

УДК 621.777.01

DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-89-97

Наталія Грудкіна, Олег Марков

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ЗІ СКЛАДНОЮ КОНФІГУРАЦІЄЮ ІНСТРУМЕНТУ

Актуальність теми дослідження. Процеси холодного видавлювання забезпечують високу якість поверхні й точні розміри штампованих заготовок і деталей та завдяки цьому демонструють стійку тенденцію до розширення технологічних можливостей та впровадження на виробництві. Отримання інженерних формул розрахунків оптимального силового режиму, уявлення про характерні зони і межі розподілу течії металу та зон контакту деталі з інструментом, прогнозування формоутворення є актуальними завданнями, що потребують вирішення.

Постановка проблеми. Складні за формою деталі із суцільних або порожнистих заготовок доцільно виготовляти способами поперечного і комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання. При цьому конфігурація інструменту (наявність фасок, заокруглень) дозволяють сформувати необхідний профіль деталі та суттєво впливають на деформаційний та силовий режими деформування. Визначення оптимального силового режиму у вигляді інженерних формул з урахуванням впливу конструктивних особливостей інструменту сприятиме більш активному впровадженню наведених процесів на виробництві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі аналізу публікацій за останні роки було встановлено, що дослідження процесів холодного поздовжнього-поперечного видавлювання переважно проведені експериментально, методом скінченних елементів та стосуються визначення силового режиму, особливостей формозмінення та дефектоутворення напівфабрикату.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Невирішеними залишаються питання щодо отримання інженерних формул розрахунку силового режиму (особливо за наявності складної форми інструменту), що вказує на недостатню придатність отриманих результатів для використання на виробництві.

Метою статті є розширення технологічних можливостей процесів холодного видавлювання на основі розробки нових кінематичних модулів складної форми та вироблення відповідних рекомендацій щодо їх використання для отримання оцінки силового режиму деформування та визначення оптимальної конфігурації інструменту.

Виклад основного матеріалу. У роботі запропоновано використання наближеної кривої у якості заміни чверті кола, що відображає заокруглення матриці. Встановлено, що відхилення довжини дуги наближеної кривої та площі криволінійної трапеції, що обмежена нею, не перевищує 0,8 %, що вказує на адекватність запропонованої заміни. Проведено розрахунки приведенного тиску деформування всередині кінематичного модуля із заокругленням. Встановлено, що радіус заокруглення можна використовувати у вигляді параметра оптимізації конфігурації інструменту за величиною приведенного тиску деформування.

Висновки відповідно до статті. Розроблений новий кінематичний модуль із заокругленням дозволяє розширити можливості енергетичного методу для моделювання процесів холодного видавлювання із складною формою інструменту. Це дозволить надалі використовувати наведені розрахунки в нових схемах та сприятиме отриманню оцінки силового режиму та формозмінення і, як наслідок, виробленню рекомендацій щодо оптимальної конфігурації інструменту та більш активному впровадженню цих процесів на виробництві.

Ключові слова: математичне моделювання; процеси комбінованого видавлювання; кінематичний модуль; енергетичний метод; процес деформування.

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Процеси холодного видавлювання забезпечують високу якість поверхні й точні розміри штампованих заготовок і деталей та завдяки цьому демонструють стійку тенденцію до розширення технологічних можливостей та впровадження на виробництві. Отримання інженерних формул розрахунків оптимального силового режиму, уявлення про характерні зони та межі розподілу течії металу й зон контакту деталі з інструментом, прогнозування формоутворення є актуальними завданнями, що потребують вирішення.

