

Порівняльний аналіз гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів із заготовок круглої і квадратної форми

В.Л. Калюжний¹ • С.В. Ситник¹ • В.М. Левченко²

Received: 10 July 2023 / Revised: 28 August 2023 / Accepted: 12 September 2023

Анотація. *Проблематика.* Сучасне виробництво порожнистих виробів гарячим зворотним видавлюванням ставить задачі зменшення енергозатрат та зниження витрат металу на виготовлення таких виробів. Такі задачі можна вирішити шляхом застосування для видавлювання заготовок квадратної форми.

Мета. Визначення за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) параметрів гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів із заготовок круглої і квадратної форми та порівняння результатів теоретичних досліджень.

Методика реалізації. Теоретичні дослідження силових режимів видавлювання, питомих зусиль та напружено-деформованого стану металу проведено моделюванням з використанням МСЕ в програмному середовищі DEFORM.

Результат. За допомогою МСЕ проведено моделювання процесу гарячого зворотного видавлювання із малоуглецевої сталі порожнистого виробу з виступами на торці донної частини. Використані заготовки круглої і квадратної форми. Встановлені зусилля видавлювання, зусилля виймання пуансонів із zdeформованих заготовок та зусилля виштовхування виробів із матриць. Виявлений розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті. Визначено напружено-деформований стан та температурний розподіл у zdeформованому металі в кінці видавлювання. Проведено оцінку пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією та виконано порівняння отриманих параметрів.

Висновки. Обґрунтовано застосування заготовок квадратної форми при гарячому зворотному видавлюванні порожнистих виробів.

Ключові слова: метод скінченних елементів, гаряче зворотне видавлювання, порожнистий виріб, кругла і квадратна заготовка, температура, зусилля, напруження, деформації.

Вступ

Для виготовлення порожнистих виробів, в залежності від розмірів і марки матеріалу, використовують процеси холодного чи гарячого зворотного видавлювання. Гаряче зворотне видавлювання, яке застосовують при виробництві таких виробів великих розмірів із круглих заготовок, та проектування штампного оснащення достатньо добре описано в джерелі [1]. Для

певної номенклатури виробів, зокрема для гільз і снарядів артилерійського озброєння, в якій першим переходом штампування є зворотне видавлювання, крім потрібної форми необхідно забезпечити відповідне пропрацювання структури металу пластичною деформацією для досягнення відповідних механічних властивостей у zdeформованому металі. Використання квадратних заготовок дозволяє здешевити виробництво їх із гарячекатаних квадратних прутків. Здешевлення відбувається завдяки зменшенню витрат металу при розділенні прутків на заготовки. Крім цього, знижується розігрів матриць при гарячому видавлюванні.

Тому актуальними є дослідження, які спрямовані на визначення впливу форми вихідної форми заготовки на гаряче пластичне формоутворення порожнистих виробів.

✉ С.В. Ситник
sytnykstas@ukr.net

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

² ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, Україна

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В монографії [1] викладено рекомендації із виробничого досвіду по проектуванню технології і штампового оснащення для гарячого зворотного видавлювання із круглих заготовок порожнистих виробів із різних марок сталей.

Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) для удосконалення існуючих і розробки нових технологій по гарячому пластичному формоутворенню різноманітних виробів із кольорових металів наведено в роботі [2].

Приклад використання МСЕ для моделювання багатоперехідного моделювання гарячого пластичного формоутворення заготовок залізодорожних коліс приведено у праці [3].

В джерелі [4] шляхом моделювання МСЕ встановлені параметри гарячого штампування порожнистого виробу із високоміцного алюмінієвого сплаву B95 з інтенсивним пропрацюванням структури металу у донній частині і стінці виробу. Проведені експериментальні дослідження підтвердили результати розрахунків.

В роботі [5] авторами виконано чисельне моделювання отримання деталі типу стакан з матеріалу In718 за допомогою способу гарячого зворотного видавлювання. В різних частинах отриманої деталі досліджено структуру зерна. Автори вказують, що більш дрібну та рівномірну структуру зерна вдалося отримати із заготовки, яка перед початком зворотного видавлювання була розігріта до температур 1000–1050°C, а швидкість деформування складала 5 мм/с.

