

## ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 621.777.4

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.4.1>

Л.І. АЛІЄВА

Донбаська державна машинобудівна академія

ORCID: 0000-0002-5283-925X

В.М. ЛЕВЧЕНКО

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

ORCID: 0000-0002-2411-4198

Д.О. КАРТАМИШЕВ

Донбаська державна машинобудівна академія

ORCID: 0000-0003-3240-8919

Х.В. МАЛІЙ

Донбаська державна машинобудівна академія

ORCID: 0000-0002-9046-4268

**РОЗРОБКА ТА ВИКОРИСТАННЯ КІНЕМАТИЧНИХ МОДУЛІВ  
ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОПЕРЕЧНО-ПРЯМОГО  
ВИДАВЛЮВАННЯ**

*У роботі представлено результати моделювання силового режиму процесу поперечно-прямого видавлювання порожнистих виробів з глухим отвором із суцільних заготовок на основі енергетичного методу верхньої оцінки. Показано, що використання для холодного видавлювання таких виробів комбінованими процесами дозволяє не тільки скоротити кількість необхідних операцій, а й знизити навантаження на інструмент, що деформує. Протестовано та описано спеціально розроблені криволінійні кінематичні модулі, застосування яких дозволяє підвищити оперативність методу верхньої оцінки для дослідження процесів комбінованого видавлювання. Продемонстровано можливість коректного використання кінематичних модулів для аналізу складних схем процесів із кількома зонами. Моделювання проведено як для розрахункової схеми поперечно-прямого видавлювання заготовки зі змінною висотою фланця (загальний випадок), так і для схеми заготовки з фланцем постійної висоти. Встановлено, що розроблені криволінійні трикутні модулі за рахунок зниження величини розриву швидкостей на їх межах дозволяють знизити верхню оцінку навантажень на інструмент порівняно з варіантами моделей, які раніше базувалися на модулях прямокутної форми. Використання розроблених криволінійних модулів краще відповідає реальній кінематиці течії металу та забезпечує більш точний розрахунок силового режиму процесів комбінованого видавлювання. Розрахунки показали, що уточнені значення приведенного тиску для процесів поперечно-прямого видавлювання на 18...30% нижчі, ніж одержувані при використанні модулів з прямолінійними контурами. Досліджено також вплив на силовий режим процесу послідовного поперечно-прямого видавлювання основних технологічних параметрів. Встановлено, що при збільшенні відносної товщини дна деталі з 0,2 до 0,8 для коефіцієнта тертя  $\mu_s = 0,08$  тиск знижується до 20...30%, а для  $\mu_s = 0,2$  – до 40%, збільшення відносного радіуса порожнини від 1,2 до 2,5 призводить до збільшення силових параметрів на 33%, зміна відносної товщини стінки деталі від 0,5 до 0,2 збільшує приведений тиск на 19%.*

*Ключові слова:* моделювання, поперечно-пряме видавлювання, енергетичний метод верхньої оцінки, кінематичний модуль, модульний підхід, навантаження на інструмент.

Л.И. АЛИЕВА

Донбасская государственная машиностроительная академия

ORCID: 0000-0002-5283-925X

В.Н. ЛЕВЧЕНКО

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

ORCID: 0000-0002-2411-4198

Д.А. КАРТАМЫШЕВ

Донбасская государственная машиностроительная академия

ORCID: 0000-0003-3240-8919

К.В. МАЛИЙ

Донбасская государственная машиностроительная академия

ORCID: 0000-0002-9046-4268

## РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОПЕРЕЧНО-ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

*В работе представлены результаты моделирования силового режима процесса поперечно-прямого выдавливания пустотелых изделий с глухим отверстием из сплошных заготовок на основе энергетического метода верхней оценки. Показано, что использование для холодного выдавливания таких изделий комбинированными процессами позволяет не только сократить количество необходимых операций, но и снизить нагрузки на деформирующий инструмент. Протестированы и описаны специально разработанные криволинейные кинематические модули, применение которых позволяет повысить оперативность метода верхней оценки для исследования процессов комбинированного выдавливания. Продемонстрирована возможность корректного использования кинематических модулей для анализа сложных схем процессов с несколькими зонами. Моделирование проведено как для расчетной схемы поперечно-прямого выдавливания заготовки с переменной высотой фланца (общий случай), так и для схемы для заготовки с фланцем постоянной высоты. Установлено, что разработанные криволинейные треугольные модули за счет снижения величины разрыва скоростей на их границах позволяют снизить верхнюю оценку нагрузок на инструмент по сравнению с вариантами моделей, которые ранее базировались на модулях прямоугольной формы. Использование разработанных криволинейных модулей лучше соответствует реальной кинематике течения металла и обеспечивает более точный расчет силового режима процессов комбинированного выдавливания. Расчеты показали, что уточненные значения приведенного давления для процессов поперечно-прямого выдавливания на 18...30% ниже, чем получаемые при использовании модулей с прямолинейными контурами. Также исследовано влияние на силовой режим процесса последовательного поперечно-прямого выдавливания основных технологических параметров. Установлено, что при увеличении относительной толщины дна детали с 0,2 до 0,8 для коэффициента трения  $\mu_s = 0,08$  давления снижаются до 20...30%, а для  $\mu_s = 0,2$  – до 40%, увеличение относительного радиуса полости от 1,2 до 2,5 приводит к увеличению силовых параметров на 33%, изменение относительной толщины стенки детали от 0,5 до 0,2 увеличивает приведенное давление на 19%.*

*Ключевые слова:* моделирование, поперечно-прямое выдавливание, энергетический метод верхней оценки, кинематический модуль, модульный подход, нагрузка на инструмент.

L.I. ALIIEVA

Donbass State Engineering Academy

ORCID: 0000-0002-5283-925X

V.M. LEVCHENKO

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine

ORCID: 0000-0002-2411-4198

D.O. KARTAMYSHEV

Donbass State Engineering Academy

ORCID: 0000-0003-3240-8919

Kh.V. MALII

Donbass State Engineering Academy

ORCID: 0000-0002-9046-4268

## DEVELOPING AND USING KINEMATIC MODULES FOR SIMULATION OF TRANSVERSE-FORWARD EXTRUSION PROCESSES

*The article presents the results of simulations the power mode of the process of transverse-forward solid blanks extrusion of hollow products with blind hole based on the power upper bound method. It is shown that using of combined processes for cold extrusion of such products makes it possible not only to reduce the number of necessary operations, but also to decrease load on the deforming tool. The specially developed curvilinear kinematical modules, applying of which makes it possible to increase the efficiency of using the upper bound method for the studying of combined extrusion processes, have been tested and described. The possibility of correct application of kinematical modules for analysis of complex schemes of processes with several zones has been demonstrated. The simulations were carried out both for the computational scheme of the transverse-forward extrusion of a workpiece with variable flange height (general case) and for the scheme for workpiece with flange of constant height. It has been found that the developed curvilinear triangular modules, due to the reduction of the speed increases at its boundaries, make it possible to reduce the upper estimation of the tool loads in comparison with simulation variants that were previously based on rectangular modules. The use of the developed curvilinear modules better corresponds to the real kinematics of the metal flow and*

provides more accurate calculation of the power mode of combined extrusion processes. Calculations have shown that the corrected values of the reduced pressure for the processes of transverse-forward extrusion are 18...30% lower than those obtained when using modules with rectilinear contours. The influences of the main technological parameters on the power mode of the process of sequential transverse-forward extrusion were also investigated. It was found that with increasing the relative thickness of the part bottom from 0.2 to 0.8 for the coefficient of friction  $\mu_s = 0.08$  the pressure decreases to 20...30%, and for  $\mu_s = 0.2$  – up to 40%, increasing the relative radius of the cavity from 1.2 to 2.5 leads to increasing power parameters by 33%, changing the relative wall thickness of the part from 0.5 to 0.2 increases the reduced pressure by 19%.

