

КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 621.777.22.07

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).3-11](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).3-11)**В.В. Свяцький**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Скрипник**, доц., канд. техн. наук,
С.В. Конончук, канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: svv_iamph@ukr.net***Комп'ютерне моделювання процесу прямого пресування через різні профілі матричних лійок**

Виходячи з аналізу напруженого і деформованого стану стадії пресування, що встановилася, запропоновано використовувати профіль матричної лійки, виконаний по лінії ковзання, що розділяє пружну і пластичну зону. Результати теоретичних досліджень, комп'ютерного моделювання процесу прямого пресування за допомогою програмного комплексу Deform 2D/3D, експериментальних дослідів показали, що кращі умови пресування досягаються через матрицю із профілем, який виконаний по лінії ковзання.

комп'ютерне моделювання, пресування, інструмент, матриця, профіль, зусилля, ефективність**В.В. Свяцький**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Скрипник**, доц., канд. техн. наук, **С.В. Конончук**, канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна***Компьютерное моделирование процесса прямого прессования через различные профили матричных воронок**

На основе анализа поля линий скольжения установленной стадии прессования через симметричную одноочковую матрицу предложено использовать профиль матричной воронки, выполненный по линии скольжения, разделяющий упругую и пластическую зону. Результаты теоретических исследований, компьютерного моделирования процесса прямого прессования с помощью программного комплекса Deform 2D/3D, экспериментальных опытов показали, что оптимальные энергосиловые условия достигаются при прессовании через матрицу, которая имеет профиль, выполненный по линии скольжения.

компьютерное моделирование, прессование, инструмент, матрица, профиль, усилие, эффективность

Постановка проблеми. Інтенсифікація процесу екструзії матеріалів з метою мінімізації зусиль одержання прес-виробів має великий науковий і практичний інтерес.

Напружено-деформований стан і розміри вогнища деформації при екструзії істотно залежать від конструкції пресового інструмента і, зокрема, від форми матричної лійки [1, 2]. Проте, на сьогоднішній день не має єдиної, загально прийнятої думки щодо впливу геометрії матричної лійки на енергосилові параметри процесу екструзії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У багатьох процесах пресування використовують форму матричної лійки у вигляді усіченого конусу із кутом заходу від 90° до 120°. Широка практика застосування конусних матриць зумовлена відносно низькою собівартістю виготовлення такого пресового інструменту. Однак, матричні лійки, виконані по конусу, не забезпечують оптимальні енергосилові показники пресування [3]. Крім конічних у практиці металообробки тиском застосовуються і інші профілі матричних лійок. Увігнутий профіль, який побудований по циклоїді з радіусом $R_{\text{ц}}$, обумовлений умовою найбільшої рівномірності пластичного течії металу в матричній лійці [4]. Утворююча матриці, яка побудована по циклоїді, забезпечує найменший час

знаходження периферійних шарів металу у вогнищі деформації, що, у свою чергу, на думку авторів [4], призводить до мінімальної неоднорідності металу у поперечному перерізі випресовки.

Радіус циклоїди $R_{ц}$ визначається за формулою:

$$R_{ц} = \frac{R_0 - R}{1,741}, \quad (1)$$

де R_0 – радіус контейнера;

R – радіус отвору матриці.

Опуклий профіль, побудований по експоненті, аргументований у роботі [1] умовою сталості логарифмічної деформації λ_z на одиницю висоти матричної лійки:

$$R_z = R_0 \cdot \exp\left(-0,5\lambda \frac{z}{h}\right), \quad (2)$$

де h – висота матричної лійки;

R_z – радіус лійки на відстані z від її початку.

Опуклий профіль, запропонований у роботі [4], обґрунтований умовою забезпечення сталості усередненої швидкості деформації по висоті матричної лійки:

$$R_z = R_0 \left(1 + \frac{R_0^2 - R^2}{R^2 \cdot h} z\right)^{-0,5}. \quad (3)$$

При пресуванні кольорових металів і сплавів через прямокутну матрицю ($\alpha = 90^\circ$) було виявлено [5], що в контейнері утворюються "загальмовані" зони металу, які формують "природню" матричну лійку, близьку за формою до сфери. Р. Хілл [6] теоретично обґрунтував, що границі, які розділяють пружні й пластичні зони, є лініями ковзання або лініями, що їх огинають. При цьому форма цієї границі, за даними досліджень [7], суттєво не залежить від степені деформації, швидкості пресування, температури заготовки і природи сплаву.

Таким чином, дотепер не існує єдиної точки зору про вплив геометрії вогнища деформації на енергосилові параметри процесу пресування металів.

Постановка завдання. На основі теоретичних досліджень і комп'ютерного моделювання за допомогою програмного комплексу Deform 2D/3D встановити вплив різних профілів матричних лійок на одержання прес-виробів із найменшими енергосиловими параметрами.