Постановка проблеми. Складні за формою деталі із суцільних або порожнистих заготовок доцільно виготовляти способами поперечного і комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання. При цьому конфігурація інструменту (наявність фасок, заокруглень та ін.) дозволяють не тільки сформувати необхідний профіль деталі, а й суттєво впливають на деформаційний та силовий режими деформування. Визначення оптимального силового режиму у вигляді інженерних формул з урахуванням впливу конструктивних особливостей інструменту сприятиме більш активному впровадженню наведених процесів на виробництві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки дослідженням процесів радіально-поздовжнього (послідовного або суміщеного) видавлювання присвячено багато робіт [1-9]. При цьому аналіз силових і деформаційних режимів цих процесів виконано

переважно експериментально, на основі скінченно-елементного аналізу й методами верхньої оцінки. Способи «безматричного видавлювання» застосовують для виготовлення глибоких порожніх судин, що значно знижує питомі сили деформування в порівнянні з використанням зворотного видавлювання [3; 4]. У роботі [5] представлено силові характеристики процесу послідовного радіально-прямого видавлювання, проаналізовано вплив конструктивних параметрів і різних умов тертя. Перевірка достовірності результатів кінцево-елементного моделювання виконувалася на експериментальних даних за зусиллям деформування. У роботі [6] досліджували вплив конструктивних геометричних параметрів процесу послідовного радіально-прямого видавлювання (величини кільцевого зазору, товщини фланця та радіуса оправлення) на коливання навантаження. Висновок про незначний вплив на формування навантаження на пуансон і контрпуансон радіусів заокруглень перехідних ділянок інструменту викликають сумніви. Інтерес викликає дослідження експериментальним шляхом і методом верхньої оцінки способу комбінованого радіально-прямого видавлювання з використанням додаткового гідростатичного тиску в осередку деформації і введенням знакозмінного характеру деформації [7]. Значне збільшення міцності з дуже низькою втратою пластичності й високою однорідністю показників твердості деталі поряд зі зниженням загального навантаження є вагомими перевагами цього способу. Багато досліджень присвячені питанням оцінки напружено-деформованого стану заготовки та інструменту, дефектоутворення та деформованості металу заготовок при холодному комбінованому видавлюванні [8; 9]. У роботі [8] отримано оцінку напружено-деформованого стану (НДС), розрахунки ресурсу пластичності за різними критеріями для процесу комбінованого радіально-прямого видавлювання. Основною метою скінченно-елементного аналізу процесу радіально-прямого видавлювання [9] було вивчення впливу геометрії інструменту на НДС заготовки і знос інструменту. Однак переважна частина досліджень має обмежений характер та не дає інженерних формул розрахунку силового режиму (особливо за наявності складної форми інструменту), що вказує на недостатню придатність отриманих результатів для використання на виробництві.

Треба зазначити, що ефективним теоретичним методом розрахунків процесів холодного видавлювання є енергетичний метод балансу потужностей [10]. Цей метод дозволяє прогнозувати силовий режим деформування та формоутворення і дефектоутворення напівфабрикату. Причому цей метод дозволяє отримати величину приведенного тиску деформування в аналітичному вигляді з подальшою оптимізацією за геометричними чи кінематичними параметрами, а за деяких умов для процесів комбінованого суміщеного видавлювання і природи напівфабрикату. Розвитку можливостей енергетичного методу балансу потужностей на основі розширення бази кінематичних модулів складної конфігурації присвячено багато робіт [11-14]. Основні результати досліджень дозволяють враховувати особливості конфігурації інструменту [11; 12], форми меж розподілу течії металу всередині заготовки. Виявлено проблеми ускладнення математичного апарату при отриманні величини приведенного тиску деформування (в аналітичному вигляді) всередині кінематичного модуля трикутної або трапецієподібної форми з похилими межами. Чимало робіт присвячено вирішенню цих проблем - пошуку прийомів спрощення виразів приведенного тиску деформування та отримання відповідних інженерних формул розрахунків силового режиму процесів холодного видавлювання [11-14].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На основі літературного огляду встановлено, що оцінка технологічних можливостей процесів холодного видавлювання на основі розширення можливостей енергетичного методу балансу потужностей має важливе наукове та практичне значення, яке підтверджує актуальність роботи. Розширення бази уніфікованих кінематичних модулів складної конфігурації дозволить отримати оцінку силового режиму та формоутворення деталі у процесах холодного ви-

давлювання, що відповідає дійсності. Використання в розрахункових схемах цих процесів кінематичних модулів із похилими криволінійними межами натомість елементарних прямокутних модулів вимагає додаткових досліджень. Розробка нових кінематичних модулів складної конфігурації (особливо з заокругленнями) та рекомендацій щодо доцільності їх використання в розрахункових схемах досліджуваних процесів сприятиме вирішенню питань отримання адекватної оцінки оптимального силового режиму.

