

А.Є. Тітаренко ^[0000-0002-0407-5144], В.М. Горностай ^[0000-0001-5766-931X],
С.Ф. Сабо́л ^[0009-0004-8585-508X]

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ ЗАГОТОВКИ НА ПРОЦЕС ГАРЯЧОГО ЗВОРОТНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ КРУГЛИХ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ З ВИСОКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Методом скінчених елементів створено математичні моделі і проведено дослідження процесів гарячого зворотного видавлювання з високовуглецевої сталі порожнистих виробів із заготовок круглого і квадратного перерізів. Використано пластичну модель металу. Визначено швидкість деформування для забезпечення температурного режиму гарячої деформації на протязі процесів формоутворення виробів. Для двох форм заготовок отримано залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансонів, розподіли питомих зусиль на контактуючих поверхнях деформованих заготовок з інструментом. Приведено розподіли температури, компонент напружень і деформацій для кінцевих стадій видавлювання. Пропрацювання структури металу пластичною деформацією оцінено по розподілах інтенсивності деформацій. Виявлено кінцеві форми та розміри виробів. Виконано порівняння отриманих результатів моделювання процесу видавлювання.

Ключові слова: гаряче зворотне видавлювання, порожнистий виріб, метод скінчених елементів, заготовка круглого і квадратного перерізу, зусилля, питомі зусилля, температура, напруження, деформації.

A. Titarenko, V. Hornostai, S. Sabol

INFLUENCE OF THE BILLET GEOMETRIC SHAPE ON THE PROCESS OF HOT BACKWARD EXTRUSION OF HOLLOW PRODUCTS FROM HIGH-CARBON STEEL

Mathematical models were developed using the finite element method to investigate the hot reverse extrusion of high-carbon steel hollow products from round and square billets. A plastic metal model was employed. The deformation rates were determined to maintain the required thermal conditions for hot deformation throughout the forming process. For both billet shapes, the relationships between extrusion force and punch displacement were established, along with the distribution of specific forces on the contact surfaces between the deformed billets and the tooling. The distribution of temperature, stress components, and strains for the final stages of extrusion are presented. The refinement of the metal structure through plastic deformation was evaluated based on strain intensity distributions. The final shapes and dimensions of the products were identified. A comparative analysis of the simulation results for the extrusion processes was performed.

Keywords: hot reverse extrusion, hollow product, finite element method, round and square billets, force, specific forces, temperature, stress, strain.

Постановка проблеми. Для виготовлення круглих порожнистих виробів з високовуглецевої сталі в умовах серійного і масового виробництва раціонально використовувати процес гарячого зворотного видавлювання. Основними перевагами гарячого пластичного формоутворення є зменшення зусилля деформування та збільшення ресурсу пластичності металу. Такі вироби в якості напівфабрикатів отримують на перших переходах крупносерійного штампування корпусів спеціального призначення в оборонній промисловості. При цьому, крім потрібної форми напівфабрикатів, необхідно забезпечити певне пропрацювання структури металу пластичною деформацією деформованого металу для забезпечення заданих механічних властивостей по висоті стінок і в донних частинах. На собівартість напівфабрикатів суттєво впливають витрати металу та затрати на виготовлення деформуючого інструменту. Тому збільшення коефіцієнта використання металу і підвищення стійкості інструменту є актуальними задачами, вирішення яких проведе до зниження собівартості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати моделювання методом скінчених елементів (МСЕ) в середовищі DEFORM по впливу швидкості деформування на процес гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів із маловуглецевої сталі представлені в джерелі [1, 2]. Дослідження параметрів процесу гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів із маловуглецевої сталі за допомогою проведення чисельних експериментів з використанням МСЕ приведені в джерелі [3].

В джерелах [4,5] моделюванням з застосуванням МСЕ і програми DEFORM визначено вплив форми деформуючого інструменту на процеси обтиску і видавлювання порожнистих деталей із високовуглецевої сталі. Це дозволило оптимізувати процес формоутворення шляхом застосування спеціалізованого деформуючого інструменту.

Дослідження структури матеріалу при гарячому видавлюванні описано в статті [6]. Авторами за допомогою чисельних експериментів встановлено, що при деформуванні заготовки з матеріалу In718, нагрітої до 1000-1050° С та швидкості переміщення деформуючого інструменту 5 мм/с утворюється рівномірна дрібнозерниста структура матеріалу у виробі.

© А.Є. Тітаренко, В.М. Горностай, С.Ф. Сабо́л

Дослідження процесу обертального-зворотного видавлювання обертовою головкою описані в джерелі [7]. В роботі використано МСЕ та проведений натурний експеримент цього процесу. Було встановлено, що при деформуванні даним способом матеріалу STD 810 кінцевий виріб набуває покращених механічних властивостей.

