

УДК 621.777.4

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2020.1.1.3>

Н.С. ГРУДКІНА

Донбаська державна машинобудівна академія

ORCID: 0000-0002-0914-8875

Л.І. АЛІЄВА

Донбаська державна машинобудівна академія

ORCID: 0000-0002-5283-925X

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТРАПЕЦЕЇДАЛЬНИХ КРИВОЛІНІЙНИХ КІНЕМАТИЧНИХ МОДУЛІВ

В роботі представлено розрахунки складових приведеного тиску деформування трапецеїдального кінематичного модуля із криволінійною похилою межею в рамках використання енергетичного методу балансу потужностей при моделюванні процесів комбінованого видавлювання з декількома степенями свободи течії металу. Розроблений кінематичний модуль дозволяє описати складний характер течії металу у процесі комбінованого радіально-зворотного видавлювання порожнистих деталей з фланцем. Отримано потужності сил деформування, зрізу із суміжними кінематичними модулями та тертя на поверхні контакту заготовки та інструменту. Проведено порівняльний аналіз силових параметрів процесу деформування розрахункових схем, що містять трапецеїдальний модуль з похилою прямолінійною та криволінійною межами відповідно. Встановлено, що оптимізація за кінематичним параметром – швидкістю заповнення стінки стакану, що формується, є можливою за різних співвідношень параметрів процесу комбінованого видавлювання. Рациональність застосування криволінійної межі у вигляді $z = z_2(r)$ підтверджена виконанням умови $\bar{p}_2 < \bar{p}_1$ для оптимальних значень за різних співвідношень та умов тертя. Отримані вирази потужностей сил деформування, зрізу із суміжними кінематичними модулями та тертя на поверхні контакту заготовки та інструменту можуть бути використані як складові у інших розрахункових схемах комбіновано видавлювання з декількома степенями течії металу. Згідно з отриманими даними застосування трапецеїдального кінематичного модуля із похилою криволінійною межею дозволить зменшити прогнозовані розрахунки за силовими параметрами процесу деформування на 5–7%. Це сприятиме отриманню більш адекватної оцінки характеру течії металу всередині напівфабрикату і силового режиму, а в широкому розумінні розширенню можливостей комбінованого радіально-зворотного видавлювання.

Ключові слова: комбіноване видавлювання, енергетичний метод верхньої оцінки, кінематичний модуль, приведений тиск деформування.

Н.С. ГРУДКИНА

Донбасская государственная машиностроительная академия

ORCID: 0000-0002-0914-8875

Л.И. АЛИЕВА

Донбасская государственная машиностроительная академия

ORCID: 0000-0002-5283-925X

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

В работе представлены расчеты составляющих приведенного давления деформирования трапецеидального кинематического модуля с криволинейной наклонной границей в рамках использования энергетического метода баланса мощностей при моделировании процессов комбинированного выдавливания с несколькими степенями свободы течения металла. Разработанный кинематический модуль позволяет описать сложный характер течения металла в процессе комбинированного радиально-обратного выдавливания полых деталей с фланцем. Получены мощности сил деформирования, среза со смежными кинематическими модулями и трения на поверхности контакта заготовки и инструмента. Проведен сравнительный анализ силовых параметров процесса деформирования расчетных схем, содержащих трапецеидальный модуль с наклонной прямолинейной и криволинейной границами соответственно. Установлено, что оптимизация по кинематическому параметру - скорости заполнения формирующейся стенки стакана возможна при различных соотношениях параметров процесса комбинированного выдавливания. Рациональность применения

криволинійної границі в виде $z = z_2(r)$ підтверджена виконанням умови $\bar{p}_2 < \bar{p}_1$ для оптимальних значень при різних соотношеннях і умовах трення. Отримані вираження потужностей сил деформування, среза со сусідніми кінематическими модулями і трення на поверхності контакту заготовки і інструмента можуть бути використані як складові в інших розрахункових схемах комбіновано видавлювання з декількома степенями свободи течія металу. Згідно отриманим даним застосування трапецидального кінематического модуля з нахилною криволинійною границею дозволить зменшити прогнозовані розрахунки силових параметрів процесу деформування на 5–7%. Це буде сприяти отриманню більш адекватної оцінки характеру течія металу всередині напівфабрикату і силового режиму, а в широкому сенсі розширенню можливостей комбінованого радіально-обратного видавлювання.