Метою статті є розширення технологічних можливостей процесів холодного видавлювання на основі розробки нових кінематичних модулів складної форми та вироблення відповідних рекомендацій щодо їх використання для отримання оцінки силового режиму деформування та визначення оптимальної конфігурації інструменту.

Виклад основного матеріалу. У межах використання енергетичного методу верхньої оцінки важливе місце відіграє розбиття об'єму заготовки на комплекс кінематичних модулів розрахункової схеми процесу. При цьому можлива побудова величезної кількості різних наборів кінематичних модулів із різними кінематично можливими полями швидкостей (КМПШ). Форма межі розділу течії металу всередині заготовки або складна конфігурація інструменту вимагає використання кінематичних модулів із криволінійною межею трикутної або трапецієподібної форми. Надалі найбільш ефективною вважається розрахункова схема з мінімальною величиною приведенного тиску деформування. При цьому для розрахункових схем комбінованого видавлювання із наявністю роз'єданого або суміщеного осередків деформації можливим є використання результатів одного з автономних осередків деформації. Наявність широкого кола процесів видавлювання із розвинутою радіальною складовою течії металу вимагає більш детального дослідження з точки зору відображення картини течії металу в зоні розвороту до радіальної течії і далі з течією до фланцевої зони з урахуванням наявності фасок або заокруглень на поверхні контакту матриці із заготовкою (рис. 1, 2).

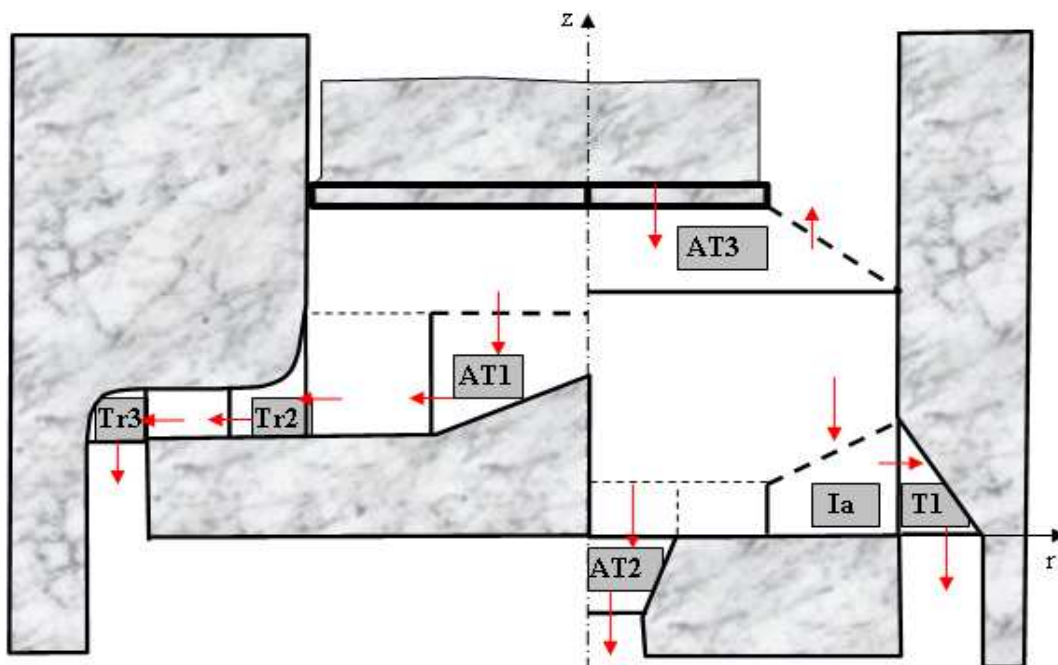


Рис. 1. Узагальнена схема комбінованого видавлювання

Основними кінематичними модулями складної форми є трапецієподібні осьові (рис. 1, AT1, AT2, AT3), внутрішні (рис. 1, Ia) та кінематичні модулі трикутної або трапецієподібної форми, що дозволяють враховувати форму поверхні контакту інструменту та заготовки у фланцевій зоні (T1, Tr2, Tr3).

