**Колісник М.А.**

д.ф., ст. викладач

**Вінницький національний
аграрний університет****Kolisnyk M.**

Ph.D., Senior Lecturer

**Vinnytsia National Agrarian
University****УДК 621.771.016.2****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-10****ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ
ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ У
ХОЛОДНОМУ СТАНІ З
УРАХУВАННЯМ НАПРУЖЕНО-
ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
МАТЕРІАЛУ**

У даній роботі розглядається процес штампування обкочуванням у холодному стані як один із прогресивних і ефективних методів обробки металів тиском, що забезпечує не лише високу точність, але й відмінну якість поверхні готових виробів. Цей метод широко використовується в сучасному виробництві завдяки своїй здатності формувати складні просторові геометрії без значного зниження міцнісних характеристик матеріалу. Особлива увага в дослідженні приділяється аналізу напружено-деформованого стану матеріалу під час локалізованої пластичної деформації, яка виникає в зоні безпосереднього контакту між інструментом та заготовкою. В таких умовах виникають складні градієнти напружень і деформацій, що істотно впливають на кінцеві характеристики деталі.

У роботі докладно описано методику розрахунку основних показників напруженого стану матеріалу, зокрема гідростатичного тиску, еквівалентних напружень, інтенсивності деформацій та інших величин, які дозволяють визначити найбільш напружені ділянки заготовки. Розглянуто вплив цих показників на граничні значення деформацій, які можуть призводити до зародження мікротріщин, втрати пластичності або руйнування виробу в процесі формування. Окрему увагу приділено дослідженню параметрів процесу, таких як швидкість обкочування, температура середовища, геометрія інструмента та механічні властивості матеріалу. Проведено розрахунок і оцінку енерговитрат процесу, що дозволяє виявити найбільш раціональні шляхи зменшення споживаної енергії при одночасному підвищенні ефективності технології та ресурсу матеріалу.

Результати дають змогу глибше зрозуміти фізичні та механічні механізми пластичного деформування в умовах холодної обробки тиском. Вони можуть бути використані як база для подальшої оптимізації конструкції інструментів, розробки ефективних режимів деформування, а також прогнозування довговічності деталей і вузлів, що виготовляються із застосуванням даного методу в таких галузях, як машинобудування, авіаційна, автомобільна та оборонна промисловість, де до якості деформованих деталей висуваються особливо високі вимоги, а надійність та точність виконання деталей є критичними показниками.

Ключові слова: штампування обкочуванням, локалізоване пластичне деформування, напружено-деформований стан, обробка тиском, граничні деформації, показник напруженого стану, пластичність матеріалу.

Постановка проблеми. У сучасному виробництві спостерігається постійна потреба у підвищенні ефективності технологічних процесів обробки металів тиском, зокрема штампування. Традиційні методи штампування характеризуються значними витратами енергії та потребують використання потужного технологічного обладнання через великі зусилля деформування [1]. Це обмежує їх застосування в умовах обмежених ресурсів, знижує економічну доцільність процесу та ускладнює інтеграцію у високоточні або енергоощадні виробничі системи.

У зв'язку з цим виникає необхідність у розробці нових підходів до штампування, які б дозволяли зменшити навантаження на обладнання, знизити енерговитрати та забезпечити високу якість обробки. Одним із перспективних напрямів є метод локального деформування, унікальність якого полягає в можливості реалізувати більшість схем традиційного штампування з локалізацією зони деформації [2]. Це створює сприятливі умови контакту інструмента із заготовкою, що, своєю чергою, забезпечує істотне зниження зусиль деформування та необхідної потужності обладнання.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних дослідженнях з обробки металів тиском значну увагу приділено розвитку технологій штампування обкочуванням (ШО) як перспективного методу локалізованого пластичного деформування. Загальні уявлення про кінематику процесу ШО сформовані на основі численних експериментальних і чисельно-аналітичних досліджень, в яких основну увагу зосереджено на взаємодії інструменту із заготовкою рис. 1.