Ключевые слова: комбіноване видавлювання, енергетический метод верхньої оцінки, кінематический модуль, приведенне тиснення деформування.

N.S. HRUDKINA

Donbass State Engineering Academy

ORCID: 0000-0002-0914-8875

L.I. ALIEVA

Donbass State Engineering Academy

ORCID: 0000-0002-5283-925X

MODELING OF COMBINED EXTRUSION PROCESSES USING TRAPEZOIDAL CURVED KINEMATIC MODULES

The paper presents the calculations of the components of the deformation pressure of the trapezoidal kinematic module with a curved inclined boundary in the framework of using the energy method of power balance in modeling the processes of combined extrusion with several degrees of freedom of metal flow. The developed kinematic module allows us to describe the complex nature of the metal flow in the process of combined radial-backward extrusion of hollow parts with a flange. The power of the forces of deformation, shear with adjacent kinematic modules and friction on the contact surface of the workpieces and tool are obtained. We conducted a comparative analysis of the power parameters of the process of deformation of design schemes containing a trapezoidal module with an inclined rectilinear and curvilinear boundaries, respectively. It has been established that optimization with respect to the kinematic parameter – the filling rate of the forming glass wall - is possible with various ratios of the parameters of the combined extrusion process. The rationality of the use of a curved border in the form $z = z_2(r)$ is confirmed by the fulfillment of the conditions $\bar{p}_2 < \bar{p}_1$ for optimal values under various ratios and conditions of friction. The obtained expressions of the power of the forces of deformation, shear with adjacent kinematic modules and friction on the contact surface of the workpieces and tool can be used as components in other calculation schemes combined extrusion with several degrees of freedom of metal flow. According to the data obtained, the use of a trapezoidal kinematic module with an inclined curved border will reduce the predicted calculations of the force parameters of the deformation process by 5-7%. This will contribute to obtaining a more adequate assessment of the nature of the metal flow inside the semi-finished product and the power regime, and in the broad sense, expanding the capabilities of combined radial-backward extrusion.

Keywords: combined extrusion, energy upper bound method, kinematic module, deformation pressure.

Постановка проблеми

На даний час технологічні способи холодного об'ємного деформування (ХОД) завдяки різноманітним можливостям і високій ефективності в порівнянні з іншими процесами формоутворення деталей демонструють стійку тенденцію до збільшення обсягів виробництва точних заготовок та розширенню номенклатури штампованих деталей [1, 2]. Розвиток процесів ХОД пов'язаний із розробкою і освоєнням саме процесів комбінованого поперечно-поздовжнього видавлювання (суміщеного та послідовного) [3]. А поєднання радіального і поздовжнього видавлювання відкриває великі перспективи в забезпеченні високої складності одержуваних деталей із фланцями та відростками різної форми та зниження силових параметрів процесу деформування [4]. Однак слід враховувати, що процеси комбінованого видавлювання з декількома степенями свободи течія металу проходять в саморегульованого режимі, тому вимагають наявності попередньої оцінки силового режиму деформування та, що не найголовніше, із послідовної формозміни напівфабрикату. Зазначимо, що на даний час є об'єктивні труднощі, пов'язані з визначенням оптимальних кінематических параметрів процесу (швидкості витікання металу у різних напрямках) і отримання приведенного тиснення в аналітичному вигляді. Це призводить до труднощів в отриманні інженерних формул розрахунку силового режиму та збільшень напівфабрикату, що відповідають дійсності (експериментальним даним) і, як наслідок,

ускладнюють попередню оцінку раціональності використання процесів комбінованого суміщеного видавлювання.

