

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РАДІАЛЬНО-ПОЗДОВЖНЬОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТРИКУТНИХ КІНЕМАТИЧНИХ МОДУЛІВ**Н. С. Грудкіна**

Донбаська державна машинобудівна академія

вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна. E-mail: vm.grudkina@ukr.net

З метою дослідження вбудовуваності в загальні розрахункові схеми процесів послідовного радіально-поздовжнього видавлювання запропоновано кінематичний модуль трикутної форми. Отримано величину приведенного тиску деформування всередині модуля із урахуванням верхньої оцінки за Коші-Буняковським потужності сил деформування, сил тертя на поверхні контакту інструменту та напівфабрикату та зрізу для суміжних модулів. Відхилення верхньої оцінки для величини повного приведенного тиску деформування загальної розрахункової схеми не перевищує 1–3%. З огляду на перспективність застосування даного кінематичного модуля у розрахунках процесів радіально-прямого видавлювання запропоновано у якості суміжних модулів обрати різновиди, що дозволяють моделювати процеси із розвинутою складовою радіальної течії металу. Умови тертя та відносна величина товщини стінки, що видавлюється, суттєво впливають на оптимальне значення \bar{h} , яке визначає оптимальну з точки зору зниження силових режимів конфігурацію інструменту. Одержану в результаті величину приведенного тиску рекомендовано використовувати в загальних розрахункових схемах радіально-прямого видавлювання. Отримані результати сприятимуть визначенню оптимальної конфігурації інструмента та розробці відповідних технологічних рекомендацій.

Ключові слова: радіально-поздовжнє видавлювання; математичне моделювання; приведений тиск деформування.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАДИАЛЬНО-ПРОДОЛЬНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕУГОЛЬНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ**Н. С. Грудкина**

Донбасская государственная машиностроительная академия

ул. Академическая, 72, г. Краматорск, 84313, Украина. E-mail: vm.grudkina@ukr.net

С целью исследования встраиваемости в общие расчетные схемы процессов последовательного радиально-продольного выдавливания предложен кинематический модуль треугольной формы. Получена величина приведенного давления внутри модуля с учетом верхней оценки по Коши-Буняковскому мощности сил деформирования, сил трения на поверхности контакта инструмента и полуфабриката и среза для смежных модулей. Отклонение верхней оценки для величины полного приведенного давления деформирования общей расчетной схемы не превышает 1–3%. С учетом перспективности использования данного кинематического модуля в расчетах процессов радиально-прямого выдавливания предложено в качестве смежных выбрать разновидности, позволяющие моделировать процессы с развитой составляющей радиального течения металла. Условия трения и относительная величина толщины выдавливаемой стенки существенно влияют на оптимальное значение \bar{h} , определяющее оптимальную с точки зрения снижения силовых режимов конфигурацию инструмента. Полученную в результате величину приведенного давления рекомендовано использовать в общих расчетных схемах радиально-прямого выдавливания. Полученные результаты будут способствовать определению оптимальной конфигурации инструмента и разработке соответствующих технологических рекомендаций.

Ключевые слова: радиально-продольное выдавливания; математическое моделирование; приведенное давление деформирования.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Інтенсивний розвиток технології об'ємного штампування в останні десятиліття сприяє збільшенню обсягів виробництва точних заготовок та розширенню номенклатури штампованих деталей із застосуванням процесів холодного видавлювання [1–4]. Ці тенденції ґрунтуються на розвитку теоретичних методів дослідження, а саме прийомів спрощення попередньої оцінки силових режимів та поетапної і граничної формозміни напівфабрикату у процесах деформування, та сприяють в загальному розумінні оцінці розширення можливостей даних процесів [3–5]. Дослідження останніх років стосуються як традиційних способів холодного видавлювання (повздовжнього, поперечного), так і процесів комбінованого видавлювання з декількома степенями течії металу [6–9]. Однак аналіз деформаційних та енергосилових режимів та формоутворення виконано переважно

