

РОЗДІЛ I МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ТИСКОМ

УДК 621.73.011.001.5

DOI: 10.37142/2076-2151/2025-1(54)5

Алієв І. С.
Сивак Р. І.
Абхарі П. Б.

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОГО КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ НА ДЕФОРМОВНІСТЬ ЗАГОТОВОК

Практичною реалізацією вимог до сучасного машинобудівного виробництва умовах високої конкуренції є застосування ресурсозберігаючих процесів. Одними із таких процесів є інноваційні методи холодного об'ємного штампування, що сприяють випуску високоякісної продукції з мінімальними затратами. Зокрема способи комбінованого видавлювання поетапним деформуванням дозволяють отримувати деталі складної конфігурації з покращеними механічними властивостями деформованого металу, високою точністю, необхідною технологічною спадковістю та підвищеними значеннями граничних розмірів. Водночас такі процеси дозволяють значно знизити силу деформування і, як наслідок, збільшити стійкість інструменту. При цьому дорогі марки сталей можна замінити на більш дешеві без погіршення службових властивостей виробів за рахунок формування сприятливої для роботи виробів макроструктури, необхідного рівня деформаційного зміцнення та пошкодженості деформованого металу. Але поетапне деформування є причиною виникнення течії металу, що характеризується немонотонною пластичною деформацією, а це значно ускладнює теоретичний розв'язок такого типу задач обробки металів тиском з точки зору розрахунку компонент тензора напружень і пошкоджень. В результаті виникає необхідність у отриманні інформації про кінематику пластичної течії металу, механічні властивості та структури функцій матеріалу, які необхідні для розрахунків напружено-деформованого стану та величини використаного ресурсу пластичності при немонотонному деформуванні в умовах об'ємного напруженого стану. На основі теоретичних та експериментальних досліджень в статті пропонується для виготовлення деталей застосовувати способи холодного комбінованого видавлювання і прослідкувати вплив параметрів деформування на деформовність заготовки. Це дозволить значно збільшити граничні розміри та покращити показники технологічної спадковості виробу. Для оцінки пластичності металу в статті пропонується комплекс обчислень, який враховує особливості протікання процесу об'ємного штампування деталей, при якому метал перебуває в умовах немонотонної пластичної деформації.

Ключові слова: комбіноване видавлювання, напруження, деформації, пластичність, деформовність, використаний ресурс пластичності.

Традиційні схеми пластичного деформування між двома інструментами: активним рухомим і нерухомим інструментами не відповідають сучасним вимогам та складним технологічним задачам. Керування властивостями, пластичною течією, технологічними факторами потребує більш складного силового та кінематичного впливу. Комбінування такими впливами, течіями, способами деформування, їх активне регулювання за часом та шляхом відкрило широкі можливості у напрямку підвищення якості продукції, отримання деталей раніше недоступних складних форм при порівняно низьких силових впливах з нових конструкційних і функціональних матеріалів [1].

У машинобудуванні все більшого поширення набувають комбіновані методи пластичної обробки. Нові способи деформування, які передбачають складне комбіноване навантаження з додатковими кінематичними і силовими впливами, з високим рівнем гідростатичного тиску, з наявністю знакозмінного деформування дають можливість формування сприятливої

для роботи виробів макроструктури, необхідної величини деформаційного зміцнення та допустимого рівня пошкодженості деформованого металу. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що при застосуванні комбінованого видавлювання сила деформування в порівнянні з традиційними способами знижується на 16–40 % [2].

На якість виробів, що виготовляються обробкою тиском, істотно впливають закономірності зміни напружено-деформованого стану заготовки в процесі об'ємного пластичного деформування. А на течію металу при деформуванні та напружено-деформований стан заготовки впливає безліч факторів, основними з яких є спосіб деформування, форма інструменту, форма заготовки, кінематичний режим, матеріал заготовки тощо [3]. Формування властивостей виробу пов'язане із зовнішніми кінематичними та силовими впливами на заготовку та залежить від переважаючої механічної схеми деформації. Додатковий кінематичний вплив може сприяти різкому поліпшенню опрацювання структури металу усунення застійних зон і зниження нерівномірності деформації [4].

Наявність немонотонного навантаження значно ускладнює теоретичний розв'язок задач обробки металів тиском. Існуючі фізичні рівняння, які використовують для розрахунку компонент тензора пошкоджень та напружень при немонотонному навантаженні потребують доопрацювання. Для достовірної оцінки величини використаного ресурсу пластичності при немонотонному деформуванні в умовах об'ємного напруженого стану необхідне врахування низки факторів, зокрема незалежно отримана інформація про кінематику пластичної течії металу, визначення відповідних механічних властивостей та структури функцій матеріалу.

