

УДК 621.73.011.001.5

Р. І. Сивак, д. т. н., доц.; В. І. Савуляк, д. т. н., проф.**ОЦІНКА ГРАНИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ У ПРОЦЕСІ ПОПЕРЕЧНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ З ПОДАЛЬШОЮ ОСАДКОЮ**

Основною задачею обробки металів тиском є отримання заготовок заданої форми без порушення суцільності. У зв'язку з цим актуальною залишається проблема оцінки пластичності металів, що деформуються, особливо під час немонотонної пластичної деформації. Механізм накопичення та заліковування пошкоджень під час немонотонної пластичної деформації на сьогодні повністю не вивчений. Тому немає єдиної точки зору щодо оцінки деформованості металів під час немонотонного навантаження.

В статті проведено дослідження пластичності металу в процесі поперечного видавлювання осесиметричного фланця з подальшою його осадкою. Цей процес характеризується немонотонним навантаженням. Тому розрахунок компонент девіатора напружень виконується з використанням моделі анізотропного зміцнення Бакхауза.

Оскільки відомі тензорні моделі процесу накопичення пошкоджень при немонотонному навантаженні є дуже громіздкими, у цій статті обґрунтовується перехід від тензорної моделі до тривимірної скалярної моделі. У якості основних характеристик немонотонного навантаження використано показник жорсткості напруженого стану та параметр Надаї-Лоде. Замість шести компонент тензора пошкоджень введено три компоненти девіатора пошкоджень в просторі головних напружень. Запропоновано апроксимацію функції, яка описує вплив історії навантаження на пластичність та враховує чутливість деформованого металу до схеми напруженого стану. Вплив напруженого стану на пластичність визначається поверхнею граничної деформації, яка описує залежність граничної деформації від двох інваріантних показників напруженого стану.

Розроблена модель оцінки пластичності металу при складному немонотонному навантаженні використана для оцінки впливу параметрів процесу поперечного видавлювання фланця на граничну деформацію. Запропонований спосіб комбінованого видавлювання дозволяє раціонально використовувати ресурс пластичності деформованого металу.

Ключові слова: *пластична деформація, напруження, немонотонне навантаження, шляхи деформування, руйнування.*

Вступ

Основною задачею обробки металів тиском є отримання заготовок заданої форми без порушення суцільності. У зв'язку з цим актуальною залишається проблема оцінки пластичності металів, що деформуються, особливо під час немонотонної пластичної деформації. Механізм накопичення та заліковування пошкоджень під час немонотонної пластичної деформації на сьогодні повністю не вивчений. Тому немає єдиної точки зору щодо оцінки деформованості металів під час немонотонного навантаження [1 – 5].

Модель накопичення пошкоджень під час немонотонного навантаження основана на гіпотезі, що пошкодження мають спрямований характер і описуються тензором другого рангу. Компоненти цього тензора визначаються механікою протікання пластичної деформації у конкретному технологічному процесі, а також матеріальними функціями, що описують фізико-механічні властивості матеріалу.

Пластична деформація металів в умовах немонотонного навантаження

Введемо згідно з [5, 6], тензор пошкоджень ψ_{ij} , компоненти якого визначаються в такий спосіб:

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u^*} F(e_u, \eta, \mu_\sigma) \beta_{ij} de_u, \quad (1)$$

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

Компоненти направляючого тензора β_{ij} дорівнюють [5]:

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

Зі співвідношення теорії течії:

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

впливає що

$$\frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u} = \sqrt{\frac{3}{2}} \beta_{ij} = \frac{3}{2} \frac{S_{ij}}{\sigma_u} \quad (4)$$

або

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{S_{ij}}{\sigma_u} \quad (5)$$

де S_{ij} – компоненти девіатора напружень, σ_u – інтенсивність напружень.

Представимо тензор σ_{ij} у вигляді:

$$\sigma_{ij} = S_{ij} + \sigma \delta_{ij} \quad (6)$$

де $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$ – середнє напруження.

Крім того, використовуємо відомі співвідношення

$$\mu_\sigma = \frac{2S_2 - S_1 - S_3}{S_1 - S_3} \quad (7)$$

$$S_1 + S_2 + S_3 = 0, \quad 2\sigma_u^2 = (S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2, \quad (8)$$

де μ_σ – параметр Надаї-Лоде.

