

DOI: 10.31319/2519-8106.1(48)2023.280802  
UDC 621.777.4

**Алієв І.С.**<sup>1</sup>, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Обробка металів тиском»  
**Aliiev Igramotdin**<sup>1</sup>, Dr of Tech. Sci., Full Prof.  
ORCID: 0000-0002-4248-8214  
e-mail: igramaliev@gmail.com

**Левченко В.М.**<sup>2</sup>, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Levchenko Volodymyr**<sup>2</sup>, PhD of Tech. Sci., Sen. Res.,  
ORCID: 0000-0002-9871-4452  
e-mail: goldangel271@gmail.com

**Марков О.Є.**<sup>1</sup>, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Комп'ютеризований дизайн і моделювання процесів і машин»  
**Markov Oleg**<sup>1</sup>, Dr of Tech. Sci., Full Prof.  
ORCID: 0000-0001-9377-9866  
e-mail: oleg.markov.ond@gmail.com

**Абхари П.Б.**<sup>1</sup>, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Обробка металів тиском»  
**Abhari Payman**<sup>1</sup>, Dr of Tech. Sci., Full Prof.  
e-mail: payharies@gmail.com

**Малій Х.В.**<sup>1</sup>, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Обробка металів тиском»  
**Malii Khrystyna**<sup>1</sup>, PhD of Tech. Sci.  
ORCID: 0000-0002-3987-9871  
e-mail: kristina.v.goncharuk@gmail.com

<sup>1</sup>Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

<sup>1</sup>Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk

<sup>2</sup>Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України, м. Харків

<sup>2</sup>Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine, Kharkiv

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ КОНІЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

### SIMULATION OF THE EXTRUSION PROCESS HOLLOW CONICAL DETAILS

*У роботі представлено результати моделювання процесу отримання деталей типу конічний стакан комбінованим методом холодного об'ємного штампування. З використанням сучасного програмного продукту на основі метода скінчених елементів досліджено силовий режим процесу зворотно-прямого видавлювання та особливості формозміни заготовки за стадіями. За розподілом інтенсивності деформації оцінено пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією по перерізу стінки та донної частини деталі. Проаналізовано вплив фактору тертя на контактних поверхнях з інструментом у комбінації з таким параметром як відношення радіуса торця пуансона до радіуса дна порожнини матриці на характер течії металу і формоутворення заготовки. Оцінено можливість виникнення дефектів. Проведено дослідження впливу кута нахилу торця пуансону на розподіл інтенсивності деформації у заготовці та на пропрацювання металу. Наведено дані експериментального дослідження, щодо видавлювання конічних стаканів з алюмінієвого сплаву. Окреслено перспективні*

напрямки моделювання процесів об'ємного штампування вісесиметричних порожнистих деталей методом зворотно-прямого видавлювання.

**Ключові слова:** конічний стакан, видавлювання, комбінований процес, деформування, дефект, коефіцієнт тертя, метод скінчених елементів.

*Hollow parts such as cylindrical and conical cups and sleeves are very common in the modern fields of instrument building and mechanical engineering. Extrusion processes make it possible to obtain high-quality parts with increased operational properties that practically do not require finishing by mechanical processing methods. The factor limiting the technological possibilities of extrusion processes is the high level of forces and pressure of metal deformation. Combining traditional reverse and direct extrusion methods in the manufacture of hollow parts increases the efficiency of stamping processes due to fewer technological transitions, lower energy consumption and increased productivity. The purpose of the work is to determine the parameters of the process of combined reverse-direct extrusion of a hollow conical part using the finite element method (FEM). During the MSE simulation of the combined reverse-direct extrusion process, it was established that the change in the extrusion force is uneven and three stages of the extrusion process can be distinguished: the non-stationary stage, the quasi-stationary stage and the reverse extrusion stage. With relatively small values of the friction coefficients on the matrix and punch, the movement of the metal occurs mainly in a straight direction, and at the same time it is possible to increase the thickness of the bottom compared to the thickness of the original conical workpiece. Increasing the length of the inclined forming matrix also affects the deformation process, and the smaller the length of the contact line of the workpiece with the forming matrix, the more the extrusion process becomes similar to the stamping process, which is characterized by drawing the workpiece into the cavity of the matrix without reducing the thickness of the bottom of the workpiece. The analysis of the shape change of the workpiece also showed that the deformation of the metal according to this option, when the combined extrusion of the metal is kept until the completion of the shaping of the hollow part, is quite possible. The effect on the shape change of the workpiece of the conditions of contact friction is also related to such a parameter as the ratio of the radius of the face of the punch to the radius of the bottom of the matrix cavity. With values of this parameter in the range from 0.4 to 0.8, an increase in the value of the coefficient of friction on the punch has a greater effect on the level of strength characteristics of the extrusion process, and with values not included in this range, on the peculiarities of the forms of the workpiece change. When the values of the coefficients of friction on the matrix and the punch are minimal, during the process of extrusion, the line of separation of the flow of the metal is shifted higher by the height of the semi-finished product. This leads to the appearance of such a defect as a gap between the bottom of the part and the working end of the punch. The influence of the angle of inclination of the face of the punch on the distribution of the intensity of deformations during combined reverse-forward extrusion was studied. A decrease in the value of this angle leads to an increase in the zone of maximum deformations with an improvement in the working of the bottom of the part. A comparison of the results obtained by MSE modeling with the data of experimental studies on the extrusion of conical glasses from aluminum alloy with tools with inclination angles of  $10^\circ$  showed a satisfactory correspondence of the nature of the shape change of the workpiece at successive stages of the extrusion process. Prospective directions for MSE modeling of the processes of combined reverse-direct extrusion of hollow conical parts are the study of the influence on the process of the rate of deformation, the temperature factor, heat release in the process of deformation, as well as the expansion of grades of materials for blanks.*

