

РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТІ ЗАГОТОВОК У РАЗІ ПОЕТАПНОГО ПЛАСТИЧНОГО ФОРМОЗМІНЕННЯ

Роман Сивак

доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри механіки та інженерії агроєкосистем
Поліський національний університет, бульв. Старий, 7, Житомир, Україна, 10008, sivak_r_i@ukr.net
ORCID: 0000-0002-7459-2585

Руслан Пузир

доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобілів і тракторів
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20, Кременчук, Полтавська область, Україна, 39600, puzyruslan@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9791-9002

Віталій Кудраш

аспірант кафедри галузевого машинобудування
Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21021, lisovoy844@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0380-8120

Юлія Сіра

завідувачка відділення механічної інженерії
Відокремлений структурний підрозділ «Фаховий коледж Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського», вул. Чумацький Шлях, 7, Кременчук, Полтавська область, Україна, 39621, guliasira87@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9247-4777

Виконано дослідження пластичності за немонотонної пластичної деформації, яка виникає у результаті поетапного пластичного формозмінення. Розглянуто комбінований процес пластичного деформування, який складається з послідовних операцій прямого і радіального видавлювання циліндричної заготовки та контурної осадки отриманого фланця. Немонотонне навантаження значно ускладнює оцінку деформованості заготовки в таких процесах, тому для оцінки пластичності металу заготовки використано феноменологічну теорію деформованості, засновану на тензорній моделі процесу накопичення пошкоджень. Немонотонність деформації урахована також для дослідження напружено-деформованого стану. Установлено, що одержання виробів шляхом послідовних операцій пластичного формозмінення має широкі можливості в плані підвищення якості готової продукції.

Ключові слова: немонотонна пластична деформація, ресурс пластичності, напружено-деформований стан, функції току, комбіноване видавлювання.

Актуальність роботи. Для розрахунку компонент тензора пошкоджень та напружень за немонотонного навантаження необхідне використання обґрунтованих фізичних рівнянь. Окрім того, для розрахунків напружено-деформованого стану та величини використаного ресурсу пластичності за немонотонного деформування в умовах об'ємного напруженого стану необхідна незалежно отримана інформація про кінематику пластичної течії металу, а також про структуру функцій матеріалу, які несуть інформацію про його механічні властивості.

Розроблення нових, більш досконалих методів розрахунків напружено-деформованого стану та

оцінки деформованості заготовок за холодного об'ємного штампування в умовах немонотонного навантаження є актуальним завданням для створення конкурентоспроможного виробництва.

Матеріал і результати досліджень. Немонотонна пластична деформація, зокрема, виникає за одноразової або багаторазової зміни характеру навантаження під час формозмінення заготовки. Такі умови притаманні багатоперехідним процесам пластичного деформування [1; 2]. Немонотонна пластична деформація значно ускладнює оцінку деформації заготовок у комбінованих процесах холодного видавлювання. Для дослідження руйнування та локалізації деформацій під час

обробки тиском певних матеріалів використовують математичну модель пластичного деформування структурно неоднорідного матеріалу [3]. У роботах [4; 5] сформульовано критеріальні співвідношення для накопичених ушкоджень у вигляді рівнянь спадкового типу. Особливості розподілу напружень у багатоперехідних процесах холодного видавлювання розглядаються у роботах [6; 7].

Таким чином, прогнозування механічних властивостей деформованого металу та рівень його пошкоженості за немонотонного пластичного деформування можуть бути визначені тільки на основі комплексного підходу, що включає отримання достовірної інформації про напружено-деформований стан та відому історію розвитку процесу пластичної деформації у будь-якій точці осередку деформації.

Для оцінки величини використаного ресурсу пластичності необхідно отримати експериментальну залежність пластичності металу, що деформується, від схеми напруженого стану і розрахувати поле напружень у пластичній області. Під час дослідження поля напружень нами використано експериментально-розрахунковий метод, у якому як вихідна використовується інформація про кінематику процесу.

