

УДК 621.777.4

¹ГРУДКІНА Н. С., ²КУЗНЕЦОВ М. М., ³ПАШИНСЬКИЙ В. В.

¹Донбаська державна машинобудівна академія, Україна

²Донбаська національна академія будівництва і архітектури, Україна

³ТОВ Науково-виробниче об'єднання "ДОНІКС", Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТОЧНОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ ВИДАВЛЮВАННЯМ НА ОСНОВІ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕТОДУ БАЛАНСУ ПОТУЖНОСТЕЙ

Мета. Удосконалення проектування технологій точного об'ємного штампування видавлюванням на основі розвитку енергетичного методу балансу потужностей. Вироблення рекомендацій щодо раціонального використання систематизованої бази кінематичних модулів складної конфігурації при побудові розрахункових схем оцінки силового режиму та формоутворення в процесах холодного видавлювання із подальшою програмною реалізацією.

Методика. Енергетичним методом балансу потужностей на основі методу кінематичних модулів систематизовано результати дослідження розширення можливостей застосування процесів холодного видавлювання із визначенням силового режиму деформування та особливостей формоутворення напівфабрикату при виготовленні порожнистих та стрижневих деталей з фланцем, типу гільз та стаканів.

Результати. Систематизовано розширену базу кінематичних модулів складної конфігурації із виробленням рекомендацій щодо їх раціонального використання при побудові розрахункових схем процесів, в тому числі з можливістю оперативного врахування зміни конфігурації інструменту. Це дозволило визначити фактори керування формоутворенням напівфабрикату у процесах суміщеного та послідовного комбінованого холодного видавлювання.

Наукова новизна. Підтверджено можливості енергетичного методу балансу потужностей як ефективного методу попереднього аналізу визначення області раціонального застосування холодного видавлювання в рамках проектування технологічного процесу отримання складнопрофільованих деталей.

Практична значимість. Розроблений програмний продукт з систематизації розширеної бази кінематичних модулів, комплексу розрахункових моделей процесів холодного видавлювання з оцінки силового режиму, прогнозування формоутворення та дефектоутворення у вигляді утягнення сприятиме більш активному впровадженню процесів комбінованого видавлювання на виробництві.

Ключові слова: енергетичний метод балансу потужностей; комбіноване видавлювання; кінематичний модуль; проектування технологічного процесу.

Вступ. Процеси точного об'ємного штампування (ТОШ) видавлюванням демонструють високу ефективність та широкий діапазон можливостей у порівнянні з іншими процесами формоутворення напівфабрикатів, що сприяє розширенню номенклатури і матеріалів деталей, які виготовляють на такий спосіб [1–8]. Перспективним напрямком розвитку ТОШ є всебічне дослідження та активне впровадження на виробництві процесів комбінованого видавлювання у роз'ємних матрицях, що дозволяє використовувати переваги поєднаних простих способів обробки та скоротити кількість та час операцій і отримати складнопрофільовані деталі більш точних розмірів і форми [1–3, 5–8]. Однак ці процеси на противагу переліченим перевагам мають і труднощі застосування, пов'язані з наявністю саморегульованого режиму формоутворення, що вимагає адекватної попередньої оцінки як силового режиму деформування, так (що найважливіше для процесів з декількома ступенями свободи течії) і формозміни напівфабрикату та можливого дефектоутворення [3, 4]. При цьому конструктивні особливості інструменту у вигляді фасок, заокруглень, крайок виступають факторами керування формоутворенням напівфабрикату, що значно розширює можливості

способів комбінованого суміщеного видавлювання, та вимагає забезпечення оперативності при аналізі за рахунок введення цих змін в розрахункові моделі на етапі проектування. Таку оперативність у врахування змін конфігурації інструменту, умов тертя та інших технологічних факторів на можливість прогнозування силового режиму, особливостей формоутворення та дефектоутворення забезпечує енергетичний метод балансу потужностей (ЕМБП) на основі використання модульного підходу, що значно спрощує етап проектування, пов'язаний з оцінкою раціональності використання процесів комбінованого видавлювання, особливо для виготовлення складнопрофільованих деталей [5, 9, 11–14].

Постановка завдання. На даний час використовують методики проектування технологічних процесів (ТП), що ґрунтуються на системному підході вирішення задач практичного характеру та на груповому методі організації виробництва деталей. Таким чином, головна мета проектування технології полягає в розробці оптимального за комплексом умов та характеристик процесу. При цьому наявність спрощених даних та співвідношень з визначення граничних навантажень на інструмент, величин запасу пластичності і ступенів формоутворення, технологічних факторів, що відповідають дефектоутворенню різного роду, обумовлюють можливості використання способів холодного комбінованого видавлювання.

Таким чином, розширення можливостей процесу проектування технологій ТОШ видавлюванням на основі розвитку модульного підходу при розрахунках енергетичним методом балансу потужностей є актуальною науково-практичною задачею.

Результати дослідження. Алгоритм розробки процесів виготовлення деталей ТОШ видавлюванням можна описати вдосконаленою схемою [10], що ґрунтується на відомих алгоритмах розробки технологій штампування (рис. 1). Система проектування ТП видавлюванням містить сім основних етапів, інформаційне забезпечення та комплекс розрахункових моделей, що забезпечують реалізацію цих етапів [5, 11–18] із обов'язковим урахуванням умов виробництва і рівня наявних базових технологій.