Перспективним в рамках використання енергетичного методу балансу потужностей, як ефективного теоретичного методу моделювання процесів комбінованого видавлювання, є розробка нових кінематичних модулів. Потреба у розробці модулів трапецеїдальної та трикутної форми ґрунтується на необхідності опису складної течії металу всередині заготовки та особливостей конфігурації інструменту. Саме розширення бази уніфікованих кінематичних модулів із криволінійними границями дозволить повною мірою використовувати всі можливості енергетичного методу та отримати оптимальні кінематичні та геометричні параметри, що забезпечать визначення силового режиму і приростів напівфабрикату. Це в свою чергу, заповнить нестачу рекомендацій щодо використання процесів комбінованого видавлювання з декількома степенями свободи течії металу на виробництві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На даний час дослідження процесів комбінованого видавлювання проведено скінченно-елементним моделюванням та експериментально, а отримані результати мають обмежений характер [7-13]. Основна частина рішень отримані для визначення енергосилових параметрів процесу та вимагає чисельних розрахунків. В роботі [5] представлений аналіз впливу геометричних параметрів (радіус заокруглення матриці, висоти зазору та умов тертя) в процесі прямого-радіально-зворотного видавлювання. При цьому використовували метод скінченних елементів (МСЕ) в програмному забезпеченні ABAQUS та аналітичних залежностей силових параметрів і збільшень напівфабрикату не отримано. В роботі [6] досліджено процес комбінованого зворотно-прямого видавлювання методом верхньої оцінки із застосуванням довільно орієнтованих трикутних елементів, об'єднаний з методом скінченних елементів (UBET). Аналіз напружено-деформованого стану та силового режиму у процесі комбінованого видавлювання порожнистих конічних деталей у роботі [7] проведено МСЕ та не ставив за мету отримання аналітичних залежностей тиску деформування.

У роботах [8, 9] МСЕ досліджено процес двостороннього радіально-зворотного видавлювання порожнистих деталей з фланцем при різних змінних факторах (величина зазорів, радіуси закруглення матриці і умови тертя). Автори стверджують, що умови тертя мають незначний вплив на силові параметри процесу деформування і деформацію зразка.

Ряд робіт присвячений питанням оцінки деформованого стану та умов появи дефектів деталей у процесах холодного комбінованого видавлювання. Робота [10] присвячена оцінці граничної формозміни заготовок з різних матеріалів в процесах холодного об'ємного деформування, а саме проведено розрахунки ресурсу пластичності за різними критеріями для процесу комбінованого радіально-прямого видавлювання. Ряд робіт присвячений проблемам дефектоутворення у процесах комбінованого видавлювання [11, 12]. Запропоновано діаграму областей, критичних з точки зору утворення дефекту у вигляді утягнення у донній частині при комбінованому видавлюванні деталей з фланцем [11]. Для осесиметричного процесу радіально-прямого видавлювання запропонований аналітичний підхід, заснований на визначенні компонентів простих полів швидкостей із паралельним перебігом в рамках використання енергетичного методу верхньої оцінки [13].

Однак останні дослідження в рамках використання кінематичних модулів складної конфігурації із криволінійними межами в порівнянні із кінематичними модулями простішої форми вказують на можливості зниження прогнозованих силових режимів та уточнення даних щодо формозміни напівфабрикату. Тому розробка нових кінематичних модулів та аналіз їх раціональності та ефективної вбудовуваності в загальні розрахункові схеми процесів комбінованого видавлювання є актуальною.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розширення можливостей енергетичного методу моделювання процесів комбінованого радіально-зворотного видавлювання завдяки розробці трапецеїдального кінематичного модуля з криволінійною похилою межею та аналіз перспективності його використання.

Викладення основного матеріалу дослідження

Ключовими етапами використання енергетичного методу балансу потужностей можна вважати підбір функцій, що описують кінематично можливе поле швидкості (КМПШ) та інструментів спрощення складових енергетичного рівняння, що дозволяють отримувати приведенний тиск у аналітичному вигляді [14]. Це стосується перш за все розрахункових схем, що містять трапецеїдальні модулі з криволінійними границями. Перші спроби вирішити проблеми спрощення розрахунків потужності сил деформування шляхом використання лінеаризації інтенсивності швидкостей деформації виявилися неефективними. Раціональним є визначення функції, що описує криволінійну межу, та подальше застосування верхньої оцінки потужності сил деформування за формулами Коші-Буняковського або кубатурними формулами [15]. За таких умов стає можливою подальше отримання розрахункових формул приведенного тиску деформування та аналіз впливу на оптимального значення кінематичних параметрів геометричних співвідношень та умов тертя.

