \cos(\alpha) - \sin(\eta) \cdot \sin(\alpha) - 1, & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \cos(\alpha) - [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \sin(\alpha) - 1, & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i = b \cdot \begin{cases} \eta \cdot \sin(\alpha) + \sin(\eta) \cdot \cos(\alpha), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \sin(\alpha) + [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \cos(\alpha), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

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

Отже, на базі однопараметричної сплайн-подібної функції ми побудували трипараметричну модель траєкторії деформацій, що задана параметрично.

В цій праці використовуватимемо окремих, спрощений варіант попереднього співвідношення при $\alpha = \frac{\pi}{4}$:

$$\begin{cases} \eta'(\eta) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta - \sin(\eta)) - 1, & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta - \sin(\eta_1) - \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)) - 1, & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i(\eta) = b \cdot \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta + \sin(\eta)), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

Надалі використовуватимемо модель підсумовування пошкоджень зі степеневу апроксимацією функції пошкоджень:

$$\psi(\bar{\varepsilon}_i) = \int_0^{\bar{\varepsilon}_i} \frac{n \cdot \varepsilon_i^{n-1}}{[\varepsilon_{*s}(\eta(\varepsilon_i))]^n} \cdot d\varepsilon_i \leq 1, \quad \bar{\varepsilon}_i \leq \varepsilon_*, \quad (15)$$

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

Якщо $n=1$ – нелінійна модель (15) вироджується в модель, що відображує лінійний принцип підсумовування пошкоджень:

$$\psi(\bar{\varepsilon}_i) = \int_0^{\bar{\varepsilon}_i} \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_{*s}[\eta(\varepsilon_i)]} \leq 1, \quad \bar{\varepsilon}_i \leq \varepsilon_*, \quad (16)$$

За умови $n = 1 + 0.2 \cdot \arctg\left(\frac{d\eta}{d\varepsilon_i}\right)$ – нелінійна модель (15) стає тотожною критерію В. Огороднікова [1].

У випадку параметричного рівняння шляху деформування:

$$\begin{cases} \eta = \varphi(t) \\ \varepsilon_i = \omega(t) \end{cases} \quad (17)$$

Лінійний принцип підсумовування пошкоджень (16) набуває вигляду:

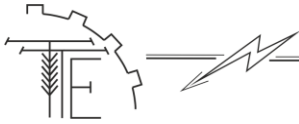
$$\psi(\bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \frac{\omega'(t) \cdot dt}{\varepsilon_{*s}[\eta(t)]} \leq 1, \quad \bar{t}_i \leq t_*, \quad \omega(t_*) = \varepsilon_* \quad (18)$$

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:

$$\varepsilon_{*s}(\eta) = \varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{\eta}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{\eta^2}{2}} \quad (19)$$

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



$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(t) = \begin{cases} y_1(t), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ y_2(t), & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon_{*s}(t) = \varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{y_1(t)}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{y_1^2(t)}{2}}, & 0 \leq t \leq \eta_1, \\ \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{y_2(t)}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{y_2^2(t)}{2}}, & t > \eta_1 \end{cases} \end{array} \right. \quad (20)$$

де

$$\begin{aligned} y_1(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (t - \sin(t)) - 1, \\ y_2(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (t - \sin(\eta_1) - \cos(\eta_1) \cdot (t - \eta_1)) - 1 \end{aligned} \quad (21)$$

З урахуванням (15), (17) можемо записати:

$$\omega'(t) = b \cdot \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (1 + \cos(\eta)), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (1 + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (1 - \eta_1)), & \eta > \eta_1 \end{cases} \quad (22)$$

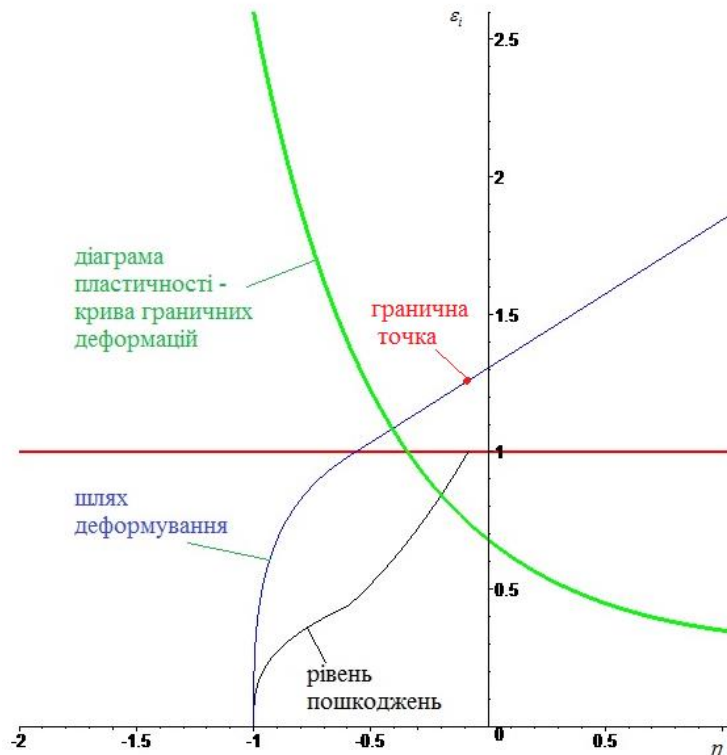
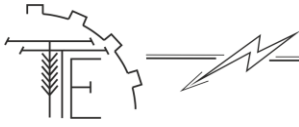