В рамках виконання першого етапу для аналізу області раціонального застосування технологічних способів комбінованого видавлювання необхідним є вироблення комплексу обмежень для обраних способів видавлювання, головні з яких пов'язані з ресурсом пластичності та можливістю появи дефектів різного роду. Основою такої бази обмежень можуть слугувати результати досліджень ЕМБП появи утягнень в процесах радіально-поздовжнього видавлювання. Також для процесів з декількома ступенями свободи течії необхідним є контроль відповідності затребуваних розмірів напівфабрикату. У разі відхилень потрібно аналізувати можливості керування течією металу введенням змін у конфігурацію формоутворювальних інструментів у вигляді крайок, фасок та заокруглень. Другий етап полягає у розробці таких альтернативних варіантів ТП з відповідною вихідною інформацією (перелік типових процесів видавлювання) та бази основних характеристик обладнання і штампованих матеріалів. Третій етап полягає у виробленні системи критеріїв оцінки ефективності альтернативних процесів із відповідною вихідною інформацією, яка складається із системи показників ефективності обраної технології та містить принципи реалізації процесів ТОШ видавлюванням і базу методів прийняття рішень.

Четвертий етап процесу проектування представляє собою реалізацію вибору ефективного варіанту ТП із використанням встановлених критеріїв оцінки із його подальшою розробкою на п'ятому етапі. Реалізація розроблених розрахункових моделей процесів холодного видавлювання представлена у вигляді програмного модуля та використовується в якості модулів проектних систем в Донбаській державній машинобудівній академії (ДДМА) і на виробництві із апробацією запропонованих способів з використанням відповідного штампного оснащення. Шостим етапом є детальна розробка технологічного оснащення на основі класифікатора та сучасних комп'ютерних систем проектування штампів та змінних інструментів, відповідна нормативна та методична документація. Останній етап - це дослідно-

промислове відпрацювання визначеної технології із обов'язковим випробуванням штампового оснащення і деформуючого інструменту.

