

Сивак Р. І.  
Наляжний В. С.  
Чучин О. В.  
Косарев В. С.

## ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕСІ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ НОЖА ДЛЯ ПОДРІБНЮВАЧА ГІЛОК

*Для отримання заготовки ножа подрібнювача гілок пропонується застосувати процес двохетапного комбінованого видавлювання. Ножі є одним із основних робочих елементів подрібнювача гілок, які працюють в умовах дії ударних та повторно-змінних навантажень, інтенсивного зношування тощо. Тому на даний час процес виробництва ножів включає низку технологічних операцій механічної обробки. До них відносяться низка металорізальних операцій та термообробка. Крім того, для виробництва ножів необхідна легована сталь високої вартості. В статті пропонується кардинально зміни підхід до отримання заготовок ножів подрібнювачів. Для цього пропонується використати інноваційний спосіб комбінованого видавлювання, який включає в себе процес рівноканального видавлювання та осадки. Це дозволить зменшити кількість операцій, пов'язаних з обробкою різанням, та замінити вартісну леговану сталь більш дешевими марками конструкційної сталі без погіршення експлуатаційних характеристик виробу. Для оцінки деформовності заготовки використана тензорна модель накопичення пошкоджень, в якій залежність пластичності від схеми напруженого стану задавали поверхнею граничних деформацій, а історію навантаження траєкторіями в просторі трьох безрозмірних показників. Деформований стан визначали з використанням нерухомої просторової та пов'язаної з частками деформованого тіла матеріальної системи. Напружений стан визначали з використанням моделі анізотропно зміцнюваного тіла.*

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

Процеси поетапного комбінованого видавлювання є перспективним напрямком розвитку технологій обробки металів тиском. Нові схеми штампування на основі принципу побудови послідовності певних операцій здатні забезпечити необхідну технологічну спадковість виробів та знизити вартість деталей без втрати їх експлуатаційних характеристик. Застосування процесів поетапного комбінованого видавлювання дозволяє значно підвищити пластичність металу, що сприяє збільшенню граничних розмірів виробів [1, 2].

Характерною особливістю комбінованих процесів обробки металів тиском є немонотонна пластична деформація, що виникає внаслідок багатоетапного деформування створеного додатковими кінематичними рухами та силовими впливами інструменту. Немонотонність є результатом неузгодження між головними напрямками тензору швидкостей деформацій частки матеріалу на другому етапі і матеріальними волокнами, що утворились внаслідок течії металу після першого етапу деформування. Це значно ускладнює оцінку граничного формозмінення заготовки. Багаторазова зміна характеру течії металу призводить до утворення певних закономірностей при формуванні напружено-деформованого стану та процесів накопичення пошкоджень. В роботах [3, 4] для оцінки деформовності та напружено-деформованого стану по об'єму заготовок в комбінованих процесах холодного видавлювання використовується математична модель пластичного деформування структурно-неоднорідного матеріалу. Модель процесу накопичення пошкоджень при немонотонній пластичній деформації представлена в роботах [5, 6] у вигляді критеріальних співвідношень з використанням рівнянь, що враховують спадковий вплив історії навантаження. В роботах [7, 8] розглядаються особливості розподілу напружень в холодних багатоперехідних процесах обробки тиском в залежності від геометричних параметрів інструменту.

Комбіновані схеми пластичного формозмінення заготовок дозволяють знизити значення сил і тисків деформування металу в холодному стані [9]. Зміна схеми напруженого стану в процесі поетапного комбінованого видавлювання сприяє зниженню енергоємності процесу за рахунок створення ефективних силових режимів [10, 11]. Одним із основних недоліків таких процесів є можливі труднощі при видаленні готового виробу із штампа, тому по цій причині на застосування певних способів видавлювання накладаються певні обмеження [12].

