

Левченко В. М.  
Алієва Л. І.  
Абхарі П. Б.  
Сивак Р. І.

## РАДІАЛЬНО-ПОЗДОВЖНЕ ВИДАВЛЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З ФЛАНЦЕМ І ВІДРОСТКОМ

*Розглянуто способи виготовлення порожнистих та стрижневих осесиметричних деталей з фланцем та осьовим відростком видавлюванням. Залежно від конструкції та параметрів деталі виділено дві групи переважно прийнятних способів комбінованого видавлювання: радіально-зворотного та радіально-прямого видавлювання. Наведено результати моделювання процесу комбінованого радіально-прямого видавлювання стрижневої деталі з фланцем методом скінчених елементів з використанням програмного комплексу QForm. Підтверджено, що при комбінованому видавлюванні деталі з фланцем і відростком з течією металу в радіальному і прямому напрямках в нерухомій матриці осередок пластичної деформації об'єднаний. При цьому фланець, сформований радіальним видавлюванням, може стати застійною зоною, уздовж якої метал буде переміщатися в прямому напрямку. Це викликає небезпеку руйнування деталі та відділення фланця. Новий спосіб комбінованого видавлювання в рухомій матриці передбачає роз'єднання осередків видавлювання металу в радіальному та прямому напрямках з початку процесу. Дана оцінка закономірностей формозміни та розвитку деформованого стану заготовки в процесі комбінованого видавлювання в рухомій матриці. Встановлено, що рухливість матриці запобігає небезпеці відділення фланця. При цьому зберігається зосередження зон з найбільш інтенсивною деформацією у вихідних отворів на перехідних кромках формоутворюючого інструменту. Зіставлення деформованого стану заготовки, отриманого методом скінчених елементів з експериментальними даними, отриманими методом діляльних сіток, показало близький характер полів деформацій у пластичній зоні.*

**Ключові слова:** деталі з фланцем та відростком, комбіноване радіально-поздовжнє видавлювання, рухлива матриця, напружено-деформований стан, метод скінчених елементів, формозміна заготовки.

Розробка та освоєння нових наукомістких технологічних процесів – один із найважливіших напрямів інтенсифікації заготівельного виробництва машинобудування. Серед перспективних процесів виробництва чільне місце займає технологія точного об'ємного штампування (ТОШ). При цьому ефективним методом виготовлення точних заготовок і деталей є холодне видавлювання [1, 2]. Технології точного об'ємного штампування видавлюванням демонструють стійку тенденцію до збільшення обсягів виробництва, створення нових способів формоутворення та розширення на цей основи номенклатури деталей, що штампуються [2–6].

Стрижневі і порожнисті деталі з фланцем і осьовим відростком є досить поширеними в приладо- та машинобудуванні. Типові представники деталей з фланцем (рис. 1) містять три основні частини: корпус деталі з середнім діаметром  $D_0(2R_0)$  та висотою  $H(H_0+H_1)$  фланець з найбільшим діаметром  $D_1$  та товщиною  $h$  та осьовий відросток з діаметром  $d(2R)$  та довжиною  $l$ . Корпус може бути розділеним фланцем на дві частини с довжиною  $H_0$  і  $H_1$  (варіанти *a*, *в*), або бути тільки з верхньою частиною з довжиною  $H_0$  (варіант *б*), або тільки з нижньою частиною з довжиною  $H_1$  (варіант *г*). У найбільш простому випадку виродження корпусу і його злиття з фланцем ми отримаємо деталь типу клапана або гвинта. Іноді деталі мають велими довгу частину с  $H_1$  та довжина стержня незначна, наприклад, не перевищує  $d$  (варіант *г*).

На рис.2 наведена класифікація способів штампування деталей з фланцем і відростком, яка розроблена в ході досліджень з урахуванням попередніх розробок та літературних джерел [3, 6, 7]. Поширеною і освоєною технологією отримання деталей такого типу є багатоперехідна холодна висадка, а також радіальне або пряме видавлювання, доповнене, як правило, операцією висадки (осадки) фланця (схема *A1*) [4, 6]. Спосіб штампування з висадкою з одного кінця заготовки і з прямим видавлюванням (або редукування) з другого кінця (*A2*) застосовують для деталей з частиною корпусу з довгим розміром  $H_1$ . При цьому обмежені довжина відростку  $l$  при прямому видавлюванні і ступень обтиснення при редукуванні (див. рис. 1, *в* і *г*).

Взагалі, головне обмеження для процесів холодного деформування металевих виробів пов'язане з високими питомими і повними зусиллями на інструмент, що знижують його стій-

кість і стабільність процесу [2, 6]. Крім того, недостатня пластичність більшості сучасних матеріалів змушує знижувати ступінь формоутворення і збільшити кількість операцій штампування для забезпечення потрібної якості виробів. Для операції висадки обмеження і в тому, що стійкість частині заготовки, що висаджується, може бути недостатньою.

Способи деформування, що спрямовані для зниження цих обмежень, передбачають створення більш сприятливої для силового режиму різнойменній схеми напружено-деформованого стану (НДС), зменшення площі контакту активного деформуючого інструменту із заготовкою, зниження навантажень на інструмент за рахунок комбінування схем течії і забезпечення більшого ступеня свободи витікання металу [4–10].

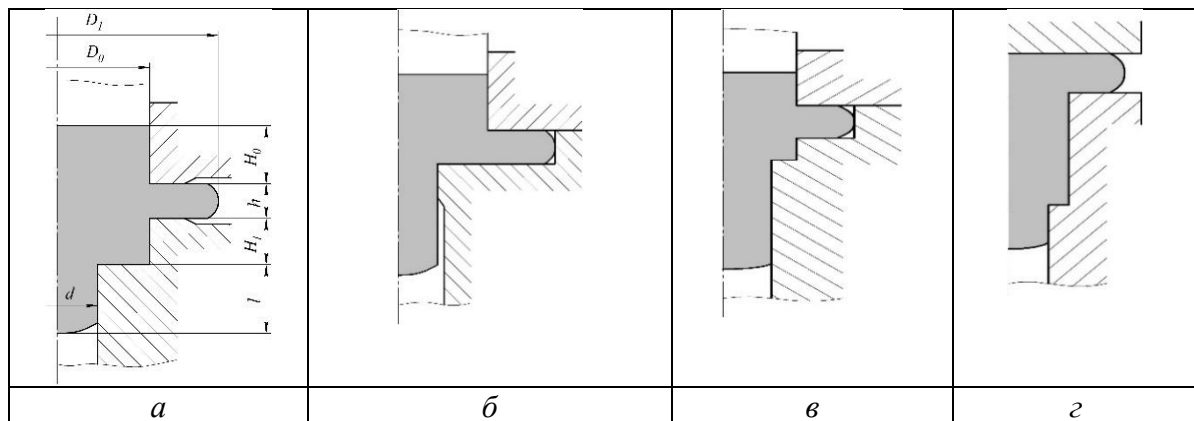


Рис. 1. Деталі типу «Стрижень з фланцем и відростком»

Способи комбінованого деформування, засновані на поєднанні поздовжнього та поперечного (бічного або радіального) видавлювання відрізняються багатоваріантністю виконання. Схеми групи А об'єднує способи з переважно радіально-зворотним видавлюванням, а схеми і деталі групи Б об'єднують способи деформування з переважним прямим видавлюванням осевого відростка. Ці нові способи деформування з комбінованою течією привертають дедалі більше увагу дослідників.