Дослідження новітньої схеми зворотного деформування порожнистої заготовки описано в роботі [8]. Схема деформування відрізняється від класичної наявністю нерухомої втулки між пуансоном та матрицею, в яку встановлюється заготовка. Під час деформування, пуансон діє на заготовку в отворі втулки, внаслідок чого матеріал починає текти між матрицею та втулкою і заготовка набуває необхідної форми. Дослідження проведено за допомогою МСЕ та встановлено, що за допомогою деформування з застосування даної схеми, збільшується ступінь деформації, що позитивно впливає на структуру деформованого матеріалу.

В статті [9] з використанням МСЕ проведені чисельні розрахунки деформування порожнистого виробу з титанового сплаву Ti-6Al-4V та здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів з натурним експериментом. Отримані результати мають хорошу збіжність, що дозволяє їх використовувати для моделювання деформуючого інструменту в схожих процесах.

Способи усунення небажаних дефектів, які виникають при видавлюванні заготовки квадратного перерізу описано в роботі [10], зокрема усунення виступів на торці виробу за допомогою утворення фасок в кутових зонах такої заготовки.

Вплив коефіцієнта тертя на процес гарячого видавлювання порожнистих виробів з маловуглецевої сталі із заготовок круглого і квадратного перерізу описано в джерелі [11]. Отримані результати при моделюванні МСЕ в програмі DEFORM вказують на те, що при деформуванні заготовки квадратного перерізу тертя здійснює менший вплив на процес формоутворення, завдяки чому отримано менше зусилля деформування в порівнянні із заготовкою круглого перерізу.

З аналізу літературних джерел встановлено, що для гарячого видавлювання круглих порожнистих виробів використовують вихідні заготовки круглого і квадратного перерізу. Практично відсутні дані для видавлювання таких виробів із заготовок з високовуглецевої сталі.

Постановка завдань. Мета дослідження полягає в визначенні впливу заготовки круглого і квадратного перерізу на параметри процесу гарячого видавлювання круглих порожнистих виробів із високовуглецевої сталі.

Завданнями дослідження є визначення і порівняння силових режимів видавлювання і питомих зусиль на деформуючому інструменті, розподілів компонент напружень і деформацій по об'ємах виробів та проведення оцінки пропрацювання структури металу пластичною деформацією.

Форму і розміри виробу, схему гарячого видавлювання виробу та розміри заготовок зображено на рис. 1. На рис. 1а показано ескіз виробу із загальним виглядом з розрізом. Для отримання виробу використано схему зворотного видавлювання, яку для заготовки круглого перерізу наведено на рис. 1б. Ліворуч від вісі симетрії наведено початок процесу деформування, а праворуч – в кінці процесу. Заготовку 1 встановлено в матриці 3 з центруванням за допомогою фаски. Деформування здійснено за допомогою пуансона 2, який переміщується зі швидкістю V_0 , та отримано виріб 5. При цьому метал заповнює порожнину на виштовхувачі 4 з утворенням виступу нижньому торці виробу 5. Видалення виробу 5 із матриці 3 здійснюється за допомогою виштовхувача 4.

Заготовки круглого і квадратного перерізів з розмірами після нагрівання та фасками для центрування в матриці із загальними виглядами приведено відповідно на рис. 1в і рис. 1г. Заготовки із сталі С60 мали однаковий об'єм.

Моделювання процесу гарячого деформування здійснено з використанням МСЕ і програми Deform 3D з використанням пластичної моделі металу. Початкова температура заготовок була 1000°С, швидкість переміщення деформуючого інструменту (пуансона) складала $V_0=60$ мм/с і забезпечила режим гарячої деформації. Температура деформуючого інструменту була 20 °С. Тертя враховано по Зібелю з коефіцієнтом тертя $\mu=0,3$.

Викладення основного матеріалу. Положення деформуючого інструменту, зміну форми заготовки та отримання виробу при моделюванні видавлювання заготовок круглого і квадратного перерізу зображено на рис. 2. Початкове положення в розрізі половини заготовки круглого перерізу 1, пуансона 2, матриці 3 і виштовхувача 4 представлено на рис. 2а. На рис. 2б наведено положення на проміжній стадії видавлювання, а на рис. 2в показано положення в кінці видавлювання з отриманням виробу 5. Робочий хід пуансона 2 склав 250 мм. Аналогічні положення для видавлювання заготовки квадратного перерізу приведено на рис. 2г – рис. 2е. Робочий хід пуансона

2 склав 350 мм. При деформуванні заготовки квадратного перерізу на торці стінки виробу утворюються чотири виступи, які утворюються в кутових зонах заготовки.

Для вибору пресового обладнання та проектування штампового оснащення, призначення матеріалу для деформуючого інструмента і визначення кількості бандажів для матриць потрібно знати зусилля деформування та розподіли питомих зусиль на контактуючих поверхнях деформованих заготовок з інструментом. Питомі зусилля можна оцінити по розподілах нормальних напружень σ_n на таких поверхнях, які дозволяє виявити програма Deform.