Кінематику деформування під час видавлювання визначали методом функцій току [8]. При цьому на меридіональний переріз заготовок ($h_0=100$ мм, $d_0=40$ мм), складених із двох половинок, наносили координатну сітку з кроком 1 мм. видавлювання проводили через конічну матрицю з кутом воронки 90° з діаметра 40 мм у діаметр 20 мм. Швидкість переміщення пуансону – $v_0=10$ мм/хв, що практично виключає вплив тепловиділення та швидкісних ефектів на характер пластичної течії. У стадії течії лінії паралельні осі симетрії збігаються з траєкторіями руху матеріальних частинок, а також із лініями току, які є ізолініями функцій току. Функції току визначали на вході до каналу матриці:

$$\Phi_{1,j} = \pi v_0 (R_{1,j}^2 - R_{1,1}^2), \quad (1)$$

де $R_{1,1}$, $R_{1,j}$ – радіуси 1-ї та j-ї ліній току на вході до каналу матриці; v_0 – швидкість недеформованого металу до входу до каналу матриці.

Функції току вважали постійними вздовж ліній току, що збігаються з відповідними лініями координатної сітки. Експериментальні значення функцій току апроксимували кубічними сплайн-функціями, що згладжують, уздовж ліній $r_j=\text{const}$ та $z_j=\text{const}$. Компоненти тензора швидкостей

деформацій та їх інтенсивність обчислювали за формулами:

$$\dot{\epsilon}_\phi = -\frac{1}{2\pi r^2} \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{1}{2\pi r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial r},$$

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{1}{2\pi r^2} \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial r}, \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\epsilon}_\phi - \dot{\epsilon}_r)^2 + (\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_z)^2 + (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_\phi)^2} + \frac{2}{3} \dot{\gamma}_{rz}$$

Накопичену деформацію обчислювали за формулою:

$$e_u(r, z) = \int_0^t \dot{\epsilon}_u(z(\tau), r(\tau)) d\tau, \quad (3)$$

де t – час, за який частка проходить шлях S уздовж лінії току.

Перед радіальним вичавлюванням на меридіональний переріз заготовки наносили нову прямокутну сітку. Заготовку видавлювали за три етапи до діаметра $d=34$ мм ($d_0=20$ мм). Після кожного етапу вимірювали координати точок елементів координатної сітки. Компоненти тензора швидкостей деформацій обчислювали за формулами [9]:

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{r}{r_0} \left[\frac{\partial z}{\partial z_0} \frac{\partial^2 z}{\partial z_0 \partial t} - \frac{\partial z}{\partial r_0} \frac{\partial^2 r}{\partial z_0 \partial t} \right],$$

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{r}{r_0} \left[\frac{\partial r}{\partial r_0} \frac{\partial^2 z}{\partial r_0 \partial t} - \frac{\partial r}{\partial z_0} \frac{\partial^2 z}{\partial z_0 \partial t} \right], \quad \dot{\epsilon}_\phi = \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial t} \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}_{rz} = \frac{r}{r_0} \left[\frac{\partial r}{\partial r_0} \frac{\partial^2 r}{\partial z_0 \partial t} + \frac{\partial z}{\partial z_0} \frac{\partial^2 z}{\partial r_0 \partial t} - \frac{\partial r}{\partial z_0} \frac{\partial^2 r}{\partial z_0 \partial t} - \frac{\partial z}{\partial r_0} \frac{\partial^2 z}{\partial z_0 \partial t} \right].$$

Функції ейлерових координат від лагранжевих $z(z_0, r_0, t)$ і $r(z_0, r_0, t)$ отримували шляхом апроксимації експериментальних даних кубічними сплайнами.

Перед контурною осадкою на меридіональний переріз заготовки наносили нову прямокутну сітку. Осадку реалізували за два переходи. При цьому діаметр заготовки збільшився до $d=42$ мм. Компоненти тензора швидкостей деформацій обчислювали за формулами (4).

Значення накопиченої деформації під час формозмінення без розвантажень знаходили за формулою (3). Оскільки перед радіальним видавлюванням і контурною осадкою наносили нову ділильну сітку, то накопичену деформацію у цьому разі визначали як суму отриманої на даному етапі за формулою (3) та накопиченої деформації наприкінці попередньої операції. Під час радіального видавлювання та контурної осадки як пропорційний параметр t у фор-

мулі (3) використовували максимальний діаметр потовщення.