**Keywords:** conical cup, extrusion, combined process, deformation, defect, friction factor, finite element method.

### Постановка проблеми

Порожністі деталі типу циліндричних і конічних стаканів та гільз дуже поширені в галузях приладобудування та машинобудування. Для виготовлення цих виробів ефективні процеси холодного та гарячого видавлювання [1—3]. Процеси видавлювання дозволяють отримувати деталі високої якості та з підвищеними експлуатаційними властивостями, що практично не по-

требують доопрацювання методами механічної обробки. Для технологій холодного видавлювання характерне раціональне використання матеріалу та висока продуктивність. В останні роки технології видавлювання демонструють стійку тенденцію до збільшення обсягів виробництва, розширення номенклатури деталей та матеріалів і створення нових способів формоутворення [4—6].

Фактором, що обмежує технологічні можливості видавлювання, є високий рівень сил та тиску деформування металу [2, 5—8]. Комбінування традиційних способів поздовжнього (зворотного та прямого) видавлювання з новими схемами поперечного (радіального та бокового) видавлювання при виготовленні порожнистих деталей підвищує ефективність процесів штампування за рахунок меншого числа технологічних переходів, зниження енергоємності та збільшення продуктивності. Комбіноване видавлювання із роздачею дозволяє знизити енергоємність процесу деформування за рахунок зменшення жорсткості схеми напруженого стану в осередку деформації [1, 5, 9]. Ефективність процесу комбінованого радіально-прямого видавлювання для отримання глибоких гільз обумовлена, перш за все, його перебігом в оптимальному силовому режимі [5, 7, 10]. Тому такі нові способи деформування з комбінованою течією металу привертають дедалі більшу увагу дослідників. Так, наприклад, у роботі Лі Я. С. (Y.S. Lee) [11] представлено силові характеристики процесу комбінованого послідовного видавлювання залежно від таких параметрів, як діаметр оправки, радіус матриці та коефіцієнт тертя.

Аналізу дефектоутворення, напружено деформованого стану (НДС) та тепловідлення у процесах видавлювання присвячено роботи, виконані із залученням методів верхньої оцінки та скінчених елементів [6, 9—12]. У роботі [9] розглянуто можливості енергетичного методу верхньої оцінки для прогнозування виникнення дефектів у вигляді утяжин у донній частині стакана при його видавлюванні.

Що стосується видавлювання порожнистих конічних деталей, то спосіб зворотного видавлювання (рис. 1, *a*) є найбільш енергоємним процесом, що обумовлено інтенсивною односпрямованою течією металу в умовах всебічного стиснення та значного тертя [2]. У цьому процесі стійкість заготовки недостатня, що призводить до появи різновтовщинності стінки отриманої деталі.

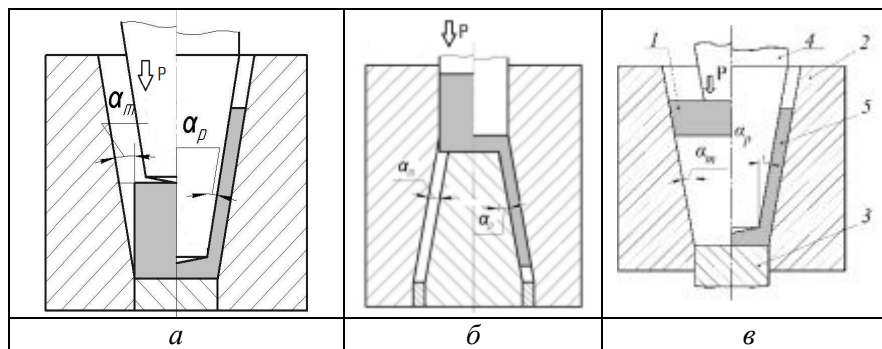


Рис. 1. Схеми видавлювання порожнистих деталей типу «конічний стакан»

Пряме видавлювання з роздачею конічних деталей (рис. 1, *б*) через різнознакову схему напруженого стану потребує менших сил деформування [2, 13]. Тому і деформованість заготовок може бути низькою через те, що на кромці деталі діє окружне напруження розтягування.