Виклад основного матеріалу. Нами проведено дослідження з визначення профілю матричної лійки на основі аналізу поля ліній ковзання сталої стадії пресування через симетричну одноочкову матрицю [3]. Подібний підхід виконаний у роботі В. Джонсона та Х. Кудо [8], де показано, що в сталому процесі пресування поле ліній ковзання залишається фіксованим за формою і є незмінним у часі.

Поле ліній ковзання відповідає схемі пресування через шорстку матрицю із жорстко-пластичними зонами у кутах. Розв'язок завдання (побудова поля ліній ковзання) у системі декартових координат xOy із центром поля в точці O' зводиться до розв'язку системи рівнянь [9]

$$\begin{cases} \frac{x}{R_{отв}} = \sqrt{2} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \varphi\right) \cdot J_0 \cdot (2\sqrt{\alpha\beta}) + 2 \cos \varphi U_1(2\beta, 2\sqrt{\alpha\beta}) - 2 \sin \varphi U_0(2\beta, 2\sqrt{\alpha\beta}), \\ \frac{y}{R_{отв}} = -\sqrt{2} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \varphi\right) \cdot J_0 \cdot (2\sqrt{\alpha\beta}) + 2 \sin \varphi U_1(2\beta, 2\sqrt{\alpha\beta}) - 2 \cos \varphi U_0(2\beta, 2\sqrt{\alpha\beta}), \end{cases}$$

при таких граничних умовах: координати крайніх ліній ковзання збігаються із границями "мертвої зони", їхній нахил до стінки контейнера визначається коефіцієнтом тертя відповідно:

$$\delta = \frac{1}{2} \arccos \frac{\tau}{k},$$

де α і β – криволінійні координати;

J_0 – функція Бесселя нульового порядку;

U_0, U_1 – функції Ломмеля двох змінних (криволінійних координат α і β) нульового і першого порядку, відповідно;

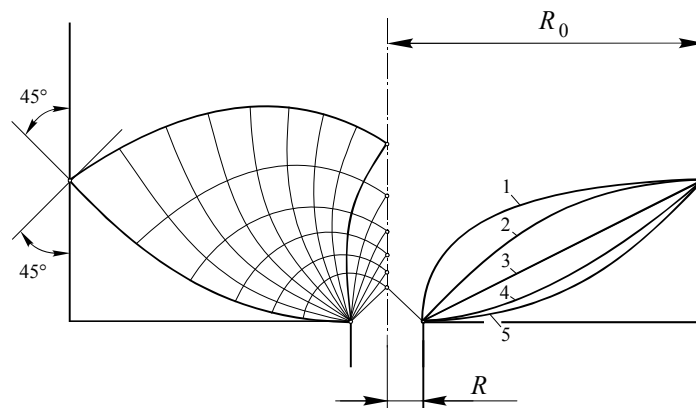
τ – величина дотичного напруження, що діють на стінках контейнера;

k – пластична постійна;

φ – коефіцієнт, що розраховується за формулою:

$$\varphi = \alpha + \beta.$$

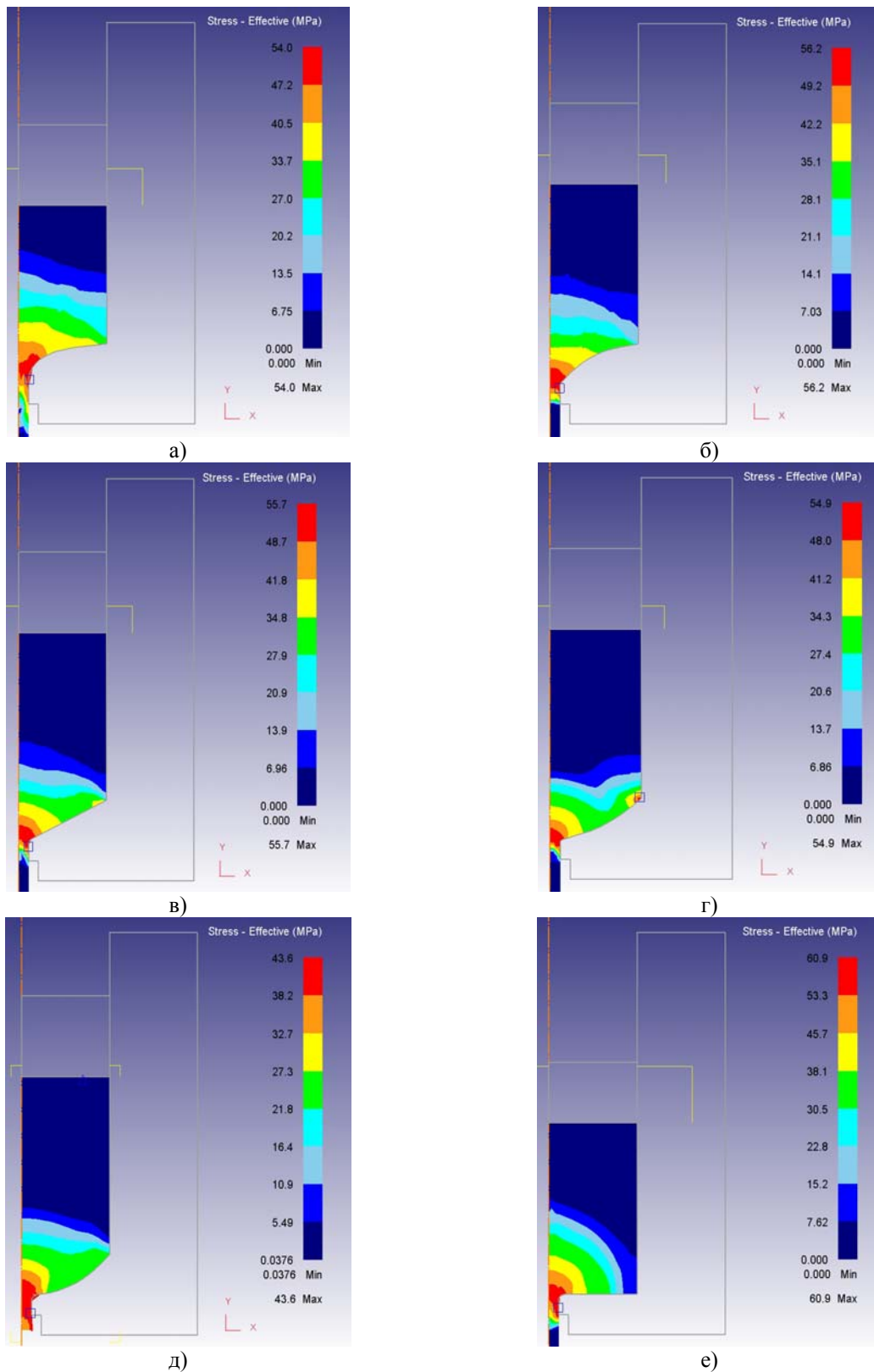
За допомогою комп'ютерного моделювання прямого пресування свинцевих зразків із величиною витяжки $\mu = 81$ ($R_0 = 22.5$ мм, $R = 2.5$ мм) зі швидкістю 1 мм/сек досліджувалися такі типи профілів матричних лійок: увігнута по циклоїді, яка побудована по залежності (1); опукла, що побудована по логарифмічній залежності (2); друга опукла, розрахована згідно (3); конусна і увігнута, яка побудована по лінії ковзання, що відокремлює пружні зони від пластичних у процесі пресування (рис. 1).



1 – перша опукла логарифмічна; 2 – друга опукла логарифмічна; 3 – конусна;
4 – увігнута по циклоїді; 5 – увігнута по лінії ковзання

Рисунок 1 – Поле ліній ковзання для сталої стадії пресування і профілі матричних лійок
Джерело: розроблено автором