Розглянемо розрахункову схему процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання

деталей з фланцем (табл. 1). Трапецеїдальний кінематичний модуль 2 в загальному вигляді може мати похилу межу у вигляді лінійної функції $z = z_1(r)$ або деякої кривої $z = z_2(r)$. За загальних позначень маємо $M = V_0 R_1 / (2h_1)$, де V_0 - швидкість руху пуансону.

Таблиця 1

Схема процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання	КМПШ процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання
	<p>КМПШ:</p> $\begin{cases} v_{z2} = \frac{W + z'(r)v_{r2}}{z(r)} z, \\ v_{r2} = \frac{M + W(R_1^2 - r^2)}{2r z(r)}. \end{cases}$ <p>Складові інтенсивності швидкостей деформації:</p> $\begin{cases} \dot{\epsilon}_{z2} = \frac{W + z'(r)v_{r2}}{z(r)}, \\ \dot{\epsilon}_{r2} = \left[\frac{\frac{W}{z(r)} - \frac{M + W(R_1^2 - r^2)}{2r^2 z(r)}}{z'(r) \left(\frac{M + W(R_1^2 - r^2)}{2r^2 z(r)} \right)} \right], \\ \dot{\epsilon}_{\theta 2} = \frac{M + W(R_1^2 - r^2)}{2r^2 z(r)}, \\ \dot{\gamma}_{rz2} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{W + z'(r)v_{r2}}{z(r)} \right) \cdot z. \end{cases}$

Покладаючи в загальному вигляді КМПШ модуля 2 межу у вигляді лінійної функції $z = z_1(r)$, були отримані результати приведеного тиску деформування процесу радіально-зворотного видавлювання порожнистих деталей з фланцем [11]. Обмеження використання розрахункової схеми даного процесу стосувалися співвідношень $2R_2 h_1 / (R_2^2 - R_1^2) < 1$, характерних для переважно зворотного видавлювання. Також отримані результати з урахуванням особливостей протікання процесу деформування дозволили використовувати трапецеїдальний кінематичний модуль 2 із прямолінійною похилою межею для аналізу дефектування у вигляді утягнення в донній частині заготовки. Деталі, отримані комбінованим радіально-зворотним видавлюванням: із С1 із утягненням (рис. 1, а) та із сплавів АД1, АД31, Лб2 та М1 без дефектування (рис. 1, б). Використання прямолінійної границі $z = z_1(r)$ дозволило отримати дані щодо енергосилових параметрів процесу та формозміння, що відповідають дійсності з прийнятним відхиленням, як для процесу із дефектуванням, так і для процесу без появи утягнення в донній частині заготовки. Однак результати, отримані в роботах останніх років із застосуванням кінематичних модулів з криволінійними межами, доводять ефективність їх застосування у порівнянні із прямолінійними похилими межами. Моделювання зміни вертикальної складової течії металу в Qform 2/3D для $R_1 = 12$ мм, $R_2 = 22.5$ мм, $h_1 = 2$ мм для ходу, що відповідає $H = 15$ мм (ліва половина) та $H = 12.6$ мм (права половина) дозволяє зробити висновок про перспективність використання криволінійної межі кінематичного модуля 2 (рис. 2, а). Тому у якості альтернативи прямолінійної межі, використовуємо криву $z = z_2(r)$ у вигляді (рис. 2, б):

$$z_2(r) = \frac{a}{r-b}, \tag{1}$$

де $b = \frac{R_1(H+h_1) - h_1 R_2}{H}$, $a = h_1(R_2 - b)$.

Потужності сил зрізу на поверхнях із суміжними модулями для кінематичного модуля 2 із криволінійною межею (1) приймають вигляд:

$$Nc2-3 = \frac{\pi\sigma_s}{a\sqrt{3}} \left[\frac{M((R_2-b)^2 - (R_1-b)^2)}{2} + \frac{W}{4} (2R_1^2(R_2^2 - R_1^2) - R_2^4 + R_1^4) - \right. \\ \left. - Wb \left(R_1^2(R_2 - R_1) - \frac{R_2^3 - R_1^3}{3} \right) + \frac{a^2((R_2-b)^2 - (R_1-b)^2)}{2(R_2-b)^2(R_1-b)^2} \right], \quad (2)$$

$$Nc2-4 = \frac{\pi\sigma_s R_2}{\sqrt{3}} \left| \frac{a(M + W(R_1^2 - R_2^2))}{2R_2(R_2-b)^2} - \frac{W(R_2-b)h^2}{a} \right|, \quad (3)$$