Перспективним методом штампування конічних деталей може бути комбіноване зворотно-пряме видавлювання, що дозволяє помітно знизити енергосилові витрати на процес деформування, досягти найбільш точних розмірів і покращити якість виробів, що отримують [14]. Існує також схема з використанням фасонної заготовки, що розміщується у верхній частині порожнини матриці. При деформуванні такої заготовки верхній торець деталі формується за рахунок роздачі, що унеможливує подальше калібрування.

Для нової схеми комбінованого видавлювання характерно розміщення вихідної конічної заготовки у верхній частині порожнини матриці (рис. 1, в) [15]. Вихідну заготовку 1 встановлено в матриці 2, в якій розміщений виштовхувач 3. Деформування виконується за рахунок силового впливу пуансона 4. В результаті отримують виріб 5. При цьому сили тертя, що виникають між пуансоном і заготовкою, сприяють прямому видавлюванню, а між матрицею та заготовкою — зворотному.

#### Формулювання мети дослідження

Математичне моделювання процесів дає можливість розгляду більшої кількості варіантів, що цікавлять, для значень параметрів процесу без додаткових витрат на виготовлення штампової оснастки і заготовок. Результати моделювання дозволяють обґрунтувати вибір форми та розмірів вихідної заготовки, визначити сили деформування та отримати розподіл тиску на інструмент [2, 5]. При цьому метод скінчених елементів (МСЕ) має низку переваг у порівнянні з іншими аналітичними методами, що застосовують в обробці тиском: можливість покрокового розрахунку енергосилових параметрів та навантажень на інструмент; розрахунок параметрів напружено-деформованого стану заготовки та відстеження їх значень по ходу процесу деформування; можливість візуалізації кінематики процесу та виявлення можливих дефектів деталі, що виникають при пластичному деформуванні.

Метою роботи є визначення за допомогою методу скінчених елементів параметрів процесу комбінованого зворотно-прямого видавлювання порожнистої конічної деталі.

#### Виклад основного матеріалу

Для вирішення поставленої задачі теоретичного аналізу використано метод скінчених елементів, що реалізується в програмному комплексі QForm 2D. Граничні умови для скінчено-елементного аналізу: матеріал заготовки — АДЗ1; модуль Юнга — 70 000 МПа; коефіцієнт Пуассона — 0,33; Початкова температура заготовки — 20°C. Розміри заготовки: більший діаметр конічної заготовки  $d_1 = 56$  мм; висота заготовки  $h_1 = 30$  мм; кут нахилу конуса  $\alpha = 10^\circ$ . Розміри отриманої деталі: товщина дна  $h_2 = 17$  мм; товщина стінки  $s = 7$  мм; загальна висота деталі  $H = 73$  мм.

Для опису поведінки заготовки у процесі деформування використовується в'язко-пластичне середовище. Умови контактного тертя задано згідно із законом Зібеля. В якості базового варіанту технологічного процесу, що моделюється, прийнято варіант з розташуванням заготовки у верхній частині матриці (див. рис. 1, в) і коефіцієнти тертя на поверхнях матриці і пуансона, рівні  $\mu_s = 0,08$ .

У результаті досліджень процесу комбінованого зворотно-прямого видавлювання було встановлено, що зміна сили видавлювання нерівномірна і можна виділити три стадії процесу видавлювання. На першій нестационарній стадії (з ходом пуансона  $S = 30\%$  від загальної величини ходу) відбувається розпресування заготовки та інтенсивне зростання сили, що видавлює. На другій стадії (з ходом пуансона  $S = 65\%$ ) процес можна вважати квазістационарним, оскільки збільшення сили видавлювання відбувається плавно. Третя стадія процесу настає, коли нижній торець напівфабрикату починає контактувати з торцем контрпуансона і характеризується різким стрибком силових параметрів за рахунок переходу від комбінованого течії до етапу зворотного видавлювання.