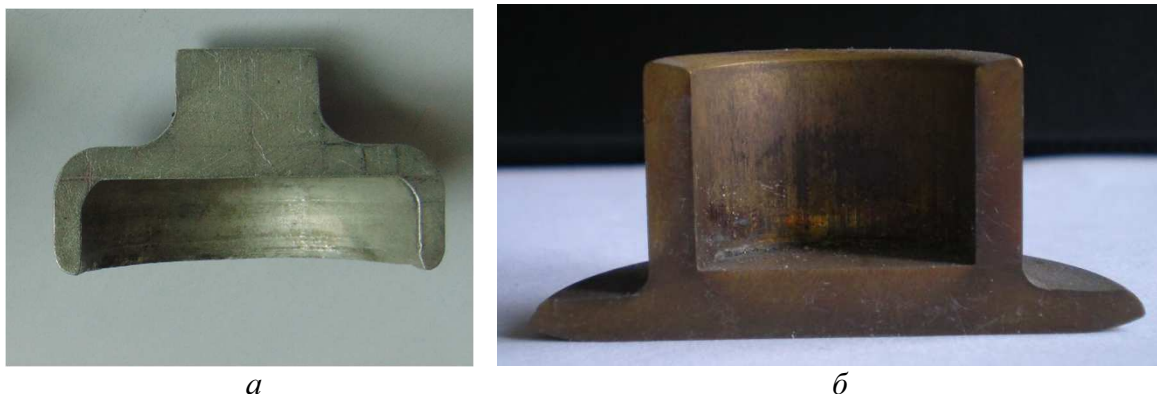


Рис. 2. Отримані деталі з наявністю заокруглень: а – комбіноване радіально-пряме видавлювання з роздачею; б – комбіноване радіально-зворотнє видавлювання

База уніфікованих кінематичних модулів із похилою прямолінійною межею включає трапецієподібні кінематичні модулі, для яких проведено розрахунки потужності сил деформування, тертя та зрізу між суміжними модулями. Однак для випадку віссиметричної задачі питання врахування межі у вигляді чверті кола не вирішене. Взагалі трапецієподібний модуль із криволінійною похилою межею має такий вигляд та відповідне КМПШ (таблиця).

Таблиця

Схема та КМПШ кінематичного трапецієподібного модуля

Схема кінематичного модуля	КМПШ кінематичного модуля
	<p>КМПШ кінематичного трапецієподібного модуля:</p> $\begin{cases} V_z = \frac{R_i(h_i + R)V_i}{rz^2(r)} z'(r) \cdot z, \\ V_r = \frac{R_i(h_i + R)V_i}{rz(r)}, \end{cases}$ <p>де $z(r)$ – будь-яка крива, що проходить через точки $(R_i, h_i + R)$ та $(R_i + R, h_i)$.</p>

Використання цього кінематичного модуля із прямолінійною межею не викликає труднощів, однак використання як функції $z(r)$ – чверті кола радіусу R з центром у точці $(R_i + R, h_i + R)$ не є можливим з огляду на не існування $z'(R_i)$, це не уможливило подальші розрахунки потужності сил зрізу на поверхні входу до модуля та потужності сил деформування. Таким чином, постає проблема пошуку кривої, наближеної до $z(r) = h_i + R - \sqrt{R^2 - (r - (R_i + R))^2}$, аналітичної для $r \in [R_i; R_i + R]$.

Розглянемо криву:

$$z_1(r) = \frac{A}{r - R_i \left(1 - \frac{R}{2\pi}\right)} + B, \tag{1}$$

де $A = \frac{R^2 R_i}{2\pi} \left(1 + \frac{R_i}{2\pi}\right)$; $B = h_i + R - \frac{2\pi A}{R_i R}$.

Продемонструємо відмінність даної кривої від чверті кола (рис. 3), переходячи до відносних величин $\bar{R}_i = 1$, $\bar{R} = R / R_i$, $\bar{h}_i = h_i / R_i$. Крива чверті кола відображена червоною лінією, наближена крива – чорною пунктирною лінією. Характер зміни кривих наближено подібний.