*Key words:* simulation, transverse-forward extrusion, power upper bound method, kinematical module, modular approach, tool load.

### Постановка проблеми

У номенклатурі штампованих заготовок значний обсяг займають порожнисті деталі з глухим отвором типу стаканів і гільз. Традиційним та поширеним способом виготовлення таких заготовок і деталей є поздовжнє (зворотнє і пряме) видавлювання. Характерні для процесів поздовжнього видавлювання обмеження пов'язані з граничними навантаженнями на інструмент, що змушують вводити декілька послідовних переходів з меншими ступенями деформації. Інші обмеження пов'язано з втратою стійкості інструменту, особливо пуансонів для зворотного видавлювання, що вимагає введення додаткових операцій калібрування заготовок перед видавлюванням.

Перспективними способами штампування порожнистих деталей можуть служити способи комбінованого видавлювання, які об'єднують традиційні схеми поздовжнього видавлювання з схемами поперечного (радіального і бокового) видавлювання. Процеси комбінованого видавлювання дозволяють значно зменшити енергосилові параметри деформування та час виготовлення, підвищити якість деталей і стійкість штампового інструменту. Таку технологію можна використовувати для виготовлення порожнистих виробів різної форми типу гільз, профільованих стаканів тощо.

Широке застосування комбінованого видавлювання, особливо при виробництві порожнистих деталей, обмежується недостатнім розвитком розрахункового апарату для проектування технологічних режимів деформування, а також недостатньою вивченістю напружено-деформованого стану (НДС) заготовок при деформуванні за новими способами послідовного комбінованого видавлювання.

Вирішення цих питань пов'язано з подальшим проведенням досліджень для створення рекомендацій та методик проектування процесів послідовного комбінованого радіально-прямого видавлювання. Використання енергетичного методу верхньої оцінки (балансу потужностей) для моделювання силового режиму вищезгаданих процесів видавлювання дозволяє створити кінематичні модулі, аналіз яких можна виконати окремо незалежно від суміжних модулів і жорстких зон, та дослідити їх можливості щодо більш точнішого відтворення реальної картини течії при видавлюванні за рахунок вибору полів швидкостей більш складних конфігурацій.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для технологій холодного деформування високі питомі та повні сили деформування є характерними обмеженнями, що знижують стабільність процесу і стійкість штампового інструменту [1-4]. В існуючих способах деформування, які усувають ці обмеження, зниження навантажень на інструмент відбувається за рахунок створення різноименної схеми напружено-деформованого стану [5, 6], роздачі [6-9], зменшення площі контакту інструменту із заготовкою [2, 10, 11], а також за допомогою додаткових комбінованих силових і кінематичних впливів на заготовку [8, 12-14].

Способи комбінованого видавлювання, у яких поєднуються схеми поперечного і поздовжнього (зворотного і прямого) видавлювання дозволяють отримати деталі найбільш складних форм лише за одну операцію [5, 8, 14-16]. Особливість способів послідовного комбінованого видавлювання полягає в тому, що напрямок течії металу в процесі деформації змінюється з радіального (течія з роздачею) на прямий (рис. 1). За результатами аналізу напружено-деформованого стану заготовок встановлено, що обмеженням для процесу є дія силових навантажень на інструмент [15].

За результатами експериментальних досліджень автори робіт [2, 4-7] стверджують, що в разі прямого видавлювання з роздачею, сила деформування в порівнянні з поздовжнім видавлюванням знижується на 16...40% (схема 1). Найбільшого зниження сил деформування за рахунок найбільшої міри свободи течії металу можна домогтися, якщо розворот течії матеріалу заготовки відбуватиметься відразу ж після виходу металу з об'єму заготовки одночасно з боку бічної поверхні нижньої ділянки заготовки та нижньої торцевої поверхні (схема 2), або з боку нижньої ділянки бічної поверхні. У процесі вільного (без матриці) видавлювання виготовляють глибокі порожнисті ємності, питоме зусилля при цьому процесі знижується в 1,5...1,8 рази [2, 17]. Вільна формозміна в розглянутих вище способах не дозволяє отримати необхідні форму і розміри деталей, саме тому для цих напівфабрикатів далі передбачають протягування на оправці або пряме видавлювання.

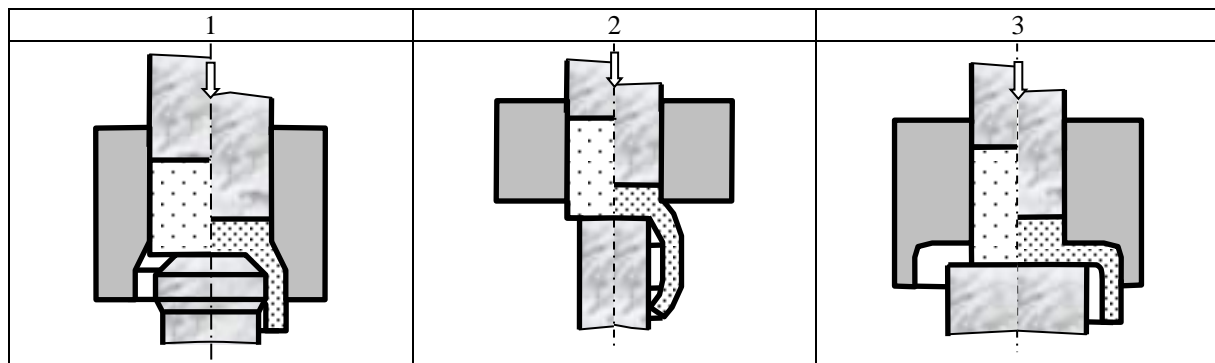


Рис. 1. Способи послідовного комбінованого радіально-прямого видавлювання

За рахунок напрямку течії металу в радіальну порожнину на початку процесу можливо збільшення зовнішнього діаметра стакану. Далі, в зоні розвороту течія матеріалу заготовки буде відбуватись в прямому (переважно) або зворотному напрямку. Подальший розвиток способів видавлювання з інтенсивною роздачею призвів до появи послідовного комбінованого радіально-прямого видавлювання. В цьому процесі розвинена радіальна течія матеріалу сприяє помітному збільшенню поперечних розмірів порожнистої деталі (рис. 1, схема 3) [8, 15, 16].