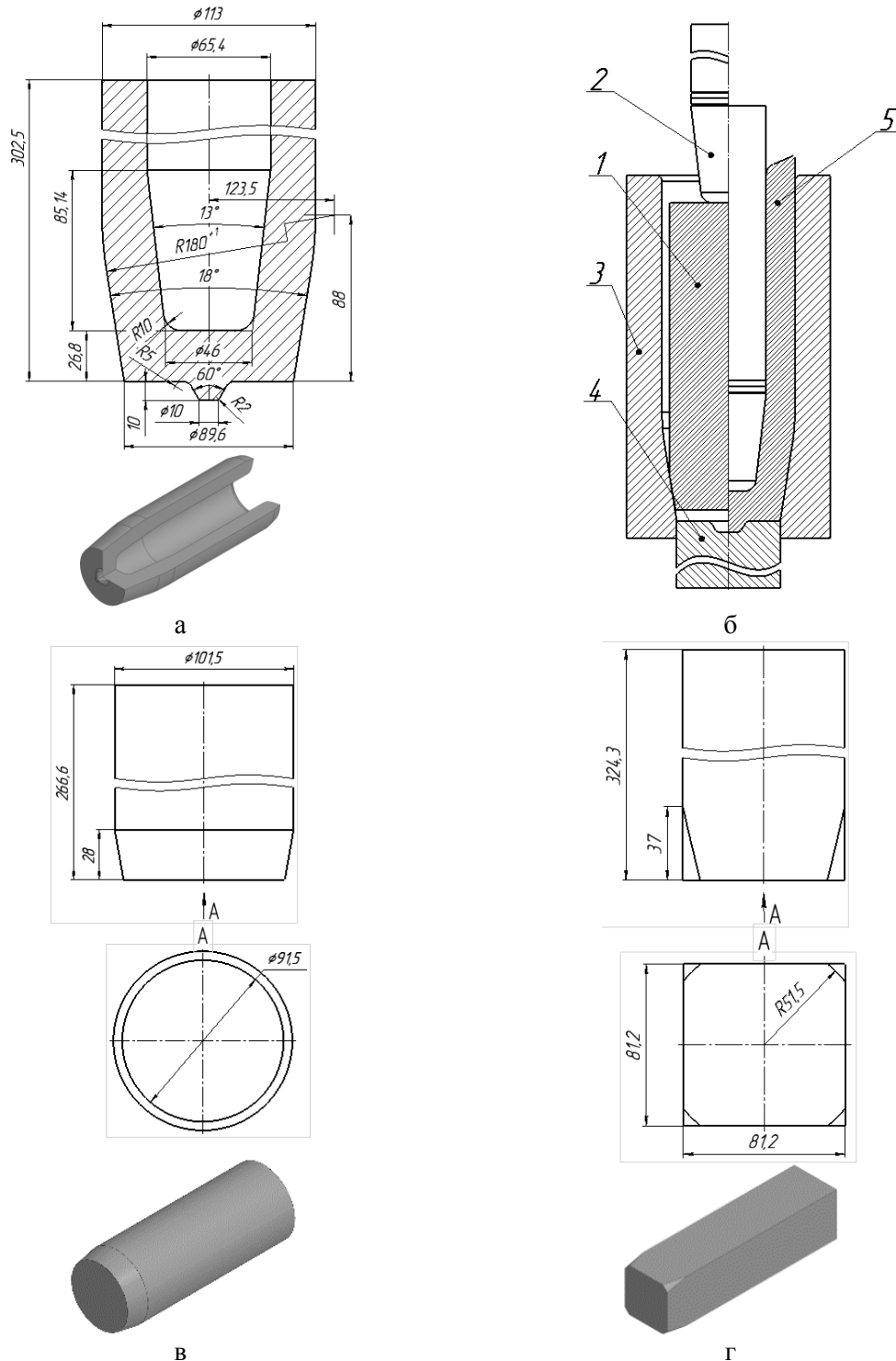


Рис. 1. Розміри виробу (а), схема видавлювання (б), розміри заготовок із загальним виглядом для круглого перерізу (в) та для квадратного перерізу (г).

