

УДК 621.777.01

ОЦІНКА СИЛОВОГО РЕЖИМУ У ПРОЦЕСАХ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КІНЕМАТИЧНИХ МОДУЛІВ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

Грудкіна Н.С.

Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

В наш час актуальною задачею залишається вибір раціонального та економічно обумовленого методу обробки металів, що забезпечить експлуатаційну надійність та якість отриманих деталей [1-3]. У зв'язку з цим збільшується інтерес до процесів холодного видавлювання, які демонструють тенденцію до збільшення обсягів виробництва та розширенню номенклатури штампованих деталей і матеріалів. Комбіноване (попереднє та суміщене) видавлювання при виробництві деталей з відростками (або фланцем) різної форми підвищує технологічні можливості процесів штампування, однак потребує наявності попередньої оцінки силового режиму та дотримання розмірів готової деталі [4-7]. Саме пошук прийомів спрощення розрахунків та отримання інженерних формул оцінки силових параметрів процесу деформування та формозміни напівфабрикату визначає задачі теоретичних досліджень процесів холодного видавлювання. Зазначимо, що на даний час аналіз енергосилових і деформаційних режимів в процесах холодного видавлювання на основі традиційних та комбінованих схем виконані найчастіше кінцево-елементним моделюванням та експериментально [6-9]. З іншого боку перспективними є дослідження цих процесів з використанням різних модифікацій енергетичного методу для розв'язання задач плоского та осесиметричного деформування [10]. Ускладнення конфігурації інструменту та межі розподілу течії всередині заготовки (особливо для комбінації поздовжньо-попереднього видавлювання) потребує розширення бази елементарних кінематичних модулів із похилими границями різної форми [11, 12]. Однак слід зазначити, що для кінематичних модулів трикутної та трапецеїдальної форми характерні труднощі, що виникають під час визначення величини приведенного зусилля деформування у вигляді аналітичної функції. Тому пошук прийомів спрощення величини потужності сил деформування та аналіз впливу на подальше визначення оптимальних параметрів отриманих спрощених виразів є актуальною задачею.

Перші спроби уникнути чисельних розрахунків під час визначення потужності сил деформування ґрунтувалися на використанні лінеаризація підінтегральних виразів інтенсивності швидкостей деформацій всередині кінематичного модуля. Однак їх використання найчастіше виявляється неефективним з огляду на неможливість обрати відповідну заміну, дійсну у всьому об'ємі кінематичного модуля або із суттєвим впливом на процес подальшої оптимізації за варіюваними параметрами (суттєвим зсувом оцінки оптимального значення). З іншого боку використання верхньої оцінки за Коші-Буняковським або кубатурними формулами дозволяють отримати в аналітичному вигляді величину потужності сил деформування із відхиленням, що не перевищує 1–3% [13-15]. Ще одним перспективним прийомом спрощення розрахунків приведенного зусилля є пошук функцій (або цілого сімейства функцій), які описують похилу криволінійну межу кінематичного модуля і дозволяють отримати потужності сил деформування, тертя і зрізу в аналітичному вигляді. Цей метод ґрунтується на пошуку функцій, що є розв'язком диференціального рівняння, відповідного до спрощеного виразу інтенсивності швидкостей деформації. Порівняльний аналіз доцільності використання прийнятих методів спрощення величини потужності сил деформування та приведенного тиску всередині розробленого осьового кінематичного трапецеїдального модуля (таблиця 1) є демонстрацією можливостей спрощення оцінок в межах застосування енергетичного методу [16]. Кінематично

можливо поле швидкостей (КМПШ) побудовано для використання даного кінематичного модуля у якості осевого із похилою лінійною межею контакту заготовки із інструментом та верхнім суміжним жорстким модулем.