З використанням МСЕ та програми Forge, досліджено процес радіально-зворотного видавлювання роторною головкою. Також проведено натурний експеримент цього процесу за допомогою торсійного пластоміру STD 810 [6]. В результаті дослідження авторами встановлено, що при застосуванні вказаного способу, виникають напруження зсуву в отриманому виробі, що може вплинути на активацію додаткових механізмів деформації. Це в свою чергу суттєво впливає на механічні властивості кінцевого виробу.

Розглянуто та досліджено нову схему процесу зворотного видавлювання порожнистого виробу [7]. Наукова новизна схеми полягає в наступному. Між пуансоном та матрицею розміщується нерухома втулка, що має в собі отвір, в якому встановлюється заготовка. Пуансон починає деформувати заготовку в отворі втулки, внаслідок чого матеріал заготовки починає текти між втулкою та матрицею доки виріб не набуде необхідної геометричної форми. Дослідження виконано за допомогою МСЕ та проведені натурні експериментів на заготовках з алюмінію. Автори дослідження, вказують на те, що при застосуванні такої схеми зворотного видавлювання порожнистого виробу ступінь деформації збільшується, структура матеріалу покращується, що зменшує дефекти в zdeформованому металі отриманого виробу.

Процес зворотного видавлювання обміднених алюмінієвих стержнів описано в джерелі [8]. Проведено чисельні розрахунки за допомогою МСЕ в програмному комплексі DEFORM та виконано натурні експерименти. Для правильного задання матеріалу в програмі DEFORM, було попередньо випробувано на гаряче стискання алюмінієвого сплаву EN AW-1080A та мідного сплаву CW004A. Отримані дані діаграм істинних напружень заведено в програму DEFORM. Встановлено, що швидкість потоку сердечника з алюмінієвого сплаву EN AW-1080A вища ніж у втулці з мідного сплаву CW004A. Це призвело до високих значень розтягуючих напружень і відбулось руйнування виробу. Результати чисельних розрахунків МСЕ порівняно з натурним експериментом, за допомогою чого було остаточно визначено необхідну технологію для процесу зворотного видавлювання.

Використовуючи аналітичний метод розрахунку задачі досліджено процес зворотного видавлювання [9]. Автори роботи вивчали вплив заокруглення плоского пуансона на процес зворотного видавлювання. Аналітично визначено зусилля і тертя, яке виникає між пуансоном та заготовкою в процесі зворотного видавлювання. Визначено природу течії матеріалу заготовки та встановлено форму і розміри кінцевого виробу. Аналітичні розрахунки були перевірені натурним експериментом, результати якого узгоджують проведені аналітичні розрахунки.

З використанням МСЕ, виконано чисельні розрахунки процесу гарячого зворотного видавлювання порожнистого виробу з титанового сплаву марки Ti-6Al-4V [10]. Також проведено натурний експеримент такого процесу. Результати отриманих чисельних розрахунків було порівняно з результатами натурного експерименту, який показав що гаряче видавлювання титанового сплаву тісно пов'язано з фазовими перетвореннями і впливає на ріст зерен. Отримано достатньо точну збіжність результатів чисельних розрахунків з результатами натурного експерименту.

Досліджено процес зворотного видавлювання порожнистого виробу [11]. Авторами проведено чисельне моделювання з використанням МСЕ в програмному комплексі DEFORM та виконано натурні експерименти. Вихідним матеріалом для заготовки обрано алюмінієвий сплав. Заготовка циліндричної форми розміщувалась у матриці, а деформування її відбувалось за допомогою пуансона, який при поступальному русі також обертався. Завдяки такому обертанню автори стверджують, що заготовка розігрівається та в зоні деформування характер процесу змінюється з холодного на гаряче видавлювання. Як висновок цього дослідження вказано, що отриманий виріб має підвищену міцність та меншу пластичність в порівнянні зі стаціонарним способом, коли пуансон рухається поступально без обертання.