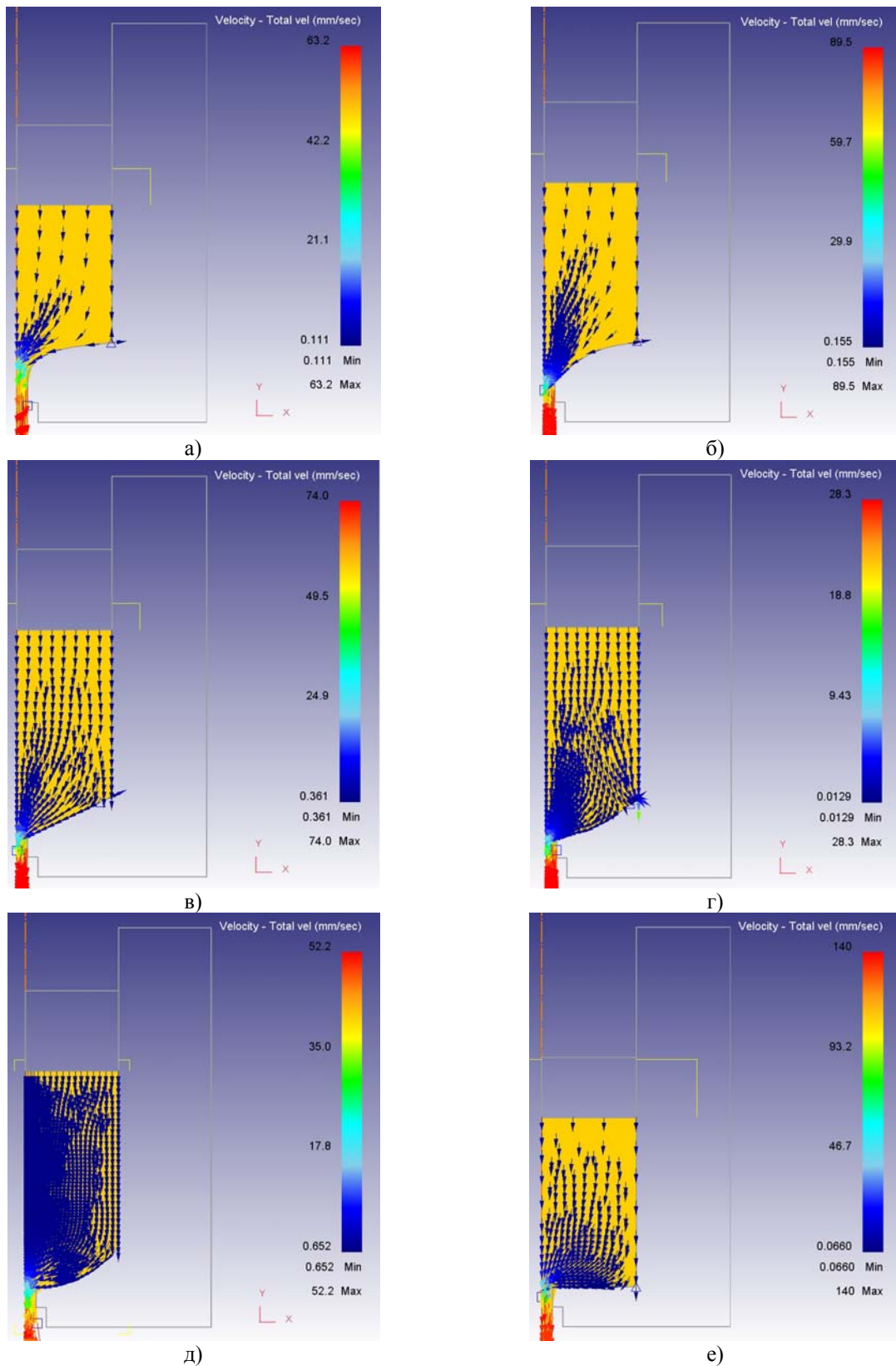
Аналіз комп'ютерного моделювання силових параметрів пресування (рис. 2 – 5) показав суттєву перевагу ввігнутих профілів матриць щодо інших профілів. При пресуванні через матрицю, профіль якої виконаний по лінії ковзання, що відокремлює пластичну зону від пружної (рис. 5, д), відзначені найменші енергосилові витрати в порівнянні із профілем циклоїдної матриці (рис. 5, г). До того ж, побудова лінії ковзання (лінії максимальних зсувних деформацій) теоретично обґрунтована, і для різних степенів витяжки лінія ковзання, яка відокремлює пластичну зону від жорсткої, в кожному окремому випадку буде різною, а при $\mu = 4$ ($R_k/R_0 = 2$) лінія ковзання буде мати нахил до осі симетрії кут 45° , і як наслідок, в цьому випадку криволінійний профіль матриці перетвориться в конусний. У той же час циклоїдний профіль, згідно [4], будується через дві вузлові точки: перша – точка гострої кромки отвору матриці, друга – точка сполучення профілю матриці і контейнера, ордината якої дорівнює висоті конусної матриці. Отже, для різних степенів витяжки профіль циклоїдної матриці буде завжди криволінійним, що веде до некерованості енергосиловими характеристиками процесу пресування.



*a – перша опукла логарифмічна; б – друга опукла логарифмічна; в – конусна;
г – увігнута по циклоїді; д – увігнута по лінії ковзання; е – прямокутна*

Рисунок 2 – Розподіл інтенсивностей напружень для сталої стадії пресування через різні типи матричних лійок