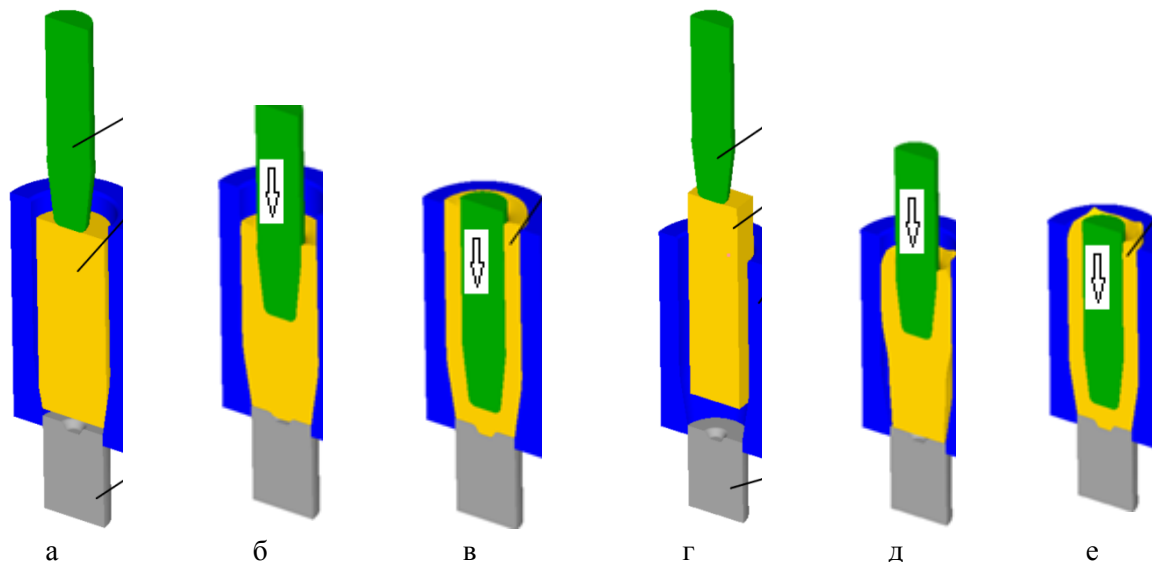
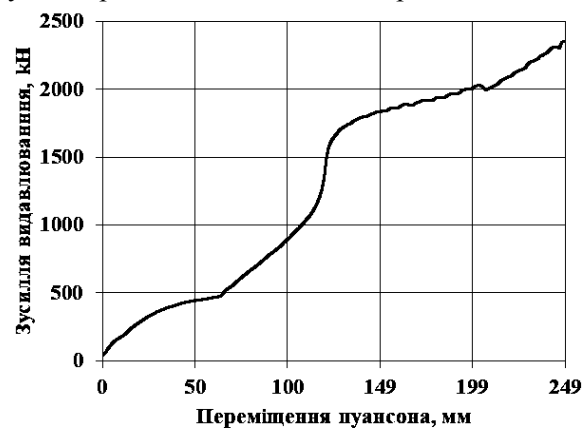
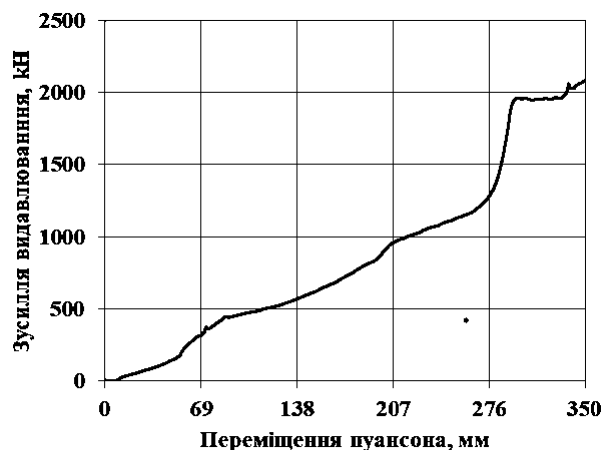


Рис. 2. Положення інструменту, зміна форми заготовки та отримання виробу при моделюванні (1 – заготовка, 2 – пуансон, 3 – матриця, 4 – виштовхувач, 5 – виріб): а, б і в – видавлювання заготовки круглого перерізу; г, д і е – видавлювання заготовки квадратного перерізу

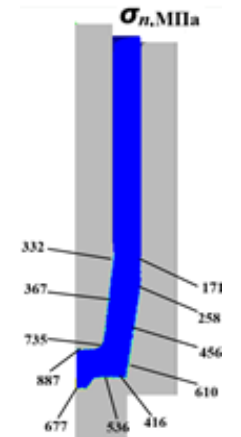
Залежності зусилля видавлювання, яке виникає на пуансоні, від його переміщення для розглянутих варіантів видавлювання представлено на рис. 3.



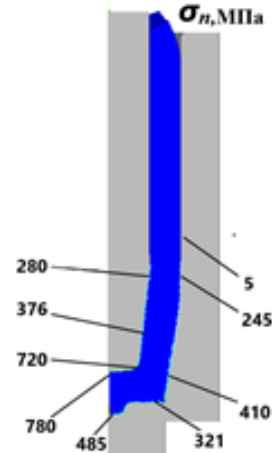
а



в



б



г

Зусилля видавлювання поступово зростає зі збільшенням переміщення пуансонів. При деформуванні заготовки круглого перерізу (рис. 3а) максимальне значення зусилля досягає 2353 кН. На рис. 3б наведено розподіли напружень σ_n для цієї заготовки. Максимальні значення питомих зусиль у межах $\sigma_n = 887 \div 735$ МПа зафіксовано на контактній поверхні торця пуансона з виробом. На поверхні контакту з виштовхувачем значення становлять $667 \div 416$ МПа, а на конусній поверхні

матриці 610÷258 МПа. Встановлено, що для даної схеми видавлювання конструкція матриці не потребує застосування бандажів. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона наведено на рис. 3г. В кінці видавлювання отримано максимальну величину зусилля 2046 кН. Різниця в зусиллях видавлювання склала 12%. Розподіл напружень σ_n при деформуванні заготовки квадратного перерізу представлено на рис. 3г. Використання цього варіанту забезпечує зниження питомих зусиль до рівня 780÷720 МПа на торці пуансона, 485÷381 на виштовхувачі та 410÷245 МПа на конусній поверхні матриці. Зменшення напружень сприяє підвищенню експлуатаційної стійкості деформуючого інструменту.