В процесах поетапного комбінованого видавлювання шляхом створення інтенсивної пластичної деформації можна отримати необхідну ультрадрібну зернисту структура в результаті модифікації зерен металів і сплавів. Структурні зміни, викликані інтенсивною пластичною деформацією сприяють покращенню механічних властивостей металів. Одним із процесів створення наддрібної зернистої структури є рівноканальне кутове видавлювання [13]. Рівноканальне кутове видавлювання є найпоширенішою операцією, що забезпечує високі пластичні деформації [14]. В роботах по дослідженню рівноканального кутового видавлювання використовуються результати експериментального та кінцево-елементного аналізу для виявлення впливу геометрії матриці та умов тертя на нерівномірність поля зсувних деформацій в об'ємі заготовки. Також відомі дослідження по оцінці силових режимів та напружено-деформованого стану в залежності від геометричних параметрів інструменту. Чисельний підхід на основі методу скінчених елементів використовується для дослідження оптимальних параметрів конструкції матриці. В роботі [15] виконані дослідження напружено-деформованого стану та термoeфект в заготовці в умовах інтенсивної пластичної деформації при рівноканальному кутовому пресуванні залежно від початкової температури та швидкості. В представлених роботах відсутні дослідження по оцінці деформовності заготовок, що піддаються формозміненню в умовах інтенсивного пластичного деформування.

Таким чином, з точки зору оцінки деформовності огляд наукової літератури показав недостатній рівень досліджень процесу комбінованого видавлювання, який є суміщенням двох схем деформування - рівноканального видавлювання і осадки. Оскільки комбіновані процеси нерозривно пов'язані з немонотонною пластичною деформацією, то для оцінки величини використаного ресурсу пластичності та прогнозування необхідної технологічної спадковості виробу необхідний комплексний підхід. Тобто точний і достовірний результат залежить від інформації про зміну напружено-деформованого стану в будь-якій точці по об'єму деформованої заготовки, а також від того, як враховані в послідовності розрахунків особливості протікання немонотонної пластичної деформації. В статті розглядається застосування такого підходу при немонотонному деформуванні заготовки в процесі комбінованого видавлювання заготовки ножа для подрібнювача гілок.

Метою роботи є оцінка деформовності заготовки ножа для подрібнювача гілок в комбінованому процесі холодного видавлювання із застосуванням моделі анізотропно зміцнюваного тіла та тензорної моделі накопичення пошкоджень з урахуванням немонотонності навантаження.

Традиційним методом отримання ножа для подрібнювача гілок (рис. 1) є механічна обробка, яка включає низку металорізальних операцій і термообробку. Це значно підвищує вартість виробу. Однак цей недолік можна усунути, якщо використати для виробництва ножа методи комбінованого видавлювання [1–6].

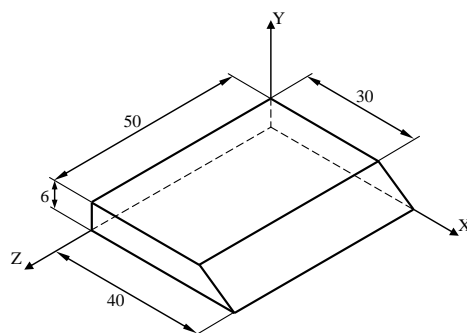


Рис. 1. Загальний вигляд та геометричні параметри ножа

Для реалізації такого процесу необхідно складне устаткування [18–22], але готову деталь можна отримати за один перехід, який включає в себе два етапи. Для виробництва ножа пропонується сумістити в одному процесі дві операції – рівноканальне видавлювання і осадку (рис. 2). На першому етапі здійснюється рівноканальне видавлювання заготовки (рис. 2, а).

Після рівноканального видавлювання центральна частина заготовки отримує пропрацьований метал в той час коли на кінцях заготовки (зона I і II) метал отримує порівняно незначні деформації. Цей недолік усуває наступний етап – осадка (рис. 2, б). Кінцеве положення інструменту і готовий виріб представлені на рис. 2, в.