Метою роботи є розробка нових, більш досконалих методів розрахунків напружено-деформованого стану та оцінки деформовності заготовок при холодному об'ємному штампуванні в умовах немонотонного навантаження для створення, розробки та удосконалення процесів обробки металів тиском.

Поетапні способи комбінованого видавлювання виділені в особливу групу. Їх можна охарактеризувати тим, що крім пуансона в штампі має бути ще одна рухома частина, або протипуансон або матриця [1]. Реалізація таких поетапних способів радіально-подовжнього видавлювання вимагає створення пристроїв зі складною кінематикою руху інструментів [2–4]. Такі процеси обробки металів тиском супроводжуються немонотонним навантаженням металу і питання здатності його до пластичного формозмінення стає надзвичайно складним. Але якщо змінювати характер навантаження шляхом створення знакозмінної деформації [5, 6], то інтенсивність пошкодження металу під час пластичної деформації може бути значно понижена.

В теорії пластичності отримати розв'язок системи диференціальних рівнянь, який задовольняв би граничним умовам, для немонотонного навантаження надзвичайно складно. Тому пропонується наступна математична модель, яка дозволяє при розрахунках напружень враховувати вплив немонотонності.

Для одержання кінематично можливого поля швидкостей для задач осесиметричної стаціонарної течії при видавлюванні [7–14] пропонується метод, який можна використати при дослідженнях усталених режимів пластичної деформації суцільних тіл.

Компоненти тензора швидкостей деформацій $\dot{\epsilon}_{ij}$ визначали із рівнянь, апроксимуючих викривлення ліній ділильної сітки в змішаних ейлерово-лагранжевих змінних [15]:

$$R = f(\psi, z), \quad (1)$$

де ψ - функція викривлення ліній ділильної сітки.

Компоненти тензора напружень σ_{ij} для осесиметричної деформації повинні задовольнити диференціальним рівнянням рівноваги [16]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0 \end{aligned}, \quad (2)$$

і граничним умовам, які приймали в інтегральній формі на границі пружної і пластичної зон G_1 на вході і G_2 на виході із матриці:

$$P_n = 2\pi \int_{G_n} r(\sigma_z v_z + \tau_{rz} v_r) dG, \quad (3)$$

де $P_n (n = 1, 2)$ – сила на границі G_n , v_z , v_r – компоненти вектора зовнішньої нормалі до G_n , або у вигляді однорідних граничних умов на вільній поверхні [17]:

$$\sigma_z v_z + \tau_{rz} v_r = 0, \quad \tau_{rz} v_z + \sigma_r v_r = 0. \quad (4)$$

Величина навантажень P_n відома із експерименту або із постановки задачі.

Для розрахунку компонент девіатора напружень використовували рівняння у вигляді

$$S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_u(e_u) \frac{e_{ij}}{\varepsilon_u} - \frac{1}{3} \int_0^{e_u} (1 - \beta(e_u^*)) \sigma_u(e_u^*) \varphi(e_u^* - e_u^0) \frac{d^2 e_{ij}}{de_u^2}(e_u^*) de_u^*. \quad (5)$$

Характеристики матеріалу $\sigma_p(e_u)$, $\beta(e_u)$ і $\varphi(e_u - e_u^0)$ визначали експериментально.

Модель накопичення пошкоджень при немонотонному навантаженні ґрунтується на гіпотезі, що пошкодження описуються тензором другого рангу. Компоненти цього тензора визначаються механікою протікання пластичної деформації в конкретному технологічному процесі, а також матеріальними функціями, які описують фізико-механічні властивості матеріалу.

Введемо, додержуючись [17] тензор пошкоджень ψ_{ij} , компоненти якого визначали наступним чином:

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u^*} F(e_u, \eta, \mu_\sigma) \beta_{ij} de_u, \quad (6)$$

де $F(e_u, \eta, \mu_\sigma)$ – позитивна функція, яка характеризує чутливість матеріалу до схеми напруженого стану.