Найбільшого поширення в наш час з традиційних теоретичних методів для дослідження процесів об'ємного деформування набули аналітичний енергетичний метод балансу потужностей, метод верхньої оцінки (МВО), а також метод скінченних елементів. До головних переваг аналітичних методів теоретичного аналізу можна віднести можливість побудови розрахункових схем картин течії металу, що спостерігалися експериментально, і отримання результатів аналізу у вигляді інженерних розрахункових формул.

Модульний підхід, що застосовується та розвивається у ДДМА, може служити підвищенню оперативності енергетичного методу. У його основі лежить підбір та використання заздалегідь розроблених кінематично можливих полів швидкостей (КМПШ) у вигляді поодиноких областей [4] або кінематичних модулів [8, 14, 18 – 23], які призначені для більш чіткого опису різних переважаючих схем деформацій в пластичних зонах. Найчастіше у якості елементарних зон застосовують прямокутні або чотирикутні (ромбічні) і трикутні модулі. Їх використання не викликає проблем при отриманні рішення, а також їх вбудовування в конструкцію розривного поля швидкостей, але для полів з більш складною конфігурацією необхідно застосовувати модулі також складних форм, в тому числі і з криволінійними твірними. Тому створення нових кінематичних модулів, в тому числі з не лінійними геометричними характеристиками, перевірка можливостей щодо застосування їх у якості складових для моделей процесів комбінованого поперечно-прямого видавлювання та визначення меж параметрів, що забезпечують прийнятний рівень навантажень на інструмент цих процесів, є актуальною задачею.

#### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розширення можливостей енергетичного методу у напрямку теоретичного аналізу процесів комбінованого радіально-прямого видавлювання за рахунок створення універсальних кінематичних модулів та їх використання для побудови математичних моделей.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

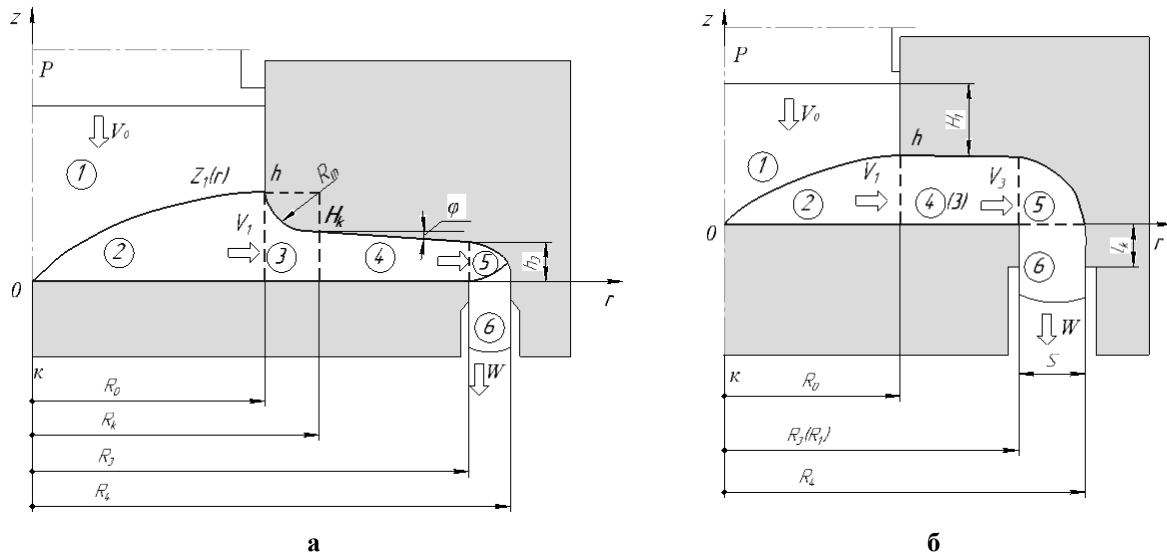
Узагальнені розрахункові схеми процесу послідовного радіально-прямого видавлювання з роздачею з формою кінематичних модулів в центральній області, наближених до експериментально спостережуваного поля деформацій (аналіз картини течії виконаний за установочними експериментами), наведено на рис. 2.

Розрахункова схема в загальному варіанті (див. рис. 2, а) включає центральний (осьовий) трикутний модуль 2 [21], перехідний модуль 3, модуль для фланцевої зони 4 і модуль розвороту течії металу 5 [23]. В другому варіанті розрахункової схеми процесу (див. рис. 2, б) з аналізу силового режиму виключено модуль 3, а модуль 4 має спрощений варіант за рахунок того, що порожнина для фланця для цього випадку постійної висоти  $h$ .

Загальний приведений тиск на активному рухомому контрпуансоні для процесу поперечно-прямого видавлювання розраховується за формулою:

$$\bar{p} = \bar{p}_1 + \bar{p}_3 + \bar{p}_4 + \bar{p}_5 + \Delta\bar{p}_3, \quad (1)$$

де  $\bar{p}_1$ ,  $\bar{p}_3$ ,  $\bar{p}_4$  і  $\bar{p}_5$  – приведені тиски, відповідно, в першій (зони 1, 2, модуль 2), другій (зона 3, модуль 3), третій (зона 4, модуль 4), четвертій (зони 5 і 6, модуль 5) областях деталі (див. рис. 2, а). Приведений тиск сил зрізу  $\Delta\bar{p}_3$  враховує додатковий зріз між модулями 2 і 3, 3 і 4, 4 і 5, який може виникнути при їх з'єднанні у єдиний процес послідовного видавлювання.



**Рис. 2. Розрахункові схеми з криволінійними модулями для процесу послідовного поперечно-прямого видавлювання порожнистих деталей: а) загальний випадок; б) спрощений випадок з фланцем заготовки постійної висоти**

Для схеми послідовного видавлювання з постійною висотою зони 4 і модулю 4 (див. рис. 2, б) приведений тиск включає тиски деформування в зоні 1 і 2, в четвертій зоні і в зоні розвороту з модулями 5 і 6:

$$\bar{p} = \bar{p}_1 + \bar{p}_4 + \bar{p}_5 \tag{2}$$

Приведений тиск сил зрізу  $\bar{\Delta p}_z$ , який призначений для врахування додаткового зрізу між модулями 2 і 4, 4 і 5 при їх зборці у єдину схему процесу, у даному випадку дорівнює нулю. Це пов'язано з тим, що при постійній висоті в зоні фланцю 4 компонента швидкості  $v_z$  відсутня, що веде до відсутності і додаткових змін у потужності сил зрізу на границях модулів, які об'єднуються в одну загальну схему процесу.