Досить добре вивчено способи радіально-зворотного видавлювання деталей із фланцем. Попередні експериментальні та теоретичні дослідження даного способу показують перспективні можливості процесу для отримання якісних деталей з легко деформуючих матеріалів [8, 9]. Обмеження може бути пов'язане з необхідністю використання порожнистого пуансону, який повинен бути досить міцним при обробці металу в холодному стані [6].

В роботах [2, 6, 7, 8], присвячених теоретичному аналізу силового режиму радіально-поздовжнього видавлювання, обраний енергетичний метод верхньої оцінки, заснований на балансу потужностей на кінематично можливих швидкостях переміщень. Кінематичне можливі поля швидкостей (КМПШ) задаються на підставі попередньо проведених експериментальних досліджень і аналізу особливостей течії металу. Особливістю схеми радіально-зворотного видавлювання, є то, що коли відросток і фланець розташовані по різні сторони відносно корпусу деталі, осередок інтенсивного деформування є роз'єднаний, сформований з двох автономних осередків зворотного та радіального видавлювання металу (рис. 2, б) [6, 9]. Силові характеристики процесу комбінованого видавлювання в залежності от таких параметрів, як розміри формообразуючих інструментів и коефіцієнт трення, представлені в роботі [10].

Аналізу напружено-деформованого стану (НДС), дефектоутворенню та тепловиділенню у процесах видавлювання присвячено роботи, виконані із залученням методів верхньої оцінки та скінчених елементів [6–11]. У роботі [8] розглянуто можливості прогнозування енергетичним методом верхньої оцінки виникнення дефектів у вигляді утяжки у процесі радіально-зворотного видавлювання деталей із фланцем.

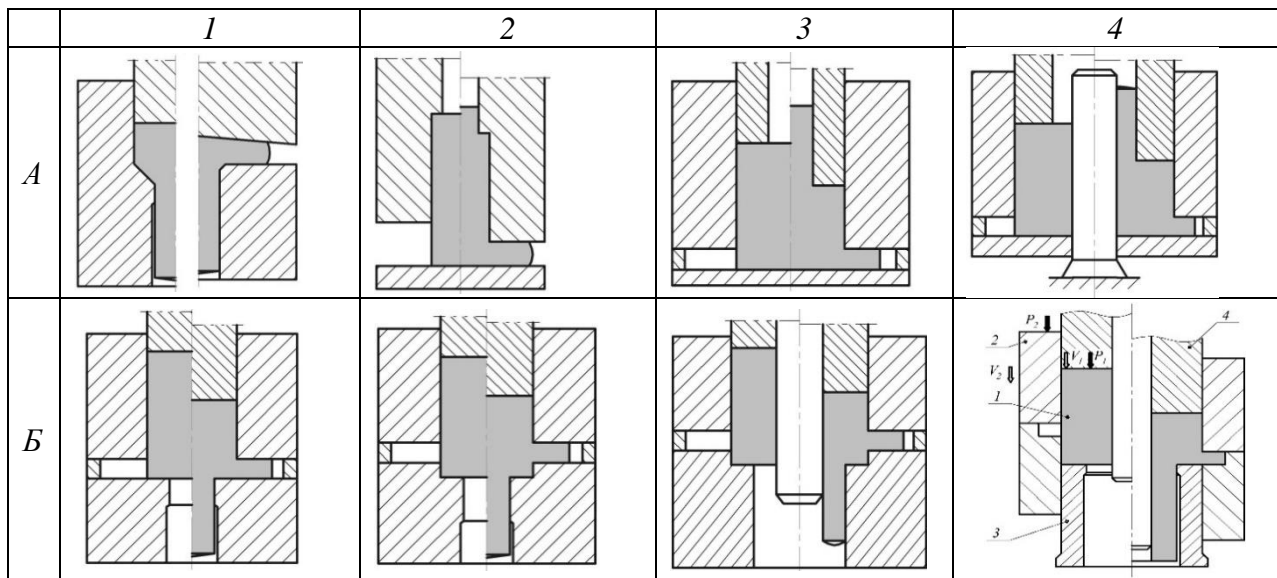


Рис. 2. Схеми радіально-поздовжнього видавлювання деталей з фланцем і відростком

Аналізу процесу тристороннього (прямо-зворотно-радіального) видавлювання порожнистої деталі з фланцем та відростком методом скінчених елементів присвячено роботу [9]. Вивчено вплив конструктивних параметрів, таких як геометрія кромки матриці та пуансону, величини зазорів, а також умов тертя. Порівняльний аналіз результатів скінчено-елементного моделювання з експериментальними даними щодо навантажень, течії матеріалу в різних напрямках та розподілу деформацій, підтверджує ефективність застосування МСЕ. У роботі [11] досліджували для комбінованого радіально-прямого видавлювання порожнистої деталі вплив деяких важливих геометричних параметрів порожнистої деталі, таких як товщина дна, величина кільцевого зазору, радіус оправки на розвиток та коливання навантаження. Закономірності формоутворення та хороші можливості способів комбінованого радіально-прямого видавлювання у зниженні силових параметрів та розширенні типорозмірів порожнистих штампованих деталей встановлено і в роботах [12–14].

Способи радіально-зворотного видавлювання доцільно застосовувати при односторонньому розташуванні корпусу і відростка відносно фланця, а способи радіально-прямого видавлювання (*Б1, Б2, Б3*) – при роз'єднаному розташуванні корпусу і відростка.

Найбільш важкими в реалізації схемами можуть бути способи радіально-прямого (поєднаного за часом і за осередком деформації) видавлювання (група *Б*), яким властива поява високих деформацій зсуву на межах розділу течії. У попередніх дослідженнях процесу радіально-прямого видавлювання (РПВ) відзначена особливість положення фланця і його роль в видавлюванні фланця і пряме видавлювання відростка [1, 6, 9]. Фланець, який вже сформований, може грати роль застійної зони, щодо якої метал продовжує інтенсивно переміщатися в прямому напрямку. Особливо це можливе при наявності ділянки корпусу з розміром  $H_1$ . Як показали дослідження методом верхньої оцінки, при РПВ швидкість прямої течії металу в відросток переважно дорівнює швидкості деформування і може викликати небезпеку появи тріщин на межах зсуву металу відносно вже сформованого фланця, який став частиною деталі (і застійною зоною) [6, 7].