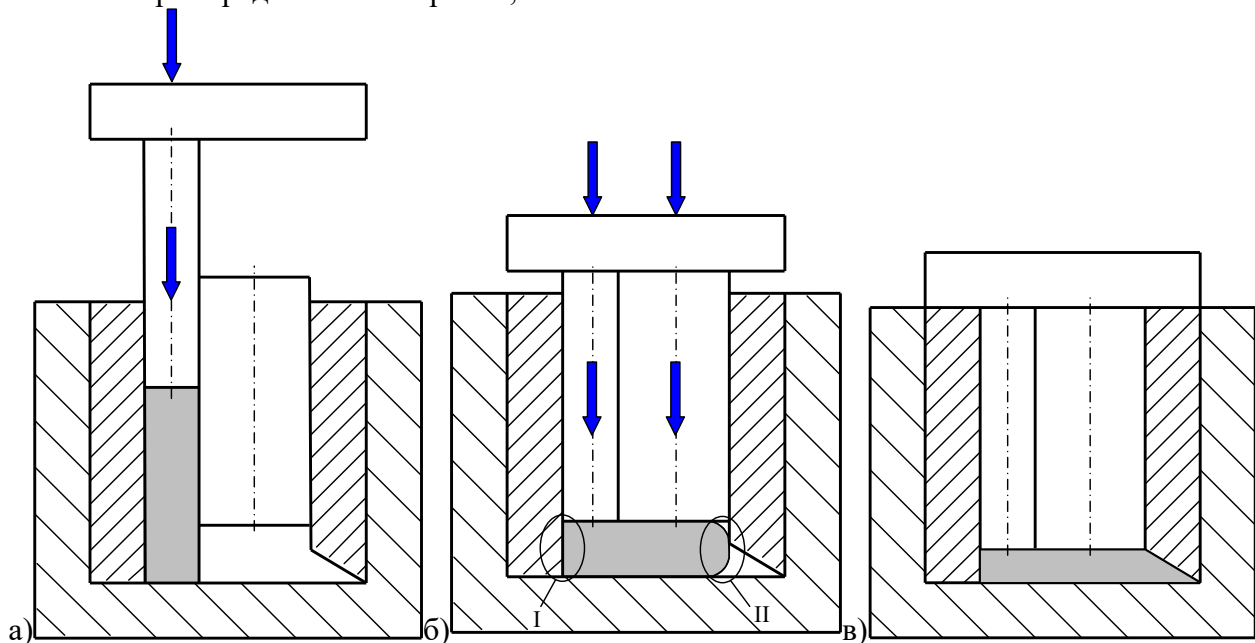


Рис. 2. Принципова схема процесу комбінованого видавлювання ножа:  
а – рівноканальне видавлювання, б – осадка, в – кінцеве положення

Оцінка деформовності заготовки в запропонованому процесі виконується в такій послідовності. Спочатку визначаються кінематичні характеристики процесу деформування. Для цього координати характерних точок заготовки (рис. 3) визначають відносно двох систем відліку – нерухокої (просторової або ейлерової) і системи координат пов’язаної з деформувемим тілом (матеріальної або лагранжевої) [1, 23]. Тоді компоненти тензора швидкостей деформацій визначаються по формулам:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_r &= \frac{r}{r_0} \left[ \frac{\partial z}{\partial z_0} \frac{\partial^2 z}{\partial z_0 \partial t} - \frac{\partial z}{\partial r_0} \frac{\partial^2 r}{\partial z_0 \partial t} \right]; \quad \dot{\varepsilon}_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial t}; \\ \dot{\varepsilon}_z &= \frac{r}{r_0} \left[ \frac{\partial r}{\partial r_0} \frac{\partial^2 z}{\partial r_0 \partial t} - \frac{\partial r}{\partial z_0} \frac{\partial^2 r}{\partial r_0 \partial t} \right]; \\ \dot{\gamma}_{rz} &= \frac{r}{r_0} \left[ \frac{\partial r}{\partial r_0} \frac{\partial^2 r}{\partial z_0 \partial t} + \frac{\partial z}{\partial z_0} \frac{\partial^2 z}{\partial r_0 \partial t} - \frac{\partial r}{\partial z_0} \frac{\partial^2 r}{\partial z_0 \partial t} - \frac{\partial z}{\partial r_0} \frac{\partial^2 z}{\partial r_0 \partial t} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Для визначення компонент девіатора напружень використана модель анізотроно зміцненого тіла Деля-Бакхауза [1, 23, 24]:

$$S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_u(e_u) \frac{\dot{\varepsilon}_{ij}}{\dot{\varepsilon}_u} - \frac{1}{3} \int_0^{e_u} (1 - \beta(e_u)) \sigma(e_u) \cdot \varphi(e_u - e_u^0) \frac{d^2 \varepsilon_{ij}}{de_u^2}(e_u) de_u, \quad (2)$$

де  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  – компоненти тензора швидкостей деформацій;