Таким чином, для послідовного поперечно-прямого видавлювання маємо розрахункову залежність (2), до якої необхідно додати ще складову, що враховує витрати сил на тертя у вихідній ділянці в зоні 6.

$$\Delta p_t = \frac{4 \cdot \mu_s \cdot \bar{l}_k}{\sqrt{3} \cdot R_4 - 1} \tag{3}$$

Аналіз отриманої залежності (2) з урахуванням (3) виконано з побудовою графіків, представлених на рис. 3 і 4, в яких в якості змінних використані такі відносні параметри процесу, як висота  $h$  ( $h_3$ ), радіус фланцевої зони  $R_3$  (радіус порожнини деталі) та відношення товщини стінки деталі до товщини її дна  $s/h$ . Вплив тертя, як відомо, однозначний, тому за коефіцієнт тертя прийнятий  $\mu_s = 0,08$ , що є характерним для процесів холодного видавлювання. Величина кута  $\phi$  дорівнює нулю ( $h = \text{const}$ ).

Якщо розглядати рівень впливу основних параметрів процесу на силовий режим процесу і значення приведенного тиску, то можна помітити, що найбільший вплив мають відносна товщина стінки порожнистої деталі  $s/h$  (рис. 3) і відносна висота фланцевої порожнини або, що те ж саме, товщина дна деталі  $\bar{h}$  (рис. 4). За впливом радіус порожнини деталі  $R_3$  знаходиться на третьому місці. У загальному процесі при малих значеннях  $h$  вплив  $\bar{R}_3$  цілком відчутний – зі зростанням  $\bar{R}_3$  тиск  $\bar{p}$  зростає неухильно (див. рис. 3).

Зі зменшенням  $\bar{h}$  тиск  $\bar{p}$  зростає, та особливо при  $\bar{h}$  менше 0,4. Це характерно для всіх значень відповідних параметрів  $\bar{R}_3$  та  $\mu$ . Наприклад, при  $\bar{R}_3 = 2,0$  та  $\bar{h} = 0,8$   $\bar{p} = 4,0$ , зі зменшенням  $\bar{h}$  до 0,2 тиск  $\bar{p}$  збільшується до 5,5, тобто на 37% (рис. 5). При цьому зміна  $s/h$  в меншу сторону від оптимуму викликає невелике збільшення приведенного тиску  $\bar{p}$  (рис. 6).

При постійному значенні  $\bar{R}_3$  і зміні інших параметрів процесу спостерігається деяке оптимальне з точки зору мінімуму тиску значення відносної висоти  $\bar{h}$ , яке приходиться на  $\bar{h} = 0,7$  (рис. 7).

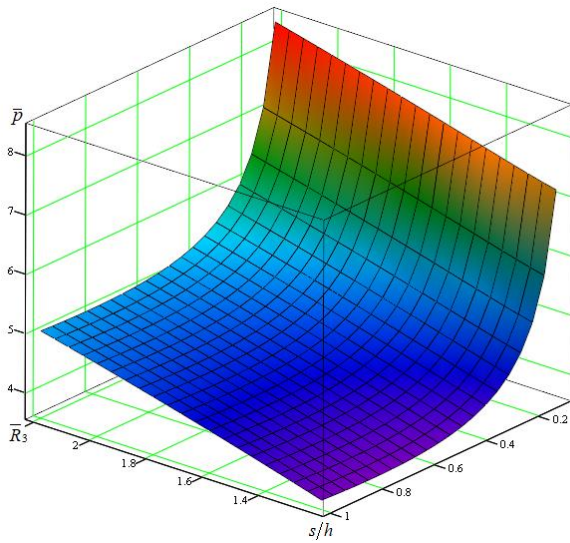


Рис. 3. Залежність приведенного тиску послідовного видавлювання від товщини стінки  $s/h$  і радіусу фланця  $\bar{R}_3$  при  $\mu_s = 0,08$ ;  $\bar{h} = 0,3$

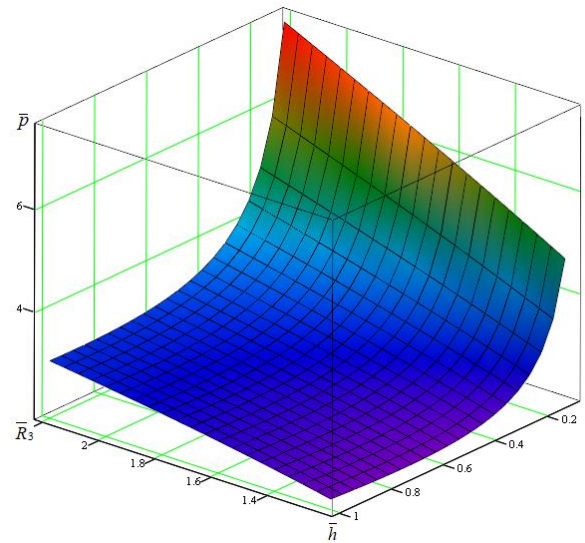


Рис. 4. Залежність тиску комбінованого видавлювання від товщини  $\bar{h}$  і радіусу фланця  $\bar{R}_3$  при  $\mu_s = 0,08$ ;  $s/h = 0,7$

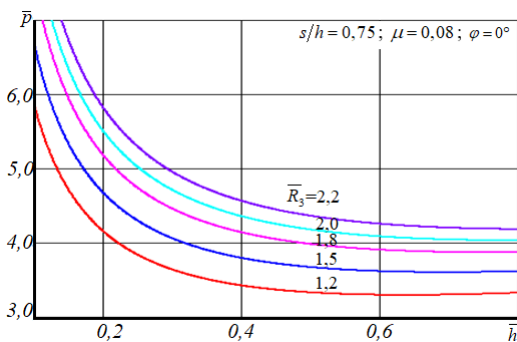


Рис. 5. Залежність тиску послідовного комбінованого видавлювання від відносної висоти  $\bar{h}$  і радіусу порожнини  $\bar{R}_3$

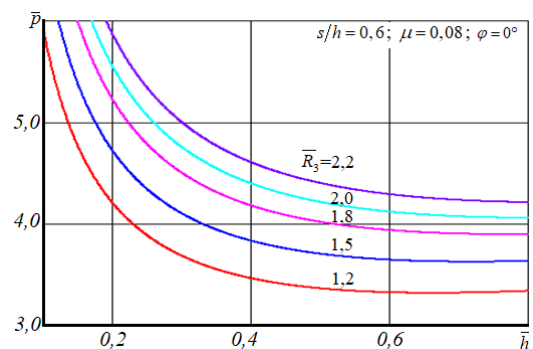


Рис. 6. Залежність тиску послідовного комбінованого видавлювання від відносної висоти  $\bar{h}$  і радіусу порожнини  $\bar{R}_3$  при  $s/h = 0,6$

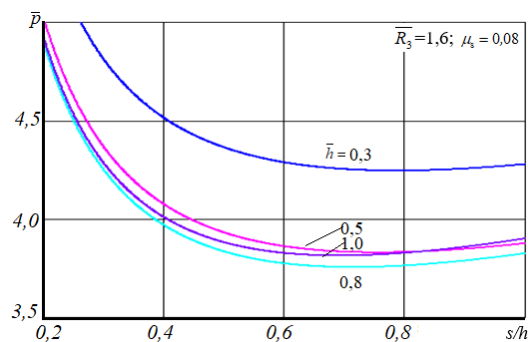


Рис. 7. Залежність тиску послідовного комбінованого видавлювання від відносної товщини стінки  $s/h$  і висоти  $\bar{h}$  при радіусі порожнини  $\bar{R}_3 = 1,6$

В цілому значення приведенного тиску деформування  $\bar{p}$  у порівнянні із розрахунками методом верхньої оцінки, знаходиться в допустимих межах навантаження для інструментів холодного деформування.