Таким чином, освоєння способів комбінованого видавлювання складнопрофільованих деталей, заснованих на поєднанні схем традиційного поздовжнього видавлювання з новими способами поперечного (радіального та бокового) видавлювання в роз'ємних та рухомих матрицях, є перспективним напрямом розвитку технологій ТОШ, що сприяє зростанню техніко-економічних показників та конкурентоспроможності [1, 5–7]. Подальші дослідження мають бути присвячені вдосконаленню технологічних способів видавлювання та визначення сфери їх ефективного застосування.

Метою даного дослідження є оцінка технологічних режимів способу радіально-зворотного видавлювання і можливостей формоутворення деталей з осьовим відростком і фланцем в суміщеному процесі.

Дослідження проводилися для порівняльного аналізу формоутворення деталей з фланцем та відростком при комбінованому видавлюванні за різними технологічними схемами. Використовувався програмний комплекс Qform-2D [15], який базується на програмному модулі, придатному для всіх варіантів технологічних процесів обробки тиском і насамперед об'ємного штампування (рис. 3).

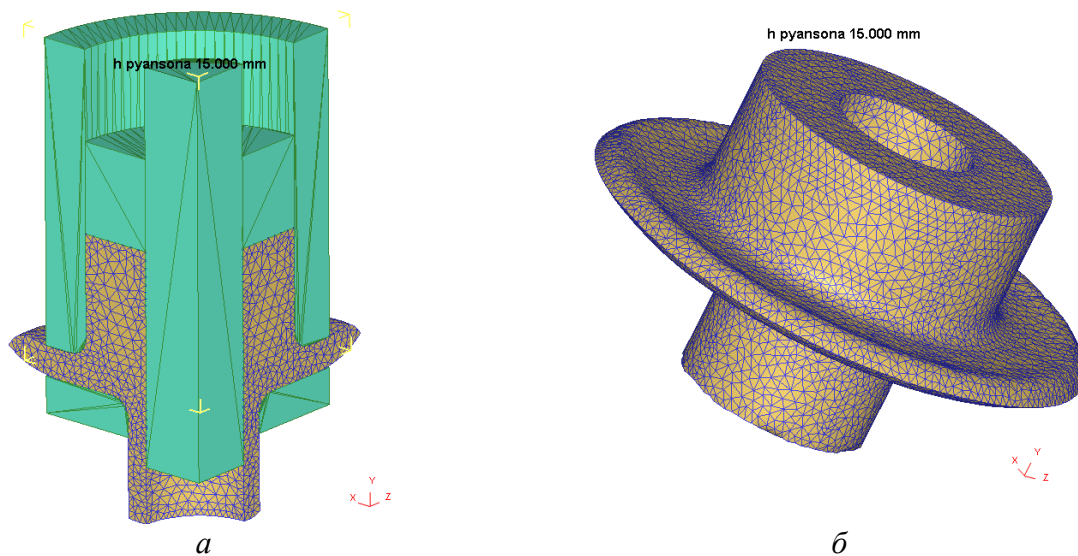


Рис. 3. Модель системи інструмент-заготовка (а) та деталь на заключній стадії комбінованого видавлювання (б)

Для розрахунків МСЕ було задано: діаметри порожнистої заготовки  $45,0 \times 21,0$  мм, вихідна висота заготовки  $H = 40$  мм, діаметр отвору нижньої напівматриці (тобто діаметр обтискання при прямому видавлюванні)  $D_1 = 28,2$  мм, товщина фланця  $h = 3$  (5) мм, варіант обмеження фланця за контуром діаметром 60 мм, швидкість переміщення пуансону 0,5 мм/с, матриці – 0,25 мм/с. Умови контактної тертя було визначено шляхом безпосереднього виміру сил тертя під час видавлювання. В результаті обробки оцінки даних холодного видавлювання алюмінієвих сплавів з мастилом тваринний жир, коефіцієнт тертя Зибеля був прийнятий рівним  $\mu_s = 0,04 \dots 0,08$ .

Порівняльний аналіз результатів розрахунку методом скінчених елементів та енергетичним методом верхньої оцінки [8] показав добрий якісний та кількісний збіг картин формозміни заготовки. SE-модель процесу показала аналогічні енергетичним моделям збільшення розмірів. Найбільш цікавою є картина розподілу деформованого стану (рис. 4 і 5). Наявність у комбінованому процесі схеми прямої течії справді супроводжується появою критичного (вздовж поверхні поділу течії) шару з високим градієнтом деформації. Зона фланця, що деформується, стає автономною периферійною областю, вздовж якої нові об'єми металу інтенсивно зміщуються вниз у прямому напрямку. Видно, що видавлювання за кінематичною схемою нерухомої матриці може викликати зріз уздовж лінії, що з'єднує перехідні кромки матриці. Особливо яскраво це спостерігається при заповненні радіальної порожнини, коли сформований фланець перетворюється на застійну зону, щодо якої метал переміщається вздовж осі до низу (див. рис. 4, а). Аналогічні результати було отримано і під час проведення експериментів на свинцевих моделях (див. рис. 4, б). На рис. 4, представлено результати експериментального дослідження характеру постадійного спотворення ділячної сітки при комбінованому видавлюванні заготовок з алюмінієвого сплаву АД31.