На рис. 2 представлено залежності сил видавлювання, що виникають на пуансоні, від переміщення інструменту, що деформує, для різних способів видавлювання. Для зворотного видавлювання характерно рівномірне зростання сили  $P$  протягом усього процесу. Максимальна сила видавлювання становила 303 кН. При комбінованому видавлюванні відбувається поступове зростання сили при продавлюванні металу вниз матриці і різкий стрибок сили при ході пуансона 38,2 мм, так як відбувається контакт заготовки, що деформується, з торцем контрпуансона і початок стадії зворотного видавлювання. Сила на пуансоні на кінцевому кроці становила 304 кН. Пряме видавлювання з роздачею характеризується різким стрибком сили на пуансоні в початковій стадії та наступним рівномірним ходом процесу деформування. Максимальна сила  $P_{max} = 209$  кН.

Формування осередку деформації при значеннях коефіцієнтів тертя на матриці 0,36 і 0,08 на пуансоні значною мірою аналогічне осередку деформації у процесі проникнення, описаного у роботі [14].

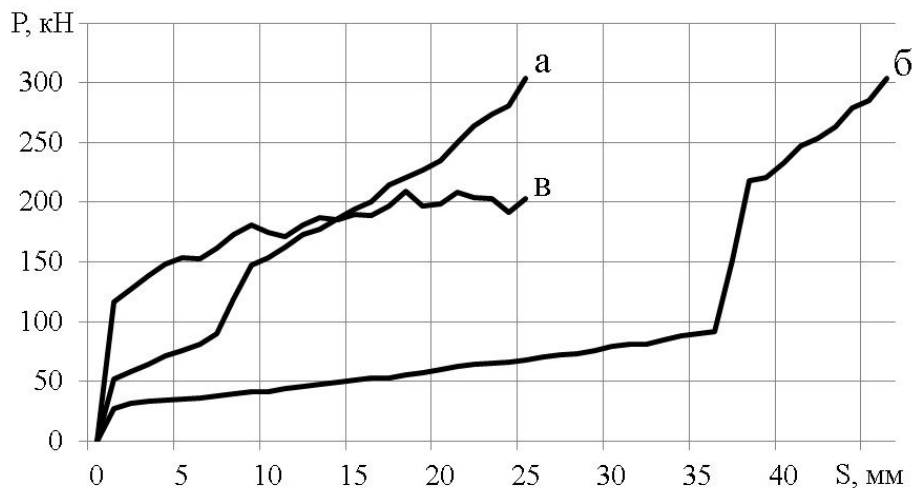


Рис. 2. Енергосилові параметри видавлювання порожнистої конічної деталі: а — зворотного, б — комбінованого, в — прямого з роздачею

Формозміна заготовки на основній стадії процесу комбінованого видавлювання (рис. 3) відбувається за схемою поєднаної течії: метал продавлюється вниз і видавлюється вгору в стінку деталі за рахунок виникнення активних сил тертя. При досягненні заготовкою торця контрпуансону відбувається початок стадії зворотного видавлювання з течією металу тільки в зворотному напрямку в зазор, що постійно звужується, між пуансоном і матрицею.

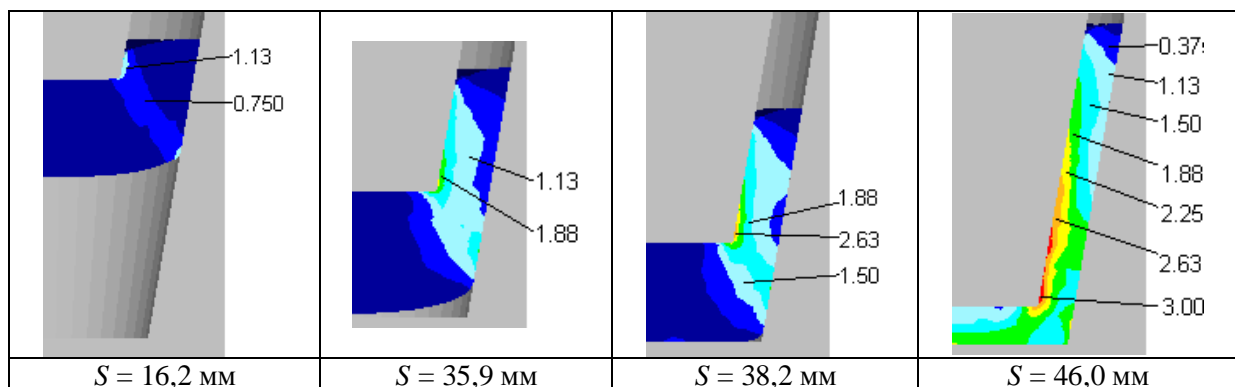


Рис. 3. Формоутворення конічної деталі за стадіями в процесі зворотно-прямого видавлювання та розподіл інтенсивності деформації

Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією по перерізу стінок та донної частини виробу можна оцінити за розподілом інтенсивності деформації у заготовці після видавлювання. Розподіл інтенсивності деформації показано за стадіями для відповідних значень переміщення пуансону  $S$  (див. рис. 3). Стінки деталей мають краще пропрацювання структури металу, і зона максимальної інтенсивної пластичної деформації знаходиться здебільшого у внутрішній частині стакану. Для верхнього торця стінки деталі має місце менше пропрацювання. Однак, незважаючи на ці неоднорідності у розподілі інтенсивності деформації, для комбінованого видавлювання характерне достатньо рівномірне пропрацювання структури з відносно невеликою зоною максимальної інтенсивності деформації.