Компоненти девіатора напружень обчислювали за співвідношеннями, що враховують вплив немонотонності пластичної деформації [10; 11]:

$$S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_u(e_u) \frac{\dot{\varepsilon}_{ij}}{\dot{\varepsilon}_u} - \frac{1}{3} \int_0^{e_u} (1 - \beta(e_u^*)) \sigma(e_u^*) \cdot \phi(e_u^* - e_u^0) \frac{d^2 \varepsilon_{ij}}{de_u^2}(e_u^*) de_u^*, \quad (5)$$

де

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

Баушингера;

$\sigma_{0,2}$ – умовна границя текучості на стиск після розтягування зразка до накопиченої деформації e_u^0 , якій відповідає напруженню $\sigma_u(e_u^0)$;

$$\phi(e_u - e_u^0) = \frac{\sigma_p(e_u) - |\sigma_c(e_u)|}{\sigma_p(e_u^0)(1 - \beta(e_u^0))} - \text{спадкова}$$

функція;

e_u^0 – накопичена деформація, за якої має місце розвантаження або злам траскторії деформації;

$\sigma_p(e_u)$ – напруження під час монотонного розтягу;

$\sigma_c(e_u)$ – напруження під час стиску зразка до деформації e_u , попередньо розтягнутого до e_u^0 напруженням $\sigma_p(e_u)$;

$\beta(e_u^0)$ – значення параметра Баушингера за $e_u = e_u^0$.

Залежності $\beta(e_u)$, $\phi(e_u - e_u^0)$ для сталі 10 отримували експериментально за методикою [12]. Експериментальні результати апроксимували функціями:

$$\beta = 0,34 + 0,66 \exp(-62e_u), \quad (6)$$

$$\phi = 0,19 + 0,81(-22,3(e_u - e_u^0)^{0,806}). \quad (7)$$

Постійні, що входять до (6) і (7), визначали методом найменших квадратів.

Компоненти тензора напружень знаходили шляхом інтегрування диференціальних рівнянь рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{r} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0,$$

використовуючи при цьому інтегральне рівняння:

$$P = 2\pi \int_0^R \sigma_z r dr, \quad (9)$$

де R – радіус тіла, що деформується; P – зусилля, що вимірюється у процесі деформування досліджуваного тіла.

Проте у цьому разі кількість рівнянь перевищує кількість невідомих. Тому за такого визначення напруження одне з диференціальних рівнянь рівноваги залишається незадоволеним. Для того щоб задовольнити обидва рівняння рівноваги, нами використано методіку коригування компонентів девіатора напружень [11].

Використаний ресурс пластичності обчислювали за критерієм [13]:

$$\Psi = 3\Psi_0^2 \exp\left(c \int_0^{e_u} \frac{\eta de_u^*}{|\eta| e_p(\eta, \mu_\sigma)}\right) + \Psi_{ij} \Psi_{ij}, \quad (10)$$

$$\text{де } \Psi_{ij} = \int_0^{e_u} \left(1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}\right) \beta_{ij} \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)},$$

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u} - \text{компоненти направляючого}$$

тензора прирощень деформацій.

Константу a приймали рівною $a=0,4$, а константу c – рівною $c=1$. Поверхню граничної пластичності сталі 10 будували за методикою [13] і апроксимували рівнянням:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = \frac{0,68e^{-0,91\eta}}{1 - 0,2784\mu_\sigma - 0,072\mu_\sigma^2}. \quad (11)$$

Використаний ресурс пластичності Ψ_0 перед видавлюванням приймали рівним нулю $\Psi_0=0$, перед радіальним видавлюванням і контурною осадкою як Ψ_0 приймали значення Ψ , отримані наприкінці попередньої операції. Історію деформування представили шляхами $\eta(e_u)$, $\mu_\sigma(e_u)$. Значення η і μ_σ за даного e_u обчислювали за формулами:

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u},$$

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3},$$

де σ – середнє напруження, σ_u – інтенсивність напружень; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження.

Оскільки у випадках, що розглядаються, має місце осесиметрична деформація, то одне з головних напружень приймали рівним σ_ϕ , а два інших визначали за формулою:

$$\sigma_{\max}^{\min} = \frac{\sigma_z + \sigma_r}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + 4\tau_{rz}^2}.$$

Результати розрахунку використаного ресурсу пластичності наведено на рис. 1.