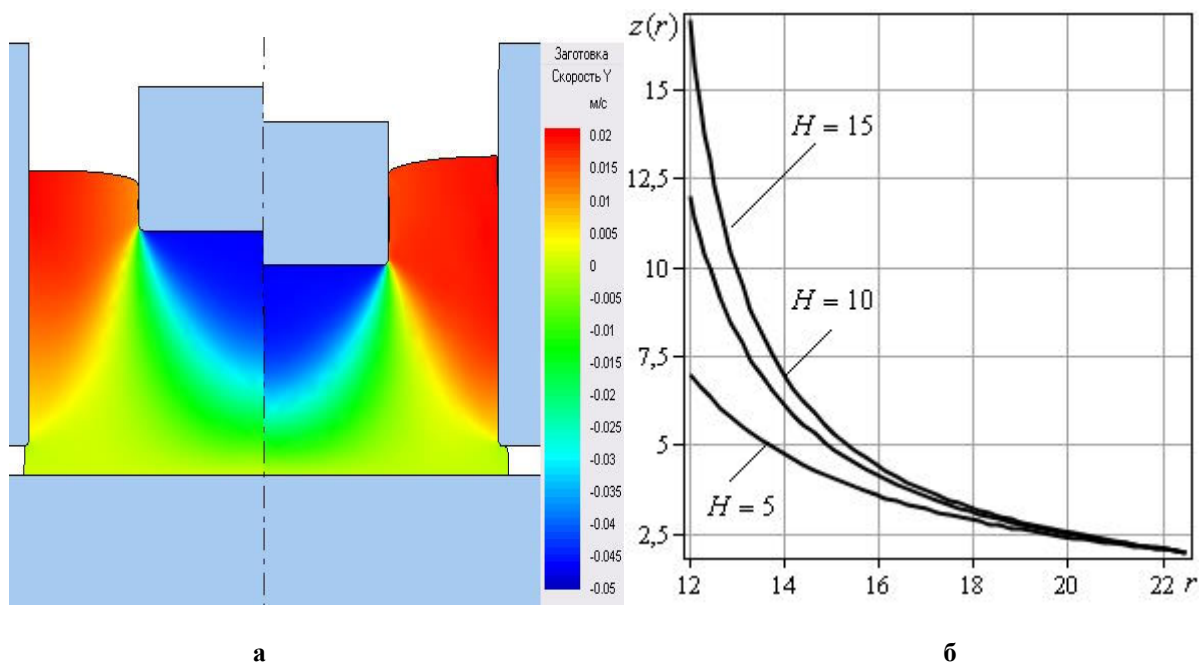
$$Nc1-2 = \frac{\pi\sigma_s R_1}{\sqrt{3}} \left| \frac{aM}{2R_1(R_1-b)^2} - (V_0 + W)(H + h_1) \right|. \quad (4)$$



а

б

Рис. 1. Деталі, отримані комбінованим радіально-зворотним видавлюванням: а) з утягненням; б) без дефектоутворення



а

б

Рис. 2. Моделювання границі розділу течії металу від радіального до зворотного напрямків: а) у Qform2/3D; б) теоретично у вигляді $z = z_2(r)$

Потужності сил тертя на поверхнях заготовки із інструментом для кінематичного модуля 2 із криволінійною межею (1) приймають вигляд:

$$Nt_{2-0} = \frac{2\pi\mu_s\sigma_s}{a\sqrt{3}} \left[\frac{Wb(R_2^3 - R_1^3)}{3} + \frac{(M + WR_1^2)(R_2 - b)^2 - (R_1 - b)^2}{2} - \frac{W}{4}(R_2^4 - R_1^4) \right]. \quad (5)$$

Використання верхньої оцінки за формулою Коші – Буняковського дозволило отримати вираз складових потужності сил деформування у вигляді:

$$Nd_2 \leq \sqrt{V_2} \iiint_{V_2} \dot{\epsilon}_i^2 dV_2, \quad (6)$$

де $V_2 = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} r dr \int_0^{z_2(r)} dz = 2\pi a \left(R_2 - R_1 + b \ln \left| \frac{R_2 - b}{R_1 - b} \right| \right)$ - об'єм області кінематичного модуля 2 із криволінійною межею.