При малих значеннях коефіцієнтів тертя на матриці та пуансоні течія металу відбувається переважно у прямому напрямку і при цьому можливе збільшення товщини дна порівняно з товщиною конічної вихідної заготовки, розміщеної в середній частині порожнини матриці. Збільшення довжини похилої твірної матриці також впливає на хід процесу. Чим менша довжина контактної

лінії заготовки з твірною матриці, тим більше процес видавлювання стає схожим на процес штампування, який характеризується втягуванням заготовки в порожнину матриці без зменшення товщини дна заготовки.

Аналіз формозміни заготовки також показав, що деформування металу за таким варіантом, коли комбінована течія металу зберігається до завершення формоутворення порожнистої деталі, цілком можливо. В процесі деформування видно, як при збільшенні сил тертя металу з матрицею зовнішня бічна поверхня напівфабрикату залипає на стінці матриці, внаслідок чого нижній торець деталі набуває округлих форм і з'являється дефект у вигляді незаповнення кута порожнини матриці (рис. 4, *a*).

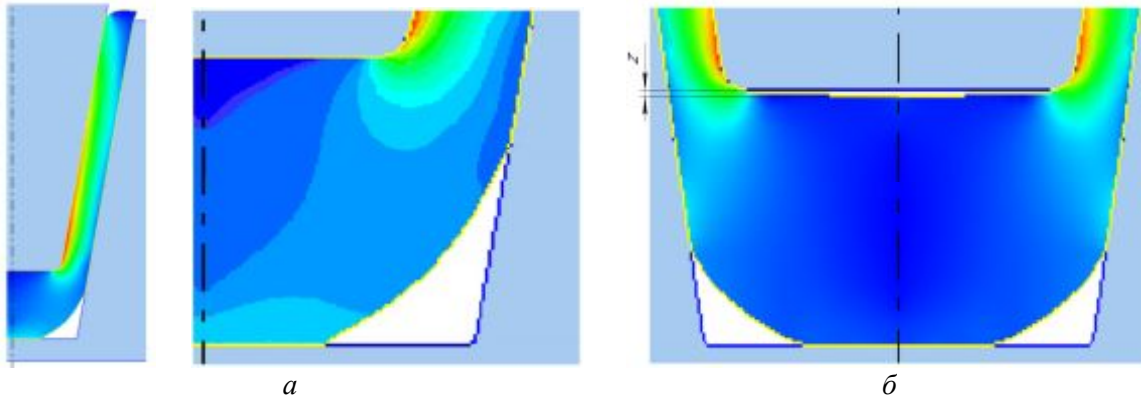


Рис. 4. Дефекти у вигляді незаповнення кутових зон (*a*) та випередження металу з появою зазору (утяжин) під торцем пуансона (*б*)

Вплив на формозміну заготовки умов контактної течії пов'язаний також з таким параметром як відношення радіуса торця пуансона до радіусу дна порожнини матриці. При значеннях цього параметра в діапазоні від 0,4 до 0,8 збільшення значення коефіцієнта тертя на пуансоні більшою мірою впливає на рівень силових характеристик процесу видавлювання, а при значеннях, що не входять в даний діапазон — на особливості форм зміни заготовки.

Збільшення значень для відношень радіусів (і ступеня деформації) до 0,8 і більше сприяє інтенсивній течії металу зі стінки стакану в прямому напрямку. Для моделювання відношення радіуса пуансона до радіусу матриці було збільшено до 0,9, при цьому кут нахилу матриці дорівнював куту нахилу пуансона  $\alpha = 10^\circ$ . Товщина заготовки була прийнята рівною товщиною дна готової деталі. У варіанті, коли значення коефіцієнтів тертя на матриці і пуансоні сприяють більш інтенсивній течії металу в прямому напрямку, тобто є мінімальними, протягом процесу видавлювання лінія розділу течії металу зміщується напівфабрикатом вище. Це призводить до появи дефекту у вигляді зазору між дном деталі і робочим торцем пуансона (див. рис. 4, *б*). Можливість появи такого роду дефекту при деформуванні заготовки через випереджальне видавлювання металу в прямому напрямку зазначено раніше й іншими дослідниками.