Розподіли температури у об'ємах четвертих частин виробів в кінці процесів видавлювання зображено на рис. 4. При деформуванні заготовки круглого перерізу (рис. 4а) температура в внутрішніх шарах металу верхньої частини стінки виробу склала 980÷900 °С. У шарах металу зовнішньої поверхні цієї частини стінки виробу отримано зменшення температури до 850÷680 °С. У донній частині виробу температура дорівнює 980÷700 °С, а у шарах металу біля пуансона температура зменшується до 600÷550 °С. В зоні контакту з конусною поверхнею матриці отримано зниження температури до 550÷520 °С.

При деформуванні заготовки, квадратного перерізу (рис. 4б) температура деформованого металу по висоті стінки виробу знаходиться у межах 980÷920 °С. В зовнішніх шарах металу стінки отримано 830÷620 °С, а у шарах металу стінки зі сторони порожнини - 910÷710 °С. Спостерігається менше охолодження в порівнянні з попереднім випадком по причині меншого часу контакту деформованої заготовки з матрицею в процесі видавлювання.

Також має місце менше охолодження в зонах біля торця пуансону, біля поверхні матриці та виштовхувача у донній частині виробу. У цих зонах отримано температуру у межах 830÷598 °С.

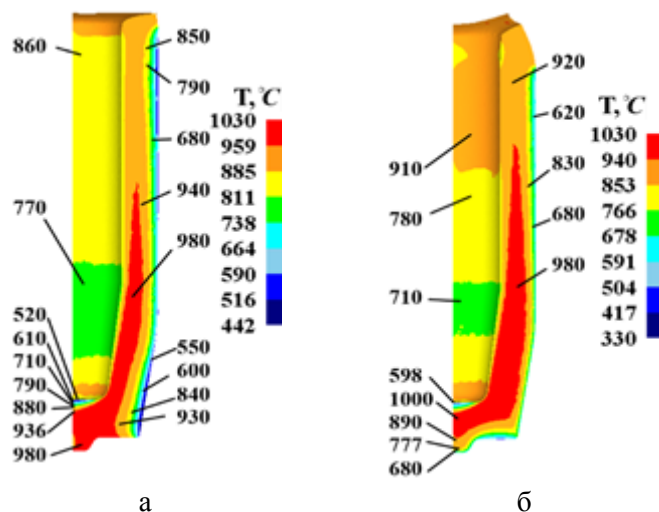


Рис. 4. Розподіли температури у об'ємах четвертих частин виробів в кінці процесів видавлювання: а – при деформуванні заготовки круглого перерізу; б – при деформуванні заготовки квадратного перерізу

Також має місце менше охолодження в зонах біля торця пуансону, біля поверхні матриці та виштовхувача у донній частині виробу. У цих зонах отримано температуру у межах 830÷598 °С.

Моделюванням встановлено напружено-деформований стан, який отримано в кінці процесів видавлювання. На рис. 5 зображено розподіли нормальних напружень σ_z , σ_y і σ_x у четвертих частинах виробів. На цих рисунках ліворуч наведено розподіл при видавлюванні заготовки круглого перерізу, а праворуч – для видавлюванні заготовки квадратного перерізу. Вигляди розподілів перерахованих компонент напружень практично не відрізняються для розглянутих перерізів заготовок. Розподіли

напружень σ_z показано на рис. 5а. Для двох варіантів видавлювання у верхніх частинах стінок виробів виникають розтягувальні напруження у межах $\sigma_z = 110 \div 100$ МПа. У стінках біля донних частин виробів ці напруження стають стискаючими $\sigma_z = -100 \div -390$ МПа, а у донних частинах вони досягають значень у межах $\sigma_z = -640 \div -900$ МПа. Деяко зменшуються розтягувальні напруження σ_y та σ_x у верхніх частинах стінок і знижуються по абсолютній величині стискаючі напруження σ_y та σ_x у нижніх частинах стінок та донних частинах виробів (рис. 5б і рис. 5в).

Розподіли кінцевих деформацій ε_z , ε_y , ε_x , та інтенсивності деформацій ε_i у четвертих частинах виробів представлено на рис. 6. Тут також ліворуч наведено розподіл після видавлювання заготовки круглого перерізу, а праворуч – заготовки квадратного перерізу. На рис. 6а показано розподіли деформацій ε_z . В шарах металу стінок зі сторони порожнини виникають розтягувальні деформації у межах $\varepsilon_z = 0,3 \div 0,4$ та змінюються до значення $\varepsilon_z = 0,15$ у зовнішніх шарах металу стінки після видавлювання заготовки круглого перерізу та до нульових значень після деформування заготовки квадратного перерізу.