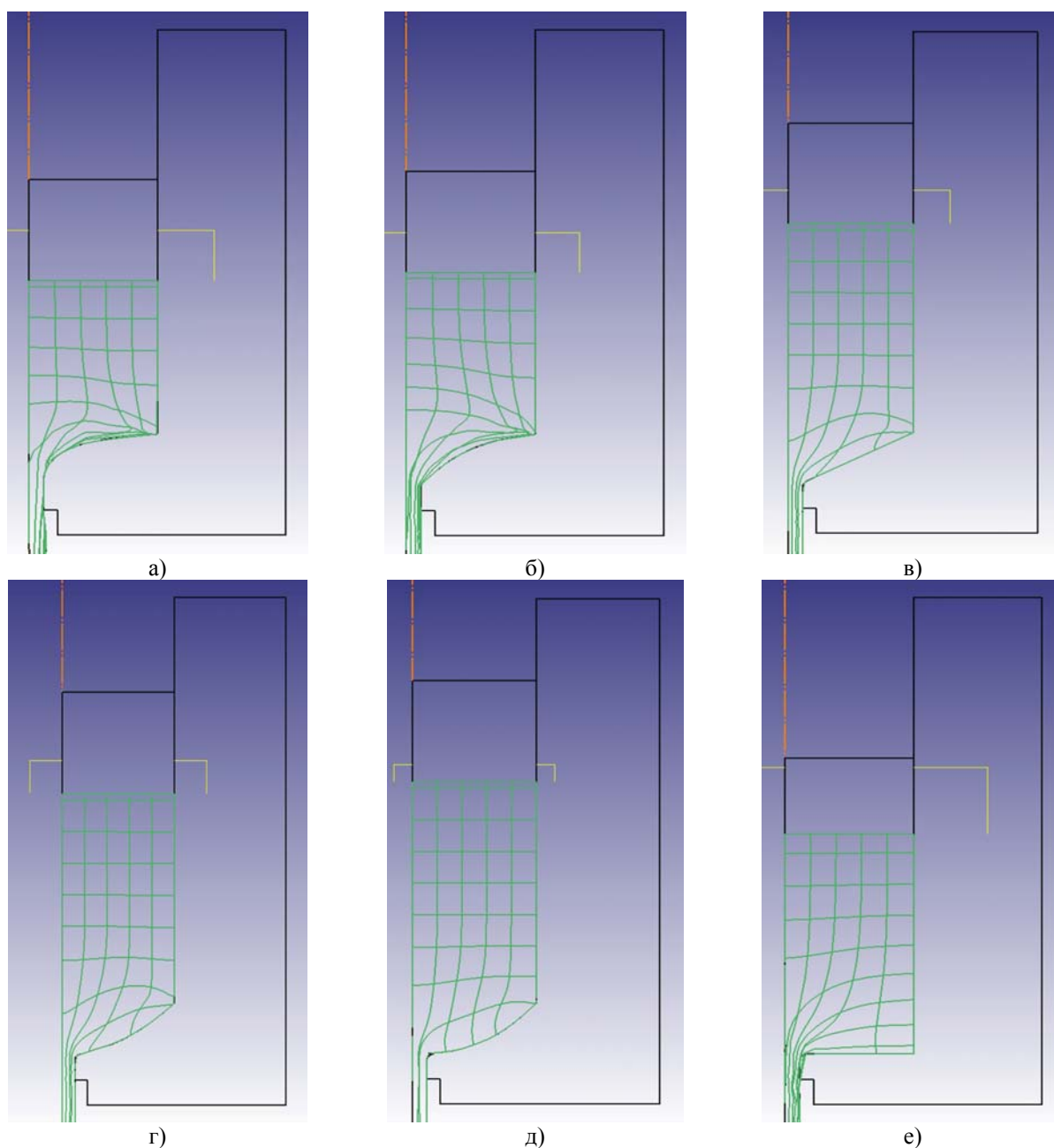
Джерело: розроблено автором



*а – перша опукла логарифмічна; б – друга опукла логарифмічна; в – конусна;
г – увігнута по циклоїді; д – увігнута по лінії ковзання; е – прямокутна*