Компоненти тензора β_{ij} дорівнюють:

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u}. \quad (7)$$

З співвідношень теорії течії:

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \frac{de_u}{\sigma_u} S_{ij} \quad (8)$$

та із [18]

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{S_{ij}}{\sigma_u} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{S_{ij}}{\sqrt{\frac{3}{2}} \tau} = S_{ij}^0. \quad (9)$$

Вважається, що руйнування настає при умові, коли якась функція інваріантів тензора ψ_{ij} досягає певного значення. Перший інваріант цього тензора дорівнює нулю. Нехтуючи впливом третього інваріанту, запишемо умову руйнування у вигляді

$$\psi_{ij} \psi = const. \quad (10)$$

Для визначення кінематичних характеристик деформування за основу прийняті ейлерів та лагранжів тензори деформації [19]:

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\delta_{ij} - \frac{\partial a_k}{\partial x_i} \frac{\partial a_k}{\partial x_j} \right), \quad L_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial x_m}{\partial a_i} \frac{\partial x_m}{\partial a_j} - \delta_{ij} \right) \quad (11)$$

де a – координати частки до деформування,

x – координати частки в процесі деформування.

А також співвідношення для визначення швидкості деформації

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

де v – складові швидкості руху часток тіла, що деформується.

Компоненти девіатора напружень обчислимо по формулі (5), а напруження при осесиметричній деформації визначимо шляхом інтегрування диференціальних рівнянь рівноваги (2) за допомогою (3).

При отриманні тензорної моделі накопичення пошкоджень виконували наступні перетворення. Із співвідношень теорії течії (8) витікає, що:

$$\frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u} = \sqrt{\frac{3}{2}} \beta_{ij} = \frac{3}{2} \frac{S_{ij}}{\sigma_u}. \quad (13)$$

Підінтегральні функції в (6) можна нормувати таким чином, щоб замість умови (10) задовольнити прийнятій в феноменологічній теорії умові [18]:

$$\psi_{ij} \psi_{ij} = 1. \quad (14)$$

В якості прикладу застосуємо запропонований підхід та послідовність обчислень для оцінки пластичності металу деталі з фланцем, що отримується шляхом комбінованого двохетапного видавлювання. Задачею даного дослідження було виявлення впливу відносної величини, що характеризує заокруглення матриці, на деформовність заготовки. Принципова схема процесу радіального видавлювання з подальшою осадкою циліндричного зразка із сталі 10 представлена на рис. 1, а.