Для схеми послідовного видавлювання з переміною висотою фланцевої зони (модуля) 4 (див. рис. 2, б) приведений тиск включає тиски деформування в зоні 1 і 2  $\bar{p}_1$ , в четвертій зоні –  $\bar{p}_4$  і в зоні розвороту з модулями 5 і 6 –  $\bar{p}_5$ :

$$\bar{p} = \bar{p}_1 + \bar{p}_4 + \bar{p}_5 + \Delta\bar{p}_3 \tag{4}$$

Додаткова складова приведенного тиску сил зрізу  $\Delta\bar{p}_3$ , яка призначена для врахування додаткового зрізу між модулями 2 і 4, 4 і 5 при їх зборці у єдину схему процесу, у даному випадку встановлюється таким чином. Доля приведенного тиску, яка враховує витрати на зріз на двох границях модулю 4, визначених радіусами  $R_k$  і  $R_3$ , встановлена за виразом:

$$\Delta p_{34} = \frac{tg\varphi}{2 \cdot \sqrt{3}} \tag{5}$$

Подібна доля приведенного тиску, яка враховує витрати на зріз на границі модулю 2, визначеної радіусом  $R_0$  ( $R_k$ ), встановлена за виразом:

$$\Delta p_{32-3} = \frac{\alpha \cdot h}{\sqrt{3}} \tag{6}$$

Приєднання модулів 2 і 4 один до одного в одній схемі викликає зміну тиску зрізу на границі між ними:

$$|\Delta\bar{p}_{32-3} - \Delta\bar{p}_{34}| = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} (\alpha \cdot \bar{h} - tg\varphi) \tag{7}$$

Для кутового криволінійного модулю 5 тиск зрізу на границі з модулем 4 отримано за виразом:

$$\Delta\bar{p}_{34-5} = \frac{2 \cdot \bar{h}_3 \cdot \alpha}{\sqrt{3}(\bar{R}_4^2 - 1)} \tag{8}$$

Приєднання модуля 5 до процесу викликає зміну тиску зрізу:

$$|\Delta\bar{p}_{34-5} - \Delta\bar{p}_{34}| = \left| \frac{2 \cdot \bar{h}_3 \cdot \alpha}{\sqrt{3} \cdot (\bar{R}_4^2 - 1)} - \frac{tg\varphi}{2 \cdot \sqrt{3}} \right| \tag{9}$$

Таким чином, для послідовного поперечно-прямого видавлювання маємо додати ще складові, що враховують зміни в приведених тисках зрізу (6) і (8), а також витрати сил на тертя у вихідній ділянці в зоні 6 за формулою (3). Аналіз отриманої залежності (4) з урахуванням вказаних додатків виконано з побудовою графіків (рис. 8 – рис. 15), в яких є змінні: висота  $h_3$  і радіус фланцевої зони  $R_3$ , зовнішній радіус виробу  $R_4$ , відношення товщини стінки деталі до товщини її дна  $s/h_3$ . Коефіцієнт тертя прийнятий  $\mu_s = 0,08$ , що є типовим для процесів холодного видавлювання. Величина кута нахилу фланця  $\varphi$  змінюється в межах від 5 до 12°.

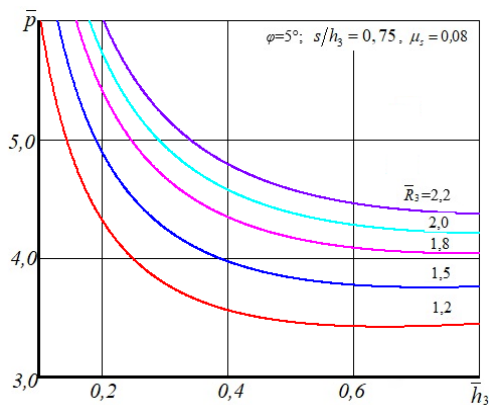


Рис. 8. Залежність тиску послідовного комбінованого видавлювання від параметру  $\bar{h}_3$  для різних відносних радіусів порожнини  $\bar{R}_3$  при  $s/h_3 = 0,75$

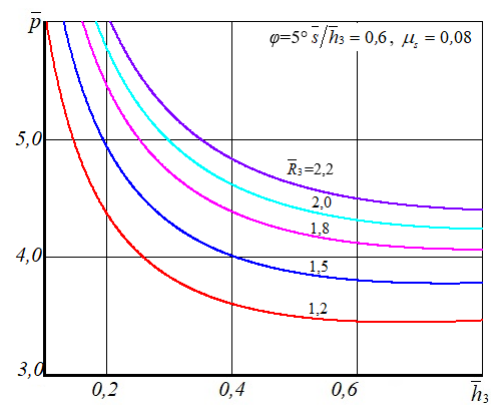


Рис. 9. Залежність тиску послідовного комбінованого видавлювання від параметру  $\bar{h}_3$  для різних відносних радіусів порожнини  $\bar{R}_3$  при  $s/h_3 = 0,6$

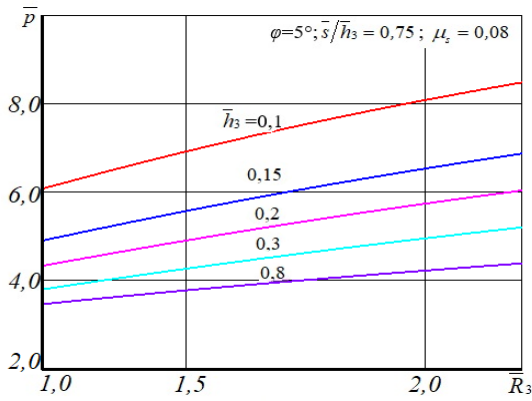


Рис. 10. Залежність тиску послідовного комбінованого видавлювання від відносного радіусу порожнини  $\bar{R}_3$  для різних значень параметру  $\bar{h}_3$  при  $s/h_3 = 0,75$

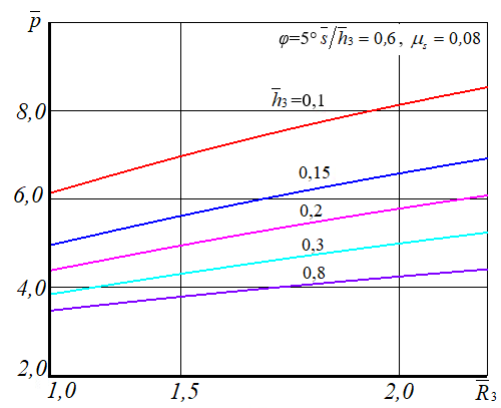


Рис. 11. Залежність тиску послідовного комбінованого видавлювання від відносного радіусу порожнини  $\bar{R}_3$  для різних значень параметру  $\bar{h}_3$  при  $s/h_3 = 0,6$