**Рисунок 3 – Векторне поле швидкостей для сталої стадії пресування
через різні типи матричних лійок**

Джерело: розроблено автором

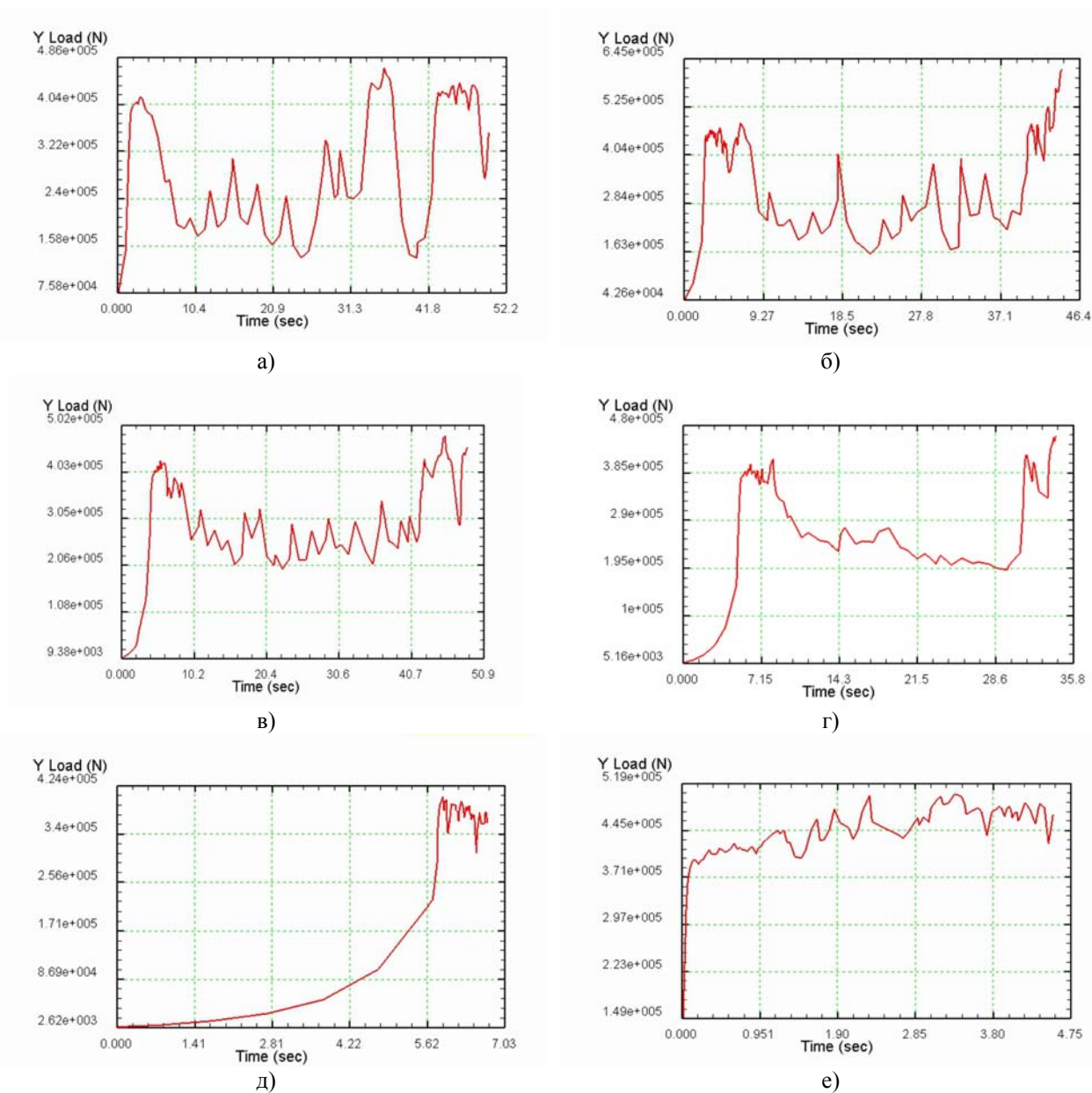


*a – перша опукла логарифмічна; б – друга опукла логарифмічна; в – конусна;
г – увігнута по циклоїді; д – увігнута по лінії ковзання; е – прямокутна*

Рисунок 4 – Викривлення координатної сітки для сталої стадії пресування через різні типи матричних лійок

Джерело: розроблено автором

Експериментальна перевірка теоретичних положень проводилася нами при пресуванні дискретних тіл (гранул) [10, 11]. Особливості характеру течії гранул, наявність межгранулярного контактного тертя дає можливість більш переконливо показати розподіл результуючих деформацій у вогнищі пресування. Для цього використовували такі типи матриць: матриця із профілем, побудованим по лінії ковзання, що відокремлює пружні зони від пластичних; опукла логарифмічна, побудована згідно із залежністю (2), і яка має із двох опуклих лійок найменші енергосилові характеристики пресування; а також конусна. Загальний вид прес-залишків для кожного типу матриць наведено в [10].



*а – перша опукла логарифмічна; б – друга опукла логарифмічна; в – конусна;
г – увігнута по циклоїді; д – увігнута по лінії ковзання; е – прямокутна*

Рисунок 5 – Графіки зусиль пресування через різні типи матричних лійок в залежності від переміщення прес-шайби

Джерело: розроблено автором

Результати експериментального дослідження кінетики течії дискретного середовища (гранул) [10, 11], як і комп'ютерного моделювання [12 – 14], показали, що форма матричної лійки матриці чинить вплив на геометрію вогнища деформації і розподіл деформацій у прес-виробі. З аналізу деформацій гранул визначено, що для увігнутої лійки, побудованої по лінії ковзання, характерне викривлення вісесиметричних частинок у напрямку деформації (рис. 4). Ці викривлення під час руху частинок від периферійних шарів до осі симетрії матриці; у опуклої лійки геометрія вогнища деформації є найбільшою; для конічної течії металу є близькою до радіальної в напрямку усіченого конуса (рис. 2).

Висновки. Таким чином, результати теоретичних досліджень, комп'ютерного моделювання процесу прямого пресування за допомогою програмного комплексу

Deform 2D/3D, експериментальних дослідів показали, що інтенсифікація процесу екструзії досягаються при використанні матриці, що має профіль, виконаний по лінії ковзання, яка відокремлює пластичну зону від жорсткої.