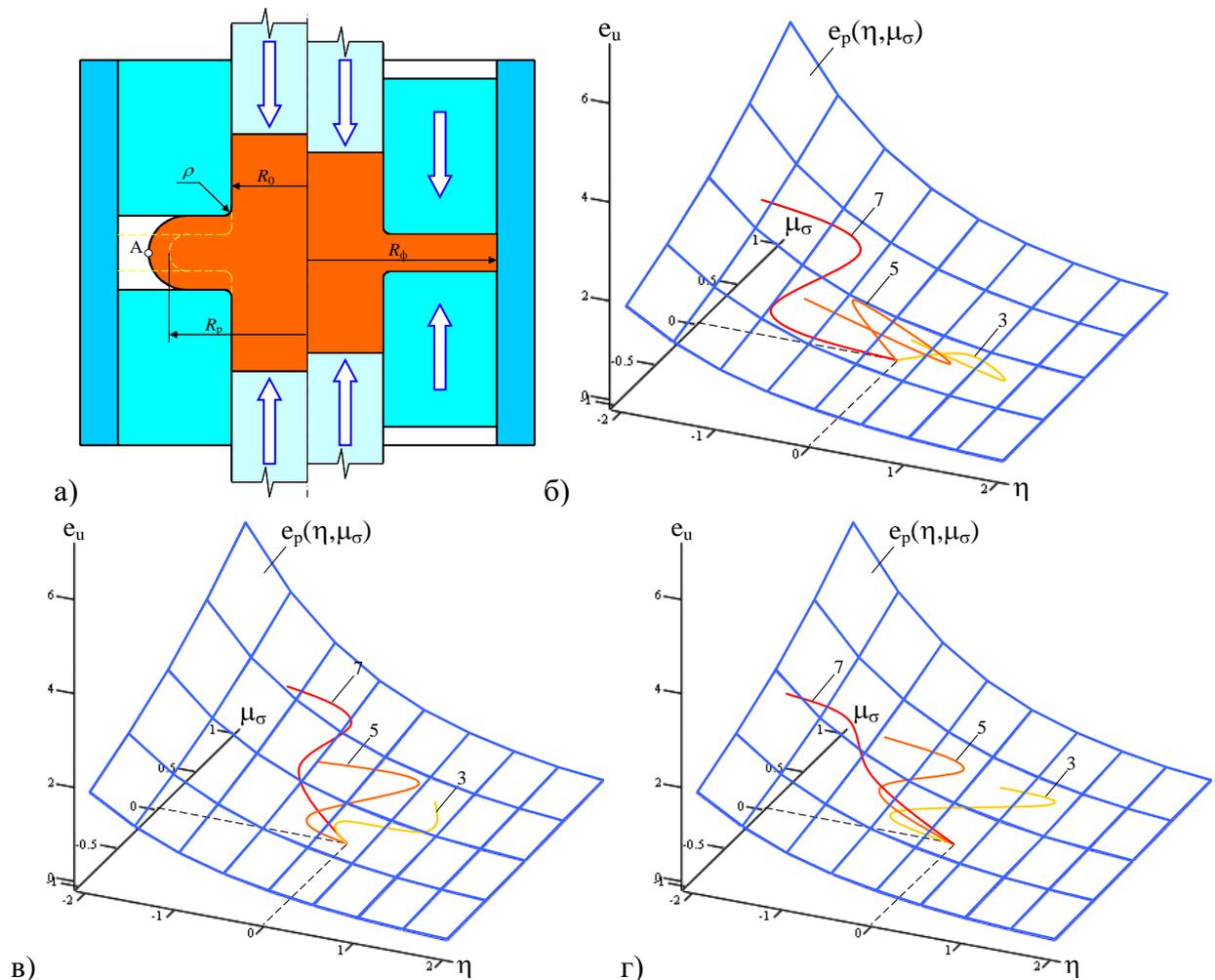


Рис. 1. Принципова схема процесу радіального видавлювання з подальшою контурною осадкою (а), поверхня граничних деформацій $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ для сталі 10 і шляхи деформування часток матеріалу в характерних точках при $\frac{\rho}{d_0} = 0.05$ (б); $\frac{\rho}{d_0} = 0.10$ (в); $\frac{\rho}{d_0} = 0.15$ (г)

Поверхню граничних деформацій для сталі 10 апроксимуємо залежністю [19, 20]:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 0,68 \exp(0,43 \mu_\sigma - 0,71 \eta).$$

Поверхню граничних деформацій сталі 10 та шляхи деформування часток матеріалу в характерних точках наведено на рис. 1, б, в, г. Точка 7 відповідає точці А, яка була використана при розрахунку напружень. Із аналізу характеру цих траєкторій і їх розташування у вибраному просторі витікає, що із збільшенням радіуса заокруглення матриці ρ траєкторії зміщуються в область більш м'яких схем навантаження, тобто умови пластичної деформації стають більш сприятливими з точки зору деформовності. Досвід отримання деталей радіальним видавлюванням свідчить, що насамперед макротріщина виникає в точці вільної поверхні фланцю на екваторіальній осі симетрії. Контурна осадка зменшує ймовірність руйнування в цьому місці деталі і дозволяє отримати фланець діаметр якого значно перевищує діаметри фланців отриманих традиційними способами видавлювання. Крім того, під час контакту вільної поверхні фланця і матриці також виникає область де метал перебуває в умовах сприятливої схеми напруженого стану. Це додатково зменшує ймовірність руйнування у небезпечній зоні деталі і надає виробу необхідну технологічну спадковість.

Результати розрахунків ψ приведені в табл. 1 для діаметру фланцю $d_{max} = 48$ мм при $d_0 = 20$ мм в залежності від радіуса заокруглення матриці

Таблиця 1

Результати розрахунків величини використаного ресурсу пластичності

Відношення радіусу заокруглення матриці до початкового діаметру заготовки, ρ/d_0	Точка	Величина використаного ресурсу пластичності, ψ
0,05	3	0,48
	5	0,74
	7	0,88
0,10	3	0,39
	5	0,58
	7	0,64
0,15	3	0,36
	5	0,44
	7	0,56

З аналізу результатів, наведених у табл. 1 витікає, що збільшення відносної величини радіуса заокруглення характеризується зменшенням величини використаного ресурсу пластичності ψ в характерних точках заготовки. Деформування вільної поверхні фланцю під час контакту з матрицею також сприятливо впливає на величину використаного ресурсу пластичності в небезпечній, з точки зору руйнування, крайній точці на горизонтальній осі симетрії заготовки. Це говорить про зменшення інтенсивності накопичення пошкоджень в цій області фланцю, за рахунок поетапного деформування.