но на основі скінченно-елементного моделювання та експериментально [3, 6–8]. З іншого боку ефективним теоретичним методом дослідження процесів комбінованого видавлювання (послідовного або суміщеного) є енергетичний метод у різних модифікаціях [10]. Першим ключовим етапом застосування методу балансу потужностей (вісесиметрична задача) є підбір функцій, що описують межі та кінематично можливе поле швидкості (КМПШ) всередині побудованого кінематичного модуля. Не менш важливим є пошук інструментів спрощення складових енергетичного рівняння, що дозволить отримати приведенний тиск у аналітичному вигляді. Це стосується перш за все розрахункових схем, що містять трикутні та трапецеїдалні модулі з границями, що дозволяють описати складний перебіг металу всередині заготовки та границі межування заготовки та інструменту [11, 12]. Таким чином, для процесів

послідовного та суміщеного комбінованого видавлювання актуальними задачами є розширення бази уніфікованих кінематичних модулів складної форми та аналіз їх вбудовуваності у загальні розрахункові схеми.

Мета роботи – удосконалення технологій процесів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання на основі розробки ефективних розрахункових схем моделювання процесів із використанням кінематичних трикутних модулів.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. В рамках використання енергетичного методу на основі попередніх експериментальних даних щодо деформаційно-напруженого стану проводять розбиття всього об'єму напівфабрикату на зони (модулі) із визначеними КМПШ, що описують течію металу у процесі деформування. Можливість отримання аналітичного виразу приведенного тиску деформування розрахункової схеми дозволяє визначити оптимальний силовий режим деформування та отримати дані щодо формозміни та можливості дефектоутворення напівфабрикату [9, 11, 12]. У якості параметрів оптимізації приведенного тиску деформування зазвичай виступають геометричні параметри, що характеризують особливості конфігурації інструменту або границі розмежування кінематичних модулів всередині заготовки. Актуальною на даний час є розробка кінематичних модулів трикутної форми із похилою криволінійною або прямолінійною межею, що моделюють течію металу від радіального до поздовжнього (прямого або зворотного) видавлювання чи навпаки [13]. До процесів, у розрахункових схемах яких є необхідність використання кінематичних модулів складної форми (трикутних чи трапецеїдальних), можна віднести процеси радіально-поздовжнього комбінованого видавлювання з обтисненням чи роздачею (рис. 1).

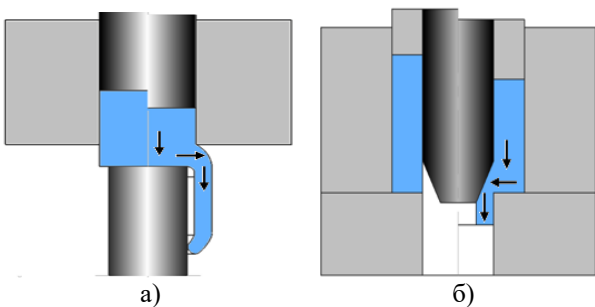


Рисунок 1 – Схеми послідовного радіально-прямого видавлювання з роздачею а) та обтисненням б)

В загальному випадку розрахункові схеми комбіновано суміщеного видавлювання з декількома степенями свободи течії металу також можуть використовувати кінематичні модулі подібної конфігурації. До найпоширеніших кінематичних модулів трикутної форми можна віднести модулі, що моделюють перебіг металу у поздовжньо-радіальному напрямку (табл. 1).

Таблиця 1 – Конфігурація та КМПШ кінематичних модулів трикутної форми

№	Форма кінематичного модуля та КМПШ
1	$\begin{cases} V_z = -\frac{2R}{(R+R_1)tg\beta} \left(1 - \frac{tg\beta}{2r} z\right) V_1; \\ V_r = -\frac{R}{R+R_1} \left(1 + \frac{R}{r}\right) V_1. \end{cases}$
2	$\begin{cases} V_z = -\alpha V_1; \\ V_r = -\frac{R_2^2 - R_1^2}{2hr} V_1. \end{cases}$
3	$\begin{cases} V_z = -\frac{R}{(R+R_1)tg\beta} \left(2 + \frac{tg\beta}{r} z\right) V_1; \\ V_r = \frac{R}{R+R_1} \left(1 + \frac{R}{r}\right) V_1. \end{cases}$

Використання кінематичних модулів складної, в тому числі трикутної форми, вимагають спрощення