Проведено дослідження впливу кута нахилу торця пуансона  $\beta$  на розподіл інтенсивності деформації  $\epsilon_i$  у стінці та донній частині виробу (рис. 5). Зі зменшенням величини кута  $\beta$  відбувається зменшення зони максимальних деформацій за висотою стінки. Однак за зміни кута з  $\beta = 90^\circ$  до  $\beta = 70^\circ$  відбувається збільшення зони максимальних деформацій за шириною, що покращує пропрацювання дна деталі.

Для підтвердження результатів, отриманих МСЕ, був проведений експеримент видавлювання конічних стаканів при кутах інструментів, рівних  $10^\circ$ . Заготовки було виготовлено з алюмінієвого сплаву АД31 у формі зрізаного конуса з наміткою під пуансон. По ходу процесу відбувається втягування металу в дно за рахунок помітно активної течії металу у прямому напрямку. Це призводить до того, що на проміжній стадії відбувається незначне збільшення товщини дна деталі, що формується. При контакті заготовки з торцем контрпуансона та переході до стадії зворотного видавлювання спостерігається зменшення товщини дна деталі та збільшення висоти стінки стакану (рис. 6).

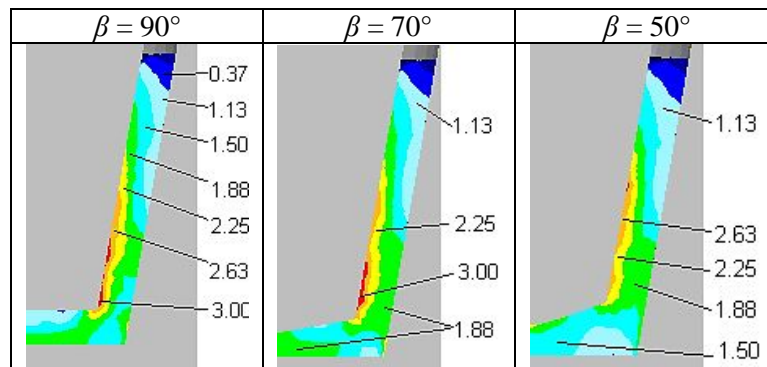


Рис. 5. Вплив кута нахилу торця пуансона  $\beta$  на розподіл інтенсивності деформації  $\varepsilon_i$  при комбінованому видавлюванні

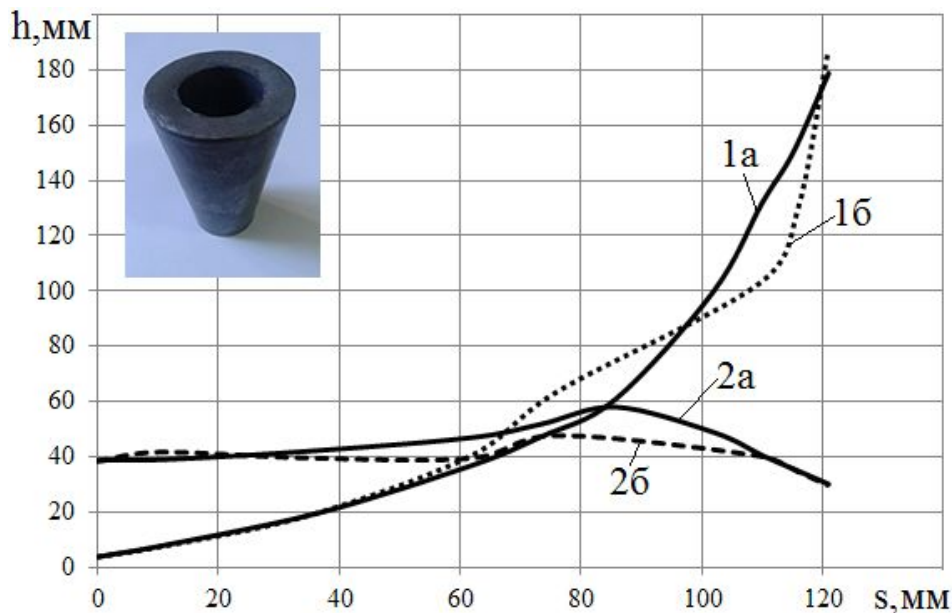


Рис. 6. Графік зміни висоти стінки (1а — МСЕ, 1б — експеримент) та товщини дна стакану (2а — МСЕ, 2б — експеримент) порожнистої конічної деталі

З рис. 6 видно, що в цілому характер формозміни заготовки, що прогнозується моделлю, підтверджується експериментальним дослідженням.