В якості наступного прикладу розглянемо процес комбінованого поздовжнього зворотно-прямого видавлювання, в якому з метою покращення якості виробу, за рахунок забезпечення проробки металу в його донній частині, пропонується здійснювати деформування в два етапи. На першому етапі одночасно виконують зворотне видавлювання стінки стакану та пряме видавлювання з утворенням технологічного відростка в донній частині стакану, а на другому етапі відбувається витіснення металу з технологічного відростка назад у донну частину (рис. 2, а, б). В даному випадку досліджувався вплив висоти технологічного відростка на деформовність заготовки. Результати розрахунків напружень і деформацій використовували для побудови шляхів деформування $\eta(e_u)$, $\mu_\sigma(e_u)$ (рис. 2, в, г), а залежність пластичності від схеми напруженого стану задавали поверхнею граничних деформацій.

Результати розрахунків величини використаного ресурсу пластичності ψ в характерних точках по об'єму заготовки приведені в табл. 2.

Наведені у табл. 2 результати свідчать, що збільшення висоти технологічного відростка призводять до збільшення величини використаного ресурсу пластичності ψ в характерних точках заготовки. Але це зростання незначне і такий спосіб деформування може бути використаний для покращення пропрацювання металу в донній частині виробу, оскільки основним недоліком традиційних способів виготовлення порожнистих виробів типу стакану є неоднорідність механічних властивостей металу виробу. У той час коли стінки стакану мають пропрацьований метал, у центральній зоні донної частини метал отримує лише незначні деформації. Особливо цей недолік проявляється у стаканів із великою товщиною дна. Згаданий недолік можна усунути, якщо застосувати поетапне комбіноване видавлювання. Для реалізації такого процесу необхідне обладнання із складною кінематикою руху інструменту, але за рахунок створення умов, при яких виникає немонотонне деформування в осередку деформації, можна значно підвищити пластичність металу і, таким чином, розширити технологічні можливості холодного об'ємного штампування деталей типу стакану.

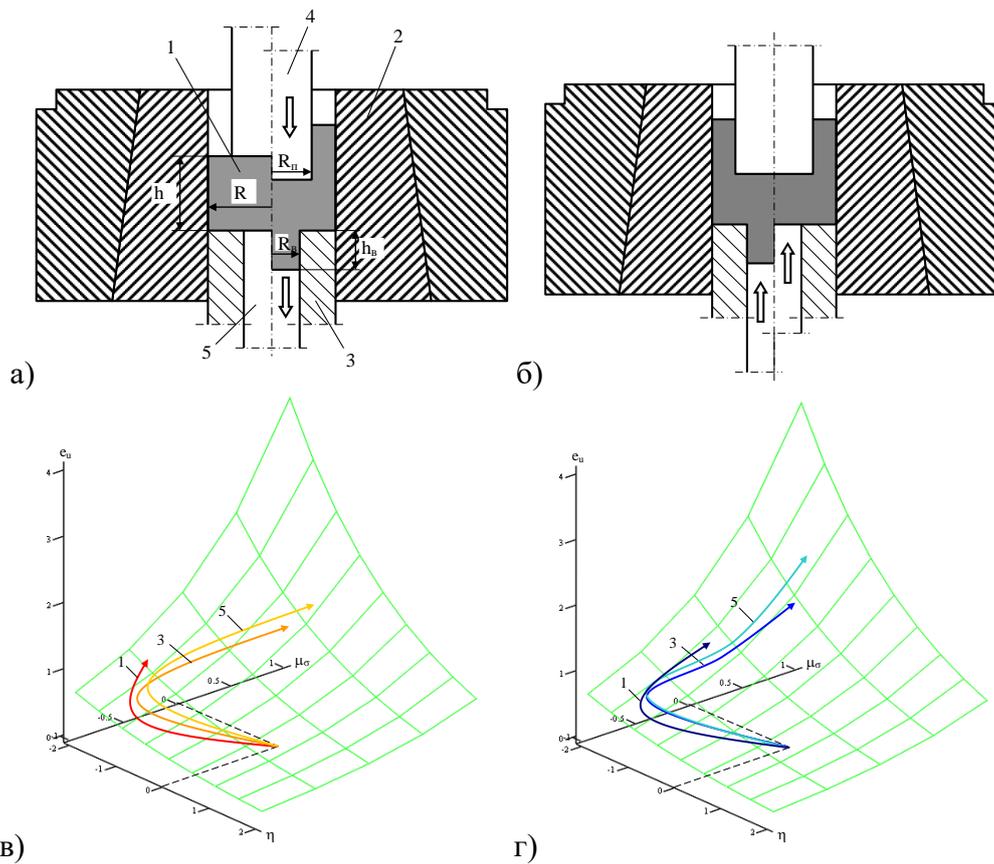


Рис. 2. Схема комбінованого поздовжнього зворотно-прямого видавлювання на початковій стадії (а); у кінці першого етапу та у кінцевій стадії другого етапу (б); поверхня граничних деформацій і шляхи деформування часток матеріалу характерних точок циліндричної заготовки при висоті технологічного відростку $h_{в} = 10$ мм (в); $h_{в} = 15$ мм (г)