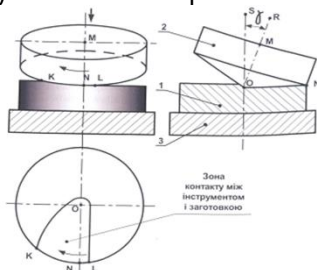


Рис. 1. Загальна схема штампування обкочуванням

У типових моделях процесу, зокрема при осаджуванні циліндричних заготовок, деформація реалізується між активним обертовим інструментом (валком) з кінчною робочою поверхнею та нерухомим інструментом із плоскою деформуючою поверхнею. Рух валка відбувається навколо осі, при цьому його траєкторія визначається просторовим положенням осі обертання відносно заготовки. Найбільш поширеним типом руху, особливо при

формуванні деталей типу «диск», є круговий обертальний рух валка з фіксованим кутом нахилу до центральної осі.

Водночас для більш складних деталей із кількома осями симетрії дослідники пропонують модифіковані кінематичні схеми з використанням поступової зміни кута нахилу валка, що забезпечує спіралеподібну траєкторію руху, або покрокові коливальні (планетарні) рухи, характерні для формування деталей типу «зірочка» або «хрестовина». За цих умов контактна зона між інструментом і заготовкою суттєво зменшується, що впливає на характер деформації та формування кінцевої геометрії виробу [3].

Здатність методу ШО забезпечувати виконання широкого кола операцій як об'ємного, так і листового штампування (рис. 2).

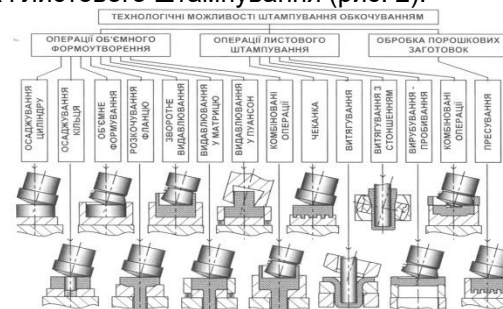


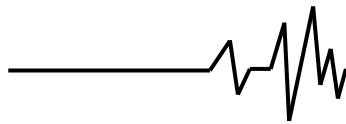
Рис. 2. Технологічні операції штампування обкочуванням

Серед конструктивних особливостей виробів, виготовлення яких доцільно здійснювати методом штампування обкочуванням (рис. 3), варто виокремити низку характерних рис. Найбільш ефективним цей метод є у випадку формування деталей із відносно тонкими стінками або елементами малої товщини, приклади яких було розглянуто раніше. Такі конструкції є досить поширеними у промисловості, хоча й відрізняються значною варіативністю за формою та геометрією.

З технологічного погляду, найбільш просто реалізованим на спеціалізованому обладнанні є обертальний рух валка. Саме використання цієї кінематичної схеми сприяє зниженню енерговитрат і спрощує процес виготовлення віссе-симетричних деталей.



Рис. 3. Класифікація деталей за формою, що можуть виготовлятися методом ШО ефективно



У ході дослідження процесу штампування обкочуванням суцільних циліндричних заготовок застосовується характеристика, яка визначається як відношення площі поперечного перерізу заготовки до площі проекції контактної зони на цей переріз. Аналогічний підхід може бути використаний і для опису процесу обкочування кільцевих деталей, при цьому відповідний показник визначається за схожим принципом [4]:

$$\lambda_k = \frac{\pi * (R^2 - R_B^2)}{\pi * R^2 - \pi * R_B^2} = \lambda * \frac{A^2 - 1}{A^2 - A^{0.5}} = \lambda * M, \quad (1)$$

В попередньому позначено $R / R_B = A$ і враховано, що:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi * R}{2 * \Pi}}; \quad \lambda_B = \sqrt{\frac{\pi * R_B}{2 * \Pi}}, \quad (2)$$

де Π - параметр обробки обкочуванням.

Множник $M_1 = f(A)$ в межах $1 < A < 2,2$ змінюється від 1,15 до 1,33, що дозволяє прийняти орієнтовно $M \approx 1,25$, тоді

$$\lambda_k = 1,25 * \lambda \quad (3)$$

Доцільність виготовлення деталей у холодному стані підтверджується суттєвими економічними перевагами. Зокрема, загальні витрати на гаряче штампування перевищують витрати при напівгарячому (теплому) способі приблизно у 1,5–2,5 рази, а в порівнянні з холодним штампуванням - у 2-3 рази. Крім того, при гарячому штампуванні рівень металевих відходів у середньому становить близько 20%, тоді як при напівгарячому цей показник зменшується до 6%.