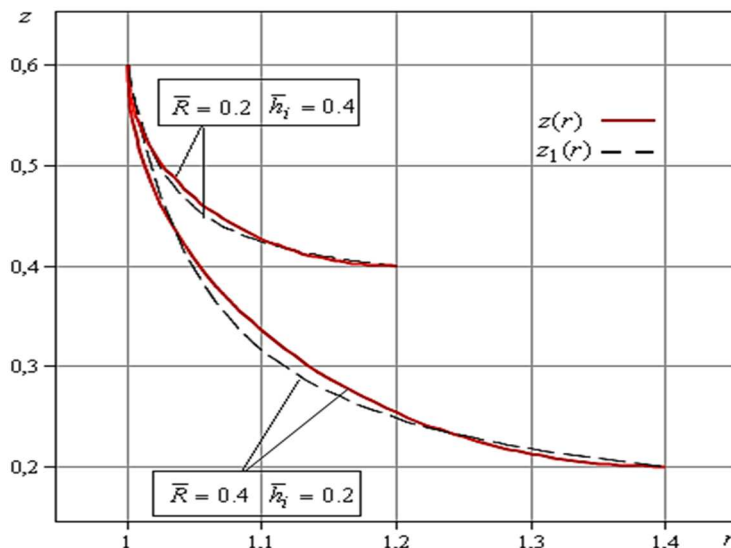


Рис. 3. Порівняльний аналіз поведінки кривих $z(r) = h_i + R - \sqrt{R^2 - (r - (R_i + R))^2}$ та $z_1(r)$

Відхилення за довжиною дуги (перевищення l_1 за кривою $z_1(r)$ відносно довжини l чверті кола) становить до 0,8 %, а за площею криволінійної трапеції, згори обмеженої даними кривими, становить ще менше. Отже, крива $z_1(r) = \frac{A}{r - R_i \left(1 - \frac{R}{2\pi}\right)} + B$ може бути ви-

користана у вигляді наближеної заміни чверті кола. Ця заміна надає можливість використання КМПШ у наведеному вище вигляді (табл. 1) та на відміну від чверті кола $z'_1(R_i) \neq 0$, що надає можливість проводити необхідні розрахунки.

Запишемо складові приведенного тиску деформування всередині кінематичного модуля Tr2 із урахуванням потужності сил деформування, зрізу на поверхні між суміжними кінематичними модулями та тертя на поверхні контакту інструменту та заготовки. Розглядання умов тертя буде в межах, характерних для процесів холодного видавлювання $\mu_s = 0,08$. Наведемо потужності сил тертя на поверхні заокруглення та на нижній межі кінематичного модуля у вигляді:

$$N_{i0} = \frac{4\pi\sigma_s\mu_s V_i R_i (h_i + R)}{\sqrt{3}B} \left[R - \frac{A}{B} \ln \left| \frac{BR \left(1 + \frac{R_i}{2\pi}\right) + A}{B \frac{R_i R}{2\pi} + A} \right| \right]; \tag{2}$$

$$N_{i1} = N_{i0} + \frac{4\pi\sigma_s\mu_s V_i R_i (h_i + R)A}{\sqrt{3}} \left[\frac{B^2}{A^2} \ln \left| \frac{\left(\frac{R_i R}{2\pi} + \frac{A}{B}\right)C}{\frac{R_i R}{2\pi} \left(C + \frac{A}{B}\right)} \right| + \frac{B}{A} \left(\frac{1}{C} - \frac{2\pi}{R_i R}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{C^2} - \frac{4\pi^2}{R_i^2 R^2}\right) \right], \tag{3}$$

де $C = R \left(1 + \frac{R_i}{2\pi}\right)$.