Таблиця 2

Значення використаного ресурсу пластичності ψ в характерних точках заготовки

Висота технологічного відростка $h_{в}$, мм	Точка	Величина використаного ресурсу пластичності ψ
10	1	0,23
	3	0,37
	5	0,53
15	1	0,29
	3	0,45
	5	0,59

Таким чином, застосування запропонованого комплексу обчислень дозволяє отримати достовірну оцінку деформовності заготовок в процесах холодного об'ємного штампування, що супроводжуються немонотонним пластичним деформуванням, та проаналізувати вплив параметрів деформування на величину використаного ресурсу пластичності для створення ефективного процесу обробки металів тиском або удосконалення існуючого з метою покращення технологічної спадковості виробу.

ВИСНОВКИ

Запропонована в статті математична модель на основі теорії анізотропно зміцнюваного тіла дозволяє враховувати вплив немонотонності навантаження на значення компонент девіатора напружень, а тензорна модель процесу накопичення пошкоджень отримати достовірну оцінку величини використаного ресурсу пластичності при немонотонному навантаженні. При

цьому в якості функцій, які описують механічні властивості матеріалу, використано поверхню граничної пластичності. Підвищення точності визначення величини використаного ресурсу пластичності за допомогою запропонованої послідовності обчислень дозволить більш якісно оцінити вплив параметрів деформування на деформовність заготовки при немонотонній пластичній деформації і на цій основі удосконалювати існуючі та створювати нові процеси обробки металів тиском для отримання деталей з необхідною технологічною спадковістю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Aliiev I. S., Sivak R. I., Markov O. E., Levchenko V. N. The evaluation of workpiece deformability for the process of two-stage extrusion of hollow hull. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. 129 (3-4), PP. 1345–1353. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12353-6>.
2. Kalyuzhnyi V. L., Aliieva L. I., Kartamyshev D. A., Savchinskii I. G. Simulation of cold extrusion of hollow parts. *Metallurgist*. 2017. 61. 5–6, pp. 359–365. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>.
3. Alieva L., Zhabankov Y. Radial-forward extrusion with a movable mandrel. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. 11, pp. 175–183. https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_11/Leila_Alieva.pdf.
4. Aliiev I. S., Levchenko V. N., Markov O. E., Aliieva L.I., Sivak R.I. Development of devices for measuring contact friction forces in the processes of volumetric plastic deformation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 132(5-6), PP. 2839–2851. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13537-4>.
5. Beigelzimer Ja. E., Efros B., Varyukhin V., Khokhlov A. [A continuum model of a structurally-inhomogeneous porous body and its application for the study of stability and viscous fracture of materials deformed under pressure](#). *Engineering Fracture Mechanics*. 1994. 48 (5), pp. 629–640.
6. Сивак І. О. Пластичність металів при холодній пластическій деформації . *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*. Краматорськ-Слов'янськ: ДДМА, 2000. С. 168–171.
7. Sivak R., Kulykivskiy V., Savchenko V., Sukmaniuk O., Borovskiy V. Application of resource-saving extrusion technologies and an integrated approach to assessing the plasticity of metal parts in agricultural engineering. *Machinery and Energetics*, 2024, 15(2), p. 21–32. DOI: <https://doi.org/10.31548/machinery/2.2024.21>.
8. Veselovska N., Sivak R., Paladiychuk Y., Bandura V., Telyatnik I., Bohatiuk M., Savkiv V., Edl M. Kinematic characteristics of deformed porous structures. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. (2024). Vol. 11(1), pp. D44–D53. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).d6](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).d6).
9. Titov A. V., Mykhalevych V. M., Popiel Peter, Mussabekov K. Statement and solution of new problems of deformability theory. *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments* 2018. 108085E (1 October 2018). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2501635>.
10. Shtern, M. B., Mikhailov, O. V., Mikhailov, A. O. Generalized Continuum Model of Plasticity of Powder and Porous Materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramic* this link is disabled, 2021, 60(1-2), pp. 20–34. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00211-7>.
11. Maximenko A. L., Hetman O. I., Shtern M. B., Olevsky E. A. Modeling the Gas Permeability of the Powder Bed in a Rotary Furnace. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2023. 62(7-8), p. 383–389. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-024-00401-z>.
12. Titov A. V., Balushok K. B., Ostash O. P., ... Polyvoda S. L., Chepil R. V. Pressing of Semi-Finished Al–Mg–Sc Alloy Products in Isothermal Conditions. *Materials Science*. 2023. 58(5), p. 636–642. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00710-5>.
13. Titov V., Mozghovyi O., Borys R., ... Amirgaliyev Y., Aitkulov Z. Theoretical and experimental substantiation of the extraction process with thinning bimetallic tubular elements of dissimilar metals and alloys. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*. 2023. 13(2), p. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.3497>.
14. Kukhar V., Hrushko O., Markov O., Anishchenko O., Prysiazhnyi A. Bypass Bends Deformability of CuZn5 Brass, X10CrNiTi18-9 and C22 Steel at Forming by Euler-Mode Buckling. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. 510, p. 1533–1542. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_158.
15. Kukhar V., Povazhnyi O., Grushko O. Analysis of CuZn5 Tube Buckling During Producing of the Crossover Bend for Metallurgical Unit. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2023. p. 444–454. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_42.
16. Grushko A. V., Kukhar V. V., Slobodyanyuk Y. O. Phenomenological model of low-carbon steels hardening during multistage drawing. *Solid State Phenomena*. 2017. 265 SSP, pp. 114–123.
17. Puzyr R., Puzyr V., Kulynych V., ... Dolhikh O., Horshkov A. Problems in the Manufacture of Hydrogen Fuel Cells Bipolar Plates. *Proceedings of the 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2023*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402487>.
18. Puzyr R., Savelov D., Argat R., Chernish A. Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. 1, pp. 27–32.