Порівняльна оцінка чотирьох методів виготовлення - холодного об'ємного штампування, напівгарячого, гарячого штампування та механічної обробки різанням - демонструє наступні значення коефіцієнта використання металу (КВМ): 85%, 85%, 75...80% і 40...45% відповідно. Це свідчить про високу ефективність холодного об'ємного штампування з точки зору матеріалозбереження.

Крім того, застосування холодного об'ємного штампування дозволяє суттєво скоротити обсяги подальшої механічної обробки, оскільки в багатьох випадках деталі отримують одразу з готовими функціональними поверхнями.

Мета роботи. Дослідження процесу штампування обкочуванням як перспективного методу локалізованого пластичного деформування металів у холодному стані, що дозволяє зменшити енерговитрати, зусилля деформування та підвищити ефективність виготовлення деталей складної геометрії. Особлива увага приділяється аналізу напружено-

деформованого стану металу, визначенню граничних деформацій за різних умов навантаження, а також оцінці чутливості пластичних властивостей матеріалів до зміни показника напруженого стану з метою удосконалення технологічних процесів обробки тиском.

Виклад основного матеріалу. Серед основних чинників, що визначають поведінку металів під час холодного деформування, важливе місце займає схема напруженого стану. Саме вона суттєво впливає на рівень пластичності матеріалу в процесі обробки. Для кількісної оцінки цієї залежності використовується поняття поверхні граничних деформацій, яка описує зв'язок між пластичністю матеріалу та параметрами, що характеризують схему напруженого стану. Такий підхід дозволяє передбачати межу формоздатності металу залежно від умов навантаження.

Появою складного деформування пояснюють також підвищення пластичності в разі утворення шийки [5, 6]. При цьому встановлений приріст деформації $\square \varepsilon_*$ лінійно залежить від відношення радіуса кривизни шийки R до її діаметру $d_{ш}$, і при $R / d_{ш} \geq 0,5$ може бути описаний рівнянням:

$$\square \varepsilon_* = 0,85 - 0,57 R / d_{ш} \quad (4)$$

На рис. 4 зображений графічний вид залежності (4) збільшення міри пластичності

$\square \varepsilon_*$ від відношення радіуса кривизни шийки R до її діаметру $d_{ш}$ для різних матеріалів: ○-ВТ9, △-ВТ25, ×-ОТ4, □-ЕП517, ▽-ЕІ961, - ЕП866, ◇-ЕП718.

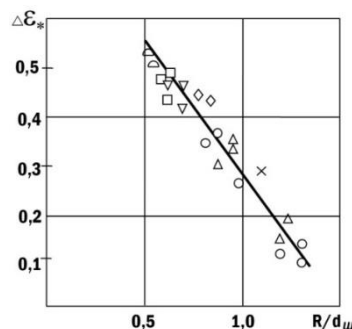
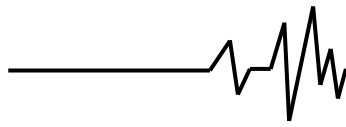


Рис. 4. Залежність збільшення міри пластичності $\square \varepsilon_*$ від відношення радіуса кривизни шийки R до її діаметру $d_{ш}$ для різних матеріалів

Під час випробування циліндричних зразків на осадження основною проблемою є усунення тертя на торцевих поверхнях зразків,



що необхідно для досягнення умов одноосного стиснення. На рис. 5 подано схему осадження суцільних циліндричних зразків, яка враховує вимоги до лінійного стиснення.

Водночас слід зазначити, що навіть за умови використання вискоефективного мастила та прокладок із м'якої фольги повною мірою забезпечити лінійне стиснення досить складно.