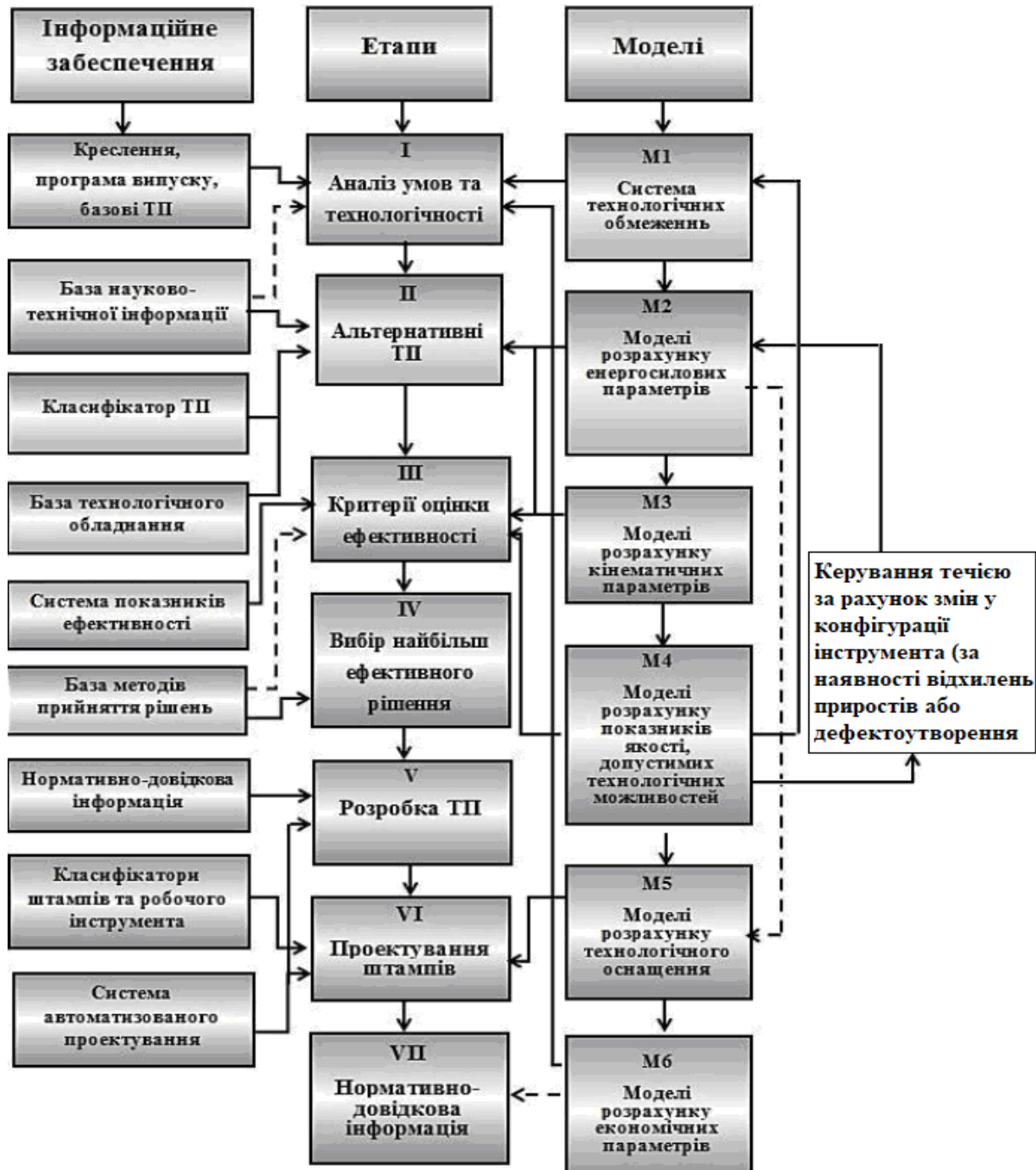


Рис. 1. Алгоритм розробки процесів точного об'ємного штампування видавлюванням

Реалізація другого етапу проектування процесів комбінованого видавлювання, в тому числі з декількома ступенями свободи течії, ґрунтується на запропонованій класифікації уніфікованих кінематичних модулів (елементів), в тому числі складної форми (трикутної або трапецеїдальної та їх комплексами) з різним орієнтуванням за швидкостями входу та виходу і формою (лінійною або нелінійною) похилих меж [5, 10]. Виокремлення їх властивостей, узагальнення кінематично можливого поля швидкостей (КМПШ) в рамках використання

методу кінематичних модулів (МКМ), дозволило виробити рекомендації із доцільності їх застосування в порівнянні із найуживанішими прямокутними кінематичними модулями із урахуванням конфігурації суміжних кінематичних модулів та особливостей вбудовуваності для різних осередків деформації при побудові розрахункових схем [5, 11–18] (рис. 2).

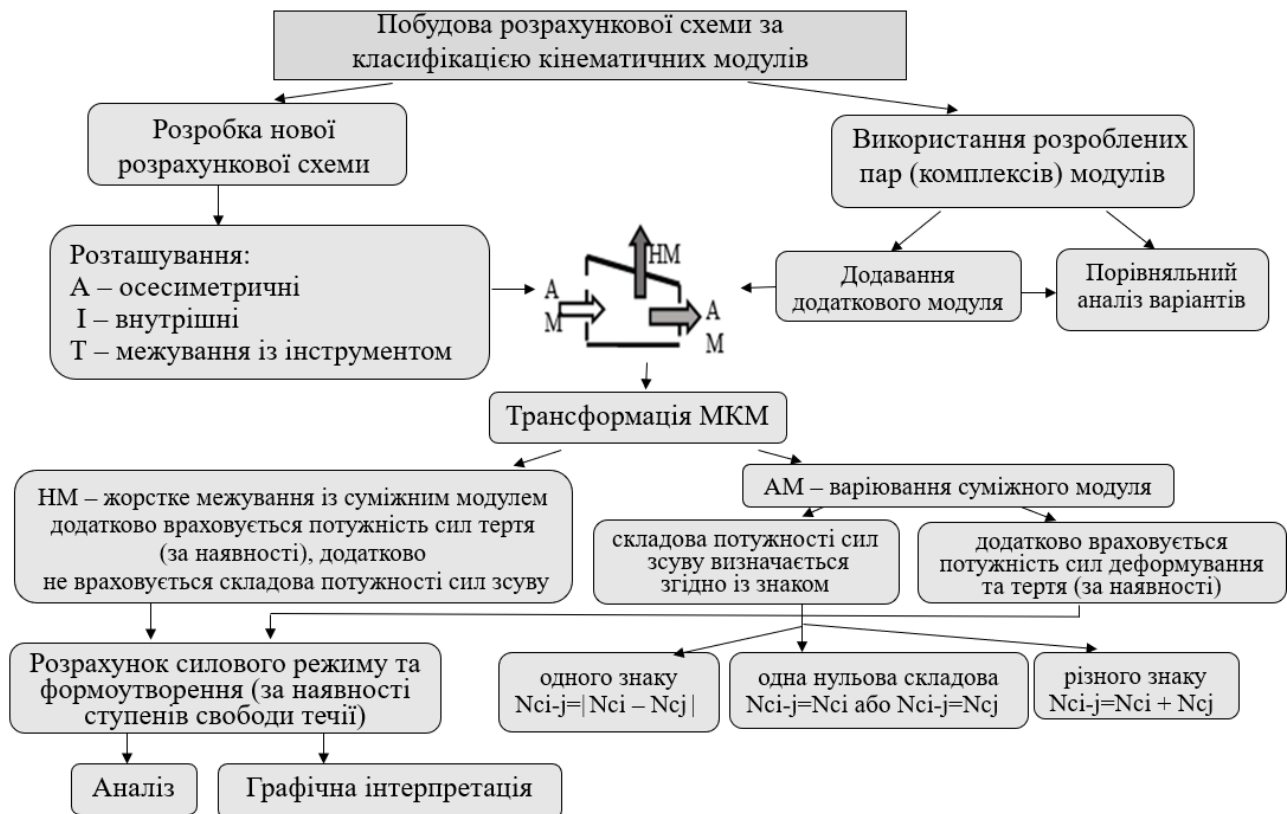
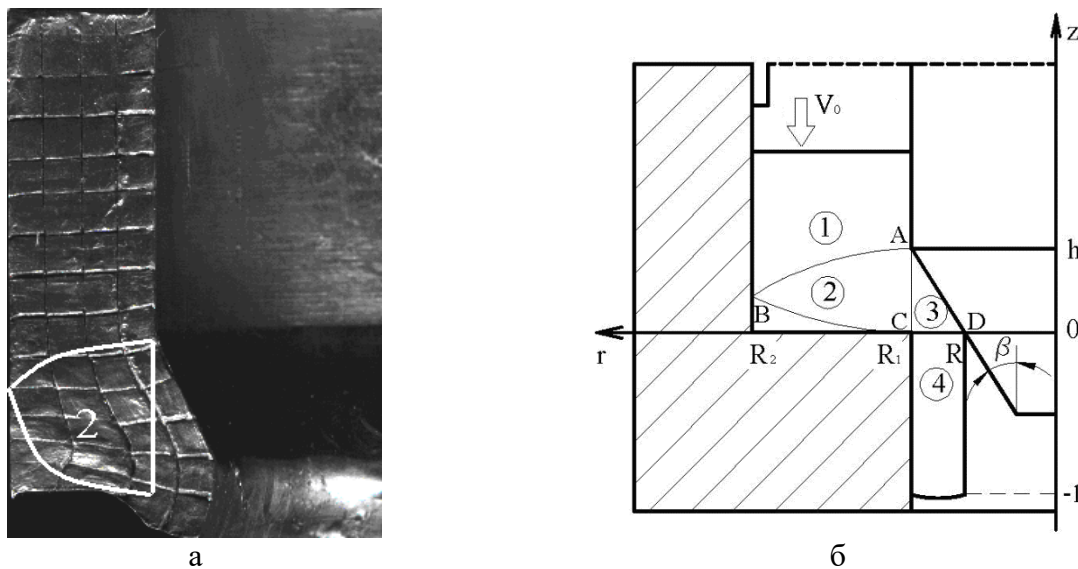