Перспективними напрямками для моделювання МСЕ процесів комбінованого зворотно-прямого видавлювання порожнистих конічних деталей є дослідження впливу на процес швидкості деформування, температурного фактора, тепловиділення в процесі деформації, а також розширення марок матеріалів заготовок.

### Висновки

1. Методом скінчених елементів проведено моделювання процесу комбінованого зворотно-прямого видавлювання порожнистих конічних деталей та встановлено закономірності формоутворення деталей та розвитку силового режиму на трьох характерних стадіях процесу.

2. Показано принципову можливість формоутворення порожнистої деталі в режимі комбінованої течії металу без переходу до зворотного видавлювання на заключній стадії процесу за рахунок збільшення сил тертя металу з матрицею на зовнішній бічній поверхні напівфабрикату. При цьому виявлено, що в такому випадку проявляється дефект у вигляді незаповнення кута матриці.



3. Встановлено, що основними параметрами, що впливають на процес зворотно-прямого видавлювання конічних стаканів, є геометричні параметри інструменту (пуансона та матриці) та вихідної заготовки, а також умови контактного тертя. Показано, що відношення радіуса торця пуансона до радіуса дна порожнини матриці в діапазоні від 0,4 до 0,8 у комбінації зі збільшенням значення коефіцієнта тертя на пуансоні впливає більшою мірою на рівень силових параметрів, а при співвідношеннях, що не входять до діапазону — на особливості формоутворення деталі.

4. Встановлено, що при збільшенні сил тертя металу з матрицею зовнішня бічна поверхня напівфабрикату залипає на стінці матриці, внаслідок чого нижній торець деталі набуває округлих форм і виникає дефект у вигляді незаповнення кута порожнини матриці (утяжина). У свою чергу зниження тертя на поверхнях матриці та пуансона сприяє інтенсивній течії металу в прямому напрямку, що може призвести до утворення зазору між дном деталі та торцем пуансона та дефекту у вигляді утяжини на дні порожнини деталі.

5. Визначено, що зменшення нахилу торця пуансона  $\beta$  сприяє збільшенню зони максимальних деформацій за шириною, що покращує пропрацювання дна деталі.

6. Порівняння результатів, отриманих моделюванням МСЕ, з даними експериментальних досліджень з видавлювання конічних стаканів з алюмінієвого сплаву інструментами з кутами нахилу  $10^\circ$ , показало задовільну відповідність характеру формозміни заготовки на послідовних стадіях процесу видавлювання.

#### Список використаної літератури

1. Bhaduri A. Extrusion. *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. Springer Series in Materials Science*, 264. 2018, 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).
2. 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.
3. Евстратов В. А., Кротенко Г. А., Левченко В. Н. Математическое моделирование процессов выдавливания в условиях трехмерного течения. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА, № 2 (23). 2010, С. 8–15.
4. Грудкіна Н.С., Алієв І.С., Малій Х.В., Левченко В.М. Розвиток енергетичного методу балансу потужностей на основі розширення бази кінематичних модулів складної конфігурації. *Математичне моделювання*. 2(45) Кам'янське: DSTU. 2021, С. 81–90. <http://matmod.dstu.dp.ua/issue/view/14851>
5. Алиева Л. И. Совершенствование процессов комбинированного выдавливания : монография. Краматорск: ООО «Тираж–51». 2018, 352 с. ISBN 978-966-379-846-2.
6. Kalyuzhnyi V.L., Aliieva L.I., Kartamyshev D.A., Savchinskii I.G. Simulation of cold extrusion of hollow parts. *Metallurgist*. 61. 5–6. 2017, pp. 359–365. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>.
7. Aliieva L., Kartamyshev D. Combined radial-forward extrusion of hollow parts like cups. *XVIII International Scientific Conference 'New Technologies and Achievements in Metallurgy, Material Engineering, Production Engineering and Physics'*. Series: Monografie. Częstochowa, No 68. 2017, pp. 108–113.
8. Alieva L., Zhibankov Y. Radial-forward extrusion with a movable mandrel. *Metallurgical and Mining Industry*. 11. 2015, pp. 175–183.
9. Aliiev I., Aliieva L., Grudkina N., Zhibankov Ya. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion. *Metallurgical and Mining Industry*. 3(7). 2011, pp. 17–22. <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/17Aliiev.pdf>
10. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Abdi Sobbouhi E. Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*. 25. 2010, pp. 857–863.
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*, 113. 2001, pp. 136–140.