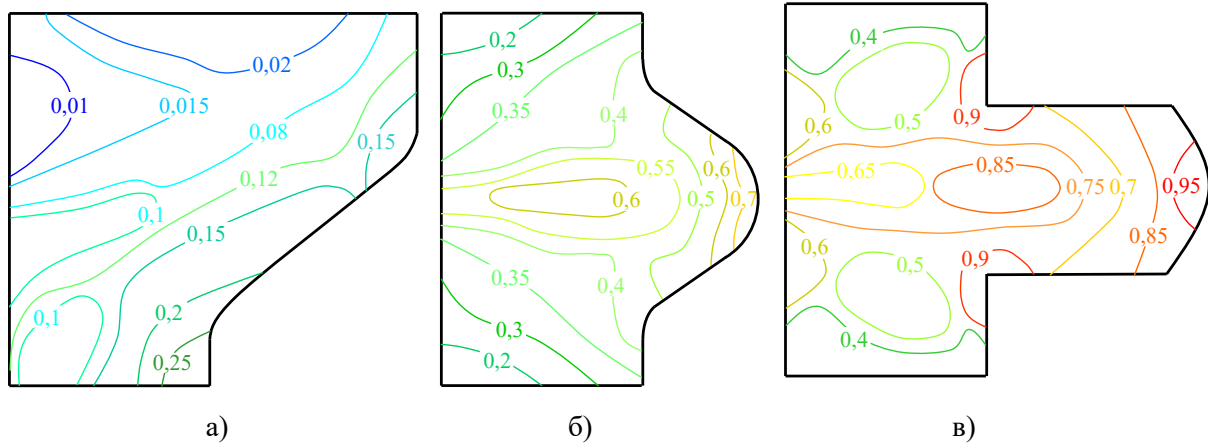


Рис. 1. Використаний ресурс пластичності після: а – прямого видавлювання, б – радіального видавлювання, в – контурної осадки

Аналіз розподілу ψ за перерізом заготовки показує, що за прямого видавлювання максимальні значення ψ приймає у периферійній зоні (рис. 1а). Ця область залишається найбільш небезпечною і під час двох наступних операцій (рис. 1 б, в). Під час радіального видавлювання та подальшої контурної осадки розподіл ψ на горизонтальній осі симетрії наближається до рівномірного. Тому таку послідовність операцій можна вважати вдалою.

Висновки. Необхідно відзначити, що тріщини на вільній поверхні заготовки з'являються за діаметра потовщень $d_{\max} > 46$ мм. Точно встановити момент появи макротріщини у цьому разі дуже складно. Експериментальні значення максимального діаметра потовщень мало відрізняються від отриманого в даній роботі діаметра $d_{\max} = 42$ мм, для якого розрахункові значення ψ близькі до одиниці. Це свідчить про те, що запропонований метод розрахунку використаного ресурсу пластичності за немонотонного навантаження дає змогу отримати результати, досить близькі до експериментальних.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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. URL: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>.
2. Aliiev I., Aliieva L., Grudkina N., Zhibankov I. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion. *Metallurgical and Mining Industry*. Dnepropetrovsk. 2011. 3. 7, pp. 17–22. URL: <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/17Aliiev.pdf>.

3. Beigelzimer Ja.E., Efos 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.

4. Сивак І.О. Пластичність металів при холодній пластичній деформації. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*. Краматорськ; Слов'янськ: ДДМА, 2000. С. 168–171.

5. 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). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2501489>.

6. 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.

7. 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.

8. Ogorodnikov, V.A., Dereven'ko, I.A., Sivak, R.I. On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading. *Materials Science*, 2018, 54(3), pp. 326–332. DOI: 10.1007/s11003-018-0188-x.

9. Pokras, V.D., Rvachev, M.A. Application of the R-functions method to viscoplastic analysis in metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 60(1-4), pp. 493–500. URL: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02376-X](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02376-X).

10. Sivak R. Evaluation of metal plasticity and research of the mechanics of pressure treatment processes

under complex loading. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7 (90), p. 34–41, 2017. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.115040.

11. Dell, H., Gese, H., Oberhofer, G. CrachFEM – A comprehensive approach for the prediction of sheet metal failure. AIP Conference Proceedings, 2007, 908, pp. 165–170. DOI:10.1063/1.2740806.

12. Khvan, A.D., Khvan, D.V., Voropaev, A.A. Single sample method for assessing the baushinger effect / *Industrial Laboratory. Materials Diagnosticsthis*, 2020, 86(7), pp. 55–58.

13. Sakharov, D.V., Sivak, I.O., Pokras, V.D., Ivatsko, V.T. The peculiarities of application of viscoplasticity method to computation of porous bodies stress state. *Poroshkovaya Metallurgiya*, 2000, (3-4), pp. 10–21.