Рис. 2. Рекомендації з використання кінематичних модулів та методу кінематичних модулів в рамках проектування процесів ТОШ видавлюванням

Алгоритм побудови нової розрахункової схеми на основі відомих її складових частин (наприклад, видозмінення за рахунок добудови у вигляді кінематичного модуля, що описує фаску або заокруглення) полягає у з'єднанні із суміжним кінематичним модулем із урахуванням складових потужностей сил зсуву (відповідних приведених тисків деформування) із обов'язковим урахуванням їх знаків (рис. 2). При цьому розробка нових розрахункових схем повинна ґрунтуватися на експериментально виявлених формах осередків пластичної деформації, побудова комплексу модулів виконується також згідно їх розташування та геометричних параметрів R , R_1 , R_2 , h , що визначаються розмірами матриць та пуансону та кутом нахилу втулки β (рис. 3) [11]. Після розрахунків енергосилового режиму та формоутворення напівфабрикату для процесів суміщеного комбінованого видавлювання з швидкістю руху пуансону V_0 за умови невідповідності напівфабрикату необхідним розмірам готової деталі, базову схему змінюють шляхом введення конструктивних особливостей у вигляді фасок та заокруглень, які розглядають як фактори керування течією металу. Такі зміни для процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання впливають не тільки на оформлення фланцевої зони та висоту стінки стакану, що формується, а й на момент появи утягнення в донній частині заготовки (рис. 4).



Джерело: [11].

Рис. 3. Дослідження процесу радіально-прямого видавлювання з обтисненням:
а) викривлення ділильної сітки для АД1; б) розрахункова схема ЕМБП