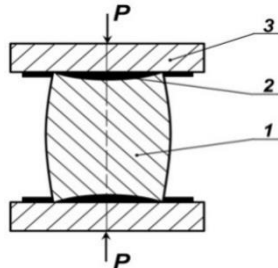


Рис. 5. Схема осадження суцільного циліндричного зразка із забезпеченням умов одноосного стиску: 1-зразок, 2-фольга, 3-інструмент

Застосування таких прийомів, як поетапне шліфування крайок лунки на торцях або вдавлення їх осадкою без фольги, з наступною поетапною осадкою із фольгою, дозволяє витримувати напружений стан близький до лінійного стиснення ($\eta = -1$) тільки до певних ступенів деформації [7]. При цьому інтенсивність деформації в момент руйнування можна визначити із співвідношення:

$$\varepsilon_* = \ln \frac{h_0}{h_*} \quad (5)$$

де h_0 і h_* - висота вихідного зразка і в момент руйнування, відповідно.

Показаний вид вихідного та перетинів циліндричних зразків, осаджених до різних ступенів за викладеною методикою, зі збереженням прямолінійності бічних поверхонь



Рис. 6. Зразки для випробування на осадження: вихідний зразок та вид перетинів циліндричних зразків, осаджених в умовах одноосного стиснення

У разі деформації зразка, що супроводжується порушенням його циліндричної форми (наприклад, утворенням бочкоподібного обрису), напружений стан відхиляється від умов ідеального одноосного стиску. Це, у свою чергу, призводить до порушення умови сталості індикатора напруженого стану, що є критичною для коректного побудування кривих граничних деформацій.

За таких умов визначення окремих точок на кривих граничних деформацій можливе за допомогою експериментально-розрахункового підходу. З цією метою для відстеження траєкторій деформування частинок матеріалу на бічну поверхню зразка, в зоні середньої висоти, наносять чотири відбитки алмазною пірамідою за методом Віккерса у чотирьох симетрично розташованих точках, що формують умовний екватор зразка рис. 7.

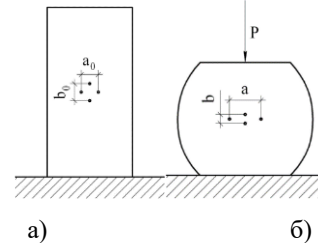


Рис. 7. Форма зразків і координатної сітки: а) до осадження, б) в процесі осадження

За результатами вимірювань визначають осьову $\varepsilon_z = -\ln \frac{a_0}{a_i}$ й окружну

деформацію $\varepsilon_\theta = \ln \frac{b_i}{b_0}$, а також значення інтенсивності деформацій і показника напруженого стану

$$\varepsilon_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_z^2 + \varepsilon_z \varepsilon_\theta + \varepsilon_\theta^2} \quad (6)$$

$$\eta = \sqrt{3} \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{\sqrt{\varepsilon_z^2 + \varepsilon_z \varepsilon_\theta + \varepsilon_\theta^2}} \quad (7)$$

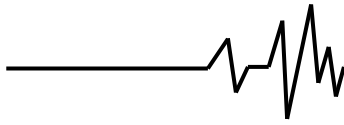
Перевагою кручення, при випробуванні металів на пластичність, є той факт, що в процесі кручення циліндричних зразків напруження $\sigma_1 = -\sigma_3$, а $\sigma_2 = 0$. Таким чином, при випробуванні витримуються постійні значення показників напруженого стану $\eta = 0$ і $\mu_\sigma = 0$, де μ_σ параметр Надаї-Лодє.

Інтенсивність деформацій на поверхні зразка визначається співвідношенням:

$$\varepsilon_u = \frac{tg \alpha}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

де α - кут зсуву, що вимірюється між вихідним і поточним положенням профільної риски на поверхні закрученого циліндричного зразка.

При визначенні граничної деформації в момент руйнування зразка, вимірювання кута α варто α проводити безпосередньо біля місця руйнування [7].



У ході досліджень встановлено, що криві граничних деформацій із точністю, достатньою для практичного використання, можуть бути побудовані на основі результатів випробувань зразків на кручення та осаджування. При цьому значення граничних деформацій у разі розтягування доцільно визначати з використанням апробованої для різних металів апроксимуючої залежності, запропонованої В. А. Огородніковим:

$$\varepsilon_* = \varepsilon_*(\eta = 0) \exp \left[-\eta \ln \frac{\varepsilon_*(\eta = -1)}{\varepsilon_*(\eta = 0)} \right] \quad (8)$$

де $\varepsilon_*(\eta = -1)$ і $\varepsilon_*(\eta = 0)$ - граничні деформації при лінійному стисненні й крученні циліндричних зразків, відповідно.