$e_u = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u d\tau$  – ступінь деформації;

$$\& \varepsilon_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left(\frac{\& \varepsilon_\varphi - \& \varepsilon_r}{\& \varepsilon_r - \& \varepsilon_z}\right)^2 + \left(\frac{\& \varepsilon_r - \& \varepsilon_z}{\& \varepsilon_z - \& \varepsilon_\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\& \varepsilon_z - \& \varepsilon_\varphi}{\& \varepsilon_\varphi - \& \varepsilon_r}\right)^2} + \frac{2}{3} \gamma_{rz} - \text{інтенсивність швидкостей}$$

деформацій;

$\sigma_{0,2}$  – умовна границя текучості на стиск після розтягу зразка до деформації  $e_u^0$ , соотвествующей напряжению  $\sigma_u(e_u^0)$ ;

$$\beta = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u(e_u^0)} - \text{параметр, що характеризує ефект Баушингера};$$

$$\varphi(e_u - e_u^0) = \frac{\sigma_p(e_u) - \sigma_c(e_u)}{(1 - \beta(e_u^0))\sigma_p(e_u^0)} - \text{спадкова функція.}$$

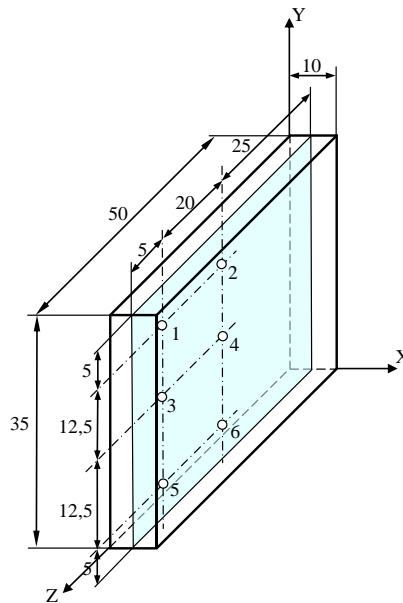


Рис. 3. Розташування досліджуваних характерних точок в об’ємі заготовки

Експериментальні значення функції  $\varphi$  для сталі 10 апроксимували залежністю:

$$\varphi = 0.19 + 0.81 \exp(-22.3 \cdot (e_u - e_u^0)^{0.806}). \tag{3}$$

Залежність параметра  $\beta$  від накопиченої деформації  $e_u$  для сталі 10 апроксимували залежністю:

$$\beta = 0,34 + 0,66 \exp(-62e_u). \tag{4}$$

Значення напружень  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  і  $\tau_{yx}$  визначали використовуючи співвідношення (1-4). На рис. 4, а–г приведені отримані залежності напружень  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  і  $\tau_{yx}$  від ступеню деформації  $e_u$  в точках, які перед деформуванням займали положення, показані на рис. 3.

Отримані результати розрахунків напружень і деформацій використовували для побудови шляхів деформування  $\eta(e_u), \mu_\sigma(e_u)$  (рис. 5). Залежність пластичності від схеми напруженого стану задавали поверхнею граничних деформацій, яку для сталі 10 описували функцією:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 0,68 \exp(-0,43\mu_\sigma + 0,91\eta). \tag{5}$$