Таблиця 1

Схема та КМПШ кінематичного модуля

Схема кінематичного модуля	КМПШ кінематичного модуля
	$\begin{cases} V_z = -V_0 + \frac{V_0(z-H)}{z(r)-H} \cdot \left(1 + \frac{z'(z)r}{2(H-z(r))}\right); \\ V_r = \frac{V_0 r}{2(H-z(r))}. \end{cases}$ <p>де $z_1(r) = k_1(r-R)$, $k_1 = z_1'(r) = -\frac{h}{R}$;</p> $\dot{\epsilon}_i = \frac{V_0 r \sqrt{A^2 + 3(H-h)^2 + B^2(z-H)^2}}{2\sqrt{3}(H-z_1(r))^2},$ $A = 3(H-h) - 2k_1 r, \quad B = \frac{k_1(3(H-h) - k_1 r)}{z_1(r) - H}.$

Вираз інтенсивності швидкостей деформації $\dot{\epsilon}_i$ для кінематичного модуля трапецеїдальної форми (таблиця 1) є досить громіздким. Для перевірки можливості використання лінеаризації досить вирішити питання порівняльного аналізу функцій в межах кінематичного модуля за умови $h < 2R/\sqrt{3}$:

$$\sqrt{3}\dot{\epsilon}_i = \left\{ \xi + 0,4 \cdot \left| \dot{\gamma}_{rz} \right|, \quad \left| \xi \right| > \left| \dot{\gamma}_{rz} \right|, \right. \quad (1)$$

де $\sqrt{3}\xi = -\frac{V_0}{2(z_1(r)-H)^3} \left(3(H-h) + \frac{2h}{R}r \right)$ за умови $(\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_\theta) \cdot (\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_z) < 0$.

Верхня оцінка потужності сил деформування на основі лінеаризації (1) приймає наступний вигляд:

$$N_{d2} = \frac{2\pi\sigma_s V_0}{3} (2 - 0,1\sqrt{3}k_1) \left[\frac{R(3Rk_1 + 2H)}{2k_1} + AR + \left(A \left(R + \frac{H}{k_1} \right) + \left(R + \frac{H}{k_1} \right)^2 \right) \ln \left(\frac{H}{H-h} \right) \right], \quad (2)$$

де $A = \frac{(3 - 0,3\sqrt{3}k_1)(H-h)}{(0,1\sqrt{3}k_1 - 2)k_1}$.

З іншого боку верхня оцінка за Коші-Буняковським формулами теж дозволяє отримати в аналітичному вигляді величину потужності сил деформування із незначним відхиленням. Для отримання величини приведенного тиску $\Delta \bar{p}$ в аналітичному вигляді також можна виконати верхню оцінку потужності сил деформування у вигляді:

$$\iiint_V \dot{\epsilon}_i^2 dV = -\frac{\pi V_0^2}{18k_1} (12 + k_1^2) \left[\begin{aligned} & R + (3C - A) \ln \left(\frac{H}{H-h} \right) - \left(\frac{1}{C} - \frac{k_1}{H} \right) (3C^2 - 2AC + B) - \\ & - \frac{1}{2} \left(\frac{k_1^2}{H^2} - \frac{1}{C^2} \right) (C^3 - AC^2 + BC) \end{aligned} \right], \quad (3)$$

$$\text{де } A = \frac{6(H-h)(6+k_1^2)}{(12+k_1^2)k_1}, \quad B = \frac{9(H-h)^2(4+k_1^2)}{(12+k_1^2)k_1^2}, \quad C = R + \frac{H}{k_1}.$$

$$N_{d3} = \sigma_S \sqrt{V \cdot \iiint_V \dot{\varepsilon}_i^2 dV}, \quad (4)$$

$$\text{де } V = 2\pi \int_0^R r dr \int_{z_1(r)}^H dz = \frac{(3(H+Rk_1) - 2Rk_1)R^2}{3} \pi - \text{об'єм області модуля.}$$

Таким чином, приведений тиск даного кінематичного модуля з урахуванням чисельних розрахунків в загальному випадку і запропонованих вище верхніх оцінок потужності сил деформування (2) та (4) має вигляд:

$$\Delta \bar{p}_i = \frac{N_{d_i} + N_{c \rightarrow} + N_{c \downarrow} + N_t}{\pi \sigma_s V_0 R^2}, \quad (5)$$

де N_{d_i} - потужності сил деформування чисельно ($i=1$), на основі лінеаризації ($i=2$) та за Коші-Буняковським ($i=3$); $N_{c \rightarrow}$ та $N_{c \downarrow}$ - потужності сил зрізу на поверхні входу та виходу відповідно; N_t - потужність сил тертя.