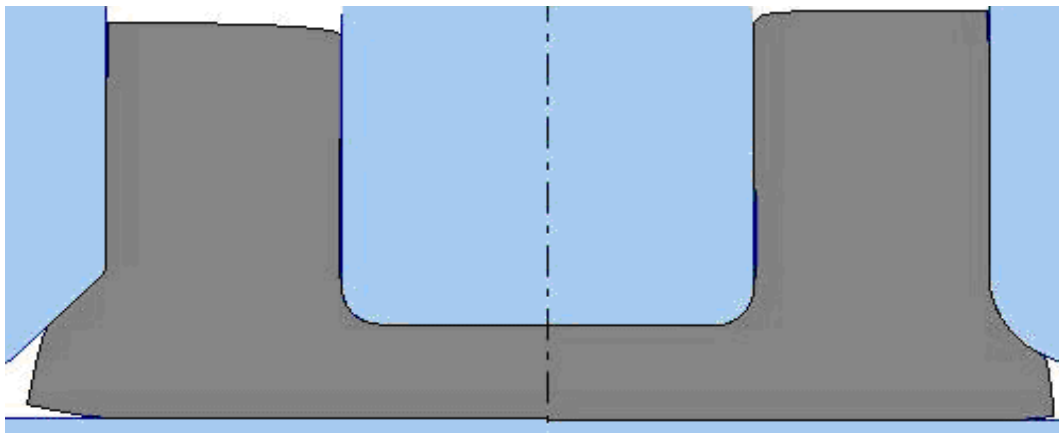


Рис. 4. Вплив змін конфігурації інструменту на формоутворення напівфабрикату

Результати проведених досліджень згідно систематизації кінематичних модулів та розроблених розрахункових моделей процесів холодного видавлювання реалізовано у вигляді програмного продукту «EXTRUSION», що використовується в навчальному процесі на лабораторних роботах, у науково-дослідних цілях та на підприємствах. Програма складається модулів Modules.exe (систематизація бази кінематичних модулів, рис. 5) та модуля розрахунку extrude_eng.exe (розроблені розрахункові моделі, рис. 6), що містить підмодуль прогнозування «дефектоутворення» Points2.exe.

В подальшому планується розширення програмного продукту за рахунок доповнення новими розрахунковими модулями процесів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання. Рекомендації із прогнозування енергосилового режиму, формозмінення напівфабрикату, можливого дефектоутворення та оптимальної конфігурації інструменту, отримані для процесів комбінованого (послідовного та суміщеного) поздовжньо-радіального видавлювання, для процесів прямого видавлювання з обтисненням та роздаванням, сприятимуть розширенню номенклатури стрижневих та порожнистих деталей з фланцем, типу стаканів, гільз та втулок.

MODULES

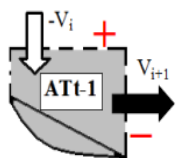
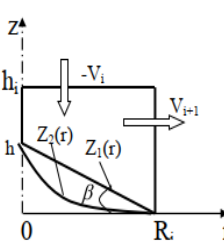
МОДУЛІ - МОДУЛЬ 1 - Конфігурація інструмента - Внутрішні - ATt-1 - AT-1 - AT-2 - AK_2a-2c - AP-1 - Зовнішні - Tr-1 - T-1 - TR-1 - Tt-1 - P-1 - PR-1 - Внутрішні - Осові - Одна ступінь свободи течії - Дві ступені свободи течії - Кільцеві - МОДУЛЬ 2 - З'єднаний осередок деформації - Радіально-зворотне видавлювання - Радіально-зворотне видавлювання (без утягнення) - Дефектування - Приєднаний осередок деформації - Радіально-пряме видавлювання з осевим відростком - Комплекси кінематичних модулів	 	Властивості, обмеження та рекомендації: 1) Нижня похила межа – поверхня контакту із інструментом або «мертва зона», інших обмежень на суміжні кінематичні модулі немає; 2) Можливо дослідження криволінійної похилої межі; 3) Кут нахилу β можна розглядати у якості параметра оптимізації; 4) Для найпростішого випадку прямої: $N_t = 2\mu_z \cdot (1 + k_1^2) \cdot N_{c\rightarrow}^-$ КМПШ: $\begin{cases} V_{z2a} = -V_i + \frac{V_i(z_i - h_i)}{z_i(r) - h_i} \cdot \left(1 + \frac{z_i'(r)r}{2(h_i - z_i(r))}\right); \\ V_{r2a} = \frac{V_i r}{2(h_i - z_i(r))}. \end{cases}$ де $z_i(r)$ – довільна крива, що описує похилу межу та проходить через точки $(0, h)$ та $(R, 0)$. Для випадку лінійної функції: $z_1(r) = k_1(r - R_i)$, $k_1 = z_1'(r) = -\frac{h}{R_i}$. $N_{d2} = \sigma_S \sqrt{\frac{\pi V_i^2}{V} \int_V \dot{\epsilon}_i^2 dV}, \text{ де } V = 2\pi \int_{R_i}^{R_i} r dr \int_{z_1(r)}^{h_i} dz = \frac{(3(h_i + R_i k_1) - 2R_i k_1) R_i^2}{3} \pi$ та $\int_V \dot{\epsilon}_i^2 dV = -\frac{\pi V_i^2}{18 k_1} \left(12 + k_1^2 \left[R_i + (3C - A) \ln\left(\frac{h_i}{h_i - h}\right) - \left(\frac{1}{C} - \frac{k_1}{h_i}\right) (3C^2 - 2AC + B) - \frac{1}{2} \left(\frac{k_1^2}{h_i^2} - \frac{1}{C^2}\right) (C^3 - AC^2 + BC) \right] \right),$ де $A = \frac{6(h_i - h)(6 + k_1^2)}{(12 + k_1^2) k_1}$, $B = \frac{9(h_i - h)^2(4 + k_1^2)}{(12 + k_1^2) k_1^2}$, $C = R + \frac{h_i}{k_1}$. $N_{c\rightarrow}^+ = -\frac{\pi \sigma_S V_i}{\sqrt{3} \cdot k_1} \left[\frac{R_i^2}{2} + \left(R_i + \frac{h_i}{k_1}\right) R_i + \left(R_i + \frac{h_i}{k_1}\right) \ln\left(\frac{h_i}{h_i - h}\right) \right]; N_{c\leftarrow}^- = \frac{\pi \sigma_S V_i}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{R_i}{2h_i} k_1\right) R_i h_i; N_t = 2\mu_z \cdot (1 + k_1^2) \cdot N_{c\rightarrow}^-.$
---	---	--