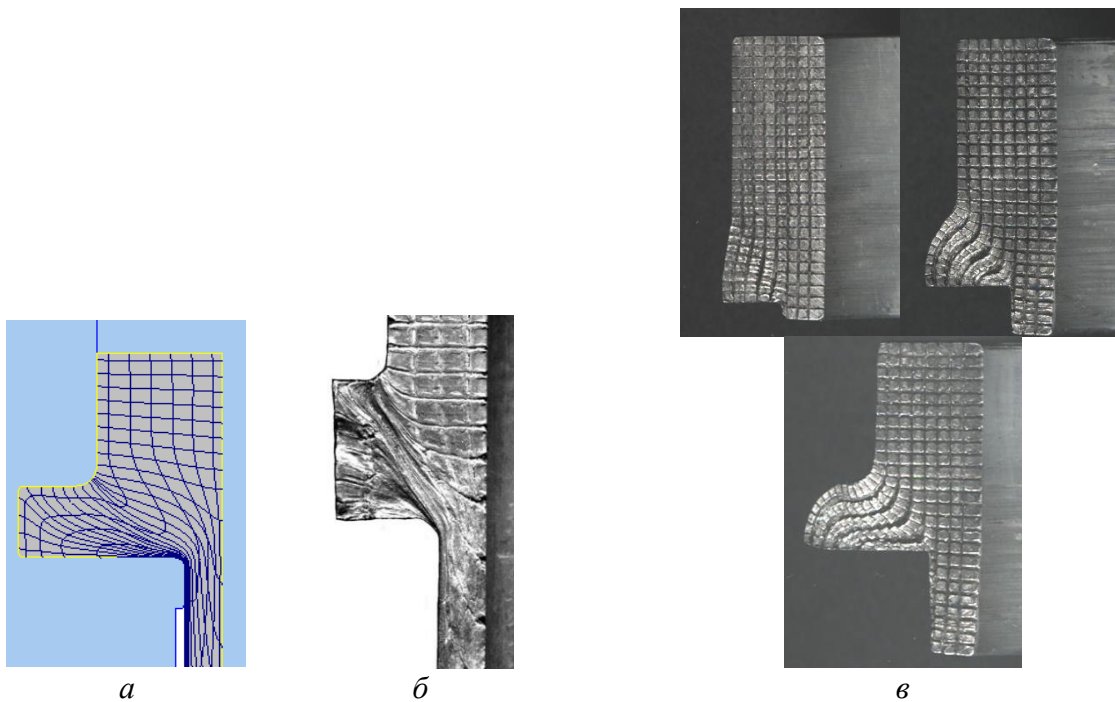


Рис. 4. Спотворення ділильної сітки при комбінованому видавлюванні порожнистої деталі з фланцем і порожнистим відростком

Співставлення деформованих станів деталей, що видавлюються за двома способами показало, що при видавлюванні з самого початку процесу в нерухомій матриці осередки деформації ОД об'єднані (рис. 5, а, б), а в рухомій матриці вони розділені (див. рис. 5, в). Найбільш інтенсивну деформацію набувають зони деталі, прилеглі до перехідних кромки матриці у вихідних отворів робочої порожнини. За перетином відростка, що видавлюється, нерівномірність деформованого стану значна – найбільшу деформацію набувають шари металу, прилеглі до зовнішньої поверхні відростка. Аналогічна і картина розподілу інтенсивності напружень (див. рис. 5, б).

Строго кажучи, отримані за допомогою МСЕ картини розподілу інтенсивності деформацій (див. рис. 4, а і 5, а) показують, що процес деформування протікає за більш сприятливою схемою з приєднаним ОД, що характеризується наявністю площини розділу течії металу з середнім діаметром (між діаметрами відростка  $d$  і вихідної заготовки  $D_0$ ). Проте, у разі високих значень відносного діаметра відростка  $d/D_0$  і за заповненої радіальної порожнини може призвести до «вирубки», тобто до відділення сформованого фланця від корпусу деталі. В даному випадку швидкість переміщення металу в відросток практично дорівнює швидкості руху пуансона, а по перерізу відростка вихідна ділильна сітка спотворюється на вузькій смужі, що приймає до зовнішньої бічної поверхні відростка (див. рис. 4, в).

Новий спосіб, розроблений на підставі результатів досліджень, спрямований на запобігання небезпеці руйнування деталі. Кінематичну схему процесу комбінованого видавлювання з рухомою матрицею наведено на рис. 2, схема Б4 [16]. Перед початком процесу деформування заготовки 1 матрицю з радіальною порожниною 2 необхідно виставити на певну висоту (з урахуванням переміщуваних об'ємів) вище протипуансону 3. У процесі видавлювання металу заготовки 1 одночасно з пуансоном 4 вниз переміщують і матрицю 2. Причому швидкість руху матриці 2 переважно дорівнює половині швидкості пуансона 4 та підбирається так, щоб до кінця процесу радіальна порожнина була підведена до торця протипуансону 3 (див. рис. 2, Б4). Два осередки деформації при цьому поєднуються, але так як це відбувається на заключній стадії процесу небажаних зрушень і зрізів не відбувається. Рух матриці 2 зі швидкістю меншої швидкості деформуючого пуансона 4 супроводжується тим, що в поперечну

порожнину метал заготовки 1 видавлюється з двох сторін, що знижує нерівномірність деформації і підвищує якість і характеристики міцності виробу. За рахунок поділу осередків деформації на основній стадії процесу деформування (див. рис. 5, *в*) при видавлюванні металу в кожному напрямку з окремої зони заготовки можливе переміщення значного обсягу металу як у радіальну порожнину матриці, так і в прямому напрямку, що дозволяє отримувати деталі з більшим діапазоном розмірів. Таким чином, в умовах роздільної течії через виключення великого градієнта ступеня деформації та інтенсивного зсуву між окремими зонами ОД усувається різь на межі між фланцем та корпусом деталі.

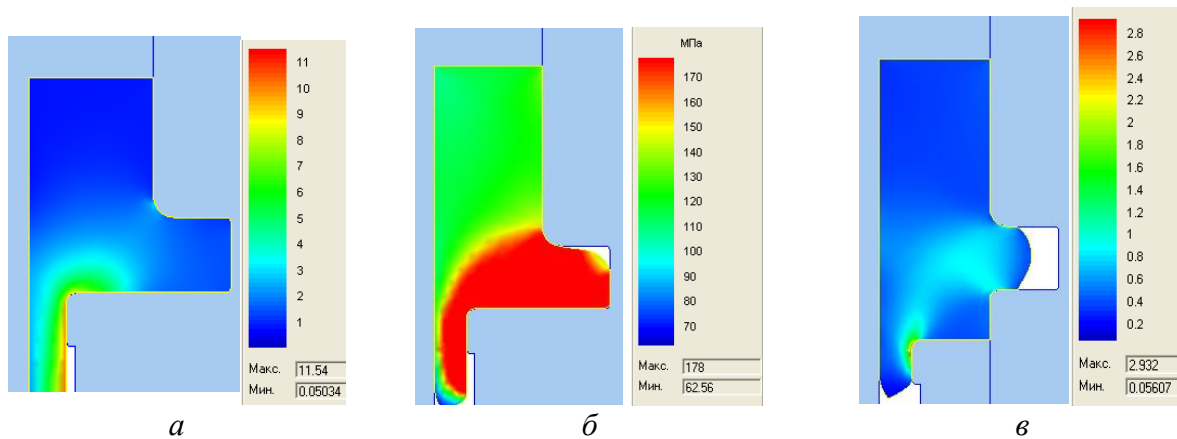


Рис. 5. Розподіл інтенсивності деформацій (*а*) і напружень (*б*) при комбінованому видавлюванні в нерухомій матриці та інтенсивності деформацій при рухомій матриці (*в*)

Аналіз кінематики течії металу за допомогою методу скінчених елементів і отримані картини поетапного наростання контуру деталі (рис. 6) та поетапного спотворення діляльної сітки (рис. 7) при комбінованому видавлюванні в рухомій матриці дають можливість представити характер формоутворення деталі з фланцем. Заміна односторонньої подачі металу в радіальну порожнину нерухомої матриці радіальним видавлюванням з двосторонньою подачею в рухомій матриці вирівнює деформований стан, шари металу з максимальною деформацією переносяться у внутрішні області деталі, віддалені від жолобників і перехідних ділянок, підвищуючи тим самим міцність виробу в цілому.