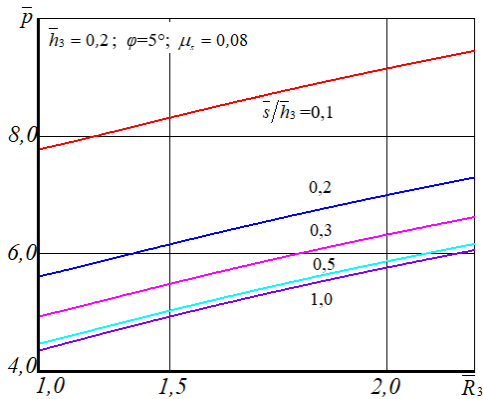


Рис. 12. Залежність тиску послідовного комбінованого видавлювання від відносного радіусу порожнини  $\bar{R}_3$  для різних значень відносної товщини стінки  $s/h_3$

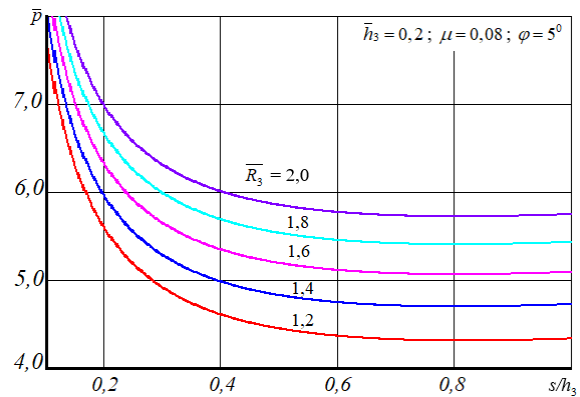


Рис. 13. Залежність тиску послідовного комбінованого видавлювання від відносної товщини стінки  $s/h_3$  для різних значень відносного радіусу порожнини  $\bar{R}_3$

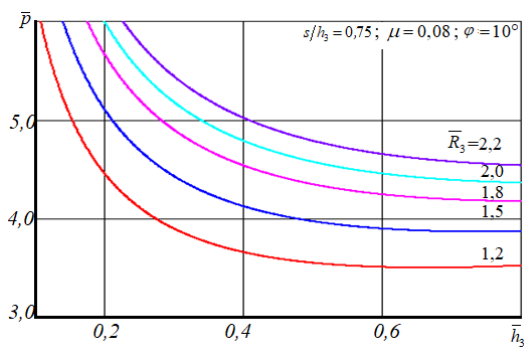


Рис. 14. Залежність тиску послідовного комбінованого видавлювання від параметру  $\bar{h}_3$  для різних значень відносного радіусу порожнини  $\bar{R}_3$  при відносній товщині  $s/h_3 = 0,75$

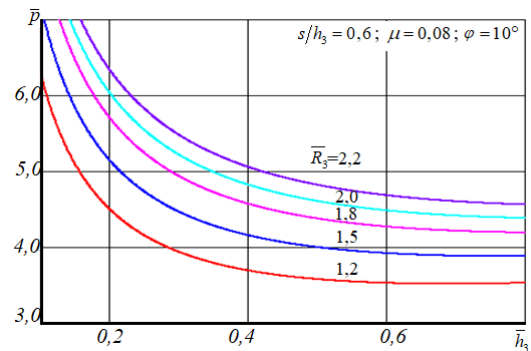


Рис. 15. Залежність тиску послідовного комбінованого видавлювання від параметру  $\bar{h}_3$  для різних значень відносного радіусу порожнини  $\bar{R}_3$  при відносній товщині  $s/h_3 = 0,6$



При змінній висоті фланцевої зони і висоті  $\bar{h}_3$ , тобто при кінчному дні стакана, результати впливу параметрів процесу на тиск деформування є подібними розглянутим вище. Але наявність нахилу під кутом  $\varphi$  ускладнює течію металу і тиск стає вищим (див. рис. 14, 15).

При значеннях товщини стінки  $s/h_3$ , близьких до оптимальних, при кути  $\varphi = 5^\circ$  з ростом радіуса  $\bar{R}_3$  тиск деформування зростає прямо пропорційно (див. рис. 10). Але при мінімальних величинах висоти  $\bar{h}_3 = 0,3$  і менше, тиск  $\bar{p}$  досягає до 5,0, а при  $\bar{h}_3 = 0,1$  і  $\bar{R}_3 = 2,2$  стає рівним 8,3. Це є значним навантаженням для інструменту холодного видавлювання і вимагає врахування при прагненні отримати за один перехід тонкостінних деталей з матеріалів, що важко деформуються, (сталей і латуней). Зі зменшенням  $s/h_3$  до 0,6 тиск зростає незначно (див. рис. 11). Розглянуто вплив параметра  $s/h_3$  на силовий режим при незмінній величині параметра  $\bar{h}_3 = 0,2$  і змінному значенні  $\bar{R}_3$  (див. рис. 12). Якщо зменшення  $s/h_3$  з 1,0 до 0,5 відбивається на величину приведенного тиску  $\bar{p}$  малопомітно, то подальше зниження товщини  $s/h_3$  до 0,2 і особливо до 0,1 викликає різке збільшення тиску  $\bar{p}$ . При зменшенні відносної товщини стінки  $s/h_3$  з 0,5 до 0,2 (при  $\bar{R}_3 = 2,0$ ) тиск  $\bar{p}$  зростає з 5,9 до 7,0, тобто на 18,6%. Зі зміною  $\bar{R}_3$  характер впливу  $s/h_3$  зберігається (див. рис. 13). Вплив товщини дна  $\bar{h}_3$  такий же, як і при поперечному видавлюванні, зі зменшенням  $\bar{h}_3$  тиск  $\bar{p}$  зростає і особливо інтенсивно при  $\bar{h}_3 = 0,4$  і менше. Деяке зростання тиску при великих величинах  $\bar{h}_3$  (більших 0,8) непомітно на графіках для видавлювання деталей з кінчним дном (з  $\varphi \neq 0^\circ$ ) (див. рис. 14 і 15). А при розширенні діапазону товщини деталі (при  $\varphi = 0^\circ$  і постійній висоті  $\bar{h}$ ) графік залежності приведених тисків  $\bar{p}$  показує наявність оптимальних значень  $\bar{h} = 0,65 \dots 0,75$ , яким властивий мінімум  $\bar{p}$  (рис. 16).