розрахунків складових рівняння енергетичного балансу. Це перш за все стосується розрахунків потужності сил деформування [14]. Використання лінеаризації інтенсивності швидкостей деформації є неефективним при моделюванні процесів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання з токи зору неможливості обрати відповідну заміну, єдину у межах кінематичного модуля [11]. Перспективним прийомом спрощення розрахунків приведенного тиску є пошук спеціальних функцій, які описують похилу межу кінематичного модуля та дозволяють отримати потужності сил деформування, тертя і зрізу в аналітичному вигляді. Однак цей метод може бути використаним для обмеженого типу кінематичних модулів з похилою границею у вигляді $T = T(z)$ [11]. В разі неможливості його застосування для спрощення складових приведенного тиску деформування застосовують верхню оцінку потужності сил деформування за формулами Коші-Буняковського або кубатурними формулами [12, 15]. За таких умов можливою є подальше оптимізація приведенного тиску кінематичного модуля за геометричними параметрами, що його визначають. Однак при використанні вказаних прийомів спрощення складових приведенного тиску деформування слід контролювати їх вплив на оптимальні параметри процесу, що досліджуються.

Розглянемо трикутний кінематичний модуль 3 (табл. 1). Інтенсивність швидкостей деформування всередині кінематичного модуля 3 приймає вигляд:

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{RV_1}{\sqrt{3}(R+R_1)r^2} \sqrt{4(r^2 + R_1r + R_1^2) + z^2}. \quad (1)$$

З урахуванням (1) при розрахунках величини потужності сил деформування в аналітичному вигляді виникають труднощі, тому запропоновано верхню оцінку за Коші-Буняковським у вигляді:

$$N_{d2} \leq \frac{\pi\sigma_s V_1 R(R_1 - R)}{3(R+R_1)tg\beta} \sqrt{A \left[B + \frac{C}{tg^2\beta} \right]}, \quad (2)$$

де $A = 2R_1 + 4R$, $B = 2 \frac{R_1^3}{R^2} + 4R - 6R_1$,

$$C = \frac{R - R_1}{3} + R_1 \left(\frac{R - R_1}{R} + \ln \left[\frac{R_1}{R} \right] \right) + \frac{R_1(R_1^2 - R^2)}{6R^2}.$$

Відхилення величини приведенного тиску деформування \bar{p}^*_{d2} всередині кінематичного модуля 3, що обчислюється чисельно, від її верхньої оцінки $\bar{p}_{d2} = Nd2 / \pi\sigma_s V_1 R^2$ досліджено нижче (рис. 2). У розрахунках переходимо до безрозмірних величин, віднесених до R_1 . Характер отриманих кривих (верхньої оцінки – суцільні лінії) та величини приведенного тиску деформування (пунктирні лінії) однотипні для різних співвідношень геометричних параметрів. Відхилення верхньої оцінки за Коші-

Буняковським складає не більше досягати 3–7%, але для величини повного приведенного тиску деформування загальної розрахункової схеми значно зменшується і складає не більше 1–3%. Таким чином, у наступних дослідженнях будемо використовувати верхню оцінку приведенного тиску деформування трикутного кінематичного модуля 3 у вигляді $\bar{p}_{d2} = Nd2 / \pi\sigma_s V_1 R^2$. Використання осевого трикутного модуля 3 для процесів радіально-прямого видавлювання з роздачею може бути необхідним для випадків нерозвиненої радіальної течії (безматричне видавлювання, див. рис.1, а) та із розвинутою складовою радіальної течії. Деталі, отримані послідовним радіально-прямим видавлюванням із АД1 представлено нижче (рис. 3).

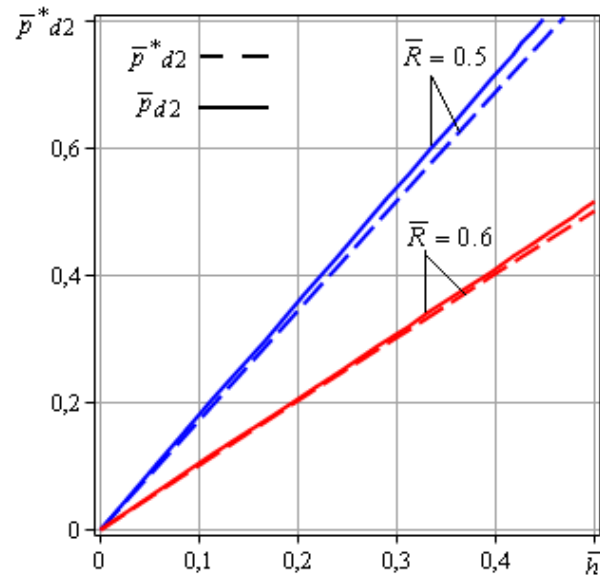


Рисунок 2 – Порівняльний аналіз величини \bar{p}^*_{d2} та її верхньої оцінки \bar{p}_{d2}