19. Sivak R. Evaluation of metal plasticity and research of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 6/7 (90), pp. 34-41. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.115040>.
20. Backhaus G. Constitutive equations for the plastic behaviour of metals and the influence of the deformation induced rotation. *Acta Mechanica*. 1981. 41, pp. 793 – 830.

REFERENCES

1. Aliiev I. S., Sivak R. I., Markov O. E., Levchenko V. N. The evaluation of workpiece deformability for the process of two-stage extrusion of hollow hull. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. 129 (3-4), PP. 1345–1353. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12353-6>.
2. Kalyuzhnyi V. L., Aliieva L. I., Kartamyshev D. A., Savchinskii I. G. Simulation of cold extrusion of hollow parts. *Metallurgist*. 2017. 61. 5–6, pp. 359-365. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>.
3. Alieva L., Zhbakov Y. Radial-forward extrusion with a movable mandrel. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. 11, pp. 175–183. https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_11/Leila_Al-jeva.pdf.
4. Aliiev I. S., Levchenko V. N., Markov O. E., Aliieva L.I., Sivak R.I. Development of devices for measuring contact friction forces in the processes of volumetric plastic deformation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 132(5-6), PP. 2839–2851. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13537-4>.
5. Beigelzimer Ja. E., Efros B., Varyukhin V., Khokhlov A. [A continuum model of a structurally-inhomogeneous porous body and its application for the study of stability and viscous fracture of materials deformed under pressure](#). *Engineering Fracture Mechanics*. 1994. 48 (5), pp. 629-640.
6. Sivak I. O. Plasticity of metals during cold plastic deformation. *Improvement of pressure treatment processes and equipment in metallurgy and mechanical engineering*. 2000, p. 168–171.
7. Sivak R., Kulykivskiy V., Savchenko V., Sukmaniuk O., Borovskiy V. Application of resource-saving extrusion technologies and an integrated approach to assessing the plasticity of metal parts in agricultural engineering. *Machinery and Energetics*, 2024, 15(2), p. 21–32. DOI: <https://doi.org/10.31548/machinery/2.2024.21>.
8. Veselovska N., Sivak R., Paladiychuk Y., Bandura V., Telyatnik I., Bohatiuk M., Savkiv V., Edl M. Kinematic characteristics of deformed porous structures. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. (2024). Vol. 11(1), pp. D44–D53. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).d6](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).d6).
9. Titov A. V., Mykhalevych V. M., Popiel Peter, Mussabekov K. Statement and solution of new problems of deformability theory. *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*. 108085E (1 October 2018). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2501635>.
10. Shtern, M. B., Mikhailov, O. V., Mikhailov, A. O. Generalized Continuum Model of Plasticity of Powder and Porous Materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* this link is disabled, 2021, 60(1-2), pp. 20–34. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00211-7>.
11. Maximenko A. L., Hetman O. I., Shtern M. B., Olevsky E. A. Modeling the Gas Permeability of the Powder Bed in a Rotary Furnace. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2023. 62(7-8), p. 383–389. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-024-00401-z>.
12. Titov A. V., Balushok K. B., Ostash O. P., ... Polyvoda S. L., Chepil R. V. Pressing of Semi-Finished Al–Mg–Sc Alloy Products in Isothermal Conditions. *Materials Science*. 2023. 58(5), p. 636–642. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00710-5>.
13. Titov V., Mozghovyi O., Borys R., ... Amirgaliyev Y., Aitkulov Z. Theoretical and experimental substantiation of the extraction process with thinning bimetallic tubular elements of dissimilar metals and alloys. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*. 2023. 13(2), p. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.35784/iap-gos.3497>.
14. Kukhar V., Hrushko O., Markov O., Anishchenko O., Prysiashnyi A. Bypass Bends Deformability of CuZn5 Brass, X10CrNiTi18-9 and C22 Steel at Forming by Euler-Mode Buckling. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. 510, p. 1533–1542. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_158.
15. Kukhar V., Povazhnyi O., Grushko O. Analysis of CuZn5 Tube Buckling During Producing of the Crossover Bend for Metallurgical Unit. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2023. p. 444–454. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_42.
16. Grushko A. V., Kukhar V. V., Slobodyanyuk Y. O. Phenomenological model of low-carbon steels hardening during multistage drawing. *Solid State Phenomena*. 2017. 265 SSP, pp.114–123.
17. Puzyr R., Puzyr V., Kulynych V., ... Dolhikh O., Horshkov A. Problems in the Manufacture of Hydrogen Fuel Cells Bipolar Plates. *Proceedings of the 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2023*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402487>.
18. Puzyr R., Savelov D., Argat R., Chernish A. Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. 1, pp. 27–32.
19. Sivak R. Evaluation of metal plasticity and research of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 6/7 (90), pp. 34-41. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.115040>.