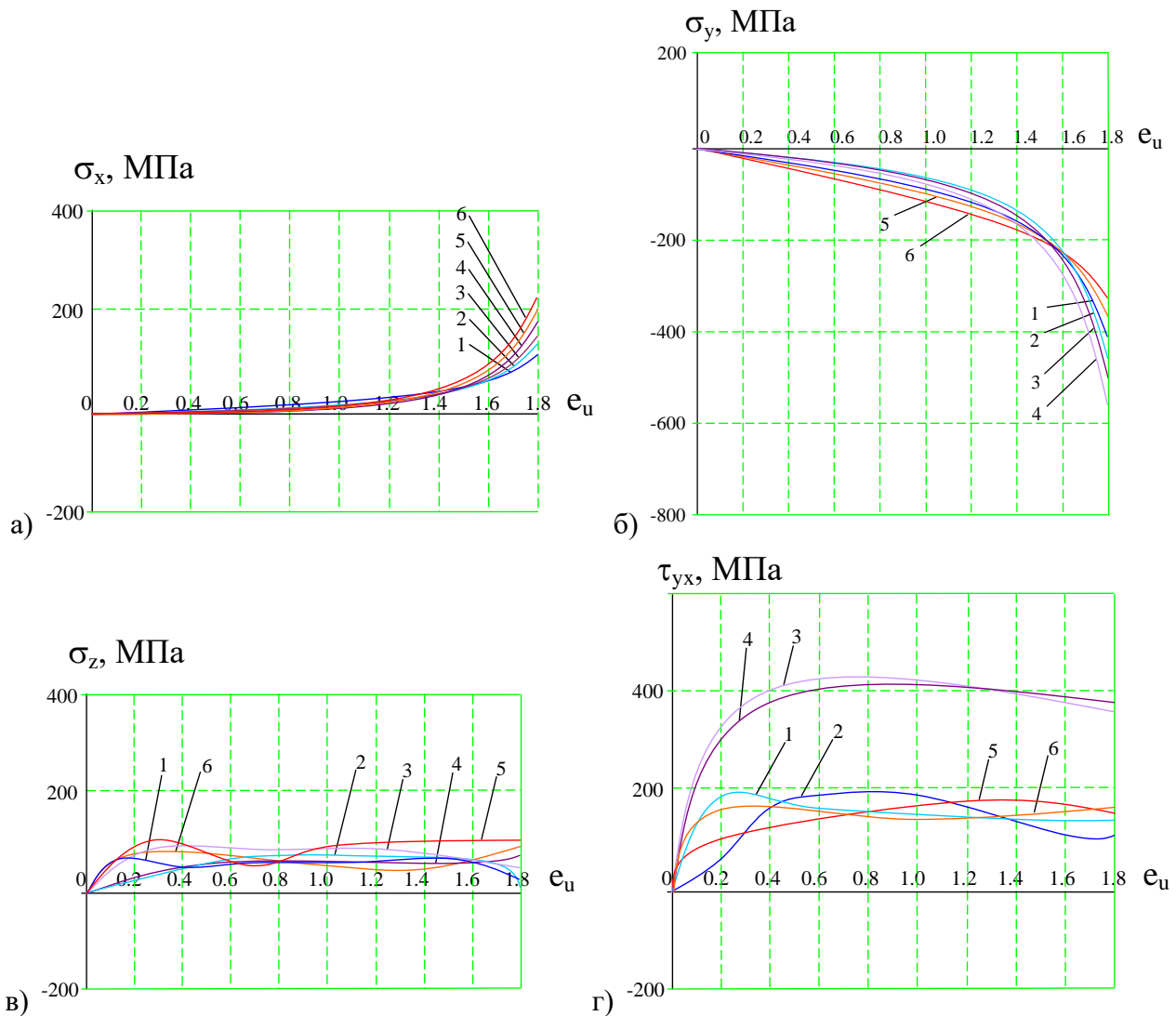


Рис. 4. Залежності напружень  $\sigma_x$  (а),  $\sigma_y$  (б),  $\sigma_z$  (в), і  $\tau_{yx}$  (г) від накопиченої деформації  $\epsilon_u$  в точках 1–6

При оцінці деформовності використана тензорна модель процесу накопичення пошкоджень і компоненти тензора пошкоджень визначаються рівнянням [1, 23]:

$$\psi_i = \int_0^{\epsilon_u} \left( 1 - a + 2a \frac{\epsilon_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_i \frac{d\epsilon_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \quad (6)$$

де  $e_p(\eta, \mu_\sigma)$  – поверхня граничних деформацій;

$a$  – стала, яка залежить від механічних характеристик металу (в даному випадку прийнята рівною  $a = 0,48$ );

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u} \text{ – показник напруженого стану;}$$

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \text{ – параметр Надаї-Лоде.}$$

Величину використаного ресурсу пластичності визначали по формулі [1, 23]:

$$\psi = \sqrt{\psi_1^2 + \psi_2^2 + \psi_3^2}. \quad (7)$$

Результати розрахунків величини використаного ресурсу пластичності  $\psi$  приведені в табл. 1.