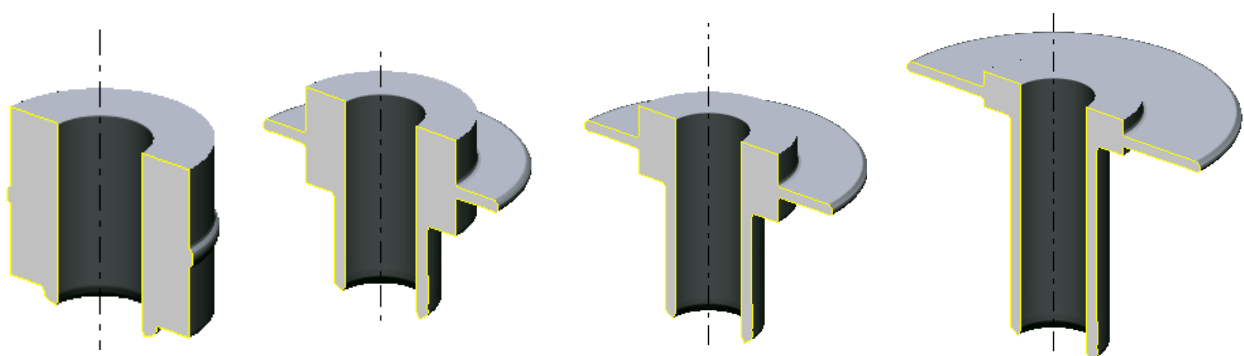


Рис. 6. Наростання контуру деталі під час видавлювання в рухомій матриці



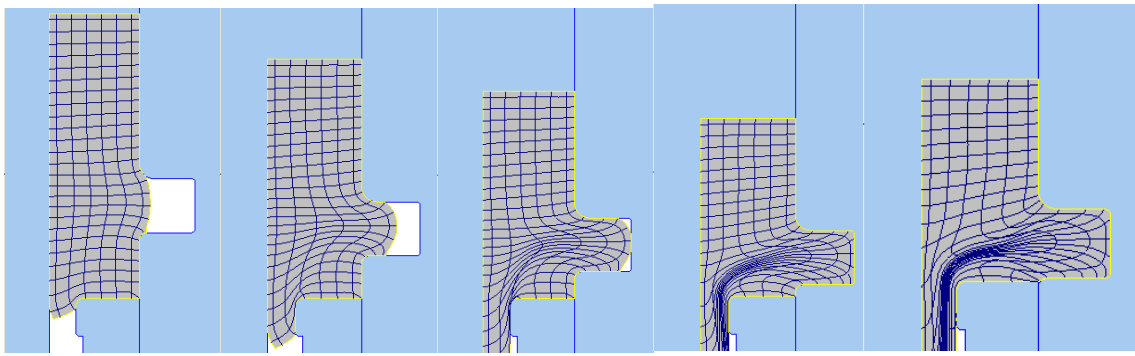


Рис. 7. Спотворення ділильної сітки при комбінованому радіально-прямому видавлюванні в рухомій матриці (СЕ-модель)

Ця різницю добре видно при співставленні деформованого стану деталі, отриманої за двома варіантами видавлювання: в нерухомій (рис. 8, *a* і *б*) і рухомій (рис. 8, *в*) матриці. Особливо наочно представлений зсув корпусу щодо фланцевої зони при видавлюванні деталей з розвиненою нижньою частиною корпусу (з висотою  $H_1$ ) (див. рис. 8, *б* і *д*). При видавлюванні в рухомій матриці така небезпека відриву фланця виключена, хоча при цьому зберігається зосередження зон з найбільш інтенсивною деформацією у вихідних отворів на перехідних кромках інструменту, формотворчого відросток. При видавлюванні в рухомій матриці вдається усунути зрушення і зменшити у проміжній зоні ступінь деформації до 0,4...0,6 (рис. 9). Розведені автономні осередки деформації поступово зливаються в один загальний осередок без зсувних деформацій та небезпеки зрізів.

Співставлення деформованого стану заготовки, отриманого методом скінчених елементів, з експериментальними даними, отриманими методом ділильних сіток (див. рис. 4, *б* і *в*), показало близький характер полів деформацій в пластичній зоні.

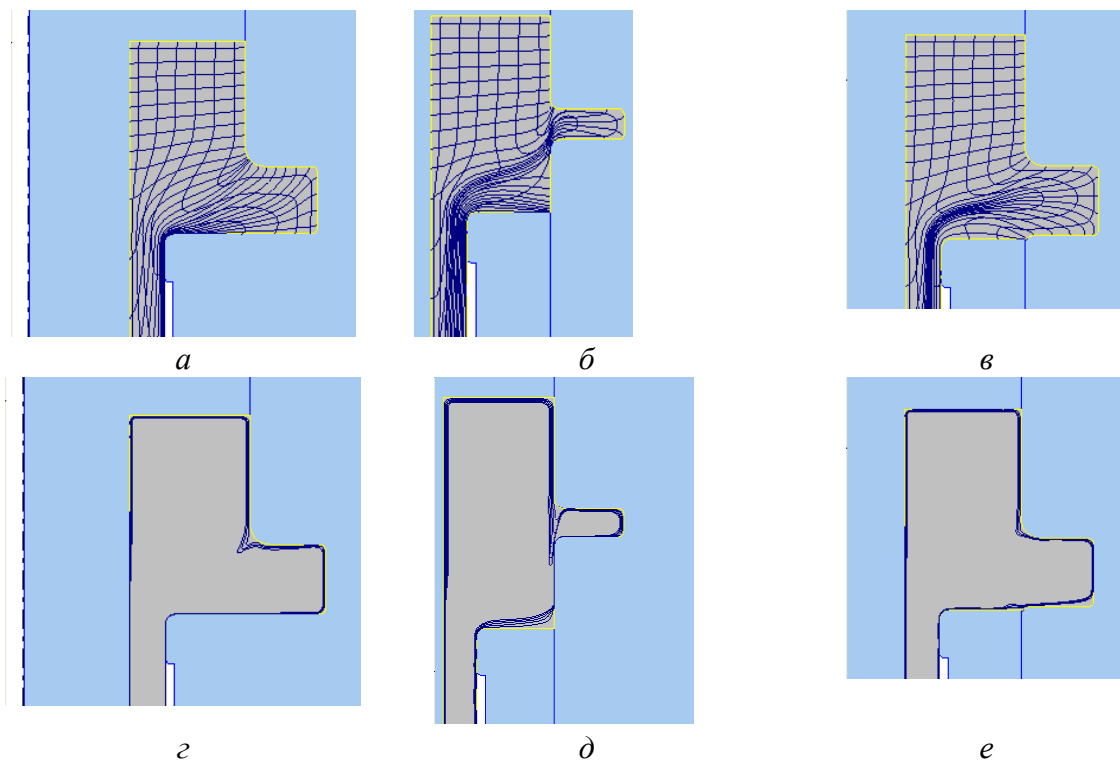


Рис. 8. Співставлення картин зміни ділильної сітки та поверхневих ліній при видавлюванні в нерухомій (*a*, *б*, *г*, *д*) та рухомій (*в*, *е*) матрицях