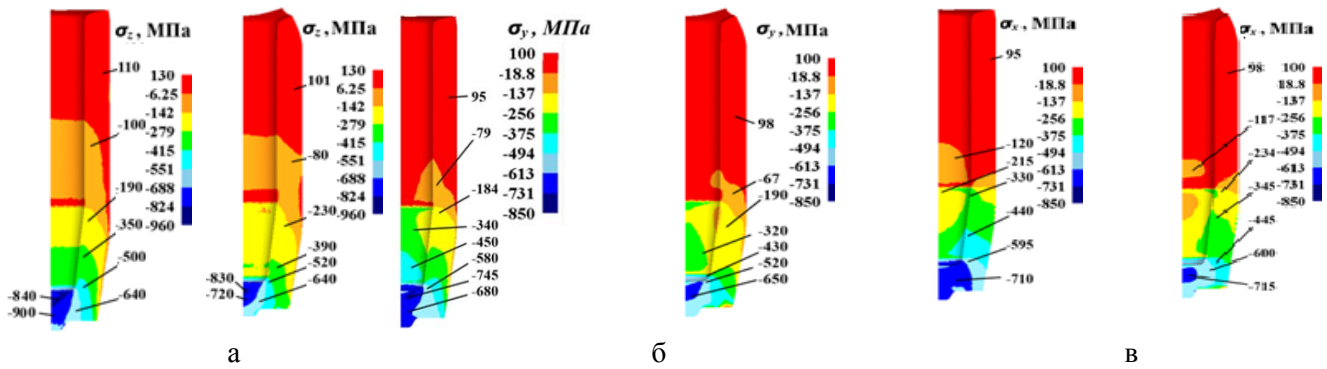


Рис. 5. Розподіли нормальних напружень σ_z , σ_y , σ_x у четвертих частинах виробів в кінці видавлювання заготовок круглого і квадратного перерізів: а – розподіл σ_z , б – розподіл σ_y , в – розподіл σ_x

В області донної частини під торцем пуансона виникають стискаючі деформації у межах $\varepsilon_z = -0,3 \div -0,4$ після деформування двох варіантів заготовок. У стінках виробів та у донних частинах отримано розтягуювальні деформації ε_y у межах $\varepsilon_z = 0,22 \div 0,4$ (рис. 6б). При цьому такі величини розповсюджуються на три четверти по ширині стінки для видавлювання заготовки круглого перерізу і займають половину ширини стінки для видавлювання заготовки квадратного перерізу