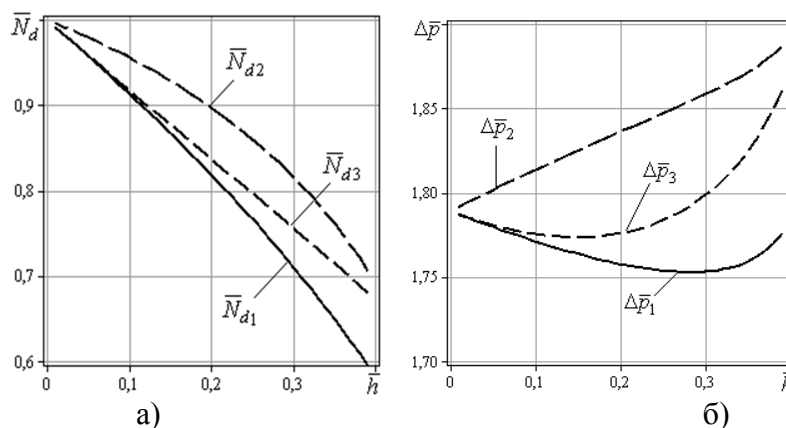


Рис.1. Залежності оцінок потужності сил деформування вигляду $\bar{N}_{d_i} = N_{d_i} / \pi \sigma_s V_0 R^2$ (а) та приведенного тиску $\Delta \bar{p}_i$ і його верхніх оцінок $\Delta \bar{p}_2$ і $\Delta \bar{p}_3$ (б) при $\bar{H} = 0.4$, $\mu_s = 0.08$

Проведений порівняльний аналіз поведінки величин $\bar{N}_{d1} = N_{d1} / \pi \sigma_s V_0 R^2$, отриманої чисельно, і верхніх оцінок у вигляді лінеаризації (2) $\bar{N}_{d2} = N_{d2} / \pi \sigma_s V_0 R^2$ та у вигляді (4) $\bar{N}_{d3} = N_{d3} / \pi \sigma_s V_0 R^2$ вказує на монотонне спадання функцій за всіх $\bar{h} = h/R \in (0, \bar{H})$. Однак відхилення величини з використанням лінеаризації інтенсивності швидкостей деформації від \bar{N}_{d1} є більш істотним як в чисельному вигляді, так і в характері поведінки кривих, що вказує на раціональність застосування верхньої оцінки (4) (рис. 1, а).

Аналіз залежностей приведенного тиску (5) і його верхніх оцінок також підтверджує раціональність застосування $\Delta \bar{p}_3$ з використанням оцінки потужності сил деформування за Коші-Буняковським (рис. 1, б). При цьому характер зміни кривих свідчить про суттєву відмінність при заміні величини приведенного тиску деформування $\Delta \bar{p}_1$ на верхню оцінку $\Delta \bar{p}_2$ із застосуванням лінеаризації. Монотонне зростання функції $\Delta \bar{p}_2$ вказує на неможливість подальшої оптимізації за параметром \bar{h} і є суттєвим обмеженням

можливостей її застосування. Для верхньої оцінки у вигляді $\Delta\bar{p}_3$ оптимізація за параметром \bar{h} є можливою, оптимальне значення зміщується в бік зменшення (відхилення $\Delta\bar{p}_3$ від $\Delta\bar{p}_1$ не перевищує 1–2%), що вказує на раціональність використання отриманої оцінки приведенного тиску деформування всередині трапецеїдального кінематичного модуля.