Рис. 5. База кінематичних модулів у Modules.exe

Calculation of the combined radial-reverse extrusion process

Data input | Results

Form of boundary
☒ T1(z) ☐ T2(z) ☐ T3(z)

Dimensional radius of punson R1, [mm]
10

Dimensional radius of die R2, [mm]
15

Dimensional thickness of flange h1, [mm]
5

Initial workpiece height Ho, [mm]
20

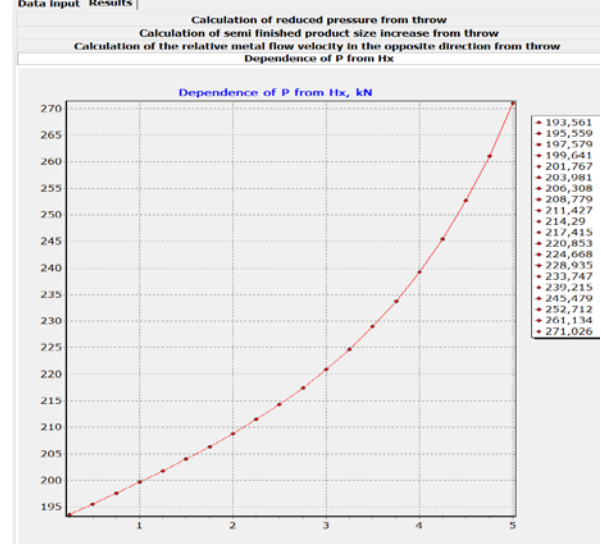
Active tool stroke Hx, [mm]
10

Coefficient of friction, μ_s
(0 < μ_s < 0.5)
0,05

Material
АД31
АД1
АМ6
Л62

а

Calculation of the combined radial-reverse extrusion process



б

Рис. 6. Вікна модуля extrude_eng.exe:

а) введення даних; б) розрахунку сили деформування

Висновки. Запропоновано удосконалену схему процесу проектування технологічних процесів у вигляді комплексу взаємопов'язаних етапів проектування, які виконуються в певній послідовності незалежно від обраного способу деформування і типорозміру деталі. Для оперативного аналізу технологічних режимів процесів видавлювання в рамках використання

енергетичного методу балансу потужностей (методу верхньої оцінки) розроблено кінематичні модулі (поля швидкостей) різної конфігурації, здатні описати пластичні зони складної форми. Це дозволяє оперативнo змінювати розрахункову схему процесу та прогнозувати силовий режим та формоутворення напівфабрикату, визначити оптимальну конфігурацію інструменту. Розроблена програма, яка призначена для побудови відповідних математичних моделей, в тому числі для прогнозування дефектоутворення із можливістю керування формоутворенням, сприятиме більш активному впровадженню процесів холодного комбінованого видавлювання на виробництві. У подальшому необхідним є розширення бази кінематичних модулів із заокругленням, що дозволить описати складну конфігурацію інструменту та визначити вплив цих конструктивних особливостей на протікання процесу деформування.

References

1. Bhaduri, A. (2018). Extrusion. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. *Springer Series in Materials Science*, No. 264, P. 599–646. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13.
2. Jafarzadeh, H., Zadshakoyan, M., Abdi, Sobbouhi E. (2010). Numerical studies of some important design factors in radial–forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*, No. 25, P. 857–863.
3. Aliev, I. S. (1990). Tehnologicheskie vozmozhnosti novyih sposobov kombinirovannogo vydavlivaniya [Technological possibilities of new methods of combined squeezing]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo = Forging and stamping production*, No 2, P. 7–10 [in Russian].
4. Ogorodnikov, V. A., Derevenko, I. A., Sivak, R. I. (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*, No. 54 (3), P. 326–332. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0188-x>.
5. Hrudkina, N. S., Aliieva, L. I. (2020). Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*, Vol. 48, No. 2, P. 357–363. <https://doi.org/10.5937/fme2002357H>.
6. Seo, J. M. et al. (2007). Forming Load Characteristics of Forward and Backward Tube Extrusion Process in Combined Operation. *Key Engineering Materials*, Vol. 340–341, P. 649–654.
7. Noh, J., Hwang, B.B., Le, H.Y. (2015). Influence of Punch Face Angle and Reduction on Flow Mode in Backward and Combined Radial Backward Extrusion Process. *Metals and Materials International*, Vol. 21, No. 6, P. 1091–1100. <https://doi.org/10.1007/s12540-015-5276-y>.
8. Winiarski, G., Gontarz, A., Samołyk, G. (2020). Theoretical and experimental analysis of a new process

Література

1. Bhaduri A. Extrusion. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. *Springer Series in Materials Science*. 2018. No. 264. P. 599-646. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13.
2. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Abdi Sobbouhi E. Numerical studies of some important design factors in radial–forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2010. No. 25. P. 857–863.
3. Алиев И. С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1990. № 2. С. 7–10.
4. Ogorodnikov V. A., Derevenko 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. No. 54 (3). P. 326–332, <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0188-x>.
5. Hrudkina N. S., Aliieva, L. I. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*. 2020. Vol. 48. No. 2. P. 357–363. <https://doi.org/10.5937/fme2002357H>.
6. Seo J. M. et al. Forming Load Characteristics of Forward and Backward Tube Extrusion Process in Combined Operation. *Key Engineering Materials*. 2007. Vol. 340–341. P. 649–654.
7. Noh J., Hwang B. B., Le H. Y. Influence of Punch Face Angle and Reduction on Flow Mode in Backward and Combined Radial Backward Extrusion Process. *Metals and Materials International*. 2015. Vol. 21. No. 6. P. 1091–1100. <https://doi.org/10.1007/s12540-015-5276-y>.
8. Winiarski G., Gontarz A., Samołyk G. Theoretical and experimental analysis of a new process for forming flanges on hollow parts.