Після розв'язання системи (7), (8) знаходимо:

$$\frac{S_1}{\sigma_u} = \mp \frac{1}{3} \frac{\mu_\sigma - 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \quad \frac{S_2}{\sigma_u} = \pm \frac{1}{3} \frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \quad \frac{S_3}{\sigma_u} = \mp \frac{1}{3} \frac{\mu_\sigma + 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}. \quad (9)$$

З (5) та (9) впливає, що головні компоненти тензора β_{ij} дорівнюють

$$\beta_1 = \mp \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\mu_\sigma - 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \quad \beta_2 = \pm \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \quad \beta_3 = \mp \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\mu_\sigma + 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}. \quad (10)$$

Передбачається, що під час немонотонного навантаження руйнування настає за умови, коли

певна функція інваріантів тензора ψ_{ij} досягає певного значення. Перший інваріант цього тензора дорівнює нулю, оскільки внаслідок стискання матеріалу – $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 0$. Без урахування впливу третього інваріанту умова руйнування може бути записана у вигляді:

$$\psi_1^2 + \psi_2^2 + \psi_3^2 = 1. \tag{11}$$

Щоб визначити вид функції $F(e_u, \eta, \mu_\sigma)$ яка входить до (1), розглянемо просте навантаження, при якому β_{ij} , η , μ_σ залишаються сталими, тоді [5]:

$$\psi_{ij} = \beta_{ij} \int_0^{e_u^*} F(e_u, \eta, \mu_\sigma) de_u = \beta_{ij} \varphi(e_u, \eta, \mu_\sigma), \tag{12}$$

де
$$\varphi(e_u, \eta, \mu_\sigma) = \int_0^{e_u^*} F(e_u, \eta, \mu_\sigma) de_u. \tag{13}$$

Оскільки $\beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2 = 1$, з (11) випливає, що під час руйнування, якщо $e_u = e_p$, $\varphi(e_u, \eta, \mu_\sigma) = 1$. Крім того,

$$\varphi(0, \eta, \mu_\sigma) = 0. \tag{14}$$

Задовольняючи цим умовам, припустимо, що [5]:

$$\varphi = \sum_{k=1}^m b_k \left(\frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right)^{n_k}, \quad \sum b_k = 1, n_k > 0. \tag{15}$$

Відповідно до (15) та (14) прийmemo надалі:

$$\varphi = (1 - a) \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} + a \frac{e_u^2}{e_p^2} \tag{16}$$

де $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ – поверхня граничних деформацій, а – постійна, що залежить від механічних характеристик металу. У цій роботі a прийнята рівною $a=0,48$.

Задовольняючи співвідношенням (1), (13), (16) прийmemo, що у випадку^

$$\psi_1 = \int_0^{e_u} \left(1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_1 \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}. \tag{17}$$

Аналогічні вирази можна записати для ψ_2 і ψ_3 які входять в умову руйнування (11).

Деформованість заготовок під час радіального видавлювання з подальшою осадкою

Критерій руйнування (11) використаний для дослідження процесу поперечного видавлювання з подальшою осадкою циліндричних заготовок із сталі 10. Схема процесу наведена на рис. 1.

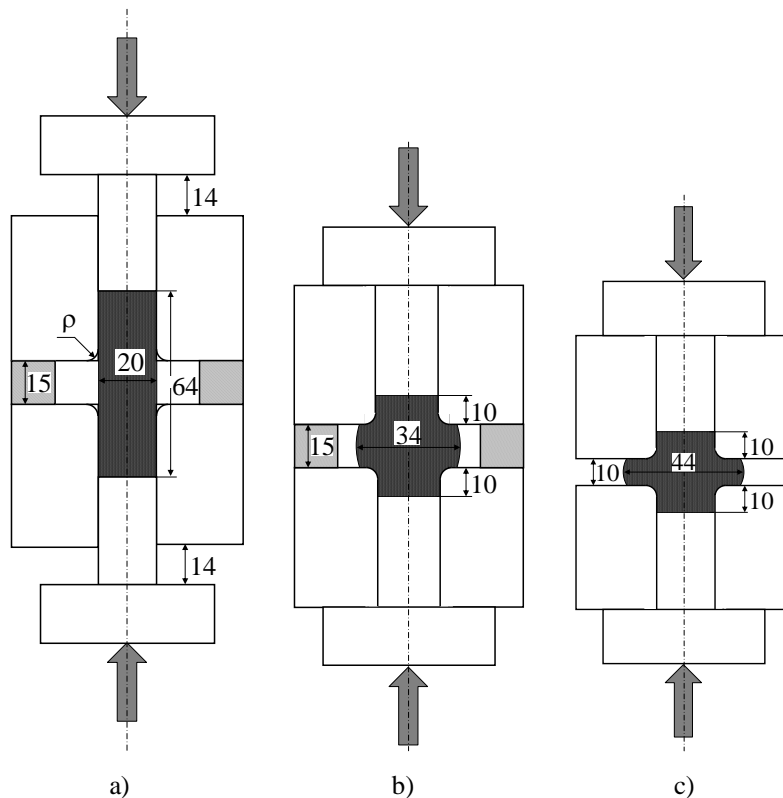


Рис. 1. Схема процесу поперечного видавлювання з подальшою осадкою отриманого фланця: а – вихідне положення; б – поперечне видавлювання; в – осадка