Одним із ефективних методів моделювання умов одноосного розтягування циліндричних зразків є їх вальцювання між валками зі змінним радіусом на клиноподібній поверхні. Такий підхід дає змогу створити напружено-деформований стан, близький до осового розтягу з вільною бічною поверхнею, та поступово нарощувати деформацію до моменту руйнування [8].

Як зображено на рис. 8, дослідний зразок 1 із нанесеною координатною сіткою встановлюється в тримач 3 та піддається обтисненню валками 2 в області їх найменших радіусів. Із початком обертання валків відбувається вальцювання по нахиленій (клиноподібній) траєкторії, що супроводжується зростанням ступеня деформації через поступове збільшення радіусів валків. Критерій пластичності визначається на основі деформації, зафіксованої в момент появи перших ознак руйнування на відкритій поверхні зразка.

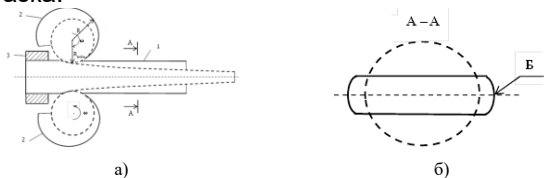


Рис. 8. Схематичне зображення процесу вальцювання на а); А-переріз деформованої заготовки; б) Б-поверхня контролю за деформаціями й руйнуванням

У випадку необхідності отримання за одне випробування двох значень пластичності металу при різних (але постійних в процесі деформування) показниках напруженого стану η здійснюють вальцювання на клин криволінійного зразка [9].

Для цього вальцювання проводять кінчними валками, радіуси яких зростають по мірі вальцювання зразка. При цьому менше

здеформована внутрішня бічна поверхня зразка матиме менше значення показника η , а більше здеформована зовнішня поверхня зразка матиме більше значення показника η рис. 9.

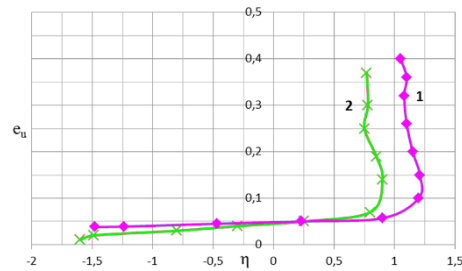
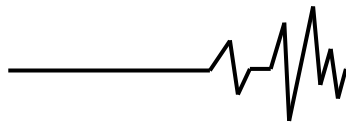


Рис. 9. Траєкторії шляхів деформування точки зовнішньої 1 та внутрішньої 2 вільних бічних поверхень заготовки

У таблиці 1 подано значення граничних деформацій металів за умов стаціонарного деформування для різних величин показника напруженого стану, а також наведено коефіцієнти, що характеризують чутливість пластичності до його змін. Ці результати базуються на даних, наведених у літературі.

У таблиці 1 представлено результати, які відображають значення граничних деформацій різних металів у процесі їх стаціонарного деформування. Розглянуто широкий діапазон значень показника напруженого стану, що дозволяє проаналізувати, як змінюється межа деформування залежно від умов навантаження. Окрім самих граничних деформацій, також наведено коефіцієнти, які описують ступінь чутливості пластичних властивостей металів до варіацій показника напруженого стану [10, 11]. Ці коефіцієнти є важливими характеристиками, оскільки дозволяють оцінити, наскільки матеріал реагує на зміну умов напруженого стану, що має суттєве значення при проектуванні технологічних процесів обробки тиском. Усі зазначені дані отримані шляхом узагальнення та аналізу наявних літературних джерел, в яких описано результати експериментальних досліджень з вивчення поведінки металів під час деформування.

Отже, наведений метод дозволяє здійснювати випробування циліндричних зразків у процесі деформування за умов сталого напруженого стану, а також дає змогу в межах одного експерименту отримати два значення пластичності для різних фіксованих значень показника напруженого стану [12].