- for forming flanges on hollow parts. *Materials*, Vol. 13/28:4088. <https://doi.org/10.3390/ma13184088>.
9. Stepanyuk, L. G. (1979). Calculation of metal-forming processes [Raschetyi protsessov obrabotki metallov davleniem]. *Mashinostroyeniye = Mechanical engineering*. Moscow. 215 p. [in Russian].
10. Aliieva, L. I., Grudkina, N. S. (2015). Osobennosti proektirovaniya protsessov holodnogo vydavlivaniya na osnove razvitiya modulnogo podhoda v ramkah energeticheskogo metoda [Features of the design of cold extrusion processes based on the development of a modular approach in the framework of the energy method]. *Vestnik NTU "HPI" = Bulletin of NTU "KhPI"*, Kharkiv, Vol. 24 (1133), P. 21–32 [in Russian].
11. Aliieva, L., Hrudkina, N., Aliiev, I., Zhibankov, I., Markov, O. (2020). Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression. *European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2/1 (104), P. 15–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433>.
12. 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*, Vol. 2, N 5/1 (101), P. 49–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179232>.
13. Grudkina, N., Markov, O. (2020). Matematichne modeljuvannja procesiv holodnogo vidavljuvannja zi skladnoju konfiguracieju instrumentu [Mathematical modeling of cold extrusion processes with complex tool configuration]. *Tekhnichni nauki ta tehnologii = Technical sciences and technologies*, No 3 (21), P. 89–97 [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3\(21\)-89-97](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3(21)-89-97) [in Ukrainian].
14. Hrudkina, N. S. (2020). Modeljuvannja protsesiv kombinovanoho radialno-priamoho vydavljuvannja skladnoprofilovanykh porozhnistykh detalei iz vykorystanniam metodu kinematychnykh moduliv [Modeling of processes of combined radial-forward extrusion of hollow parts with a complex profile by using the method of kinematic modules]. *Visnyk Kyivskogo natsionalnogo universitetu tekhnologij ta dizajnu = Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*, No. 3 (146), P. 69–78 <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2020.3.6> [in Ukrainian].
15. Hrudkina, N. S. (2019). Verkhnia otsinka pryvedenoho tysku deformuvannja osovoho trapetseidalnogo kinematychnoho modulia z nyzhnoiu pokhyloiu mezheiu [Upper estimate of the reduced deformation pressure of the axial trapezoidal kinematic module with a lower inclined limit]. *Visnyk DDMA = Materials*. 2020. No. (13/18):4088. <https://doi.org/10.3390/ma13184088>.
9. Степанский Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. Москва: Машиностроение. 1979. 215 с.
10. Алиева Л. И., Грудкина Н. С. Особенности проектирования процессов холодного выдавливания на основе развития модульного подхода в рамках энергетического метода. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харків, 2015. №24 (1133). С. 21–32.
11. 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). P. 15–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433>.
12. 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. N 5/1 (101). P. 49–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179232>.
13. Грудкіна Н., Марков О. Математичне моделювання процесів холодного видавлювання зі складною конфігурацією інструменту. *Технічні науки та технології*. 2020. № 3 (21). С. 89–97 [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3\(21\)-89-97](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3(21)-89-97).
14. Грудкіна Н. С. Моделювання процесів комбінованого радіально-прямого видавлювання складнопрофільованих порожнистих деталей із використанням методу кінематичних модулів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*. 2020. No 3 (146). С. 69–78. <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2020.3.6>.
15. Грудкіна Н. С. Верхня оцінка приведенного тиску деформування осового трапецеїдального кінематичного модуля з нижньою похилою межею. *Вісник ДДМА*. 2019. No. 3 (47). С. 21–27.

Herald of the DSEA, No. 3 (47), P. 21-27 [in Ukrainian].

16. Hrudkina, N. S. (2020). Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*. Vol. 49, No. 1, P. 56–63. <https://doi.org/10.5937/fme2101056H>.

17. Vlasenko, K., Hrudkina, N., Reutova, I., Chumak, O. (2018). Development of calculation schemes for the combined extrusion to predict the shape formation of axisymmetric parts with a flange. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3/1 (93), P. 51–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131766>.

18. Aliiev, I., Aliieva, L., Grudkina, N., Zhbakov, I. (2011). Prediction of the Variation of the Form in the Processes of Extrusion. *Metallurgical and Mining Industry: scientific and technical journal*. Dnepropetrovsk: NMetAU, Vol. 3, № 7, P. 17–22.