На першому етапі реалізується процес поперечного видавлювання (рис. 1, а), а на другому – осадка отриманого фланця (рис. 1, б). Розрахунок напружено-деформованого стану проводили методом координатних сіток, при цьому використовували методику, наведену в роботі [7]. Процес видавлювання та процес осадки проводили за три етапи. Шляхи деформування $\eta(e_u)$, $\mu_\sigma(e_u)$ будували з урахуванням впливу основних технологічних параметрів: відносної товщини фланця $h/2R_0$ та відносного значення закруглення перехідної кромки $r/2R_0$. Оскільки шляхи деформування в координатах e_u , η , μ_σ практично не залежать від матеріалу, то для досліджень напружено-деформованого стану використовували зразки із сурм'янистого свинцю ($d_0=28,2\text{mm}$, $l_0=60\text{mm}$), котрі розрізали на дві половини. На поліровану поверхню однієї з половин складеного зразка наносили гостро заточеним різцем прямокутну ділильну сітку з базою 2 мм. Потім зразки спаювали і виконували видавлювання окремих зразків до різних ступенів деформації за три переходи. Три зразки після останнього переходу поперечного видавлювання використовували для реалізації трьох переходів контурної осадки. Таким чином, кожен зразок характеризує деформований стан наприкінці відповідного етапу. Після кожного етапу зразки розпаювали та вимірювали координати вузлів деформованої сітки.

Крім того, на бічну поверхню зразків зі сталі 10 також наносили ділильну сітку і виконували поперечне видавлювання і контурну осадку за тією ж схемою що і деформували зразки зі свинцю.

Накопичену деформацію знаходили за формулою:

$$e_u = \int_0^t \dot{\epsilon}_u d\tau,$$

де $\dot{\epsilon}_u$ – інтенсивність швидкостей деформацій, t – час деформування.

Компоненти девіатора напружень обчислювали за співвідношеннями, що дозволяють

врахувати вплив немонотонності пластичної деформації [8], яка має місце у цьому процесі:

$$S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_u(e_u) \frac{\dot{\varepsilon}_{ij}}{\dot{\varepsilon}_u} - \frac{1}{3} \int_0^{e_u} (1 - \beta(e_u^*)) \sigma(e_u^*) \cdot \varphi(e_u^* - e_u^0) \frac{d^2 \varepsilon_{ij}}{de_u^2}(e_u^*) de_u^* . \quad (18)$$

Залежності $\beta(e_u)$, $\varphi(e_u - e_u^0)$ для сталі 10 отримували експериментально за методикою [8]. Експериментальні результати апроксимували функціями:

$$\beta = 0,34 + 0,66 \exp(-62e_u), \quad (19)$$

$$\varphi = 0,19 + 0,81(-22,3(e_u - e_u^0)^{0,806}). \quad (20)$$

Постійні, що входять (19) і (20) визначали методом найменших квадратів.

Компоненти тензора напружень знаходили шляхом інтегрування диференціальних рівнянь рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0, \quad (21)$$

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

використовуючи при цьому інтегральне рівняння

$$P = 2\pi \int_0^R \sigma_z r dr, \quad (22)$$

де R – радіус деформованої заготовки, P – зусилля, що вимірюється в процесі деформування досліджуваної заготовки.

Отримані результати розрахунку напруг та деформацій використовували для побудови шляхів навантаження $\eta(e_u)$, $\mu_\sigma(e_u)$ а також для розрахунку значень β_i .

Поверхню граничних деформацій для сталі 10 апроксимували залежністю, яка отримана в роботі [7]:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 0,68 \exp(0,43\mu_\sigma - 0,91\eta). \quad (23)$$

Розрахунок використаного ресурсу пластичності ψ для трьох точок на горизонтальній осі симетрії циліндричного зразка при радіальному видавлюванні з контурною осадкою можна здійснити за формулою:

$$\psi = \sqrt{\psi_1^2 + \psi_2^2 + \psi_3^2} \quad (24)$$

Поверхні граничних деформацій сталі 10 та траєкторії деформації часток матеріалу наведено на рис. 2.