Список літератури

1. Норицин И.А., Акаро И.Л., Перфилов А.А. Влияние профиля матричной воронки на параметры процесса прямого прессования. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1971. № 12. С. 1–8.
2. Сафаров Ю.С., Геращенко В.И. К вопросу о выборе оптимальной геометрии инструмента при прессовании. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1971. № 12. С. 8–11.
3. Шепельский Н.В., Свяцкий В.В. Оптимизация профиля матричной воронки для прессования. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2000. № 8. С. 10–12.
4. Глебов Ю.П., Перлин И.М. О форме упругой зоны матрицы при прессовании через одноканальную матрицу. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 1961. № 2. С. 27–30.
5. Норицын И.А. Анализ скоростных параметров прямого прессования и волочения. *Процессы штамповки и их технологические параметры*. М. : Машгиз, 1959. С. 117–127.
6. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М. : ГИТТЛ, 1956. 407 с.
7. Батурин А.И. Влияние технологических параметров на размеры и форму очага деформации при прямом способе прессования алюминиевых сплавов через плоскую матрицу. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1970. № 1. С. 6–8.
8. Джонсон В., Кудо Х. Механика процесса выдавливания металла. М. Металлургия, 1965. 174 с.
9. Теоретические основыковки и объемной штамповки / Макушок Е.М., Матусевич А.С., Северденко В.П., Сегал В.М. Минск : Наука и техника, 1968. 408 с.
10. Шепельский Н.В. Свяцкий В.В. Выбор рациональной геометрии матричной воронки для прессования. *Физика и техника высоких давлений*. 2000. Т. 10. № 4. С. 57–61.
11. Шепельский Н.В., Свяцкий В.В. Влияние геометрии очага деформации на процесс получения разобщенных волокон при прессовании литых гранул. *Збірн. наук. праць ДДМА. Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні*. 2000. С. 242–247.
12. Свяцкий В.В. Моделювання процесу прямого пресування з використанням криволінійних профілів матричних лійок. *Литво. Металургія. 2020* : зб. матеріалів XVI міжнар. наук.-техн. конф. Тези доповідей, Запоріжжя : ФОП Мокшанов В.В., 2020. С. 294-296.
13. Свяцкий В.В. Вплив вогнища деформації на енергосилові параметри процесу пресування. *Organization of scientific research in modern conditions '2020*. Conference Proceedings, USA. Seattle : KindleDP, 2020. P. 78-82.
14. Свяцкий В.В. Аналіз моделювання енергосилових параметрів процесу прямого пресування. *Прикладні науково-технічні дослідження* : зб. матеріалів IV міжнар. наук.-прак. конф. Тези доповідей, Івано-Франківськ : ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника», 2020. Т. 1. С. 72-74.

Referencis

1. Noricin, I.A., Akaro, I.L. & Perfilov, A.A. (1971). Vlijanie profilja matrichnoj voronki na parametry processa prjamoogo pressovanija [The effect of the matrix funnel profile on the parameters of the direct extrusion process]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo – Forging and stamping*, 12, 1-8 [in Russian].
2. Safarov Ju.S. & Gerashhenko V.I. (1971). K voprosu o vybore optimal'noj geometrii instrumenta pri pressovanii [To the question of choosing the optimal tool geometry during pressing]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo – Forging and stamping*, 12, 8-11 [in Russian].
3. Shepel'skij, N.V. & Svjackij, V.V. (2000). Optimizacija profilja matrichnoj voronki dlja pressovanija [Optimization of the die profile for extrusion]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem – Forging and stamping. Materials Forming*, 8, 10-12 [in Russian].
4. Glebov, Ju.P. & Perlin, I.M. (1961). O forme uprugoj zony matricy pri pressovanii cherez odnokanal'nuju matricu [On the shape of the elastic zone of the matrix during pressing through a single-channel matrix]. *Izvestija vuzov. Cvetnaja metallurgija – Proceedings of the universities. Non-ferrous metallurgy*, 2, 27-30 [in Russian].
5. Noricyn, I.A. (1959). Analiz skorostnyh parametrov prjamoogo pressovanija i volochenija [Analysis of speed parameters of direct pressing and drawing]. *Processy shtampovki i ih tehnologicheskie parametry – Stamping processes and their technological parameters*. Moscow: Mashgiz, 117-127 [in Russian].
6. Hill R. (1956). Matematicheskaja teorija plastichnosti [Mathematical Theory of Plasticity]. M.: GITTL [in Russian].
7. Baturin, A.I. (1970). Vlijanie tehnologicheskikh parametrov na razmery i formu ochaga deformacii pri prjamom sposobe pressovanija aljuminievjyh splavov cherez ploskuju matricu [The influence of