Потужність сил деформування всередині кінематичного модуля знаходимо у вигляді верхньої оцінки за Коші-Бунаковським:

$$N_d \leq \sigma_s \sqrt{M \cdot W}, \quad (4)$$

де $M = \iiint_V \dot{\varepsilon}_i^2 dV$, $\dot{\varepsilon}_i$ – інтенсивність швидкостей деформації;

$$V = 2\pi \left[A \left(R + R_i \left(1 - \frac{R}{2\pi} \right) \ln \left| \frac{2\pi C}{R_i R} \right| \right) + B \frac{(R_i + R)^2 - R_i^2}{2} \right] - \text{об'єм модуля.}$$

Якщо вважати сусідніми кінематичними модулями уніфіковані модулі для випадку радіального видавлювання, потужності сил зрізу приймають вигляд:

$$N_{ci} = \frac{\pi \sigma_s (h_i + R)}{\sqrt{3}} \left[\frac{4\pi^2 A V_i}{R_i R^2} - V_0 R_i \right]; \quad (5)$$

$$N_{cj} = \frac{\pi \sigma_s R_i (h_i + R) A}{\sqrt{3} C^2}. \quad (6)$$

Величина приведенного тиску деформування кінематичного модуля Tr2 із урахуванням (2) – (6) приймає вигляд:

$$\bar{p} = \frac{N_d + N_{ci} + N_{cj} + N_{t0} + N_{t1}}{\pi \sigma_s V_0 R_i^2}. \quad (7)$$

Для дослідження питання можливості оптимізації радіуса заокруглення необхідно розглядання величини приведенного тиску деформування обов'язково з урахуванням потужності сил зрізу між суміжними кінематичними модулями. Проаналізуємо поведінку величини приведенного тиску деформування \bar{p} , розрахованих за (7), залежно від радіуса заокруглення матриці R (рис. 4). За будь-яких значень товщини фланцевої зони криві приведенного тиску деформування мають точку мінімуму, що вказує на можливості оптимізації форми інструменту за радіусом заокруглення. При цьому зі збільшенням товщини фланцевої зони оптимальне значення радіуса заокруглення теж збільшується поряд зі зменшенням самої величини приведенного тиску деформування.

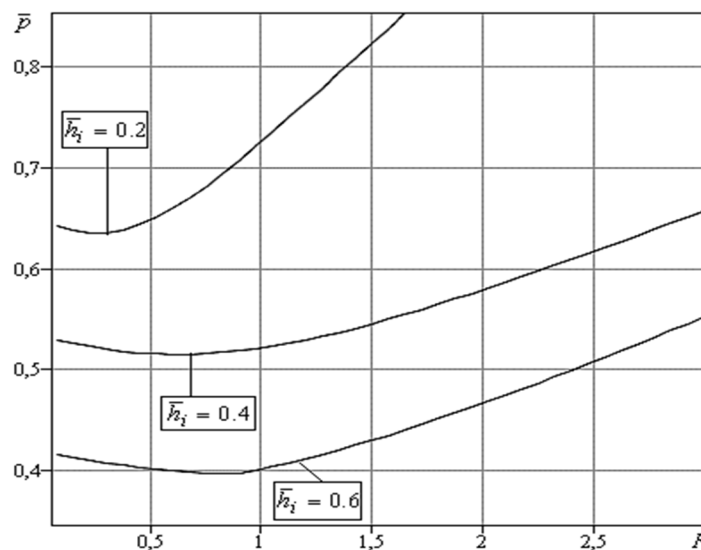


Рис. 4. Зміння величини приведенного тиску деформування при $\mu_s = 0,08$ за різних \bar{h}_i

Висновки відповідно до статті. Запропоновано використання кривої вигляду $z_1(r)$ як заміна чверті кола, що відображає заокруглення матриці. Встановлено, що відхилення довжини дуги наближеної кривої та площі криволінійної трапеції, що обмежена нею, не перевищує 0,8 %, що вказує на адекватність запропонованої заміни. Проведено розрахунки приведенного тиску деформування всередині кінематичного модуля із заокругленням. Встановлено, що радіус заокруглення можна використовувати у вигляді параметра оптимізації конфігурації інструменту за величиною приведенного тиску деформування. Розроблений новий кінематичний модуль із заокругленням дозволяє розширити можливості енергетичного методу для моделювання процесів холодного видавлювання зі складною формою інструменту. Це дозволить надалі використовувати наведені розрахунки в нових схемах та сприятиме отриманню оцінки силового режиму та формозмінення і, як наслідок, виробленню рекомендацій щодо оптимальної конфігурації інструменту та більш активному впровадженню даних процесів на виробництві.