Рис. 8. Графічне представлення за побудованою моделлю накопичення пошкоджень в матеріалі небезпечної зони фланця при висаджуванні методом ШО

В результаті модель (18), що базується на лінійному принципі підсумовування пошкоджень, набуває вигляду:

$$\psi(\bar{t}) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot b \cdot \begin{cases} z_1(\bar{t}), & 0 \leq \bar{t} \leq \eta_1 \cap \bar{t} \leq t_* \\ z_1(\eta_1) + z_2(\bar{t}), & \bar{t} > \eta_1 \cap \bar{t} \leq t_* \end{cases} \quad (23)$$

де



$$z_1(\bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \frac{(1 + \cos(t)) \cdot dt}{\varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{y_1(t)}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{y_1^2(t)}{2}}}, \quad (24)$$

$$z_2(\bar{t}) = \int_{\eta_1}^{\bar{t}} \frac{(1 + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1)) \cdot (1 - \eta_1) \cdot dt}{\varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{y_2(t)}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{y_2^2(t)}{2}}}, \quad (25)$$

Результати розрахунків накопичення пошкоджень в матеріалі заготовки при ШО за побудованою моделлю наведено на рис. 8.

5. Висновки

Проведена оцінка технологічних можливостей операції висаджування зовнішніх фланців методом штампування обкочуванням. Побудована трипараметрична модель траєкторій деформацій, що базується на однопараметричній сплайн-подібній функції, склеєної з елементарної функції синус та дотичної до неї в деякій точці. Для визначення використаного ресурсу пластичності було прийнято модель підсумовування пошкоджень зі степеневою апроксимацією функції пошкоджень.

Вперше описаний загальний вираз моделі лінійного підсумовування пошкоджень для випадку параметричного завдання шляху деформування η - ε_i .

Використовуючи розроблену модель підсумовування пошкоджень можна проводити моделювання шляхом зміни значень параметрів моделі для різних матеріалів та шляхів деформування, визначаючи таким чином величину використаного ресурсу пластичності або граничні до руйнування деформації.

Список використаних джерел

1. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа. 1983. С. 175.
2. Матвійчук В. А., Алиев И. С. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов : монография. Краматорск: ДГМА. 2009. 268 с.
3. Гожій С. П., Кривда Л. Т. Штампування обкочуванням як засіб ресурсозбереження. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2006. № 2(46). С. 55–60.
4. Красівський В. О., Матвійчук В. А., Михалевич В. М. Вплив технологічних параметрів на кінематику холодного торцевого розкочування. *В зб.: Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні*. Краматорськ – Слов'янськ: ДДМА. 2003. С. 359–363.
5. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Колісник М. А. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом штампування обкочуванням. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 1(104). С. 81–91.
6. Матвійчук В. А., Колісник М. А., Штуть А. А. Дослідження напружено-деформовного стану матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом штампування обкочування. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. № 3 (102). С. 77–84.
7. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень. Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця». 1998. С. 195.
8. Shtuts A., Kolisnyk M., Yavdyk V. Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces formation. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2018. Vol. 20. № 1. P. 19–25.
9. Gundebommu S. L., Matvijchuk V., Rubanenko O., Branitskiy Yu. Justification and development of methods building curves boundary deformation of metals. *Materials Today: Proceedings*, 2021. 38. P. 3337–3344.
10. Viktor Matvijchuk, Andrii Shtuts, Mykola Kolisnyk, Ihor Kupchuk, Iryna Derevenko. Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*. 2022. №1 (66). P. 51–58.



11. 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. Series I: Engineering Sciences*. 2021. Vol. 14 (63), № 2. P. 1–13.
12. Карнаух С. Г., Алієв І. С., Матвійчук В. А., Таган Л. В. Розробка штампів з диференційним затиском для різання заготовок під точне штампування. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. №4 (115). С. 66–74.