Досліджено процес комбінованого видавлювання, який поєднує в собі пряме та зворотне видавлювання

[12]. Виконано чисельні розрахунки з використанням МСЕ, а також проведено натурний експеримент. Під час розрахунків було враховано та порівняно наступні показники: вплив швидкості деформування (2 мм/с та 20 мм/с), вплив початкової температури заготовки (180°C та 200°C), а також вплив коефіцієнту тертя. В результаті цього дослідження отримано достатньо високу збіжність між проведеними чисельними розрахунками за допомогою МСЕ з проведеними натурними експериментами.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є визначення комп'ютерним моделюванням за допомогою МСЕ впливу форми вихідної заготовки із маловуглецевої сталі 25 на параметри гарячого зворотного видавлювання. Задачами дослідження є встановлення зусиль видавлювання, вилучення пуансонів із zdeформованих заготовок та виштовхування виробів із матриць і питомих зусиль на деформуючому інструменті; визначення кінцевих форм і розмірів виробів, виявлення напружено-деформованого стану і пропрацювання структури металу пластичною деформацією; порівняння отриманих результатів між собою.

Матеріали та методи дослідження

Для проведення дослідження було використано схему гарячого зворотного видавлювання, яку відображено на рис. 1 з розмірами деформуючого інструменту. Ліворуч від вісі симетрії показано положення інструменту та заготовки на початку видавлювання, а праворуч – в кінці видавлювання.

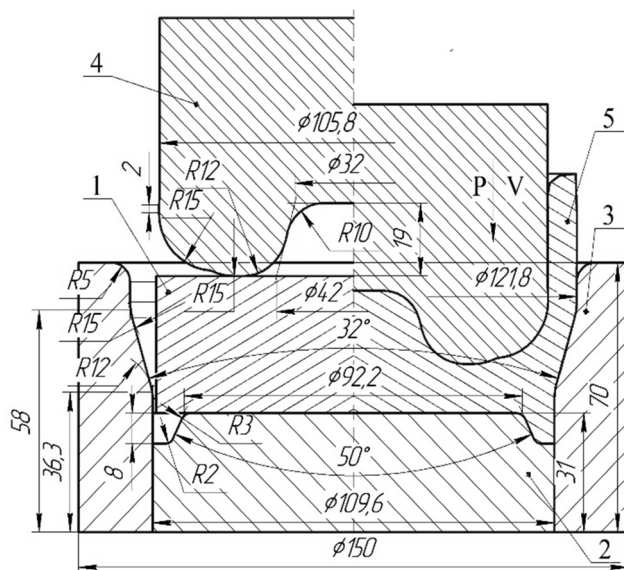


Рис. 1. Схема зворотного видавлювання: 1 – заготовка; 2 – плита; 3 – матриця; 4 – пуансон; 5 – виріб

Вихідна заготовка 1 розміщена з центруванням в циліндричній частині матриці 3 та спирається на плиту 2, яка виконує роль виштовхувача. Процес деформування зусиллям P виконується при опусканні пуансона 4 зі швидкістю V , внаслідок чого утворюється виріб 5. Після вилучення пуансона 4 із zdeформованої заготовки 5 здійснюється її виштовхування із матриці 3 за допомогою плити 2.

Для видавлювання було використано із сталі 25 циліндричну заготовку з діаметром 107,6 мм і висотою 35,5 мм та квадратну заготовку з розмірами сторін 152,2×152,2 мм та висотою 56,6 мм. Об'єми вихідних заготовок рівні між собою. Температура цих заготовок була $T = 1000^\circ\text{C}$.

Розрахунковий аналіз процесів видавлювання, вилучення пуансонів із zdeформованих заготовок та виштовхування виробів із матриць проведено методом скінченних елементів (МСЕ) з використанням програми DEFORM3D. Тертя на контактуючих поверхнях абсолютно жорсткого деформуючого інструменту з металом враховано по Зібелю з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,25$.