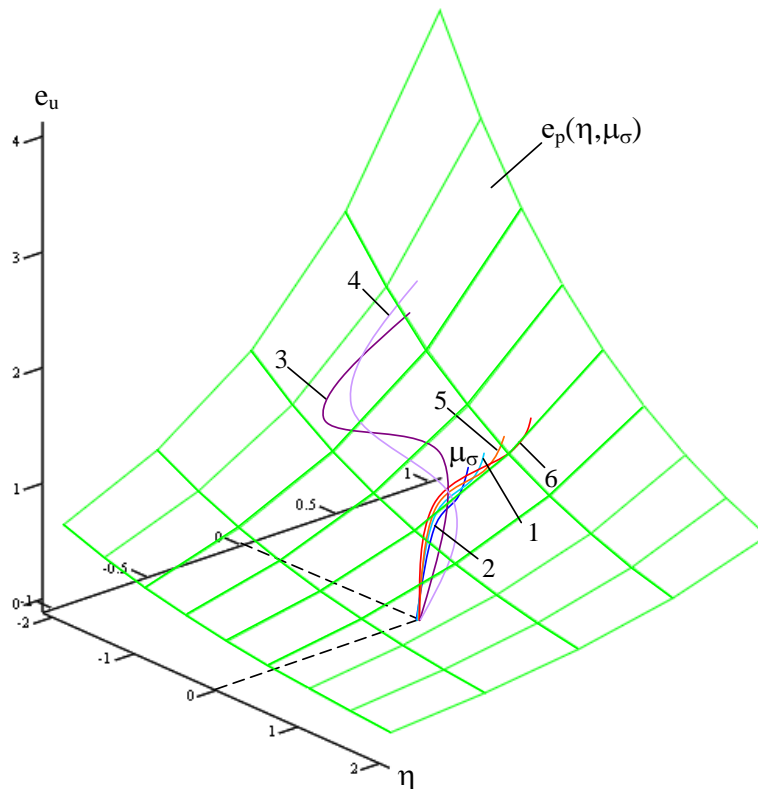


Рис. 5. Поверхня граничних деформацій для сталі 10 і шляхи деформування часток матеріалу для досліджуваних характерних точок 1-6 заготовки

Таблиця 1

Значення використаного ресурсу пластичності  $\psi$  в точках 1-6

	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
$\psi$	0,232	0,24	0,794	0,782	0,442	0,514

Із аналізу результатів, приведених в табл. 1, випливає, що найбільших значень величина використаного ресурсу пластичності приймає в центральній області заготовки. В робочій частині ножа значення  $\psi$  перебувають в межах допустимих для подальшої експлуатації в складних умовах. При цьому робоча частина ножа набуває сприятливу технологічну спадковість, яка виражається покращеними механічними характеристиками порівняно з початковим недеформованим металом.

## ВИСНОВКИ

Запропонована схема двохетапного холодного комбінованого видавлювання дозволяє отримати заготовку ножа для подрібнювача гілок з покращеними експлуатаційними характеристиками за одну технологічну операцію. Послідовність розрахунків призначена для достовірного визначення величини використаного ресурсу пластичності в умовах немонотонного деформування та дозволяє отримати результат максимально наближений до реального за рахунок врахування особливостей характеру течії металу в таких процесах. Це є результатом виняткового підходу при оцінці напружено-деформованого стану на основі моделі анізотропно зміцнюваного тіла, а також використання критерію на основі тензорної моделі накопичення пошкоджень, в якому на відміну від решти враховано об'ємність схеми напруженого

стану шляхом використання поверхні граничної пластичності в якості залежності пластичності від схеми напруженого стану і відображення історії навантаження побудовою шляхів деформування в просторі трьох безрозмірних показників. Запропонований підхід кардинально відрізняється від традиційного, в якому подібні розрахунки здійснюються з використанням співвідношень теорії течії. Впровадження методів холодного об'ємного комбінованого видавлювання дозволяє отримувати вироби з покращеними механічними характеристиками, а застосування запропонованої послідовності розрахунків для оцінки деформовності в умовах немонотонного деформування отримувати вироби з необхідною технологічною спадковістю без руйнування.