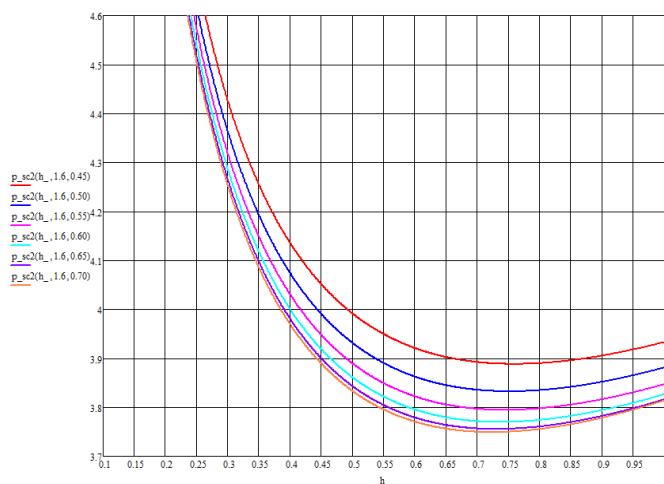


Рис. 16. Залежність тиску послідовного комбінованого видавлювання від відносної висоти  $\bar{h}_3$  при змінних  $s/h_3 = 0,45 \dots 0,7$ ;  $\mu_s = 0,08$ ;  $\bar{R}_3 = 1,6$ ;  $\varphi = 0^\circ$

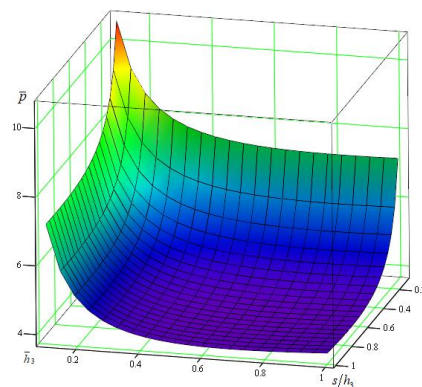


Рис. 17 Залежність тиску послідовного комбінованого видавлювання від відносної товщини стінки  $s/h_3$  і параметру  $\bar{h}_3$ ;  $\mu_s = 0,08$ ;  $\bar{R}_3 = 1,6$ ;  $\varphi = 5^\circ$

Із графіків залежності тисків деформування з урахуванням  $s/h$  в блоці прямого видавлювання (рис. 17) видно, що отримання деталей типу гільз з відносно тонкими стінками вимагає значних енергетичних витрат – до  $6 \cdot \sigma_s$  і вище. Тиск деформування при комбінованому видавлюванні вище тисків радіального (відцентрового) видавлювання в 1,5...2,1 рази залежно від величини зазору для прямої течії металу. Але при  $s/h = 0,5$  і більше навантаження є цілком прийнятними. Разом з тим, використання оптимальних значень спеціально введеного параметра  $\alpha$ , що характеризує геометрію трикутного модуля, дає можливість підготувати раціональну форму матриці і замість витрат на зрізи отримати значно менші витрати сил на контактне тертя.

Таким чином, розроблені модулі надають можливості моделювання широкого кола процесів із радіальною складовою течії металу.

#### Висновки

Енергетичним методом верхньої оцінки з використанням кінематичних модулів для зон в осередку деформації розроблені моделі процесу комбінованого поперечно-прямого видавлювання

порожнистих виробів з глухим отвором із суцільних заготовок. Встановлено, що поле швидкостей, що містить криволінійні трикутні кінематичні елементи краще відповідає експериментально встановленій картині деформацій поперечного видавлювання і кінематики течії металу і забезпечує найменші верхні оцінки тисків видавлювання. При цьому уточнення верхніх оцінок тисків осесиметричного деформування за рахунок їх зниження становить 18...30% в порівнянні з відомими рішеннями, заснованими на осесиметричних модулях з прямолінійними контурами.

Встановлено характер впливу на силовий режим процесу послідовного поперечно-прямого видавлювання порожнистих деталей основних технологічних параметрів: змінної і постійної величини товщини дна, радіуса порожнини і товщини стінки деталі. При збільшенні товщини дна деталі тиски деформування зменшуються, а зростання радіуса порожнини приводить до збільшення силових параметрів. Збільшення відносного (до радіуса заготовки) радіуса порожнини з 1,2 до 2,5 веде до зростання приведенного тиску до 33%, а при зміні відносної товщини стінки стакану  $s/h$  від 0,5 до 0,2 відбувається збільшення величини приведенного тиску на 19% через підвищення ступеня деформації обтіснення в зоні розвороту течії металу з поперечного напрямку на прямий. Зміна відносної висоти порожнини під фланцевою зоною (товщина дна) від 0,2 до 0,8 при інших рівних параметрах деталі призводить до зменшення приведенного тиску на 22...30%, при  $\mu_s = 0,08$  і до 40% при  $\mu_s = 0,2$ . Встановлено, що контактне тертя значно впливає на силовий режим процесу, особливо при кутах нахилу поверхні фланцевої зони (дна стакану) вище  $5^\circ$ .

#### Список використаної літератури

1. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те. 1987. 144 с.
2. Алиева Л.И., Чучин О.В., Гнездилов П.В. Способы снижения сил деформирования при выдавливании. Вісник ХНТУ. Херсон, 2016. № 1 (56). С. 18-25.
3. Tae-Wan Ku. A Combined cold extrusion for a drive shaft: a parametric study on tool geometry. Materials. 2020. 13. P. 2244. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13102244>.
4. Унксов Е.П., Джонсон У., Колмогоров В.Л., Огородников В.А. и др. Теорияковки и штамповки. Под ред. Унксова Е.П., Овчинникова А.Г. Москва: Машиностроение. 1999. 598 с.
5. Алиев И.С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания. Кузнечно-штамповочное производство. 1990. 2. С. 7–10.
6. Kalyuzhnyi V.L., Aliieva L.I., Kartamyshev D.A., Savchinskii I. G. Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts. Metallurgist. 2017. 61. 5-6. P. 359–365. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>
7. Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Технологияковки и объемной штамповки. Часть 1. Объемная штамповка выдавливанием: учебник для вузов. Москва : Машиностроение–1. 2005. 500 с.
8. Алиева Л. И. Совершенствование процессов комбинированного выдавливания : монография. Краматорск: ООО «Тираж–51». 2018. 352 с. ISBN 978-966-379-846-2.
9. Алієв І.С. Методи пошуку нових технологічних способів видавлювання. Теорія та практика обробки матеріалів тиском. Колективна монографія. Запоріжжя: Мотор-Січ. 2016. С. 364–485. ISBN 978-966-2906-60-8.
10. Алиева Л.И. Технологические возможности процессов комбинированного радиально-продольного выдавливания. Технологические системы. 2017. 1 (78). С. 31–40. URL: [http://technological-systems.com/images/journal/2017/files/ts78\\_4.pdf](http://technological-systems.com/images/journal/2017/files/ts78_4.pdf).
11. Balendra R., Qin Y., Mater J. Research dedicated to the development of advanced metal-forming technologies. Process. Technol. 2004. 2, pp. 144-152.
12. Розов Ю. Г. Технологии изготовления прецизионных трубчатых изделий холодным пластическим деформированием : монография. Херсон: Изд-во ХНТУ, 2013. 336 с.
13. Mletzko Ch., Liewald M., Felde A., Schiemann T. Napf-Fließpressen mit mehreren bewegten Werkzeugelementen zur Reduzierung der Stempelkraft. Schmiede JOURNAL. 2012. September S. 30–33.
14. Алиева Л.И. Деформирование заготовок способом радиального выдавливания с противодействием. Вісник ХНТУ. Херсон, 2016. № 2 (57). С. 29–36.
15. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Sobbouhi E. Abdi. Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. Materials and Manufacturing Processes. 2010. 25, pp. 857–863.
16. Chang Y.S., Hwang B.B. A study on the forming characteristics of radial extrusions combined with forward extrusion. Transactions of materials processing. 2000. 9. 3. P. 242–248.
17. Ренне И.П., Сумарокова А.И. Технологические возможности процесса свободного выдавливания (без матрицы) полых деталей. Кузнечно-штамповочное производство. 1987. №6. С. 25–26.
18. Алиев И.С., Носаков А.А., Махмудов К.Д. Метод кинематических модулей для анализа процессов точной объемной штамповки. Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА. 2001. С. 142–146.

19. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Kartamyshev D., Shevtsov S., Kuznetsov M. Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 105. No. 3/1. P. 17–22, 2020. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203989>
20. Aliieva L., Hrudkina N., Aliiev I., Zhbakov 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. 2 1 (104). P. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433>.
21. Hrudkina Natalia S., Aliieva Leila I. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. FME Transactions. 2020. Vol. 48. No. 2. P. 357–363. doi:10.5937/fme2002357H.
22. Грудкина Н.С., Алиева Л.И., Малий К.В. Проектирование процессов холодного выдавливания на основе энергетических расчетных модулей. Обработка материалов давлением. Краматорск: ДГМА. 2020. 1 (50). С. 67–76.
23. Алієва Л.І., Левченко В.М., Картамішев Д.О., Таган Л.В. Аналіз процесів поперечно-поздовжнього видавлювання методом кінематичних модулів. Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції "Сучасні технології промислового комплексу – 2021", випуск 7. Херсон: ХНТУ. 2021. С. 37–39.

### References

1. Evstratov V.A. Osnovy tehnologii vyidavlivaniya i konstruirovaniya shtampov. Kharkov: Vyscha shkola. Izd-vo pri Khark. un-te. 1987. 144 p.
2. Aliieva L.I., Chuchin O.V., Gnezdilov P.V. Sposoby snizheniya sil deformirovaniya pri vydavlivanii. Visnik KHNTU. Kherson, 2016. № 1 (56). pp. 18–25.
3. Tae-Wan Ku. A Combined cold extrusion for a drive shaft: a parametric study on tool geometry. Materials. 2020. 13. P. 2244. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13102244>.
4. Unksov E.P., Dzhonson U., Kolmogorov V.L., Ogorodnikov V.A. i dr. Teoriya kovki i shtampovki. Pod red. Unksova E.P., Ovchinnikova A.G. Moskva: Mashinostroenie. 1999. 598 p.
5. Aliiev I.S. Tehnologicheskie vozmozhnosti novyih sposobov kombinirovannogo vyidavlivaniya. Kuznechno-shtampovnoe proizvodstvo. 1990. 2. p. 7–10.
6. Kalyuzhnyi V.L., Aliieva L.I., Kartamyshev D.A., Savchinskii I. G. Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts. Metallurgist. 2017. 61. 5-6. P. 359–365. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>
7. Dmitriev A. M., Vorontsov A. L. Tehnologiya kovki i ob'emnoy shtampovki. Chast 1. Ob'emnaya shtampovka vyidavlivaniem: uchebnik dlya vuzov. Moskva : Mashinostroenie–1. 2005. 500 p.
8. Aliieva L. I. Sovershenstvovanie protsessov kombinirovannogo vyidavlivaniya : monografiya. Kramatorsk: OOO «Tirazh–51». 2018. 352 s. ISBN 978-966-379-846-2.
9. Aliiev I.S. Metodi poshuku novih tehnologichnih sposobiv vidavlyuvannya. Teoriya ta praktika obrobki materialiv tiskom. Kolektivna monografiya. Zaporizhzhya: Motor-Sich. 2016. S. 364–485. ISBN 978-966-2906-60-8.
10. Aliieva L.I. Tehnologicheskie vozmozhnosti protsessov kombinirovannogo radialno-prodolnogo vyidavlivaniya. Tehnologicheskie sistemyi. 2017. 1 (78). p. 31–40. URL: [http://technological-systems.com/images/journal/2017/files/ts78\\_4.pdf](http://technological-systems.com/images/journal/2017/files/ts78_4.pdf).
11. Balendra R., Qin Y., Mater J. Research dedicated to the development of advanced metal-forming technologies. Process. Technol. 2004. 2, pp. 144–152.
12. Rozov YU. G. Tekhnologii izgotovleniya precizionnyh trubchatykh izdelij holodnym plasticheskim deformirovaniem : monografiya. Herson: Izd-vo HNTU, 2013. 336 p.
13. Mletzko Ch., Liewald M., Felde A., Schiemann T. Napf-Fließpressen mit mehreren bewegten Werkzeugelementen zur Reduzierung der Stempelkraft. Schmiede JOURNAL. 2012. September pp. 30–33.
14. Aliieva L.I. Deformirovanie zagotovok sposobom radial'nogo vydavlivaniya s protivodavleniem. Visnik KHNTU. KHerson, 2016. № 2 (57). p. 29–36.
15. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Sobbouhi E. Abdi. Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. Materials and Manufacturing Processes. 2010. 25, pp. 857–863.
16. Chang Y.S., Hwang B.B. A study on the forming characteristics of radial extrusions combined with forward extrusion. Transactions of materials processing. 2000. 9. 3. P. 242–248.
17. Renne I.P., Sumarokova A.I. Tekhnologicheskie vozmozhnosti processa svobodnogo vydavlivaniya (bez matricy) polyh detalej. Kuznechno-shtampovnoe proizvodstvo. 1987. №6. pp. 25–26.
18. Aliiev I.S., Nosakov A.A., Mahmudov K.D. Metod kinematicheskikh moduley dlya analiza protsessov tochnoy ob'emnoy shtampovki. Udoskonalennyya protsesiv I obladnannya obrobki tiskom v metalurgiyi I mashinobuduvannI. Zb. nauk. pr. Kramatorsk: DDMA. 2001. pp. 142–146.
19. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Kartamyshev D., Shevtsov S., Kuznetsov M. Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 105. No. 3/1. P. 17–22, 2020. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203989>

20. Aliieva L., Hrudkina N., Aliiev I., Zhbakov 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. 2 1 (104). P. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433>

21. Hrudkina Natalia S., Aliieva Leila I. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. FME Transactions. 2020. Vol. 48. No. 2. P. 357–363. doi:10.5937/fme2002357H.

22. Grudkina N.S., Alieva L.I., Maliy K.V. Proektirovanie protsessov holodnogo vyidavlivaniya na osnove energeticheskikh raschetnykh moduley. Obrabotka materialov davleniem. Kramatorsk: DGMA. 2020. 1 (50). pp. 67–76.

23. Alieva L.I., Levchenko V.M., Kartamishev D.O., Tagan L.V. Analiz procesiv poperechno-pozdovzhn'ogo vidavlyuvannya metodom kinematichnih moduliv. Materiali VII mizhnarodnoï naukovo-praktichnoï konferencii "Suchasni tekhnologiiï promislivogo kompleksu – 2021", vipusk 7. Herson: HNTU. 2021.pp. 37–39.