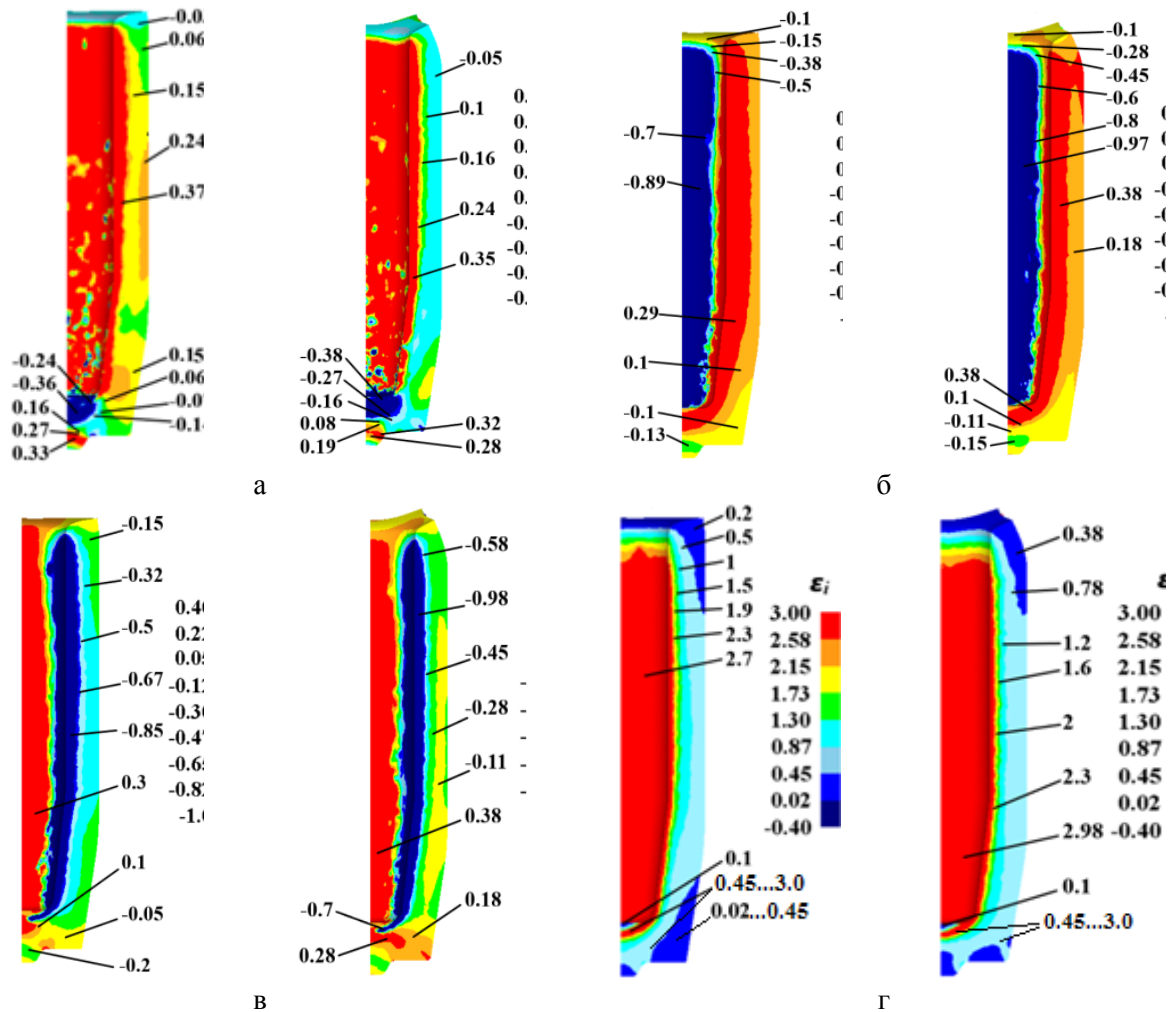


Рис. 6. Розподіли кінцевих деформацій ε_z , ε_y , ε_x і ε_i у четвертих частинах виробів після видавлювання заготовок круглого і квадратного перерізів: а - розподіл ε_z , б - розподіл ε_y , в - розподіл ε_x , г - розподіл ε_i

У зовнішніх шарах металу стінок має отримано $\varepsilon_y = 0,05 \div 0,22$ для видавлювання двох варіантів заготовок. У донних частинах виробів також має місце практично однаковий розподіл деформацій ε_y . На рис. 6в зображено розподіли деформацій ε_x . Донна частина виробу після видавлювання

заготовки круглого перерізу має невелику область з розтягувальними деформаціями у межах $\varepsilon_x = 0,05 \div 0,4$ та значну область зі стискаючими деформаціями до значення $\varepsilon_x = -0,12$. Після видавлювання заготовки квадратного перерізу у донній частині отримано тільки розтягувальні деформації у межах $\varepsilon_x = 0,05 \div 0,4$. У стінках отримано стискаючі деформації ε_x для двох варіантів заготовок. Результуюче пропрацювання структури металу пластичною деформацією можна оцінити по величині розподілу інтенсивності деформацій ε_i , розподіли яких представлено на рис. 6г. По ширині і висоті стінок. Значення інтенсивності деформацій змінюються від величин $\varepsilon_i = 2,58 \div 3,00$ у шарах металу зі сторони порожнини до $\varepsilon_i = 0,45 \div 0,87$ в шарах металу біля зовнішньої поверхні виробів. Форма перерізу заготовок суттєво впливає на пропрацювання пластичною деформацією донних частин виробів. Після видавлювання заготовки круглого перерізу у цій частині отримано дві області зі зміною величин деформацій у межах $\varepsilon_i = 0,02 \div 0,45$ та область зі значеннями від $\varepsilon_i = 0,45$ до $\varepsilon_i = 3,00$. Квадратний переріз заготовки забезпечує практично одну область, в якій величини деформацій змінюються у межах $\varepsilon_i = 0,45 \div 3,0$. Таким чином, використання заготовки квадратного перерізу забезпечує інтенсивне пропрацювання пластичною деформацією донної частини виробу.

Кінцеві форма та розміри виробів після видавлювання різних заготовок показано на рис. 7. Після видавлювання заготовки круглого перерізу на торці стінки виробу зі сторони порожнини утворюється утяжина (рис. 7а). При деформуванні заготовки квадратного перерізу (рис. 7б) також утворюється утяжина на торці стінки зі сторони порожнини та має місце викривлення стінки зі сторони зовнішньої поверхні. В обох випадках необхідна додаткова операція підрізання торців. Інші розміри виробів забезпечуються деформуючим інструментом згідно креслення виробу (див. рис. 1а).

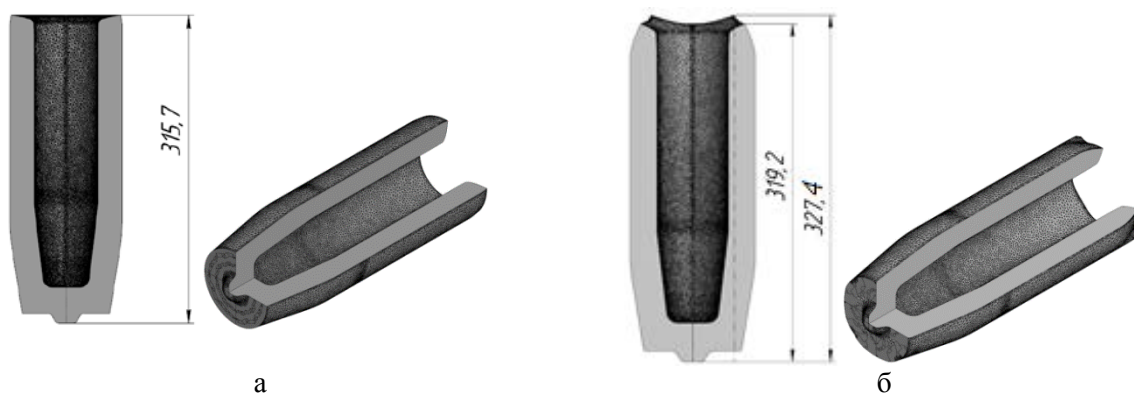


Рис. 7. Кінцеві форми та розміри половин виробів та загальні вигляди з розрізом: а – після видавлювання заготовки круглого перерізу, б - після видавлювання заготовки квадратного перерізу