## 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:[10.1007/s00170-023-12353-6](https://doi.org/10.1007/s00170-023-12353-6).
2. Aliev I. S. Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Sheet Metal Stamping Technology. (English Translation of Kuznechno - Shtampovochnoe Proizvodstvo)*. 1988. 6, pp. 1-4. ISSN: 0891-334x.
3. 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. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>.
4. Aliiev I., Aliieva L., Grudkina N., Zhibankov I. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. 3 (7), pp.17–22. <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/17Aliiev.pdf>.
5. Alieva L., Zhibankov 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](https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_11/Leila_Alieva.pdf).
6. 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:[10.1007/s00170-024-13537-4](https://doi.org/10.1007/s00170-024-13537-4).
7. 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.
8. Sivak I. O. Plasticity of metals during cold plastic deformation. *Improvement of pressure treatment processes and equipment in metallurgy and mechanical engineering*. Kramatorsk: DSEA. 2000, pp. 168–171. (in Russian).
9. 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. <https://doi.org/10.31548/machinery/2.2024.21>
10. 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. 11(1), pp. D44–D53. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).d6](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).d6).
11. Kraievskiy V. O., Mykhalevych V. M., Sawicki D., Ostapenko O., Modeling of the materials superplasticity based on damage summation theory. *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. 2018. 108084S (1 October 2018). <https://doi.org/10.1117/12.2501489>.
12. 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>.
13. Javier Gil Sevillano. Dynamic Steady State by Unlimited Unidirectional Plastic Deformation of Crystalline Materials Deforming by Dislocation Glide at Low to Moderate Temperatures. *Metals*. 2020. 10 (66). doi:10.3390/met10010066.
14. 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. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00211-7>.
15. 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:10.1007/s11106-024-00401-z.
16. 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:10.1007/s11003-023-00710-5.
17. Titov V., Mozghoviy 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, Pomiarowy w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*. 2023. 13(2), p. 44–49. DOI:<https://doi.org/10.35784/iapgos.3497>.

18. 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. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1\\_158](https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_158).
19. 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. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_42).
20. 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.
21. 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:10.1109/MEES61502.2023.10402487.
22. 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.
23. 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: 10.15587/1729-4061.2017.115040.
24. 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.

**Sivak R., Naliashnyi V., Chuchin O., Kosarev V. Evaluation of the deformity of the blanket in the process of combined extrusion of a knife for a branch cutter**

*It is suggested to use a two-stage combined extrusion process to obtain a blank for the branch chopper knife. Knives are one of the main working elements of the branch shredder, which work under the conditions of impact and repeatedly changing loads, intensive wear, etc. Therefore, at present, the knife production process includes a number of technological machining operations. These include a number of metal cutting operations and heat treatment. In addition, the production of knives requires alloy steel of high value. The article proposes a radical change in the approach to obtaining blanks for chopper knives. For this, it is proposed to use an innovative method of combined extrusion, which includes the process of equal-channel extrusion and precipitation. This will reduce the number of operations related to cutting and replace expensive alloy steel with cheaper grades of structural steel without deteriorating the performance characteristics of the product. To assess the deformability of the workpiece, a tensor model of damage accumulation was used, in which the dependence of plasticity on the stress state scheme was determined by the surface of limit deformations, and the load history by trajectories in the space of three dimensionless indicators. The deformed state was determined using a fixed spatial and particle-related material system of a deformable body. The stress state was determined using the anisotropically strengthened body model.*

**Key words:** combined extrusion, stresses, deformations, plasticity, deformability, used plasticity resource.

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

**Sivak Roman** – Dr. Sc., Full Professor, VNTU

E-mail: [sivak\\_r\\_i@ukr.net](mailto:sivak_r_i@ukr.net)

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

**Наляжний Володимир Сергійович** – аспірант, ВНТУ

Naliashnyi Volodymyr – Graduate student, VNTU

E-mail: [vova.naliashnyi@gmail.com](mailto:vova.naliashnyi@gmail.com)

**Чучин Олег Володимирович** – канд. техн. наук, ст. викладач, ДДМА

**Chuchin Oleg** – PhD, Senior Lecturer, DSEA

E-mail: [ovch2111@gmail.com](mailto:ovch2111@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9728-9925>

**Косарєв Віталій Сергійович** – аспірант, ДДМА

**Kosarev Vitalii** – Graduate student, DSEA

E-mail: [vit.kosarev97@gmail.com](mailto:vit.kosarev97@gmail.com)

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

VNTU – Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

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

DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.