Результати дослідження

Розрахункові схеми в розрізі по площині ZOХ при отриманні виробу із квадратної заготовки наведено на рис. 2. Схему на початку видавлювання зображено на рис. 2а. Квадратна заготовка 1 встановлена в матриці 2 на плиті 3. Деформування виконується пуансоном 4, при опусканні якого отримується виріб 5 із виступами на донній частині зі сторони порожнини та

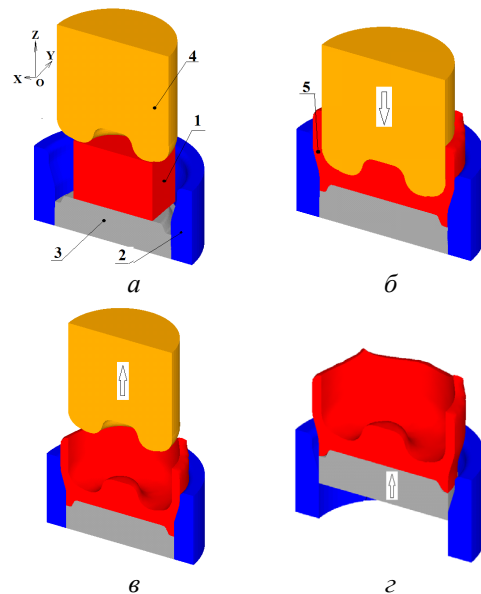


Рис. 2. Розрахункові схеми при отриманні виробу із квадратної заготовки: а – на початку видавлювання; б – в кінці видавлювання; в – після вилучення пуансона із zdeформованого виробу; г – після виштовхування виробу із матриці

на нижньому торці, а також в кутових зонах на торці стінки. Необхідно відмітити, що формоутворення виробу із круглої заготовки забезпечує отримання рівного торця стінки. При зворотному переміщенні пуансону 4 відбувається вилучення його із виробу 5, який залишається в матриці 2 (рис. 2б). Виштовхування виробу 5 із матриці 2 відбувається при переміщенні плити 3 (рис. 2с).

На рис. 3 показано розподіли температури у здеформованому металі виробів для видавлювання заготовок різної форми. Встановлено, що швидкість деформування $V = 50$ мм/сек забезпечує витримку температурного інтервалу гарячого видавлювання в обох варіантах формоутворення виробів. При видавлюванні круглої заготовки температура здеформованого металу у донній частині та у стінці виробу знижується до $T = 930^\circ\text{C}$ (рис. 3а), а при видавлюванні квадратної заготовки – до $T = 880^\circ\text{C}$ (рис. 3б).

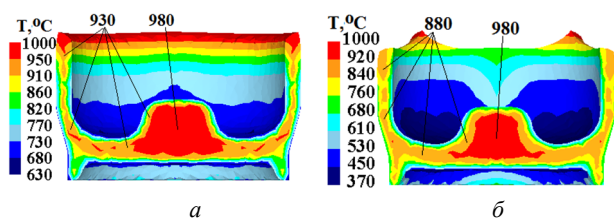


Рис. 3. Розподіли температури у здеформованому металі виробів в кінці видавлювання: а – круглої заготовки, б – квадратної заготовки

Різниця в температурах пов'язана з різною висотою вихідних заготовок. Таким чином, відкриваються можливості виконання подальшого деформування стінки виробів витягуванням з потоншенням у першому випадку в умовах гарячої деформації, а у другому – в умовах напівгарячої деформації без проміжного підігріву.

Для двох варіантів заготовок визначено силові режими видавлювання, вилучення пуансонів із здеформованих заготовок та виштовхування виробів із матриць. На рис. 4 зображено залежності зусилля видавлювання в напрямку вісі Z (див. рис. 2а) на пуансоні, виштовхувачі і матриці від переміщення пуансону. При видавлюванні із круглої заготовки такі зусилля наведено на рис. 4а. Зусилля на пуансоні і плиті постійно зростають та досягають відповідно максимальних значень 5640 кН і 5360 кН в кінці видавлювання. На матриці зусилля змінюється незначно і досягає найбільшої величини 500 кН.

Аналогічні залежності зусилля при видавлюванні прямокутної заготовки представлено на рис. 4б. Зусилля на пуансоні і плиті спочатку зростають повільно до переміщення пуансону 30 мм, а потім відбувається інтенсивне збільшення зусилля до величин 6800 кН і 6400 кН в кінці видавлювання. Зростання зусилля в порівнянні з видавлюванням круглої заготовки пов'язано з центруванням квадратної заготовки в матриці по діагоналях. При видавлюванні має місце течія металу по

поверхні плити та формоутворення стінки відбувається здеформованим металом. Крім цього, вихідна квадратна заготовка має більшу висоту і збільшується час формоутворення виробу, що приводить до охолодження здеформованого металу (див. рис 2б). Матриця в даному випадку сприймає менше зусилля, яке досягає максимального значення 260 кН. Зусилля на пуансоні необхідне для вибору пресового обладнання, а зусилля на плиті і матриці потрібне для проектування нижньої плити штампового оснащення. Таким чином, для отримання порожнистих виробів необхідної форми можна рекомендувати круглі вихідні заготовки.