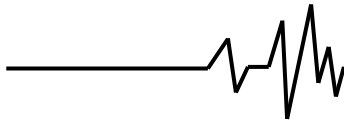
Таблиця 1. Значення граничних деформацій під час стаціонарного деформування за різних величин показника напруженого стану

№ п/п	Матеріал	Дані для побудови діаграми пластичності			Коефіцієнти чутливості пластичності для показника η	
		$\varepsilon_p(\eta_1 = 1)$	$\varepsilon_p(\eta_1 = 0)$	$\varepsilon_p(\eta_1 = -1)$	$\lambda_1 = \ln \left(\frac{\varepsilon_p(\eta_1 = 0)}{\varepsilon_p(\eta_1 = 1)} \right)$	$\lambda_2 = \ln \left(\frac{\varepsilon_p(\eta_1 = -1)}{\varepsilon_p(\eta_1 = 0)} \right)$
1	2	3	4	5	6	7
1	BT-1	0,64	1,15	2,9	0,58	0,92
2	P12	0,17	0,55	1,9	1,17	1,236
3	P6M5	0,23	0,46	0,95	0,69	0,72
4	20-A	1	1,3	1,7	0,26	0,25
5	AMГ-2	1,05	1,57	2,25	0,4	0,35
6	BT14	0,15	0,64	1,3	1,45	0,7
7	P18	0,03	0,37	1,16	2,5	1,14
8	P9	0,1	0,48	1,2	1,56	0,91
9	40ХН2МА	0,48	0,76	1,52	0,45	0,69
10	Сталь 40	0,09	0,37	∞	1,4	∞
11	OT-4	0,35	0,75	1,6	0,762	0,757
12	40X	0,08	0,86	1,5	2,37	0,556
13	ЗОХМА	0,31	0,48	2,0	0,43	1,42
14	Сталь 35	0,2	0,53	1,63	0,97	1,1
15	08КП	0,355	0,5	0,7	0,342	0,336
16	У8А	0,03	0,39	1,2	2,56	1,12
17	13М5-А	0,28	0,38	0,9	0,305	0,862
18	ХН70ВМТЮ	0,38	0,68	1,1	0,58	0,481
19	ХН77ТЮР	0,29	0,62	0,96	0,76	0,437
20	ЛС59-1	0,4	0,55	0,65	0,318	0,176
21	ШХ-15	0,2	0,52	1,8	2,6	1,24
22	Д-1	0,3	0,47	0,5	0,2	0,3
23	ЗОХГСА	0,75	1,05	1,45	0,33	0,32
24	Сталь 3	0,25	0,36	∞	0,365	∞
25	Сталь 10	0,3	0,67	2,67	0,803	1,38
26	40X13	0,35	0,84	3,3	0,875	1,37
27	AB	1,25	2,25	3,5	0,59	0,44
28	ЛС62	0,45	1,1	1,5	0,894	0,31
29	Сталь 45	0,15	0,4	1,1	0,981	1,01
30	Д16Т	0,08	0,42	0,9	1,66	0,762
31	Х18Н9Т	0,38	0,76	1,6	0,693	0,744
32	Сталь 20	0,32	0,62	1,23	0,66	0,685
33	AMГ5В	0,735	1,0	1,25	0,31	0,223
34	Д16	0,875	1,25	1,625	0,36	0,262
35	Сталь 35	0,25	0,534	1,63	0,76	1,12
36	Л62	0,4	0,59	1,75	0,39	1,09
37	У8А (2 партія)	0,255	0,39	1,2	0,425	1,12
38	Д16 (2 партія)	0,10	0,41	1,5	1,46	1,30
39	Ст20 (2 партія)	0,3	0,65	1,25	0,773	0,654
40	Ст10 (2 партія)	0,32	0,65	1,42	0,710	0,780
41	Ст38Х2МЮА	0,55	0,75	1,30	0,30	0,551
42	Ст38Х2МЮА термооброблена	0,485	0,74	1,00	0,42	0,30
43	Ст30Х3МФА	0,74	0,85	1,13	0,14	0,28
44	Ст30Х3МФА термооброблена	0,74	0,85	1,13	0,11	0,92

Висновки. Методи штампування є енергоємними та потребують значних зусиль деформування, що ускладнює їх застосування в сучасних умовах виробництва, орієнтованого на енергоефективність та високу точність. Одним із найбільш перспективних альтернативних підходів є метод штампування обкочуванням (ШО), який дозволяє локалізувати зону деформації, зменшити

навантаження на інструмент і знизити енергоспоживання.