Висновки. За допомогою методу скінчених елементів створено математичні моделі та проведено розрахункове дослідження процесів гарячого зворотного видавлювання з високовуглецевої сталі круглих порожнистих виробів із заготовок круглого і квадратного перерізів.

Встановлено залежності зусиль видавлювання від переміщення пуансонів. Максимальне значення зусилля деформування заготовки квадратного перерізу менше на 12%.

Визначено розподіли компонент напружень і деформацій у деформованому металі виробів. По розподілу інтенсивності деформацій проведено оцінку пропрацювання структури металу пластичною деформацією. Використання заготовки квадратного перерізу забезпечує більш інтенсивне пропрацювання донної частини виробу.

Виявлено кінцеві форми і розміри виробів після видавлювання. Використання різних форм заготовок потребує додаткової операції підрізання торців виробів. Було встановлено, що при видавлюванні квадратною заготовки більші витрати металу на обрізку.

Список використаних джерел

1. Драгобецький В. В. Вплив швидкості деформування на процес гарячого видавлювання з роздачою круглих порожнистих напівфабрикатів / В. В. Драгобецький, О. В. Калюжний, В. Л. Калюжний, С. В. Ситник // Mech. Adv. Technol. — 2024. — Vol. 8, No. 1. — Pp. 45–53. — DOI: 10.20535/2521-1943.2024.8.1(100).297296.
2. Калюжний В. Л. Напівгаряче та гаряче зворотне видавлювання з роздачою осесиметричної порожнистої деталі / В. Л. Калюжний, С. В. Ситник, Д. В. Савченко, О. В. Чучин // Обробка

- матеріалів тиском : зб. наук. пр. — Краматорськ : ДДМА, 2023. — № 1(52). — С. 10–19. — DOI: 10.37142/2076-2151/2023-1(52)10.
3. Калюжний В. Гарячий обтиск в матриці спеціального профілю вісесиметричних порожнистих заготовок із високовуглецевої сталі / В. Калюжний, С. Ситник, А. Титаренко // Mech. Adv. Technol. — 2022. — Vol. 6, No. 2. — Pp. 187–194. — DOI: 10.20535/2521-1943.2022.6.2.264785.
 4. Калюжний В. Л. Гаряче видавлювання із високовуглецевої сталі конусних порожнистих виробів / В. Л. Калюжний, Л. І. Алієва, О. С. Ярмоленко, С. В. Ситник // Mech. Adv. Technol. — 2022. — Vol. 6, No. 3. — Pp. 302–308. — DOI: 10.20535/2521-1943.2022.6.3.269897.
 5. Hu X. Numerical Simulation for Microstructure Evolution in In718 Alloy During Cylindrical Cup Backward Extrusion / X. Hu et al. // Advanced Materials Research. — 2013. — Vol. 650. — Pp. 92–97. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.650.92.
 6. Zota S. Theoretical and experimental analysis of the backward extrusion process with a rotational die of AZ31 alloy / S. Zota // Metabk. — 2021. — No. 60 (1–2). — Pp. 36–38.
 7. Hosseini S. H. Applicability of a modified backward extrusion process on commercially pure aluminium / S. H. Hosseini, K. Abrinia, G. Faraji // Materials and Design. — 2015. — Vol. 65. — Pp. 521–528. — DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.043.
 8. Yeom J.-T. Prediction of Microstructure Evolution in Hot Backward Extrusion of Ti-6Al-4V Alloy / Jong-Taek Yeom et al. // Journal of Metallurgy. — 2012. — Vol. 2012. — Pp. 1–6. — DOI: 10.1155/2012/989834.
 9. Драгобецький В. В. Підвищення точності форми і розмірів порожнистих напівфабрикатів при гарячому зворотному видавлюванні із заготовок квадратного перерізу / В. В. Драгобецький, О. В. Калюжний, В. Л. Калюжний, С. В. Ситник // Mech. Adv. Technol. — 2024. — Vol. 8, No. 3. — Pp. 256–264. — DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)10.
 10. Калюжний О. В. Вплив тертя при гарячому зворотному видавлюванні порожнистих напівфабрикатів із заготовок круглого і квадратного перерізу / О. В. Калюжний, В. Л. Калюжний, С. В. Ситник // Наукові нотатки : міжвуз. зб. — Луцьк, 2024. — № 78. — DOI: 10.36910/775.24153966.2024.78.12.

Дата надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.05.2026

Дата оприлюднення: 28.05.2026