RESOURCE OF PLASTICITY OF WORKPIECES DURING STEPWISE PLASTIC DEFORMATION

Roman Sivak

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Mechanics and Engineering of Agroecosystems

Polissia National University, 7 Saryi blvd, Zhytomyr, Ukraine, 10008, sivak_r_i@ukr.net

ORCID: 0000-0002-7459-2585

Ruslan Puzyr

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Automobiles and Tractors

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20 University str., Kremenchuk, Poltava region, Ukraine, 39600, puzyruslan@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9791-9002

Vitalii Kudrash

Postgraduate Student at the Department of Industrial Mechanical Engineering

Vinnytsia National Technical University, 95 Khmelnytske shose str., Vinnytsia, Ukraine, 21021, lisovoy844@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0380-8120

Yuliia Sira

Head of the Department Mechanical Engineering

Separate structural subdivision “Specialist College of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University”, 7 Chumatsky Shlyach str., Kremenchuk, Poltava region, Ukraine, 39621, gulasira87@gmail.com

ORCID 0000-0002-9247-4777

A study of plasticity was carried out in case of non-monotonic plastic deformation, which occurs as a result of step-by-step plastic deformation. The article considers the combined process of plastic deformation, which consists of successive operations: first direct, then radial extrusion of the cylindrical workpiece and the contour deposit of the obtained flange. A non-monotonic load significantly complicates the assessment of workpiece deformability in such processes. Therefore, a comprehensive approach based on the phenomenological theory of deformability based on the tensor model of the damage accumulation process is used to assess the plasticity of the workpiece metal. Since the prediction of the mechanical properties of the deformed metal and the level of its damage can be reliably determined only with a known history of the development of the process of plastic deformation of any point of the center of deformation, the assessment of deformability was carried out in the following sequence. The kinematics of deformation during direct extrusion was determined by the method of current functions. Kinematic characteristics of radial extrusion and contour sediment were determined using mixed Euler and Lagrangian coordinates. The non-monotonicity of the deformation is also taken into account for the study of the stress-strain state by using the model of an anisotropically strengthened body. To estimate the value of the used plasticity resource, a criterion was used that takes into account the gradual nature of the deformation. It has been established that the production of products through successive operations of plastic deformation has wide possibilities in terms of improving the quality of finished products. Also, the use of such methods of deformation will make it possible to obtain high-quality products from cheaper materials of previously unavailable shapes and sizes.

Key words: non-monotonic plastic deformation, plasticity resource, stress-strain state, flow functions, combined extrusion.

REFERENCES

1. 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>
2. Aliiev, I., Aliieva, L., Grudkina, N., Zhibankov, I. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion. *Metallurgical and Mining Industry*. Dnepropetrovsk. 2011. 3. 7, pp. 17–22. <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/17Aliiev.pdf>
3. 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.
4. Sivak I.O. Plasticity of metals during cold plastic deformation / *Improvement of pressure processing processes and equipment in metallurgy and mechanical engineering*. – Kramatorsk-Sloviansk: DSEA, 2000. – P. 168–171.
5. 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). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2501489>.
6. 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.
7. 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.
8. Ogorodnikov, V.A., Dereven'ko, I.A., Sivak, R.I. On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading. *Materials Science*, 2018, 54(3), pp. 326–332. DOI 10.1007/s11003-018-0188-x.
9. Pokras, V.D., Rvachev, M.A. Application of the R-functions method to viscoplastic analysis in metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 60(1–4), pp. 493–500. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02376-X](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02376-X).
10. Sivak, R. Evaluation of metal plasticity and research of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7 (90), p. 34–41, 2017. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.115040.
11. Dell, H., Gese, H., Oberhofer, G. CrachFEM - A comprehensive approach for the prediction of sheet metal failure. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 908, pp. 165–170. DOI: 10.1063/1.2740806.
12. Khvan, A.D., Khvan, D.V., Voropaev, A.A. Single sample method for assessing the baushinger effect / *Industrial Laboratory*. *Materials Diagnosticsthis*, 2020, 86(7), pp. 55–58.
13. Sakharov, D.V., Sivak, I.O., Pokras, V.D., Ivat'sko, V.T. The peculiarities of application of viscoplasticity method to computation of porous bodies stress state. *Poroshkovaya Metallurgiya*, 2000, (3-4), pp. 10–21.

Стаття надійшла 20.08.2023