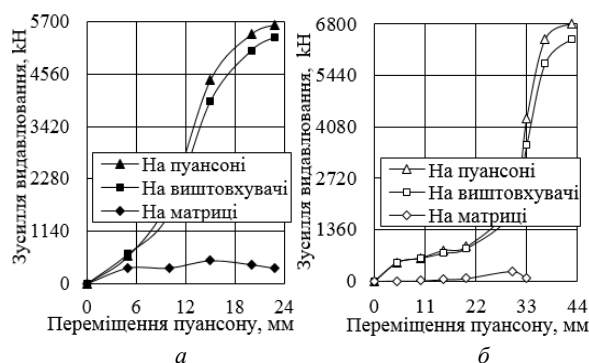


Рис. 4. Залежності зусилля видавлювання на пуансоні, виштовхувачі і матриці від переміщення пуансону: а – для круглої заготовки, б – для квадратної заготовки

На рис. 5 показано залежності зусилля вилучення із здеформованих заготовок пуансонів від їх зворотного переміщення та залежності зусилля виштовхування виробів із матриць від переміщення плит. Зусилля вилучення досягають максимальних величин на початку зворотного переміщення пуансонів і складають 10 кН після видавлювання квадратної заготовки та 8 кН після видавлювання круглої (рис. 5а). Аналогічні вигляди залежностей отримано для зусилля виштовхування виробів із матриць (рис. 5б). Найбільші значення

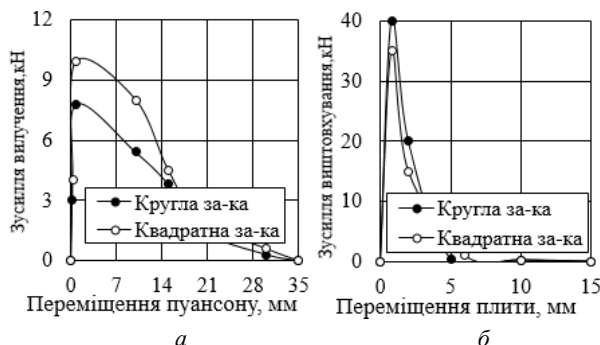


Рис. 5. Залежності зусилля вилучення пуансонів та зусилля виштовхування виробів від переміщення інструменту: а – залежність зусилля вилучення від переміщення пуансону; б – залежність зусилля виштовхування від переміщення плити

цього зусилля 40 і 35 кН отримано відповідно після видавлювання круглої і квадратної заготовок. Наведені величини зусиль необхідно враховувати при проектуванні пуансонотримачів у штамповому оснащенні.

Моделюванням визначено напружений і деформований стани металу у виробів після видавлювання згідно вибраної системи координат (див. рис. 2а). На рис. 6 зображено розподіли компонент напружень σ_z , σ_x і σ_y . Вигляди розподілів практично однакові для видавлювання круглої і квадратної заготовок, але величини напружень відрізняються. У донних частинах виробів виникають стискаючі напруження. У стінках ці напруження стають розтягувальними, досягаючи максимальних значень на внутрішніх шарах стінки. При видавлюванні круглої заготовки (рис. 6а) у донній частині виробу напруження змінюються від $\sigma_z = -140$ МПа у місці переходу стінки у цю частину до $\sigma_z = -820$ МПа в області вісі донної частини. При видавлюванні квадратної заготовки у вказаних місцях напруження σ_z змінюються від $\sigma_z = -200$ МПа до $\sigma_z = -1020$ МПа (рис. 6б).