Список використаних джерел

1. Bhaduri A. Extrusion. *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys*. 2018. Pp. 599-646. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13.
2. Aliev I. S. Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Sheet Metal Stamping Technology*. 1988. Vol. 6. Pp. 1-4.
3. Ренне И. П., Сумарокова А. И. Технологические возможности процесса свободного выдавливания (без матрицы) полых деталей. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1987. № 6. С. 25–26.
4. Kalyuzhnyi V. L., Aliieva L. I., Kartamyshev D. A., Savchinskii I. G. Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts. *Metallurgist*. 2017. Vol. 61, № 5-6. Pp. 359-365. URL: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>.
5. Lee Y. S., Hwang S. K., Chang Y. S., Hwang B. B. The forming characteristics of radial-forward extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. Vol. 113, № 1-3. Pp. 136–140. URL: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00705-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00705-1).
6. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Abdi Sobbouhi, E. Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2010. № 25. Pp. 857–863. URL: <https://doi.org/10.1080/10426910903536741>.
7. Savarabadi M., Faraji G., Zalnezhad E. Hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) as a new severe plastic deformation method for producing long nanostructured tubes. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. № 785. Pp. 163–168. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.149>.
8. Ogorodnikov, V., Derevenko, I., Sivak, R. 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. Vol. 54, № 3, 326–332. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0188-x>.
9. Noh J., Hwang B. B. Numerical analysis of tool geometry effect on the wear characteristics in a radial forward extrusion. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015. Vol. 29, № 8. Pp. 3447–3457. URL: <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0743-4>.
10. Шестаков Н. А. Энергетические методы расчета процессов обработки металлов давлением : учебное пособие. Москва : МГИУ, 1998. 125 с.
11. Hrudkina N. S., Aliieva L. I. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*. 2020. Vol. 48, № 2. Pp. 357-363. DOI: 10.5937/fme2002357H.
12. Aliieva L., Hrudkina N., Aliiev I., Zhibankov I., Markov O. Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2/1(104). Pp. 15–22. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433>.
13. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Kartamyshev D., Shevtsov S., Kuznetsov M. Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3/1 (105). Pp. 17–22. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203989>.

14. Hrudkina N., Aliieva L., Abhari P., Markov O., Sukhovirska 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, № 5/1 (101). Pp. 49–57. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179232>.

References

1. Bhaduri, A. (2018). Extrusion. *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys*, pp. 599–646. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13.

2. Aliev, I. S. (1988). Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Sheet Metal Stamping Technology*, 6, pp. 1-4.

3. Renne, I. P., Sumarokova, A. I. (1987). Tehnologicheskie vozmozhnosti protsessa svobodnogo vydavlivaniia (bez matritsy) polykh detalei [Technological capabilities of the process of free extrusion (without a matrix) of hollow parts]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 6, 25–26.

4. Kalyuzhnyi, V. L., Aliieva, L. I., Kartamyshv, D. A., Savchinskii, I. G. (2017). Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts. *Metallurgist*, 61(5-6), pp. 359-365. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>.

5. Lee, Y. S., Hwang, S. K., Chang, Y. S., Hwang, B. B. (2001). The forming characteristics of radial-forward extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3), pp. 136–140. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00705-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00705-1).

6. Jafarzadeh, H., Zadshakoyan, M., Abdi Sobbouhi, E. (2010). Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*, 25, pp. 857–863. <https://doi.org/10.1080/10426910903536741>.

7. Savarabadi, M., Faraji, G., Zalnezhad, E. (2019). Hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) as a new severe plastic deformation method for producing long nanostructured tubes. *Journal of Alloys and Compounds*, 785, pp. 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.149>.

8. Ogorodnikov, V., Derevenko, I., Sivak, R. (2018). 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*, 54(3), pp. 326–332. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0188-x>.

9. Noh, J., Hwang, B. B. (2015). Numerical analysis of tool geometry effect on the wear characteristics in a radial forward extrusion. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(8), pp. 3447–3457. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0743-4>.