Використовуючи складові розрахункової схеми із кінематичним модулем 2 з прямолінійною похилою межею \bar{p}_1 , висвітлені у роботі [11], отримати вираз приведенного тиску \bar{p}_2 деформування із удосконаленим модулем 2 з криволінійною межею у вигляді $z = z_2(r)$ можна із урахуванням складових (2)-(6). Таким чином, дослідження раціональності обраної заміни кривої зводиться до порівняльного аналізу величин приведенного тиску деформування \bar{p}_1 та \bar{p}_2 за схемами із прямолінійною та криволінійною межею відповідно.

Оптимальне значення величини приведенного тиску деформування для обраних розрахункових схем знаходимо, оптимізуючи за кінематичним параметром $\bar{W} = W/V_0$ - відносною швидкістю витікання металу у вертикальному напрямку, що формує стінку стакану. При цьому дослідження ведемо для відносних геометричних параметрів $\bar{h}_1 = h_1/R_2$, $\bar{H} = H/R_2$, $\bar{R}_1 = R_1/R_2$. Порівняльний аналіз залежностей приведенного тиску деформування при $\bar{R}_1 = 0.62$, $\bar{h}_1 = \bar{H} = 0.2$ для різних умов тертя вказує на подібність отриманих кривих як для розрахункової схеми із прямолінійною межею, так і для використання криволінійної межі кінематичного модуля 2 (рис. 3, а). Оптимальне значення кінематичного параметра \bar{W} (точка мінімуму) дещо зменшується для схеми із криволінійним кінематичним модулем 2.

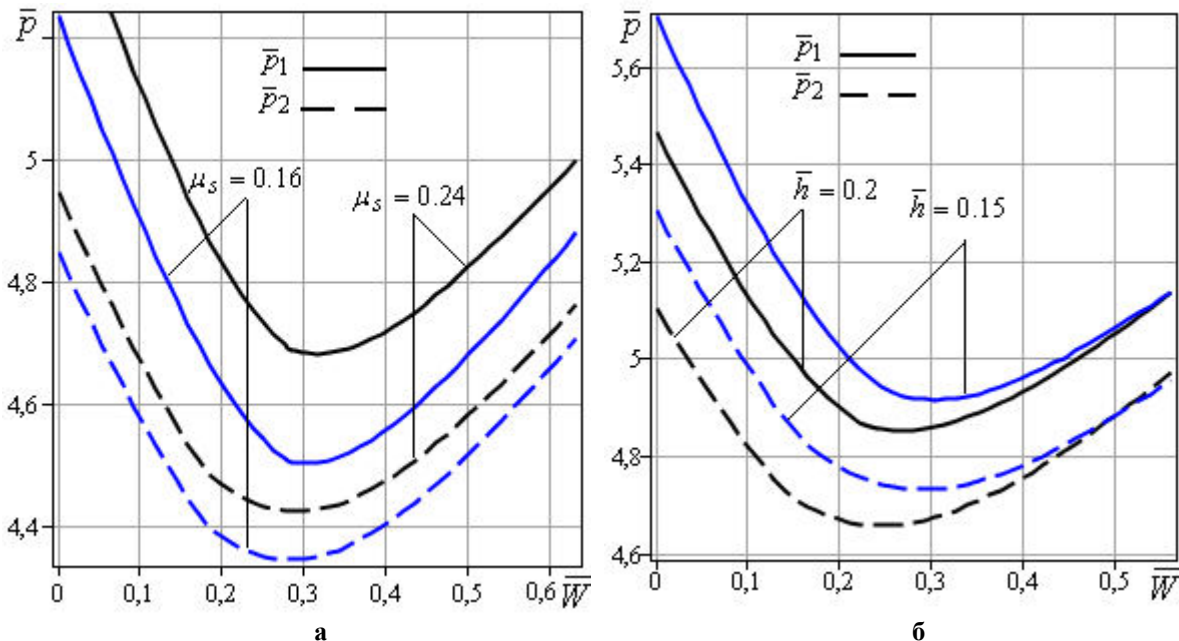


Рис. 3. Залежності приведенного тиску деформування \bar{p}_1 та \bar{p}_2 від відносної швидкості течії металу в вертикальному напрямку: а) за різних умов тертя; б) товщини фланця