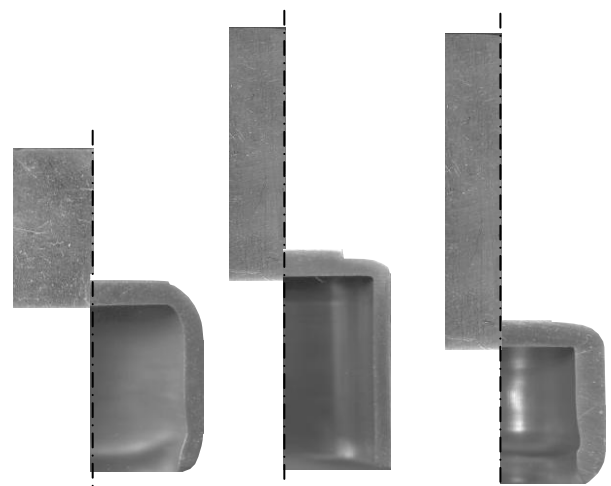


Рисунок 3 – Деталі із АД1, отримані послідовним радіально-прямим видавлюванням

Для дослідження можливості оптимізації силових режимів за параметром h (та фактично куту нахилу β), що визначає оптимальну конфігурацію

інструменту, необхідно враховувати потужності сил зрізу із суміжними кінематичними модулями різної конфігурації та потужність сил тертя на поверхні контакту напівфабрикату та інструменту.

У якості суміжного нижнього кінематичного модуля 4 обираємо жорсткий ($V_{z4} = V_2$, $V_{r4} = 0$) та отримуємо:

$$N_{c2_4} = \frac{\pi \sigma_s V_1 R (R_1 - R) (R + 3R_1)}{\sqrt{3} (R + R_1)}. \quad (3)$$

У якості суміжного лівого кінематичного модуля для розрахункових схем із розвинутою радіальною течією металу обираємо кінематичний модуль 1 ($V_{z1} = 0$, $V_{r1} = V_1 R / r$) та отримуємо:

$$N_{c1_2} = \frac{\pi \sigma_s V_1 R^2 h}{\sqrt{3} (R + R_1) \operatorname{tg} \beta} \left(4 + \frac{h}{R} \operatorname{tg} \beta \right). \quad (4)$$

Потужність сил тертя на похилій межі між напівфабрикату та інструментом приймає вигляд:

$$N_{t2_0} = \frac{2\pi \mu_s \sigma_s V_1 R (R_1 - R) (R + 3R_1)}{\sqrt{3} (R + R_1)} \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta} \right), \quad (5)$$

де μ_s – коефіцієнт тертя ($0 \leq \mu_s \leq 0,5$).

Враховуючи, вбудовуваність у розрахункові схеми процесу із розвинутою радіальною течією металу, приймаємо:

$$V_1 = \frac{V_0 R_p^2}{2Rh}, \quad (6)$$

де R_p – радіус пуансону; V_0 – швидкість руху пуансону.

Таким чином, можна дослідити величину приведенного тиску деформування для трикутного кінематичного модуля 2 із урахуванням потужності сил деформування (2), тертя (5) та зрізу (3) та (4) із суміжними модулями обраної конфігурації:

$$\Delta \bar{p}_2 = \frac{N_{d2a} + N_{c2_4} + N_{c1_2} + N_{t2_0}}{\pi \sigma_s V_0 R_p^2}. \quad (7)$$