10. Shestakov, N. A. (1998). *Energeticheskie metody rascheta protsessov obrabotki metallov davleniem [Energy methods for calculating the processes of metal forming]*. MHYU.

11. Hrudkina, N. S., Aliieva, L. I. (2020). Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*, 48(2), pp. 357-363. DOI: 10.5937/fme2002357H.

12. Aliieva, L., Hrudkina, N., Aliiev, I., Zhabankov, I., Markov, O. (2020). Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/1(104), pp. 15–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433>.

13. Hrudkina, N., Aliieva, L., Markov, O., Kartamyshv, D., Shevtsov, S., Kuznetsov, M. (2020). Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/1(105), pp. 17–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203989>.

14. Hrudkina, N., Aliieva, L., Abhari, P., Markov, O., Sukhovirska, L. (2019). Investigating the process of shrinkage depression formation at the combined radial-backward extrusion of parts with a flange. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(5/1(101)), pp. 49–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179232>.

Natalia Hrudkina, Oleg Markov

MATHEMATICAL SIMULATION OF COLD EXTRUSION PROCESSES WITH COMPLEX TOOL CONFIGURATION

Urgency of the research. Cold extrusion processes provide a high surface quality and precise dimensions of stamped workpieces and parts, and thus demonstrate a steady trend to expansion of technological capabilities and implementation in manufacturing. Obtaining of engineering formulas for calculating of the optimal power mode, presenting about characteristic zones and boundaries of the metal flow and contact zones of the part with deformation tool, predicting of shape formation are urgent tasks that need to solve.

Target setting. It is advisable to produce parts of complex shape from solid or hollow workpieces by methods of transverse and combined radial-longitudinal extrusion. In this case, the configuration of the tool (the presence of chamfers and roundings) allows to form the required profile of the part and significantly affects on the deformation and power modes of the deformation. Determination of the optimal power mode in the form of engineering formulas, taking into account the influence of design features of the tool, will contribute to a more active implementation of these processes in the manufacturing.

Actual scientific researches and issues analysis. Based on the analysis of publications in recent years, it has been established that studies of the processes of cold longitudinal-transverse extrusion are mainly carried out by experimental and by the finite element method and relate to the determination of the power regime, the features of the shape resizing and defect formation of the workpiece.

Uninvestigated parts of general matters defining. Obtaining of the engineering formulas for calculating the power regime (especially for the complex tool shape) remain unresolved, which indicates the insufficient suitability of the obtained results for using in the production.

The research objective is an expanding of the technological capabilities of the cold extrusion processes based on the development of new kinematic modules with complex shape and the development of appropriate recommendations for their using to obtain an assessment of the deformation force mode and determine of optimal tool configuration.

The statement of basic materials. The paper proposes the using of an approximate curve as a replacement for a quarter of a circle reflecting of the matrix rounding. It has been found that the deviation of the arc length of the approximate curve and the area of the curved trapezoid bounded by it does not exceed 0.8%, which indicates the adequacy of the proposed replacement. Calculations of ratio pressure into of the kinematic module with rounding have been carried out. It has been established that the radius of curvature can be used as a parameter for optimizing the configuration of the tool according to the value of the ratio pressure.

Conclusions. Developed new kinematic module with rounding allows to expand the capabilities of upper bound method for modeling the processes of cold extrusion with a complex tool shape. This will allow in the future to use the above calculations in new schemes and will help to obtain an assessment of the power mode and shape resizing and, as a result, to develop recommendations for the optimal configuration of the tool and more active implementation of these processes in the manufacturing.

Keywords: mathematical simulation, combined extrusion processes, kinematic module, upper bound method, deformation process.

Fig.: 4. Table: 1, References: 14.

Грудкіна Наталія Сергіївна – докторант кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Hrudkina Natalia – Postdoctoral Researcher of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: vm.grudkina@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0914-8875>

SCOPUS: 56257651900

Марков Олег Євгенійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Markov Oleg – Doctor in Technical science, Professor, Head of department of computerized design and modeling of processes and machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: oleg.markov.ond@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>

SCOPUS: 55648046800