При цьому за всіх умов тертя оптимальне значення \bar{p}_2 є меншим за оптимальне значення \bar{p}_1 , тому раціональним є використання удосконаленого модуля 2 із границею у формі $z = z_2(r)$. Проаналізовано також вплив відносної товщини фланця на характер кривих приведенного тиску деформування при $\bar{R}_1 = 0.6$, $\bar{H} = 0.2$, $\mu_S = 0.16$ (рис. 3, б). Збільшення товщини фланця призводить до зменшення величини приведенного тиску деформування для обох розрахункових схем процесу. Характер отриманих кривих є аналогічним із наявністю точки мінімуму, що відповідає оптимальному значенню кінематичного параметра \bar{W} , за різних геометричних співвідношень. Умова $\bar{p}_2 < \bar{p}_1$ для оптимального значення підтверджує раціональність вибору криволінійної межі кінематичного модуля 2 по відношенню до прямої лінійної межі. Відмінність оптимального значення відносної швидкості витікання у вертикальному напрямку можна вважати неістотною. Зменшення розрахунків оптимального значення приведенного тиску деформування може досягати 5–7% і збільшується із погіршенням умов тертя.

Висновки

Проведений порівняльний аналіз підтвердив можливість оптимізації величини приведенного тиску деформування \bar{p}_2 за кінематичним параметром \bar{W} , що визначає відносну швидкість заповнення стінки стакану, що формується. Раціональність застосування криволінійної межі у вигляді $z = z_2(r)$ підтверджена виконанням умови $\bar{p}_2 < \bar{p}_1$ для оптимальних значень за різних співвідношень та різних умов тертя. Зменшення розрахунків оптимального значення приведенного тиску деформування \bar{p}_2 в порівнянні із величиною \bar{p}_1 може досягати 5–7% і збільшується із погіршенням умов тертя.

Отримані вирази потужностей сил деформування, зрізу із суміжними кінематичними модулями та тертя на поверхні контакту заготовки та інструменту можуть бути використані як складові у інших розрахункових схемах комбіновано видавлювання. Згідно з отриманими даними застосування трапецеїдального кінематичного модуля із похилою криволінійною межею дозволить зменшити прогнозовані розрахунки за силовими параметрами процесу деформування на 5–7%. Це сприятиме отриманню більш адекватної оцінки характеру течії металу і силового режиму, а в широкому розумінні розширенню можливостей комбінованого радіально-зворотного видавлювання.

Список використаної літератури

1. Zhang S. H. Some new features in the development of metal forming technology / S. H. Zhang, Z. R. Wang // J. Mater. Process. Technol, 2004. № 1. P. 39–47.
2. Розов Ю. Г. Технологии изготовления прецизионных трубчатых изделий холодным пластическим деформированием : монография / Ю. Г. Розов. – Херсон: Изд-во ХНТУ, 2013. – 336 с.
3. Saffar S. On the effects of eccentricity in precision forging process / S. Saffar, M. Malaki, B. Mollaei-Dariani // UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 2014. Vol. 76. Iss. 1. P. 123–138. ISSN 1454-2358.
4. Алиева Л. И. Совершенствование процессов комбинированного выдавливания: монография / Л. И. Алиева. – Краматорск: ООО «Тираж - 51». 2018. – 352 с. ISBN 978-966-379-846-2.
5. Farhoumand A. Analysis of forward-backward-radial extrusion process / A. Farhoumand, R. Ebrahimi // Materials and Design 30, 2009. p. 2152–2157.
6. Choi H. J. The forming characteristics of radial-backward extrusion / Choi H. J., Choi J. H., Hwang B. V. // J Mater Process Technol, 2001. № 113. P. 141–147.
7. Алиев И. С., Корденко М. Ю., Самоглядюв А. Д. Комбинированное выдавливание полых конических деталей // Обработка материалов давлением. – 2018. – № 2 (47).
8. Lee H. Y. Forming load and deformation energy in combined radial backward extrusion process / H. Y. Lee, B. V. Hwang, S. H. Lee // Proceedings of the Int. Conf. “Metal Forming 2012” 16-19.09.2012, AGH, Krakow. – pp. 487–490.
9. Yang D. Y. Design of processes and products through simulation of three-dimensional extrusion / D. Y. Yang, K. J. Kim // J. Mater Process Technol. – 2007. – Nr 191. – pp. 2–6.
10. Ogorodnikov V. A. On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading / V. A. Ogorodnikov, I. A. Derevenko, R. I. Sivak // Materials Science, 2018. Volume 54, Issue 3, pp. 326–332. DOI: 10.1007/s11003-018-0188-x.
11. Hrudkina, N., Aliieva, L. Abhari, P., Markov, O., Sukhovirsk, 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, Vol. 5, No. 1 (101), pp. 49-57, 2019, doi:10.15587/1729-4061.2019.179232.