References

- [1] Ogorodnikov, V.A. (1983). *Estimation of deformability of metals during pressure treatment*. Kyiv: Higher school. [in Ukrainian].
- [2] Matviychuk, V.A., Aliev, I.S. (2009). *Improvement of processes of local rotational processing by pressure on the basis of the analysis of deformability of metals : monograph*. Kramatorsk: DGMA. [in Ukrainian].
- [3] Gozhiy, S.P., Krivda, L.T. (2006). Stamping by rolling as a means of resource conservation. *Scientific news of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, 2(46), 55–60. [in Ukrainian].
- [4] Kraievskiy, V. O., Matviychuk, V. A., Mykhalevych, V. M. (2003). Vplyv tekhnolohichnykh parametriv na kinematyku kholodnoho tortsevoho rozkochuvannia. *Udoskonalennia protsesiv ta obladnannia obrobky tyskom v mashynobuduvanni i metalurhii*. Kramatorsk - Sloviansk. 359–363. [in Ukrainian].
- [5] Matviychuk, V.A., Mikhalevich, V.M., Kolisnyk, M.A. (2022). Estimation of deformability of material of preparations at direct and return extrusion by a method of stamping by rolling. *Vibrations in engineering and technology*, 1 (104), 81–91. [in Ukrainian].
- [6] Matviychuk, V.A., Kolisnyk, M.A., Shtuts, A.A. (2018). Investigation of the stress-strain state of the workpiece material during direct extrusion by rolling stamping. *Engineering, energy, transport of agro-industrial complex*, 3 (102), 77–84. [in Ukrainian].
- [7] Mikhalevich, V.M. (1998). *Tensor models of damage accumulation*. Vinnytsia: "UNIVERSUM - Vinnytsia". [in Ukrainian].
- [8] Shtuts, A., Kolisnyk, M., Yavdyk, V. (2018). Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces formation. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 20(1), 19–25. [in English].
- [9] Gundebommu, L., Matvijchuk, V., Rubanenko, O., Branitskiy, Yu. (2021). Justification and development of methods building curves boundary deformation of metals. *Materials Today: Proceedings*, 38, 3337–3344. [in English].
- [10] Matvijchuk Viktor, Shtuts Andrii, Kolisnyk Mykola, Kupchuk Ihor, Derevenko Iryna (2022). Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*, 1 (66), 51–58. [in English].
- [11] 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. Series I: Engineering Sciences*, 14 (63), 2, 1–13. [in English].
- [12] Kamaukh, S.G., Aliyev, I.S., Matviychuk, V.A., Tagan, L.V. (2021). Development of dies with a differential clamp for cutting workpieces for precision stamping. *Engineering, energy, transport of agro-industrial complex*, 4 (115), 66–74. [in Ukrainian].

EVALUATION OF DEFORMABILITY OF MATERIAL DURING PLANTING OF ELEMENTS OF PREPARATIONS BY ROLLING STAMPING METHOD

The article presents the results of development and research of technological schemes of planting flanges on tubular (ring) workpieces by stamping by rolling cylindrical and conical rolls. It is shown that the achievement of significant dimensions of the various elements of the workpiece is possible by providing a directed flow of metal by changing the relative position of the roll and the workpiece. Planting of external flanges is one of the most effective operations of stamping by rolling, as it allows you to form a wide range of products with advanced geometric elements. To assess the technological capabilities of the flange landing operation, the most dangerous from the destruction positions of the workpiece zone was identified and the analysis of the stress-strain state of the material using the method of grids, hardness measurement and microstructural analysis. According to the results of the research, the ways of deformation of the particles of the material of the peripheral surface of the flange in the coordinates "intensity of deformations - an indicator of the stress state" are schematically constructed. These deformation paths are given against the background of curves of ultimate deformations of steels, which are built on the results of uniaxial compression and torsion



of cylindrical specimens and using tested approximations. A mathematical model of deformation trajectories is constructed, for which a one-parameter function is taken as a basis, which is "glued" from the elementary function of the sine and tangent to it at some point in the line. To determine the used plasticity resource, a damage summation model with a power approximation of the damage function was adopted. As a result, we have for the first time described the general expression of the linear damage summation model for the case of the parametric deformation path problem. The graphical representation on the constructed model of accumulation of damages in material of a dangerous zone of a flange at landing by a method of SHO is resulted. Based on the constructed model, it is possible to model the accumulation of damage by changing the values of the model parameters for different materials and deformation paths, which, in turn, depend on the relative geometric parameters of the workpiece and its location relative to the rolling roll.

Key words: rolling stamping, cylindrical and conical rolls, flange landing, stress-strain state, deformability, model of linear summation of damages.

F. 25. Fig. 8. Table. 1. Ref. 12.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Матвійчук Віктор Андрійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: vamatv50@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7837-5174>).

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

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>).

Viktor Matviychuk – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3 Solnechna St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: vamatv50@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7837-5174>).

Volodymyr Mikhalevich – 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>).

Mykola Kolisnyk – 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>).