12. Farhoumand A., Ebrahimi R. Analysis of forward–backward-radial extrusion process. *Materials and Design*. 30. 6. 2009, pp. 2152–2157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.025>.
13. Aliiev I.S., Gnezdilov P.V. Comparative analysis of methods for extrusion of hollow conical parts. *XVII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering»*: Series: Monografie. No 56. Częstochowa. 2016, pp. 179–182.
14. Алиев И.С., Корденко М.Ю., Самоглядов А.Д.. Комбинированное выдавливание полых конических деталей. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА, № 2 (47). 2018, С. 90–95.
15. Пат. 141858 Україна. (2020). Спосіб виготовлення деталей типу гільз. Алієва Л.І., Калюжний В.Л., Корденко М.Ю., Кузенко О.А., Самоглядов А.Д.. № u201911074; заявл. 11.11.19; опубл. 27.04.20, Бюл. № 8.

### References

- [1] Bhaduri A. (2018). Extrusion. *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. Springer Series in Materials Science*, 264. 599–646. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13) [In English].
- [2] Aliiev I.S., Hrudkina N.S., Malii Kh.V., Tagan L.V. (2021). Modeluvannja ta rozrobka protseviv tochnogo obemnogo shtampuvannja vidavluvannjam: monografiya [Modeling and development of precision volumetric extrusion stamping processes: monograph]. Kramatorsk: DSEA. 208 p. ISBN 978-617-7889-08-2. [In Ukrainian].
- [3] Yevstratov V.A., Krotenko G.A., Levchenko V.N. (2010) Mathematical simulating of extrusion processes with three-dimensional flow conditions. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2 (23), pp. 8–15. [In Russian].
- [4] Grudkina N.S., Aliiev I.S., Malii Kh.V., Levchenko V.M. (2021). Rozvitok energetichnogo metodu balansu potujnostej na osnovi rozshirennja bazi kinematichnih modiliv skladnoji konfiguratsii [Development of the energy method of power balance based on the expansion of the database of kinematic modules of complex configuration]. *Mathematical modeling*. 2(45) Kamianske: DSTU, pp. 81–90. <http://matmod.dstu.dp.ua/issue/view/14851> [In Ukrainian].
- [5] Aliieva L.I. (2018) Improvement of combined extrusion processes: monograph, Kramatorsk: LLC «Tirazh–51». ISBN 978-966-379-846-2. [In Russian].
- [6] Kalyuzhnyi V.L., Aliieva L.I., Kartamyshev D.A., Savchinskii I.G. (2017). Simulation of cold extrusion of hollow parts. *Metallurgist*. 61. 5-6, pp. 359–365. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>. [In English].
- [7] Aliieva L., Kartamyshev D. (2017). Combined radial-forward extrusion of hollow parts like cups. *XVIII International Scientific Conference ‘New Technologies and Achievements in Metallurgy, Material Engineering, Production Engineering and Physics’*. Series: Monografie. Częstochowa, No 68, pp. 108–113. [In English].
- [8] Aliieva L., Zhbakov Y. Radial-forward extrusion with a movable mandrel. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. 11. pp. 175–183. [In English].
- [9] Aliiev I., Aliieva L., Grudkina N., Zhbakov Ya. (2011). Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion. *Metallurgical and Mining Industry*. 3(7), pp. 17–22. <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/17Aliiev.pdf> [In English].
- [10] Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Abdi Sobbouhi E. (2010). Numerical studies of some important design factors in radial–forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*. 25, pp. 857–863. [In English].
- [11] Lee Y.S., Hwang S.K., Chang Y.S., Hwang B.B. (2001). The forming characteristics of radial-forward extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 113, pp. 136–140. [In English].
- [12] Farhoumand A., Ebrahimi R. Analysis of forward–backward-radial extrusion process. *Materials and Design*. 2009. 30. 6, pp. 2152–2157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.025> [In English].

- [13] Aliiev I.S., Gnezdilov P.V. (2016). Comparative analysis of methods for extrusion of hollow conical parts. *XVII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering»*: Series: Monografie. No 56. Częstochowa, pp. 179–182. [In English].
- [14] Aliiev I.S., Kordenko M.Yu., Samoglyadov A.D. (2018). Kombinirovannoe vidavlivaniye polih konicheskikh deyalaj [Combined extrusion of hollow conical parts]. *Obrabotka materialov davleniem. [Materials Working by Pressure]*. Kramatorsk: DSEA. 2 (47). pp. 90–95. [In Russian].
- [15] Patent 141858 Ukraine. (2020). Sposib виготовлення деталей типу гільз [The method of manufacturing sleeve-type parts]. Aliieva L.I., Kalyuzhnyi V.L., Kordenko M.Yu., Kuzenko O.A., Samoglyadov A.D. Bull. No. 8. [In Ukrainian].

*Надійшла до редколегії 06.04.2023*