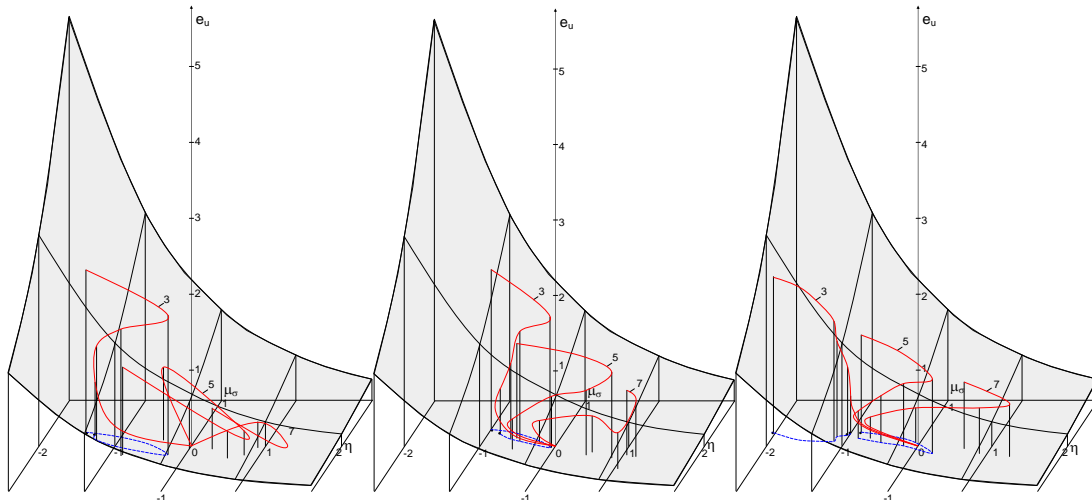


Рис. 2. Поверхня граничних деформацій і шляхи деформації часток матеріалу для точок, з початковими радіусами $r_{03} = 3,3$ мм (точка 3), $r_{05} = 6,6$ мм (точка 5) і $r_{07} = 10$ мм (точка 7): а – радіус заокруглення матриці $\rho = 1$ мм; б – $\rho = 3$ мм; в – $\rho = 5$ мм

Висновки

Розрахунок використаного ресурсу пластичності за критерієм (11) дозволить задовільно описати експериментальні результати. Розходження з експериментом не вище 18 %. При цьому слід відзначити, що врахування особливостей немонотонності пластичної деформації дозволяє отримати фланці, діаметр яких перевищує діаметр фланця при звичайному поперечному видавлюванні на 60 – 80 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Dell H. CrachFEM – A comprehensive approach for the prediction of sheet metal failure / H. Dell, H. Gese, G. Oberhofer // AIP Conference Proceedings. – 2007. – Volume 908, Issue 1. – P. 165 – 170. DOI: [10.1063/1.2740806](https://doi.org/10.1063/1.2740806).
2. Ogorodnikov V. A. 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 / V. A. Ogorodnikov, I. A. Dereven'ko, R. I. Sivak // Materials Science. – 2018. – 54 (3). – P. 326 – 332. DOI 10.1007/s11003-018-0188-x.
3. Solovei, V. D. A method for calculating the plastic anisotropy constants of the Hill theory / V. D. Solovei, V. L. Kolmogorov // AIP Conference Proceedings. – 2017. – 1915. – P. 040053. DOI: [10.1063/1.5017401](https://doi.org/10.1063/1.5017401).
4. Makushok E. M. Some features of a metallic structure and mechanisms of its destruction and joining under thermal and mechanical actions / E. M. Makushok, V. V. Kharchenko // Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal. – 2002. – № 75 (1). – P. 148 – 155.
5. Sivak R. Evaluation of metal plasticity and research of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading / R. Sivak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 6, № 7 (90). – P. 34 – 41. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.115040.
6. Rusinko A. Plasticity and creep of metals / A. Rusinko, K. Rusinko // Publisher Springer Berlin, Heidelberg, 2011. – 434 p. ISBN 978-3-642-21212-3. DOI 10.1007/978-3-642-21213-0.
7. The peculiarities of application of viscoplasticity method to computation of porous bodies stress state / D. V. Sakharov, I. O. Sivak, V. D. Pokras [et al.] // Poroshkovaya Metallurgiya. – 2000. – № 3-4. – P. 10 – 21.
8. Khvan A. D. Single sample method for assessing the baushinger effect / A. D. Khvan, D. V. Khvan, A. A. Voropaev // Industrial Laboratory. Materials Diagnosticsthis. – 2020. – № 86 (7). – P. 55 – 58.

Стаття надійшла до редакції 23.09.2023.

Стаття пройшла рецензування 27.09.2023.

Сивак Роман Іванович – д. т. н., доцент кафедри механіки та інженерії агроєкосистем. Поліський національний університет.

Савуляк Валерій Іванович – д. т. н., професор кафедри галузевого машинобудування. Вінницький національний технічний університет.