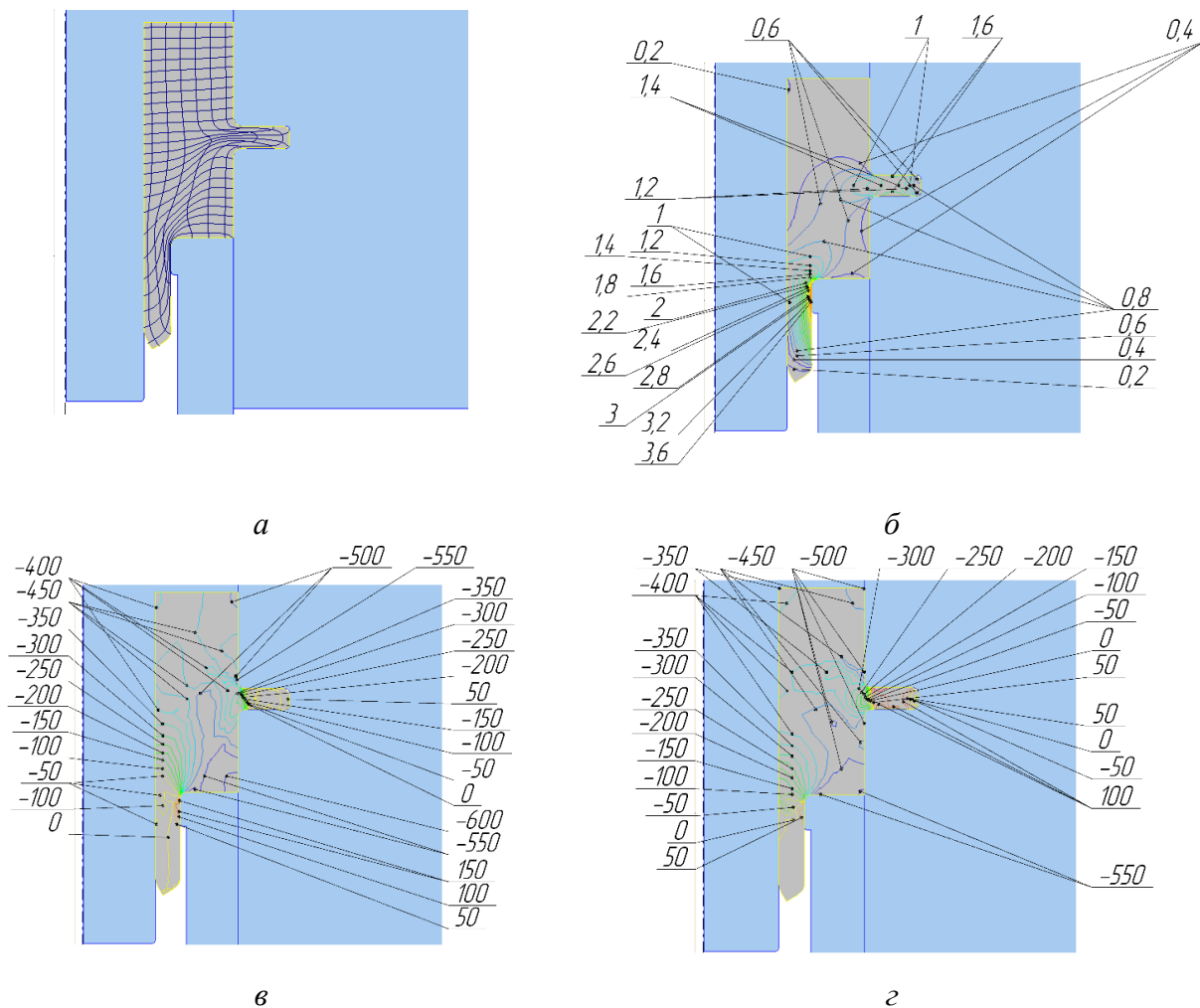


Рис. 9. Показники напружено-деформованого стану при видавлюванні за новим способом: а – zdeформована ділильна сітка, б – розподіл інтенсивності деформації, в – розподіл напружень  $\sigma_\theta$ , з – розподіл напружень  $\sigma_z$

У програмі QForm поверхневі лінії – це засіб діагностики внутрішніх дефектів. На додаток до звичайних вертикальних та горизонтальних лагранжових ліній вони розташовуються вздовж поверхні заготовки. Лінії є замкненими контурами, що повторюють обрис поверхні контуру (деталі). Вони деформуються разом із матеріальними частинками заготовки. Головне призначення поверхневих ліній – ідентифікація поверхневих дефектів у заготовках під час штампування. До таких дефектів відносяться різноманітні простріли та утяжини. Якщо вони проникають усередину заготовки – це поява дефекту (див. рис. 8, з-д). Вертикальні та горизонтальні лагранжові лінії не дають очевидної картини виникнення дефекту, хоч і досить точно відображають течію металу.

Прогнози по цих лініях досить добре збігаються з деформованим станом, представленим у вигляді картини спотвореної ділильної сітки. Наприклад, при видавлюванні з односторонньою подачею металу в радіальну порожнину нерухокої матриці небезпеку зрізу фланцевої зони особливо при наявності частини корпусу з (H1) під фланцем продемонстровано і ділильною сіткою, і поверхневими лініями (див. рис. 8, б і д). При видавлюванні за новим способом поверхневі лінії не проникають у тіло заготовки (див. рис. 8, е), що відповідає вирівняному деформованому стану деталі (див. рис. 8, в).

Напружений стан видавленої деталі загалом аналогічний полям деформацій. Розподіл компонентів напружень (див. рис. 9) показує, що на периферії фланця діють окружні напруження, що розтягують, які знижують деформовність металу.