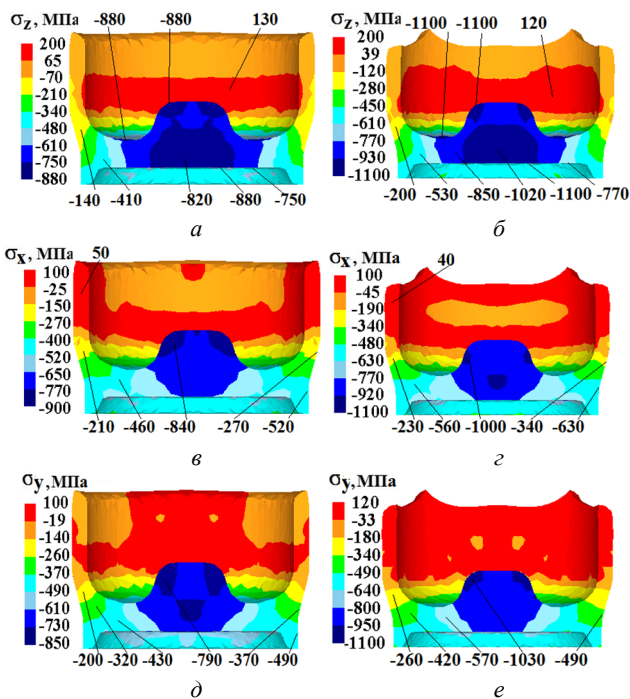


Рис. 6. Розподіли напружень σ_z , σ_x і σ_y у zdeформованому металі виробів в кінці видавлювання: а, в, д – круглої заготовки; б, з, е – квадратної заготовки

По напруженнях σ_z можна оцінити питомі зусилля, які виникають на контактуючих поверхнях пуансону і плити, що дозволяє призначити марку матеріалу та прогнозувати стійкість такого інструменту. Для цього на приведених розподілах напружень σ_z показано ве-

личини напружень на контактуючих поверхнях пуансону і плити. При видавлюванні квадратної заготовки на пуансоні питомі зусилля досягають 1100 МПа, а на поверхні плити вони змінюються у межах 770÷1100 МПа.

Напруження σ_x при видавлюванні круглої заготовки у донній частині знаходяться у межах $\sigma_x = -210 \div -710$ МПа, у виступі зі сторони порожнини отримано $\sigma_x = -840$ МПа, а на контактуючій поверхні матриці $\sigma_x = -590$ МПа (рис. 6в). Для квадратної заготовки в вказаних місцях маємо $\sigma_x = -230 \div -830$ МПа, $\sigma_x = -1000$ МПа та $\sigma_x = -630$ МПа (рис. 6з).

Приблизно таких величин досягають напруження σ_y . Для круглої заготовки отримано $\sigma_y = -200 \div -670$ МПа, $\sigma_y = -790$ МПа та $\sigma_y = -490$ МПа (рис. 6д), для квадратної - $\sigma_y = -260 \div -880$ МПа, $\sigma_y = -1030$ МПа та $\sigma_y = -490$ (рис. 6е). По максимальних абсолютних величинах напружень σ_x і σ_y на контактуючих поверхнях призначають кількість бандажів для матриць.

На рис. 7 зображено розподіли компонент деформацій ϵ_z , ϵ_x , ϵ_y і інтенсивності деформацій ϵ_i у металі виробів, які виготовлені із круглої і квадратної заготовок. При цьому має місце збільшення компонент деформацій при використанні квадратної заготовки деформації ϵ_z у донних частинах виробів стискаючі, а по висоті стінки – розтягувальні. Після видавлювання круглої заготовки у донній частині стискаючі деформації ϵ_z в області під торцем пуансону мають величину $\epsilon_z = -0,4$ (рис. 7а). Решта об'єму цієї частини має $\epsilon_z = -0,23$. В області переходу стінки у донну частину отримано $\epsilon_z = 0,8$ з подальшим зменшенням до $\epsilon_z = 0,12$ в зоні торцю стінки. Після видавлювання квадратної заготовки у наведених місцях донної частини отримано $\epsilon_z = -0,8$ і $\epsilon_z = -0,54$ (рис. 7б). По висоті стінки виробів деформації змінюються від $\epsilon_z = 0,88$ до $\epsilon_z = 0,17$.