Використовуємо відносні геометричні параметри у вигляді $\bar{h} = h / R_1$, $\bar{R} = R / R_1$ та дослідимо вплив різних співвідношень та умов тертя на поведінку функції приведенного тиску $\Delta \bar{p}_2$. Особливу увагу звернемо на наявність (відсутність) точки мінімуму за різних геометричних та технологічних співвідношень. Характер кривих приведенного тиску деформування за різних умов тертя має аналогічний характер наявності точки мінімуму (рис. 4). Погіршення умов тертя веде до зростання величини $\Delta \bar{p}_2$ із зміщенням в сторону збільшення оптимального значення відносної товщини фланцевої зони. Характер кривих приведенного тиску деформування за різної відносної товщини $\bar{S} = 1 - \bar{R}$ стінки, що видавлю-

ється, теж має аналогічний характер з наявністю точки мінімуму (рис. 5). Однак доволі незначна зміна (зростання) параметра \bar{S} веде за собою більш вагоме змінення (збільшення) оптимального значення \bar{h} .

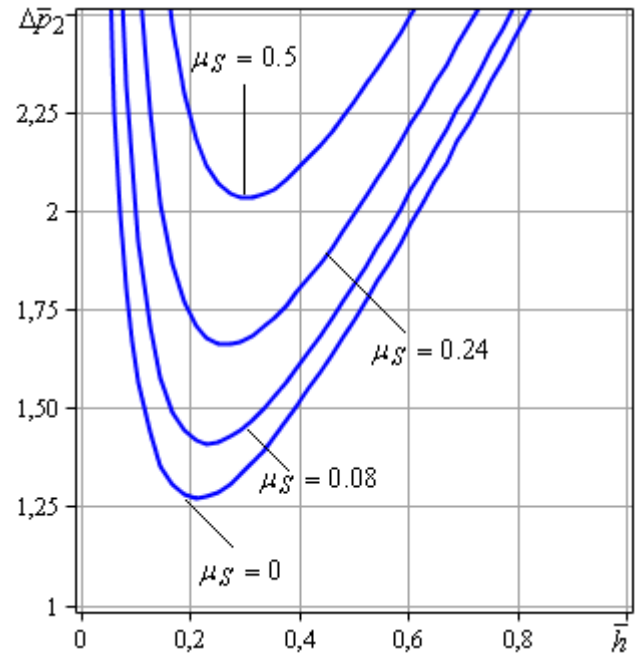


Рисунок 4 – Залежності приведенного тиску $\Delta \bar{p}_2$ від \bar{h} за різних умов тертя при $\bar{R}_p = 0,5$, $\bar{R} = 0,8$

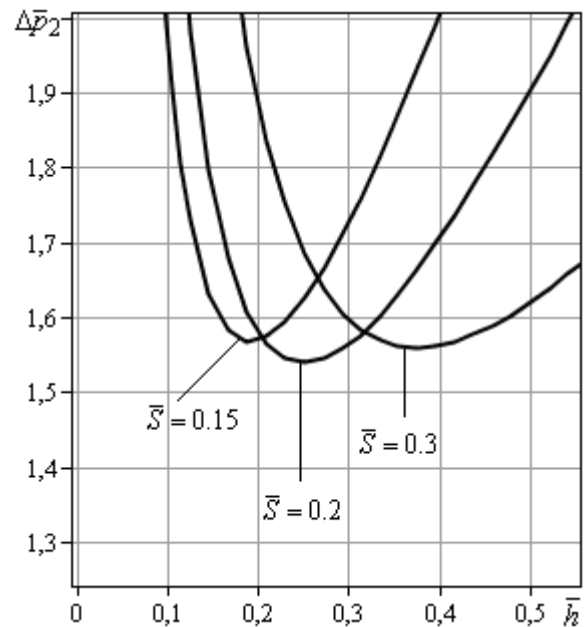


Рисунок 5 – Залежності приведенного тиску $\Delta \bar{p}_2$ від \bar{h} при $\bar{R}_p = 0,5$, $\mu_s = 0,16$

Це пов'язане із зменшенням товщини стінки, що видавлюється, і відповідно меншим оптимальним для такої схеми деформування значенням відносної товщини фланцевої зони \bar{h} .

Таким чином, оптимізація величини приведенного тиску кінематичного модуля 3 за параметр h (та фактично кутом нахилу β) є можливою за різних співвідношень та умов тертя процесу деформування.