- technological parameters on the size and shape of the deformation zone in the direct method of pressing aluminum alloys through a flat matrix]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo – Forging and stamping*, 1, 6-8 [in Russian].
8. Dzhonson, V. & Kudo, H. (1956). *Mehanika processa vydavlivaniya metalla* [Mechanics of the extrusion process]. M.: Metallurgija [in Russian].
 9. Makushok, E.M., Matusевич, A.S., Severdenko, V.P. & Segal, V.M. (1968). *Teoreticheskie osnovy kovki i obemnoj shtampovki* [Theoretical Foundations of Forging and Volumetric Stamping]. Minsk: Nauka i tehnika, 408 [in Russian].
 10. Shepel'skij, N.V. & Svjackij, V.V. (2000). Vybora racional'noj geometrii matrichnoj voronki dlja pressovaniya [The choice of rational geometry of the matrix funnel for pressing]. *Fizika i tehnika vysokih davlenij – High Pressure Physics and Technology*, 10, 4, 57-61 [in Russian].
 11. Shepel'skij, N.V. & Svjackij, V.V. (2000). Vlijanie geometrii ochaga deformacii na process poluchenija razobshhennykh volokon pri pressovanii lityh granul [The influence of the geometry of the deformation zone on the process of obtaining fragmented fibers during the extrusion of molding granules]. *Zbirn. nauk. prats' DDMA. Udoskonalennia protsesiv ta obladnannia obrobky tyskom v metalurhii ta mashynobuduvanni – Collection of scientific works of DDMA. Improvement of processes and equipment of pressure treatment in metallurgy and mechanical engineering*, 242-247 [in Russian].
 12. Sviatskyi, V.V. (2020). Modeliuvannia protsesu priamoho presuvannia z vykorystanniam kryvoliniynykh profiliv matrychnykh lijk [Modeling of direct extrusion process using curved profiles of matrix funnels]. *Lytvo. Metalurhiia. 2020: XVI mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia – XVI International Scientific and Technical Conference*. (pp. 294-296). Zaporizhzhia: sole proprietor Mokshanov V.V. [in Ukrainian].
 13. Sviatskyi, V.V. (2020). Vplyv vohnyscha deformatsii na enerhosylovi parametry protsesu presuvannia [Effect of the Deformation Zone for Power Parameters of the Extrusion Process]. *Organization of scientific research in modern conditions '2020. International Scientific and Practical Conference*. (pp. 78-82). USA. Seattle: KindleDP [in Ukrainian].
 14. Sviatskyi, V.V. (2020). Analiz modeliuvannia enerhosylovykh parametriv protsesu priamoho presuvannia [Analysis of Energy-Power Parameters Simulation of the Direct Extrusion Process]. *Prykladni naukovo-tekhnicni doslidzhennia: IV mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia – IV International Scientific and Practical Conference*. (1, pp. 72-74). Ivano-Frankivsk: Vasyl Stefanyk Precarpathian National University [in Ukrainian].

Volodymyr Sviatskyi, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Skrypnyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Kononchuk**, PhD tech. sci.

Central Ukrainian national technical university, Kropyvnytskyi, Ukraine

Computer Simulation of the Direct Pressing Process Through Various Matrix Funnel Profiles

The stressed and deformed state of the metal and the dimensions of the center of deformation during pressing depend significantly on the design of the tool and, in particular, on the shape of the matrix funnel. However, there is still no single point of view on the influence of the geometry of the deformation center on the energy forces of the metal pressing process. Based on the analysis of the field of slip lines of the steady-state stage of pressing through a symmetric single-point matrix, it is proposed to use the profile of the matrix funnel made along the slip line separating the elastic and plastic zones. The following types of matrix funnel profiles were investigated using computer simulation of direct extrusion of lead samples with a drawing value 81 at a speed of 1 mm/s: cycloid concave; convex; the second convex, which is built on the logarithmic dependence; conical and concave, which is built along a sliding line that separates the elastic zones from the plastic in the pressing process.

The results of theoretical studies, computer simulations of the direct pressing process using the Deform 2D/3D software package, and experimental experiments have shown that optimal energy-power conditions are achieved by pressing through a matrix that has a profile made along the slip line. The results of the experimental study of the kinetics of the flow of the discrete medium showed that the shape of the matrix funnel influences the size of the deformation center and the distribution of the resulting deformation in the molding. From the analysis of deformation of the granules, it is determined that the concave funnel, built along the slip line, is characterized by a curvature of the axisymmetric particles in the direction of deformation. These curvatures decrease as the granules move to the axis of symmetry of the matrix. It is noted that for a convex funnel, the length of the deformation center is greatest; for a conical metal flow is close to the radial in the direction of the truncated cones.

computer modeling, pressing, tool, matrix, profile, force, efficiency

Одержано (Received) 12.03.2020

Прорецензовано (Reviewed) 24.03.2020

Прийнято до друку (Approved) 19.10.2020