Розтягувальні деформації ϵ_x виникають у донних частинах виробів, а у стінках вони стають розтягувальними. Після видавлювання круглої заготовки такі деформації виникають в донній частині у межах $\epsilon_x = 0,26 \div 0,82$, а у стінці - $\epsilon_x = -1,15 \div -0,4$ (рис. 7в). Після видавлювання квадратної заготовки у донній частині отримано $\epsilon_x = 0,36 \div 1,03$, а у стінці - $\epsilon_x = -1,35 \div -0,32$ (рис. 7з).

Також розтягувальні деформації ϵ_y виникають у донних частинах виробів. Для круглої заготовки у цьому місці вони знаходяться у межах $\epsilon_y = 0,18 \div 0,36$ (рис. 7д), а для квадратної - $\epsilon_y = 0,25 \div 0,48$ (рис. 7е).

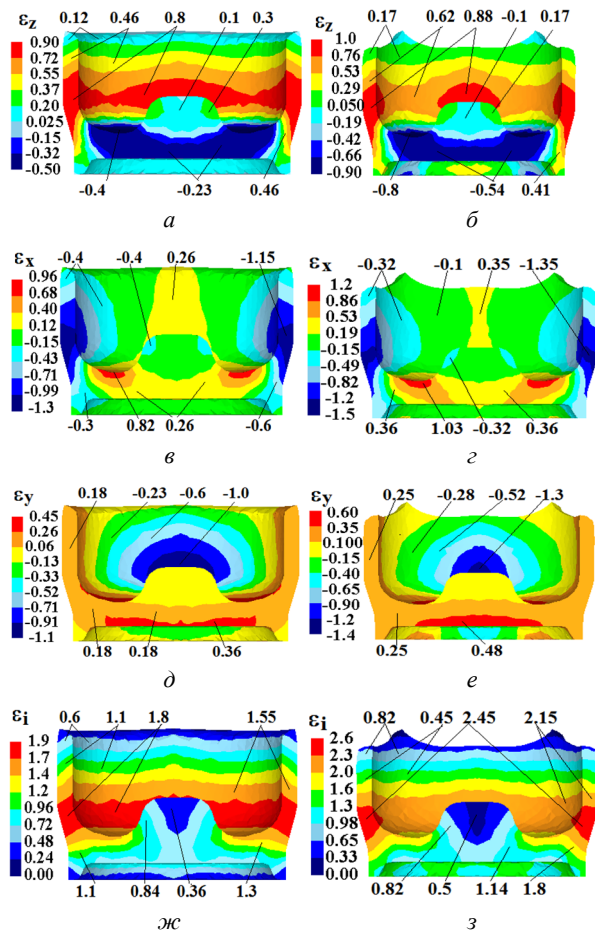


Рис. 7. Розподіли компонент деформацій ε_z , ε_x , ε_y і інтенсивності деформацій ε_i у zdeформованому металі виробів після видавлювання: *a*, *b*, *d*, *ж* – круглої заготовки; *b*, *z*, *e*, *з* – квадратної заготовки

Для деякої номенклатури порожнистих виробів, зокрема що використовується при виготовленні артилерійських боеприпасів, крім форми необхідно отримати задані механічні властивості у донній частині та по висоті стінки. Для цього потрібне певне пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією. В цілому пропрацювання можна оцінити по розпо-

ділу інтенсивності деформацій ε_i . У донній частині виробу, який отримано після видавлювання круглої заготовки, інтенсивність деформацій знаходиться у межах $\varepsilon_i = 0,84 \div 1,3$ (рис. 7ж). По висоті стінки ці деформації зменшуються від $\varepsilon_i = 1,8$ в місці переходу стінки у донну частину до $\varepsilon_i = 0,6$ в області торцю стінки. Формоутворення при видавлюванні квадратної заготовки приводить до зростання пропрацювання структури металу. У донній частині виробу отримано $\varepsilon_i = 1,14 \div 1,8$, а по висоті стінки ці деформації змінюються від $\varepsilon_i = 2,45$ до $\varepsilon_i = 0,82$.

Таким чином, використання заготовок квадратної форми приводить до більш інтенсивного пропрацювання структури металу пластичною деформацією при видавлюванні порожнистих виробів.