ВИСНОВКИ. Для кінематичного модуля трикутної форми 3 одержано величину приведенного тиску в аналітичному вигляді \bar{p}_2 із врахуванням верхньої оцінки потужності сил деформування, сил тертя на поверхні інструменту та напівфабрикату та зрізу на межі суміжних кінематичних модулів. Умови тертя та відносна величина \bar{S} товщини стінки, що видавлюється, суттєво впливають на оптимальне значення товщини фланцевої зони. Отримані залежності потужностей деформування, тертя та зрізу (2)–(5) та повна величина приведенного тиску (7) можуть використовуватися у загальних розрахункових схемах моделювання процесів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання. Відхилення верхньої оцінки для величини повного приведенного тиску деформування загальної розрахункової схеми становитиме 1–3%. Отримані результати сприятимуть визначенню оптимальних параметрів конфігурації інструмента та розробці відповідних конструкторсько-технологічних рекомендацій.

ЛІТЕРАТУРА

- Zhang S. H., Wang Z. R. Some new features in the development of metal forming technology. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, No. 1, pp. 39–47.
- 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.
- 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, Vol. 88, Is. 1–4, pp. 291–301. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8754-6>.
- Алиев И.С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания. *Кузнечно-штамповочное производство*, 1990, № 2, С. 7–10.
- Алиева Л. И. Совершенствование процессов комбинированного выдавливания: монография. Краматорск: ООО «Тираж - 51», 2018. 352 с. ISBN 978-966-379-84.
- 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, pp. 857–863.
- 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, pp. 649–654.
- 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.16, pp. 1091–1100. doi: 10.1007/s12540-015-5276-y.
- 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, pp. 17–22.
- Степанский Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. М.: Машиностроение. 1979. 215 с.
- Hrudkina N., Aliieva L., Abhari P., Kuznetsov M., Shevtsov S. Derivation of engineering formulas in order to calculate energy-power parameters and a shape change in a semi-finished product in the process of combined extrusion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, N 7 (98), p. 49–57. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.160585.
- 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>.
- Алиева Л. И., Картамышев Д. А., Грудкина Н. С., Чучин О. В. Технологические процессы изготовления полых деталей на основе способов комбинированного выдавливания. *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2018, № 1 (46). С. 22–28.
- Чудаков П. Д. Верхняя оценка мощности пластической деформации с использованием минимизирующей функции. *Известия вузов. Машиностроение*, 1992, № 9. С. 13–15.
- Грудкіна Н. С. Верхня оцінка приведенного тиску деформування осевого трапецеїдального кінематичного модуля з нижньою похилою межею. *Вісник ДДМА*. Краматорск: ДГМА, 2019, № 3 (47). С. 21–27.

FEATURES OF MODELING IN RADIAL-LONGITUDINAL EXTRACTION PROCESSES BY USING TRIANGULAR KINEMATIC MODULES

N. Hrudkina

Donbass State Engineering Academy

vul. Akademichna, 72, Kratomorsk, 84313, Ukraine. E-mail: vm.grudkina@ukr.net

Purpose. Improving the technology of combined radial longitudinal extrusion processes based on the development of effective computational process modeling schemes by using economic models of a triangular shape. **Methodology.** Based on the prospects for the introduction of combined longitudinal-transverse extrusion processes in manufacturing, it is necessary to expand the capabilities of the energy method for modeling these processes with considering the complexity of the tool configuration and the boundaries of the flow inside the billet. To describe the complex nature of the metal flow during the transition from radial to forward extrusion, there is a need to develop triangular kinematic mod-

ules. To obtain the magnitude of the reduced pressure inside the kinematic module in an analytical form, it is necessary to use techniques to simplify the power of the deformation forces, friction forces, and shear. Comparative analysis in the magnitude of the reduced pressure with considering the deformation forces and the upper bound that was obtained by Cauchy-Bunyakovsky has confirmed the validity of this replacement. The deviation of the upper bound for the total reduced strain pressure of the general design scheme does not exceed 1-3%. This made it possible to obtain in analytical form the magnitude of the reduced pressure and to analyze the possibility of optimization by parameters characterizing the features of the tool configuration. **Results.** The value of the reduced pressure inside the module with considering the upper bound by Cauchy-Bunyakovsky and also power of the deformation forces, the friction forces on the contact surface of the tool and the semi-finished product and the shear for adjacent modules are considered. To use this kinematic module in the calculations of radial forward extrusion processes, it is proposed to choose as adjacent varieties that allow modeling processes with a developed radial metal flow. Friction conditions and extruded wall thickness, significantly affect the optimal value of the parameter, determining the optimal configuration of the tool in terms of reducing power modes. **Originality.** The resulting reduced pressure value is recommended to be used in general design schemes for radial forward extrusion. This will expand the capabilities in predicting the power modes of these processes with considering optimal configuration of the tool and their wider implementation in manufacturing. **Practical.** The results will contribute to determining the optimal configuration of the tool and the development of appropriate technological recommendations.