16. Hrudkina N. S. Process Modeling of Sequential Radial-Direct Extrusion Using Curved Triangular Kinematic Module. *FME Transactions*. 2020. Vol. 49. No. 1. P. 56–63. <https://doi.org/10.5937/fme2101056H>.

17. Vlasenko K., Hrudkina N., Reutova I., Chumak O. Development of calculation schemes for the combined extrusion to predict the shape formation of axisymmetric parts with a flange. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3/1 (93). P. 51–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131766>.

18. Aliiev I., Aliieva, L., Grudkina N., Zhbakov I. Prediction of the Variation of the Form in the Processes of Extrusion. *Metallurgical and Mining Industry: scientific and technical journal*. Dnepropetrovsk: NMetAU, 2011. Vol. 3, № 7. P. 17–22.

HRUDKINA NATALIA

Donbass State Engineering Academy, Ukraine

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

Scopus ID: 56257651900

E-mail: vm.grudkina@ukr.net

KUZNETSOV MYKOLA

Donbas National Academy of Civil

Engineering and Architecture, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-5121-3194>

E-mail: n.kuznecov.1967@gmail.com

PASHYNSKYI VOLODYMYR

LLC science-production association DONIX, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-0118-4748>

Scopus ID: 7004721567

E-mail: v.v.pashynskiy@mipolytech.education

¹ГРУДКИНА Н. С., ²КУЗНЕЦОВ Н. Н., ³ПАШИНСКИЙ В. В.

¹Донбасская государственная машиностроительная академия, Украина

²Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Украина

³ООО Научно-производственное объединение «ДОНИКС», Украина

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТОЧНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ВЫДАВЛИВАНИЕМ НА ОСНОВЕ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА БАЛАНСА МОЩНОСТЕЙ

Цель. Совершенствование проектирования технологий точной объемной штамповки выдавливанием на основе развития энергетического метода баланса мощностей. Выработка рекомендаций по рациональному использованию систематизированной базы кинематических модулей сложной конфигурации при построении расчетных схем оценки силового режима и формообразования в процессах холодного выдавливания с последующей программной реализации.

Методика. Энергетическим методом баланса мощностей на основе метода кинематических модулей систематизированы результаты исследования расширения возможностей применения процессов холодного выдавливания с определением силового режима деформирования и особенностей формообразования полуфабриката при изготовлении полых и стержневых деталей с фланцем, типа гильз и стаканов.

Результаты. Систематизировано расширенную базу кинематических модулей сложной конфигурации с выработкой рекомендаций по их рациональному использованию при построении

расчетных схем процессов, в том числе с возможностью оперативного учета изменения конфигурации инструмента. Это позволило определить факторы управления формообразованием полуфабриката в процессах совмещенного и последовательного комбинированного холодного выдавливания.

Научная новизна. Подтверждены возможности энергетического метода баланса мощностей как эффективного метода предварительного анализа определения области рационального применения холодного выдавливания в рамках проектирования технологического процесса получения сложнопрофилированных деталей.

Практическая значимость. Разработанный программный продукт с систематизацией расширенной базы кинематических модулей, комплекса расчетных моделей процессов холодного выдавливания по оценке силового режима, прогнозирования формообразования и дефектообразования в виде утяжины будет способствовать более активному внедрению процессов комбинированного выдавливания на производстве.

Ключевые слова: энергетический метод баланса мощностей; комбинированное выдавливание; кинематический модуль; проектирование технологического процесса.

¹HRUDKINA N. S., ²KUZNETSOV M. M., ³PASHYNSKYI V. V.

¹Donbass State Engineering Academy, Ukraine

²Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Ukraine

³LLC science-production association DONIX, Ukraine

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY DESIGN IN PRECISION FORGING PROCESS BASED ON DEVELOPMENT OF ENERGY METHOD WITH POWER BALANCE

Purpose. Improvement of technology design in precision forging process based on development of energy method with power balance and development of recommendation with the rational use of systematized based on kinematic modules in complex configuration to make calculated schemes for power mode assessments and shaping of part in cold forging extrusion process with subsequent software implementation are considered.

Methodology. Energy method of power balance is considered based on kinematic module method that will be systematized the results of investigation for expanding in cold forging extrusion process with the definition of the power mode in deformation and features of semi-finished product shaping to make hollow and rod parts with flange such as sleeves and glasses.

Results. Development results of recommendation with the rational use of systematized based on kinematic modules in complex configuration to make calculated schemes including with the ability to quickly take into account changes in the configuration of the tool have been determined. This made it possible to define the several factors for controlling the shaping of the semi-finished product in combined and sequential combined cold forging extrusion processes.

Scientific novelty. Energy method of power balance is considered such as an effective method of preliminary analysis to determine the area of rational use in cold forging process based on process technology design to make complex parts.

Practical significance. Software product development with extended systematization based on kinematic modules, complex of calculation models in cold forging extrusion with power mode assessments and to predict shaping of part and defect formation such as dimple defect will contribute more active implementation in the manufacturing industry for combined cold forging extrusion processes.

Keywords: energy method of power balance; combined extrusion; kinematic module; process technology design.