12. Aliiev, I., Aliieva, L., Grudkina, N. and Zhbakov, I.: Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion, Metallurgical and Mining Industry, Vol. 3, No. 7, pp. 17-22, 2011.
13. Ebrahimi R. An analytical approach for radial-forward extrusion process / R. Ebrahimi, M. Reihanian, M.M. Moshksar // Materials and Design. – 2008. – № 29. – pp. 1694–1700.
14. Чудаков П. Д. О вычислении мощности пластической деформации / П. Д. Чудаков // Известия вузов. Машиностроение. – 1979. – № 7. – С. 146–148.
15. 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, Vol. 2, No. 7 (98), pp. 49-57, 2019, doi:10.15587/1729-4061.2019.160585.

References

1. 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.
2. Rozov Ju. G. Tekhnologii izgotovlenija precizionnih trubchatih izdelij holodnim plasticheskim deformirovanjem : monografiya / Ju. G. Rozov. – Kherson: Izd-vo KhNTU, 2013. – 336 s.
3. Saffar S., Malaki M., Mollaei-Dariani B. On the effects of eccentricity in precision forging process. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 2014. Vol. 76. Iss. 1. P. 123–138. ISSN 1454-2358.
4. Aliieva L. I. Sovershenstvovanie processov kombinirovannogo vydavlivaniya: monografiya / L. I. Aliieva. – Kramatorsk: OOO «Tirazh - 51». 2018. – 352 s. ISBN 978-966-379-846-2.
5. Farhoumand A., Ebrahimi R. Analysis of forward–backward-radial extrusion process. Materials and Design 30. 2009. pp. 2152–2157.
6. Choi H. J., Choi J. H., Hwang B. B. The forming characteristics of radial-backward extrusion. J Mater Process Technol. 2001. No 113. pp. 141–147.
7. Aliiev I. S., Kordenko M. Yu., Samoglyadov A. D. Kombinirovannoe vydavlivanie polyh konicheskikh detalej // Obrabotka materialov davleniem. – 2018. – № 2 (47).
8. Lee H. Y., Hwang B. B., Lee S. H. Forming load and deformation energy in combined radial backward extrusion process. Proceedings of the Int. Conf. “Metal Forming 2012” 16-19.09.2012, AGH, Krakow. pp. 487–490.
9. Yang D. Y., Kim K. J. Design of processes and products through simulation of three–dimensional extrusion. J. Mater Process Technol. 2007. No 191. pp. 2–6.
10. 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. Volume 54, Issue 3, pp. 326–332. DOI: 10.1007/s11003-018-0188-x.
11. 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, Vol. 5, No. 1 (101), pp. 49-57, 2019, doi:10.15587/1729-4061.2019.179232.
12. Aliiev, I., Aliieva, L., Grudkina, N. and Zhbakov, I.: Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion, Metallurgical and Mining Industry, Vol. 3, No. 7, pp. 17-22, 2011.
13. Ebrahimi R., Reihanian M., Moshksar M.M. An analytical approach for radial-forward extrusion process. Materials and Design. 2008. No 29. pp. 1694–1700.
14. Chudakov P. D. O vychislenii moshhnosti plasticheskoy deformacii. izvestiya vuzov. mashinostroenie. – 1979. – No.7. – Pp. 146–148.
15. 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, Vol. 2, No. 7 (98), pp. 49-57, 2019, doi:10.15587/1729-4061.2019.160585.