Key words: radial longitudinal extrusion; mathematical modeling; reduced deformation pressure.

REFERENCES

- Zhang, S. H., Wang, Z. R. (2004), Some new features in the development of metal forming technology, *J. Mater. Process. Technol.*, № 1, pp. 39–47.
- Bhaduri, A. (2018), Extrusion. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys, *Springer Series in Materials Science*, vol. 264, pp. 599-646. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13.
- Jamali, S. S., Faraji, G., Abrinia, K. (2017), Hydrostatic radial forward tube extrusion as a new plastic deformation method for producing seamless tubes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, Iss. 1–4, pp. 291–301. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8754-6>.
- Aliiev, I. S. (1990), “*Tehnologicheskie vozmozhnosti novykh sposobov kombinirovannogo vyidavlivaniya*” [Technological possibilities of new methods of combined squeezing], *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo* [Forging and stamping production], No. 2, pp. 7–10.
- Aliieva, L. I. (2018), *Sovershenstvovanie protsessov kombinirovannogo vyidavlivaniya* [Sovershenstvovanie protsessovy kombinorovannogo viidavlivaniya], Kramatorsk, «Tirazh - 51», 352 p. ISBN 978-966-379-84.
- 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, pp. 857–863.
- Seo, J. M. (2007), Forming Load Characteristics of Forward and Backward Tube Extrusion Process in Combined Operation, *Key Engineering Materials*, vol. 340-341, pp. 649-654.
- 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, № 6, pp. 1091–1100. doi: 10.1007/s12540-015-5276-y.
- Aliiev, I., Aliieva, L., Grudkina, N., Zhbankov, 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, pp. 17–22.
- Stepanskij, L. G. (1979), Raschety processov obrabotki metallov davleniem [Calculations of metal forming processes], M.: Mashinostroenie, 215 p.
- Hrudkina, N., Aliieva, L., Abhari, P., Kuznetsov, M., Shevtsov, S. (2019), Derivation of engineering formulas in order to calculate energy-power parameters and a shape change in a semi-finished product in the process of combined extrusion, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, № 7 (98), pp. 49–57. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.160585.
- Hrudkina, N., Aliieva, L., Abhari, P., Markov, O., Sukhovirskaya, 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, № 5/1 (101), pp. 49–57. <https://doi:10.15587/1729-4061.2019.179232>.
- Aliieva, L. I., Kartamyshv, D. A., Grudkina, N. S., Chuchin, O. V. (2018), “*Tehnologicheskie processy izgotovleniya polyx detalej na osnove sposobov kombinirovannogo vyidavlivaniya*” [Technical processes of manufacturing of parts based on the methods of combined production], *Obrabotka metallov davleniem* [Metal forming], Kramatorsk: DGMA, № 1 (46), pp. 22–28.
- Chudakov, P. (1992), “*Verkhniaia otsenka moshchnosti plastycheskoi deformatsyy s yspolzovaniem mynomyzryuiushchei funktsyy*” [An upper estimate of the plastic strain rate using minimizing functions], *Yzvestiya vuzov. Mashinostroeniye* [University News. Engineering], № 9, pp. 13–15.
- Grudkina, N. S. (2019), “*Verhnyaya ocinka privedenogo tisku deformovannaya osovogo trapeceidalnogo kinematichnogo modulya z nizhnoyu pohiloyu mezheyu*” [Upper estimate of the reduced deformation pressure of the axial trapezoidal kinematic module with a lower inclined limit], *Visnik DGMA* [Bulletin of the DSEA], Kramatorsk: DGMA, No 3 (47), pp. 21–27.

Стаття надійшла 26.03.2020.