Метод ШО відзначається широкими технологічними можливостями — він придатний як для об'ємного, так і для листового формування, особливо ефективний для виготовлення деталей складної форми з тонкостінними елементами. Дослідження показали, що застосування цього



методу в холодному стані є найбільш економічно доцільним завдяки високому коефіцієнту використання металу, низькому рівню відходів та зменшенню потреби в подальшій механічній обробці.

Особливу увагу приділено вивченню впливу напруженого стану на пластичність металів, що є критичним для оптимізації процесів деформування. За допомогою експериментальних методів (осадження, кручення, вальцювання) встановлено залежності між граничними деформаціями та параметрами напруженого стану. Це дозволяє створити надійні моделі прогнозування формоздатності матеріалів, що є необхідним для конструювання технологічних процесів обробки тиском.

Список використаних джерел

1. Matviychuk V., Kolisnyk M. Development of the combined technological process of blank stacks flanges formation by the method of stamping by rolling and rotary drawing. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 111-121. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-11

2. 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. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.84.4.168>

3. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Трач Є. А. Узагальнення експериментально-аналітичної методики аналізу процесу осадження. *Обробка матеріалів тиском*. Краматорск: ДДМА, 2014. № 1. С. 41–47.

4. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Краєвський В. О. Розробка процесів холодного торцевого розкочування із врахуванням впливу технологічних параметрів на напрям плину металу. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2015. № 2. С. 92-96.

5. Матвійчук В.А., Колісник М.А. Розробка технологічного процесу формування широких фланців на листових заготовках методом штампування обкочуванням. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 1 (112). С. 38-45. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-5

6. Матвійчук В.А., Колісник М.А., Любін М.В. Розробка і дослідження процесів штампування обкочуванням складно профільних заготовок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. № 4 (103). С. 56-63.

7. Михалевич В. М. Аналітичний опис динаміки формозміни циліндричних заготовок під час торцевого стиснення [Текст] / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ" : збірник наукових праць. Тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків : НТУ "ХПІ", 2015. № 47. С. 53–56.

8. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В.

Аналітичне представлення максимального радіуса циліндричних заготовок під час вісесиметричного осадження із бочкоутворенням. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. № 1. С. 59-66.

9. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Апроксимація залежностей між компонентами деформацій на бічній поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення. *Свідчення про реєстрацію авторського права на твір № 38309* від 11 травня 2011 р.

10. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Модель пластичного деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження. *Частина 1. Апроксимація деформацій*. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2010. №2. С. 97-102.

11. Matviychuk 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. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPme.18659>

12. Mykhalevych V.M., Kolisnyk M.A., Shtuts A.A. Study of the Stress–Strain State of the Material of the Blanks during Plastic Stamping by Rolling. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2025. vol. 47, No. 1. P. 57-81. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.47.01.0057>

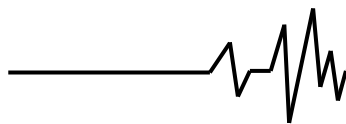
References

1. Matviychuk V., Kolisnyk M. Development of the combined technological process of blank stacks flanges formation by the method of stamping by rolling and rotary drawing. *Vibrations in Engineering and Technology*. 2021. №. 1(100). P. 111–121. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-11 [in Ukraine].

2. 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. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.84.4.168> [in Switzerland].

3. Matviychuk V.A., Mykhalevych V.M., Dobranyuk Yu.V., Trach Ye.A. Generalization of the experimental-analytical method of upsetting process analysis. *Metal Forming*. Kramatorsk: DDMA, 2014. №. 1. P. 41–47 [in Ukraine].