20. Backhaus G. Constitutive equations for the plastic behaviour of metals and the influence of the deformation induced rotation. *Acta Mechanica*. 1981. 41, pp. 793–830.

Aliiev I., Sivak R., Abhari P. Influence of cold combined extrusion process parameters on the deformability of blankets.

The practical implementation of the requirements for modern machine-building production in conditions of high competition is the use of resource-saving processes. One of such processes is innovative methods of cold volumetric stamping, which contribute to the production of high-quality products with minimal costs. In particular, methods of combined extrusion with stepwise deformation allow obtaining parts of complex configuration with improved mechanical properties of the deformed metal, high accuracy, the necessary technological heritability and increased values of limiting dimensions. At the same time, such processes allow significantly reducing the deformation force and, as a result, increasing the stability of the tool. At the same time, expensive steel grades can be replaced with cheaper ones without deteriorating the service properties of products due to the formation of a macrostructure favorable for the operation of products, the necessary level of deformation hardening and damage to the deformed metal. But the gradual deformation is the cause of the metal flow, which is characterized by non-monotonic plastic deformation, and this significantly complicates the theoretical solution of this type of metal processing problems from the point of view of calculating the components of the stress tensor and damage. As a result, there is a need to independently obtain information about the kinematics of the plastic flow of the metal, the corresponding mechanical properties and the structure of the material functions, which are necessary for calculating the stress-strain state and the value of the used plasticity resource during non-monotonic deformation under conditions of a volumetric stressed state. Based on theoretical and experimental studies, the article proposes to use cold combined extrusion methods for the manufacture of parts. This will significantly increase the limiting dimensions and improve the indicators of the technological heredity of the product. To assess the plasticity of the metal, the article proposes a set of calculations that takes into account the peculiarities of the process of volumetric stamping of parts, in which the metal is under conditions of non-monotonic plastic deformation.

Keywords: combined extrusion, stresses, deformations, plasticity, deformability, used plasticity resource.

Алієв Іграмотдін Серажутдінович – д-р техн. наук, професор ДДМА

Aliiev Igram – Doctor of Technical Sciences, Full Professor DSEA

E-mail: igramaliev@gmail.com;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4248-8214>

Сивак Роман Іванович – д-р техн. наук, професор ВНТУ

Sivak Roman – Doctor of Technical Sciences, Full Professor VNTU

E-mail: sivak_r_i@ukr.net;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7459-2585>

Абхарі Пейман Бахменович – д-р техн. наук, професор ДДМА

Abhari Payman – Doctor of Technical Sciences, Full Professor DSEA

E-mail: payharies@gmail.com;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0827-8149>

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.

DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

VNTU – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Стаття надійшла до редакції 25.06.25 р.