Аналізуючи розподіл компонент напружень за перерізом заготовки (див. рис. 9, в, з), можна відзначити, що в цілому в ній переважають стискаючі як окружні  $\sigma_\theta$  так і осьові  $\sigma_z$  напруження. Найбільші значення  $\sigma_\theta$  і  $\sigma_z$  мають місце у верхній частині заготовки в зоні під пуансоном і в куті, утвореному нижньою напівматрицею та протипуансоном, а також на крайках матриці та протипуансону в зонах перетікання металу в осьовий відросток та фланець відповідно. У цих зонах абсолютна величина окружних і осьових компонент напруження досягає 500 МПа і більше. Наявність досить великих напружень у внутрішній частині фланця заготовки, і, як наслідок сил, що діють на верхню напівматрицю, може призводити до проблеми розкриття та (або) зсуву напівматриць (особливо, враховуючи їх рухливість), що слід брати до уваги при проектуванні інструменту. У центральній частині заготовки, що примикає до оправки, напруження також є такими, що стискають, але їх величини істотно менші (приблизно вдвічі).

Деталі типу «стрижень з фланцем і відростком», отримані радіально-прямим і радіально-зворотним видавлюванням відрізняються високою точністю розмірів і якістю поверхні (рис. 10). Обмеження пов'язані з точністю діаметральних розмірів фланця і його формою. Це обмеження може бути зняте або виконанням видавлювання в закриту порожнину (рекомендується для деталей з алюмінієвих сплавів), або введенням прийому підсадки фланця в заключній стадії процесу. Види браку також пов'язані з недостатністю пластичності металу в периферійній зоні фланця, який видавлюється, де напружений стан при вільній радіальній течії близький до лінійного розтягування.



Рис. 10. Деталі, одержані радіально-прямим видавлюванням

Проведені дослідження, виконані із залученням МСЕ, показали хороші технологічні можливості запропонованого способу комбінованого вичавлювання, а також ефективність виконання математичних експериментів на основі комп'ютерних моделей процесів видавлювання. Новий спосіб комбінованого видавлювання в рухомій матриці може істотно розширити діапазон співвідношень розмірів, підвищити складність одержуваних деталей, що штампуються, і збільшити їх номенклатуру та якість. Отримані відомості дозволять дати технологічні рекомендації для виготовлення якісних деталей типу «стрижень з фланцем» холодним видавлюванням.

Надалі необхідно більш глибоке теоретичне та експериментальне дослідження процесу комбінованого видавлювання в рухомій матриці у широкому діапазоні геометричних та швидкісних параметрів процесу. Це дозволить встановити особливості формування ОД, їх меж та умови переходу одного виду ОД в інший, що необхідно для раціонального проектування технологічного процесу управління технологічними режимами деформування.

## ВИСНОВКИ

1. Розглянуто та систематизовано порожнисті та стрижневі осесиметричні деталі з фланцем та осьовим відростком та способи їх виготовлення об'ємним штампуванням та видавлюванням. Залежно від конструкції та параметрів деталі виділено дві групи переважно прийнятих способів комбінованого видавлювання: радіально-зворотне та радіально-пряме.

2. Наведено результати моделювання процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання стрижневої деталі з фланцем методом скінчених елементів з використанням програмного комплексу QForm. Підтверджено, що при комбінованому видавлюванні деталі з фланцем і відростком із течією металу в радіальному та прямому напрямках в нерухомій матриці з об'єднаним осередком деформації фланець, сформований радіальним видавлюванням, може стати застійною зоною, що викликає небезпеку руйнування деталі.

3. Розроблено та промодельовано за допомогою програмного комплексу QForm2D новий спосіб комбінованого видавлювання в рухомій матриці, що передбачає роз'єднання осередків видавлювання металу в радіальному та прямому напрямках з початку процесу. Дано оцінку закономірностям формозміни та напружено-деформованого стану заготовки в процесі радіально-прямого видавлювання в рухомій матриці та підтверджено прогнози, отримані раніше енергетичним методом. Встановлено, що рухливість матриці запобігає небезпеці відділення фланця за рахунок усунення інтенсивних деформацій зсуву і переміщення металу в прямому напрямку вздовж фланцевої зони.

4. Співставлення деформованого стану заготовки, отриманого методом скінчених елементів, з експериментальними даними, отриманими методом ділильних сіток, показало близький характер полів деформацій у пластичній зоні. При цьому встановлено зосередження зон з найбільш інтенсивною деформацією у вихідних отворів на перехідних кромках формуючого інструменту та на зовнішніх шарах відростка.

5. Використання отриманих відомостей дозволить прогнозувати формоутворення деталей з фланцем та відростком та інтенсифікувати процес розробки технологій виготовлення якісних порожнистих та стрижневих деталей холодним видавлюванням за рахунок вибору раціональних схем та параметрів процесу комбінованого видавлювання.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алієв І.С., Грудкіна Н.С., Малій Х.В., Таган Л.В. Моделювання та розробка процесів точного об'ємного штампування видавлюванням: монографія. Краматорськ: ДДМА. 2021. 208 с. ISBN 978-617-7889-08-2
2. 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](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13).
3. Balendra, R., Qin, Y. Injection Forging: Engineering and Research. *Journal of Material Processing*. 2004. 145, 189-206.
4. Aliev I.S. Radial extrusion process. *Soviet Forging and Metal Stamping Technology (English Translation of Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo)*. 1988. Part 3, pp. 54–61. ISSN: 0891-334x.
5. Алиев И.С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1990. 2. С. 7-9.
6. Алиева Л. И. Совершенствование процессов комбинированного выдавливания : монография. Краматорск: ООО «Тираж-51». 2018. 352 с. ISBN 978-966-379-846-2.
7. Алиева Л.И., Борисов Р.С., Жбанков Я.Г., Мороз Б.С. Комбинированное выдавливание полых деталей с фланцем. *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии*. Краматорск: ДГМА. 2008. С. 45-48.
8. Aliiev I., Aliieva L., Grudkina N., Zhabankov Ya. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. 3(7), pp. 17–22. <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/17Aliiev.pdf>
9. Aliieva L. I., Markov O. Y., Aliiev I. S., Hrudkina N. S., Levchenko V. N., Malii Kh. V. Analysis of power parameters of the combined three-direction extrusion process. *FME Transactions*. 2021. 49. 2, pp. 344–355. [https://www.mas.bg.ac.rs/\\_media/istravivanje/fme/vol49/2/9\\_oe\\_markov\\_et\\_al.pdf](https://www.mas.bg.ac.rs/_media/istravivanje/fme/vol49/2/9_oe_markov_et_al.pdf)
10. 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.
11. Lee Y. S., Hwang S. K., Chang Y. S., Hwang B. B. The forming characteristics of radial-forward extrusion. *Journal of materials processing technology*. 2001113, pp. 136–140. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00705-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00705-1)
12. Farhoumand A., Ebrahimi R. Analysis of forward-backward-radial extrusion process. *Materials and Design*. 2009. 30. 6, pp. 2152–2157. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.025>
13. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., & Abdi Sobbouhi E. Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2010. 25, pp. 857–863. <https://doi.org/10.1080/10426910903536741>
14. 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, pp. 242-248.