ВИСНОВКИ Розробка кінематичних модулів різної форми з похилими границями розширює базу уніфікованих кінематичних модулів та можливості використання енергетичного методу для моделювання процесів холодного видавлювання. Проаналізовано вплив заміни величини приведенного тиску її верхньою оцінкою із використанням лінеаризації інтенсивності швидкостей деформації та за Коші-Буняковським. Виявлено значні відхилення в характері зміни величини приведенного тиску при заміні на $\Delta\bar{p}_2$ (із використанням лінеаризації) із неможливістю подальшої оптимізації за параметром \bar{h} та рекомендовано використання верхньої оцінки за Коші-Буняковським. Таким чином, проведений порівняльний аналіз найуживаніших прийомів спрощення оцінки величини приведенного тиску деформування кінематичних модулів складної форми дозволяє розширити можливості використання енергетичного методу із наведенням відповідних рекомендацій.

Список використаних джерел

1. A search for technologies implementing a high fighting efficiency of the multilayered elements of military equipment / M. Zagirnyak, V. Zagirnyak, D. Moloshtan, V. Drahobetskiy, A. Shapoval // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 6, N 1 (102). P.33–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183269>.
2. Application of explosion treatment methods for production items of powder materials / V. Dragobetskiy, V. Zagirnyak, S. Shlyk, A. Shapoval, O. Naumova // Przeglad Elektrotechniczny. 2019. Vol. 5 (95). pp. 39-42. DOI: 10.15199/48.2019.05.10.
3. Analysis of the Sheet Shell's Curvature with Lamé's Superellipse Method during Superplastic Forming / O.S. Anishchenko, V.V. Kukhar, A.V. Grushko, I.V. Vishtak, A.H. Prysiazhnyi, E.Yu. Balalayeva // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. pp. 531–537. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.531>
4. 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. Derevenko, R. I. Sivak // Materials Science, 2018. Volume 54, Issue 3, pp 326–332. DOI: 10.1007/s11003-018-0188-x
5. Zhang S. H., Wang Z. R. Some new features in the development of metal forming technology. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, No1, P. 39–47
6. Bhaduri A. Extrusion. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. *Springer Series in Materials Science*, 2018, Vol. 264, pp. 599-646. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13.
7. Jamali S. S., Faraji G., Abrinia K. Hydrostatic radial forward tube extrusion as a new plastic deformation method for producing seamless tubes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. January 2017, Volume 88, Issue 1–4, pp. 291–301. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8754-6>.
8. Алиева Л. И. Совершенствование процессов комбинированного выдавливания: монография. Краматорск: ООО «Тираж - 51», 2018. 352 с. ISBN 978-966-379-84.
9. Jafarzadeh H., Zadsakoyan M., Abdi Sobbouhi E. Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*, 2010, No25, P. 857–863.
10. Шестаков Н. А. Энергетические методы расчёта процессов обработки металлов давлением: уч. пособ. Москва: МГИУ, 1998. 125 с.
11. Hrudkina N.S. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules / N.S. Hrudkina, L.I. Aliieva // FME Transactions. 2020. Vol. 48. No 2, pp. 357-363. doi:10.5937/fme2002357H.
12. Hrudkina N., Aliieva L., Abhari P., Markov O., Sukhovirskaya L. Investigating the process of shrinkage depression formation at the combined radial-backward extrusion of parts with a flange. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, N 5/1 (101), P. 49–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179232>.
13. Чудаков П. Д. Верхняя оценка мощности пластической деформации с использованием минимизирующей функции. Известия вузов. Машиностроение, 1992, № 9. С. 13–15.
14. Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression / L. Aliieva, N. Hrudkina, I. Aliiev, I. Zhbankov, O. Markov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 2/1 (104), P. 15–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433>.
15. Алиева Л. И. Моделирование процесса радиально-обратного выдавливания полых деталей / Л. И. Алиева, Н.С. Грудкина, К. Крюгер // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – № 1 (79). – С. 91–99. – DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.95873>
16. Грудкина Н.С. Верхняя оцінка приведенного тиску деформування осьового трапецеїдального кінематичного модуля з нижньою похилою межею // Вісник ДДМА. – 2019. – № 3 (47). – С. 21–27.