4. Matviychuk V.A., Mykhalevych V.M., Krayevskiy V.O. Development of cold face rolling processes considering the effect of technological parameters on metal flow direction. *Vibrations in Engineering and Technology*. 2015. №. 2. P. 92–96 [in Ukraine].



5. Matviychuk V.A., Kolisnyk M.A. Development of a technological process for forming wide flanges on sheet blanks by stamping by rolling. *Engineering, Energy, Transport of the Agro-Industrial Complex*. 2021. №. 1(112). P. 38–45. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-5 [in Ukraine].

6. Matviychuk V.A., Kolisnyk M.A., Liubin M.V. Development and study of rolling stamping processes for complex-profiled blanks. *Engineering, Energy, Transport of the Agro-Industrial Complex*. 2018. №. 4(103). P. 56–63 [in Ukraine].

7. Mykhalevych V.M., Dobranyuk Yu.V. Analytical description of the form change dynamics of cylindrical blanks during face compression. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Special Issue: New Solutions in Modern Technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. №. 47. P. 53–56 [in Ukraine].

8. Mykhalevych V.M., Dobranyuk Yu.V. Analytical representation of the maximum radius of cylindrical blanks during axisymmetric upsetting with barreling. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*. 2015. No. 1. P. 59–66 [in Ukraine].

9. Mykhalevych V.M., Dobranyuk Yu.V. Approximation of relationships between strain components on the side surface of a cylindrical specimen during face compression. Certificate of copyright registration №. 38309, May 11, 2011 [in Ukraine].

10. Mykhalevych V.M., Dobranyuk Yu.V. Model of material plastic deformation on the free surface of cylindrical specimens during axisymmetric upsetting. Part 1. Approximation of deformations. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*. 2010. №. 2. P. 97–102 [in Ukraine].

11. Matviychuk 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. Vol. 66(1). P. 51–58. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPme.18659> [in Hungary].

12. Mykhalevych V.M., Kolisnyk M.A., Shtuts A.A. Study of the Stress–Strain State of the Material of the Blanks during Plastic Stamping by Rolling. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2025. Vol. 47, №. 1. P. 57–81.

DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.47.01.0057> [in Ukraine].

STUDY OF THE COLD ROLLING STAMPING PROCESS TAKING INTO ACCOUNT THE STRESS-STRAIN STATE OF THE MATERIAL

This paper examines the process of cold rolling stamping as one of the advanced and efficient methods of metal forming under pressure, which ensures not only high precision but also excellent surface quality of finished products.

This method is widely used in modern manufacturing due to its ability to form complex spatial geometries without significantly compromising the strength properties of the material. Particular attention in the study is given to the analysis of the stress-strain state of the material during localized plastic deformation, which occurs in the zone of direct contact between the tool and the workpiece. Under such conditions, complex gradients of stress and strain arise, which have a significant impact on the final characteristics of the part.

The paper provides a detailed methodology for calculating the main indicators of the material's stress state, including hydrostatic pressure, equivalent stresses, strain intensity, and other values that help identify the most stressed areas of the workpiece. The influence of these parameters on the critical strain values is considered, as they may lead to the initiation of microcracks, loss of ductility, or failure of the product during forming. Special attention is paid to the study of process parameters such as rolling speed, ambient temperature, tool geometry, and the mechanical properties of the material. An energy consumption assessment of the process is carried out, enabling the identification of the most efficient ways to reduce energy usage while simultaneously increasing technological efficiency and material lifespan.

The results provide a deeper understanding of the physical and mechanical mechanisms of plastic deformation under cold forming conditions. They can serve as a basis for further optimization of tool design, development of effective deformation modes, and prediction of the durability of components manufactured using this method. This is particularly relevant in industries such as mechanical engineering, aerospace, automotive, and defense, where the quality of deformed parts is subject to especially high standards, and the reliability and precision of the components are critical factors.

Key words: rolling stamping, localized plastic deformation, stress-strain state, metal forming, critical strains, stress state indicator, material ductility.

Відомості про автора

Колісник Микола Анатолійович – доктор філософії з матеріалознавства, старший викладач кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: kolisnik30@gmail.com).

Kolisnyk Mykola – Doctor of Philosophy in Materials Science, Senior Lecturer Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: kolisnik30@gmail.com).