15. Біба Н.В. Досвід застосування програми QForm для моделювання процесів ОМТ в промисловості, освіті та дослідженнях. *Пластична деформація металів: матеріали наук.-практ. конф.*, 22-26 травня 2017 р. Дніпро. 2017. С. 9.
16. Пат. 8620 Україна. В21К21/00. Спосіб видавлювання деталей зі складним профілем. Л. І. Алієва, Р. С. Борисов. № 200500452. заявл. 17.01.2005; опубл. 15.08.2005. Бюл. №8.

## REFERENCES

1. Aliiev I.S., Hrudkina N.S., Malii Kh.V., Tahan L.V. Modeling and development of precision volumetric extrusion stamping processes: monograph. Kramatorsk: DSEA. 2021. 208 p. ISBN 978-617-7889-08-2. (In Ukrainian).
2. Bhaduri A. Extrusion. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. *Springer Series in Materials Science*. 2018. 264, pp. 599-646. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13)
3. Balendra, R., Qin, Y. Injection forging: engineering and research. *Journal of Material Processing*. 2004. 145, 189-206.
4. Aliev I.S. Radial extrusion process. *Soviet Forging and Metal Stamping Technology (English Translation of Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo)*. 1988. Part 3, pp. 54–61, ISSN: 0891-334x.
5. Aliiev I.S. Technological possibilities of new methods of combined extrusion. *Forging and stamping production*. 1990. No. 2. pp. 7-9. (in Russian).
6. Aliieva L. I. Improvement of combined extrusion processes: monograph. Kramatorsk: LLC "Tiraj – 51". 2018. 352 p. ISBN 978-966-379-846-2. (in Russian).
7. Aliiev I., Aliieva L., Grudkina N., Zhbakov Ya. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. 3(7), pp. 17–22. <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/17Aliiev.pdf>
8. Aliieva L.I., Borisov R.S., Zhbakov Ya.G., Moroz B.S. Combined extrusion of hollow parts with a flange. *Improvement of processes and equipment for pressure treatment in mechanical engineering and metallurgy*. Kramatorsk: DSEA. 2008, pp. 45-48. (in Russian).
9. Aliieva L.I., Markov O.Y., Aliiev I.S., Hrudkina N.S., Levchenko V.N., Malii Kh.V. Analysis of power parameters of the combined three-direction extrusion process. *FME Transactions*. 2021. 49. 2, pp. 344–355. [https://www.mas.bg.ac.rs/\\_media/istravanje/fme/vol49/2/9\\_oe\\_markov\\_et\\_al.pdf](https://www.mas.bg.ac.rs/_media/istravanje/fme/vol49/2/9_oe_markov_et_al.pdf)
10. 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.
11. Lee Y. S., Hwang S. K., Chang Y. S., Hwang B. B. The forming characteristics of radial-forward extrusion. *Journal of materials processing technology*. 2001. 113, pp. 136–140. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00705-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00705-1)
12. Farhoumand A., Ebrahimi R. Analysis of forward-backward-radial extrusion process. *Materials and Design*. 2009. 30. 6, pp. 2152–2157. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.025>
13. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., & Abdi Sobbouhi E. Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2010. 25, pp. 857–863. <https://doi.org/10.1080/10426910903536741>
14. 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, pp. 242-248.
15. Biba N.V. Experience using QForm programs for modeling metal forming processes in industry, education and research. *Plastic deformation of metals: Materials of scientific and practical conference*, 22-26 may 2017. Dnipro. 2017, p. 9. (In Ukrainian).
16. Pat. 8620 Ukraine. B21K21/00. Sposib vidavlyuvannya details zi foldable profile. L.I. Aliieva, R.S. Borisov. No. 200500452. app. 01/17/2005; publ. 08/15/2005. Bull. No. 8. (In Ukrainian).

**Levchenko V., Aliieva L., Abhari P., Sivak R. Radial-longitudinal extrusion of parts with a flange and a ledge.**

Methods for manufacturing hollow and rod axisymmetric parts with a flange and an axial ledge by extrusion are considered. Depending on the design and parameters of the part, two groups of predominantly accepted methods of combined extrusion are distinguished: radial-backward and radial-forward extrusion. The results of modeling the process of combined radial-reverse extrusion of a rod part with a flange by the finite element method using the Q-Form software package are presented. It has been confirmed that with combined extrusion of a part with a flange and a ledge with metal outflow in the radial and forward directions in a fixed matrix, the plastic deformation zone is combined. In this case, the flange formed by radial extrusion can become a stagnant zone along which the metal will move in the forward direction. This causes the risk of breaking the part and separating the flange. The new method of combined extrusion in a movable matrix involves the separation of metal extrusion centers in the radial and direct directions from the beginning of the process. An assessment is made of the regularities of shape change and development of the deformed state of the workpiece in the process of combined extrusion in a movable matrix. It is found that the mobility of the die prevents the danger of separation of the flange. At the same time, the concentration of zones with the most intense deformation at the outlet holes on the transitional edges of the shaping tool is maintained. Comparison of the deformed state of the workpiece obtained by the finite element method with experimental data obtained by the dividing grid method showed a close nature of the deformation fields in the plastic zone.

**Key words:** parts with flange and ledge, combined radial-longitudinal extrusion, movable die, stress-strain state, finite element method, workpiece forming.

**Левченко Володимир Миколайович** – канд. техн. наук, наук. співроб. ІРЕ ім. О. Я. Усикова  
**Levchenko Volodymyr** – Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher of Ya. Usikov IRE  
E-mail: [goldangel271@gmail.com](mailto:goldangel271@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2411-4198>

**Алієва Лейла Іграмотдіновна** – д-р техн. наук, професор ДДМА  
**Aliieva Leila** – Dr. Sc., Full Professor, DSEA  
E-mail: [leilialieva2017@gmail.com](mailto:leilialieva2017@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5283-925X>

**Абхарі Пейман** – д-р техн. наук, професор ДДМА  
**Abhari Payman** – Dr. Sc., Full Professor DSEA  
E-mail: [payharies@gmail.com](mailto:payharies@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0827-8149>

**Сивак Роман Іванович** – д-р техн. наук, доцент ПНУ  
**Sivak Roman** – Dr. Sc., Assoc. prof., PNU  
E-mail: [sivak\\_r\\_j@ukr.net](mailto:sivak_r_j@ukr.net)  
ORSID: <https://orcid.org/0000-0002-7459-2585>

Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАНУ (ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАНУ), м. Харків  
O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, NAS of Ukraine (Ya. Usikov IRE), Kharkiv.

Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), м. Краматорськ  
Donbas State Engineering Academy (DSEA), Kramatorsk

Поліський національний університет (ПНУ), м. Житомир  
Polissia National University (PNU), Zhytomir

*Стаття надійшла до редакції 10.06.23 р.*