Моделювання МСЕ дозволили встановити параметри для проектування технології гарячого штампування порожнистих виробів із круглої і квадратної заготовки: зусилля видавлювання і виштовхування – для вибору пресового обладнання, питомі зусилля – для проектування штампового оснащення, форму і розміри виробів та пропрацювання структури металу гарячою деформацією – для оцінки якості виробів.

Висновки

1. За допомогою МСЕ проведено моделювання процесу гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів із заготовок круглої і квадратної форми.
2. Встановлено зусилля видавлювання, вилучення пуансонів із zdeформованих заготовок та виштовхування виробів із матриць. Зусилля видавлювання при використанні круглої заготовки на 16% менше від зусилля видавлювання квадратної заготовки.
3. У металі донних частинах і стінках виробів виявлено напружений стан і питомі зусилля на деформуючому інструменті, а також zdeформований стан після видавлювання. Використання квадратної заготовки, яка має дешевшу вартість в порівнянні з круглою заготовкою, забезпечує більш інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією у донних частинах і стінках виробів.

References

- [1] E.I. Semenov Ed., "Hot stamping," in *Forging and stamping. Handbook*, Vol. 2, Moscow: Mechanical Engineering, 1986.
- [2] V.N. Danchenko, A.A. Milenin and V.I. Kuzmenko, *Computer modeling of metal pressure processing processes*. Numerical methods. Dnipropetrovsk: System Technologies. 2008. 448 p.
- [3] S.A. Snytko and V.L. Kalyuzhny, "Finite-element modeling of multi-pass deformation during the production of railway wheels," *Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*, No. 11, pp. 106–112, 2011.
- [4] V.L. Kalyuzhny et al., "Hot volumetric stamping of hollow products from high-strength aluminum alloy with specified mechanical properties," *Procurement production*, No. 12, pp. 18–25, 2018.
- [5] X Hu et al., "Numerical Simulation for Microstructure Evolution in In718 Alloy During Cylindrical Cup Backward Extrusion," *Northeastern University at Qinhuangdao Branch*, Northeastern University, Vol. 650. pp. 92–97, 2013. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.650.92

- [6] S. Zota “Theoretical and experimental analysis of the backward extrusion process with a rotational die of AZ31 alloy,” *Metabk*, No. 60, 1–2, pp. 36–38, 2021.
- [7] S.H. Hosseini, K. Abrinia & G. Faraji, “Applicability of a modified backward extrusion process on commercially pure aluminum,” *Materials and Design*, Vol. 65, pp. 521–528, 2015. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.043
- [8] S. Kuhnke *et al.*, “Numerical Investigations on Material Flow During Indirect Extrusion of Copper-Clad Aluminum Rods,” *Front. Mater.*, Vol. 7, Article 157, pp. 1–10, June 2020. DOI: 10.3389/fmats.2020.00157
- [9] Ban Bakir Alamer, “The Study of Stress State in Indentation of a Flat Punch with Rounded Edge in Axisymmetric Backward Extrusion,” *Eng. & Tech. Journal*, Vol. 31, Part (A), No.9, pp. 1765–1778, 2013. DOI: 10.30684/etj.2013.82188
- [10] Jong-Taek Yeom *et al.*, “Prediction of Microstructure Evolution in Hot Backward Extrusion of Ti-6Al-4V Alloy,” *Journal of Metallurgy*, Hindawi Publishing Corporation, Vol. 2012, pp. 1–6, 2012. DOI: 10.1155/2012/989834
- [11] R. Broomand *et al.*, “Processing MMC tubes via friction stir backward extrusion,” *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Vol. 19, Issue 1 Serial, No. 57, pp. 225–242, July 2022. DOI:10.48301/KSSA.2021.287462.1550
- [12] Duk Jae Yoon *et al.*, “A study on the forming characteristics of AZ 31B Mg Alloy in a combined Forward–backward extrusion at warm temperatures,” *Appl. Sci.*, 8(11), pp. 1–10, 2018. DOI: 10.3390/app8112187

Comparative analysis of hot reverse extrusion of hollow products from round and square blanks

V. L. Kaliuzhnyi¹, S. V. Sytnyk¹, V.M. Levchenko²

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

² Ya. Usikov IRE of NASU, Kharkiv, Ukraine

Abstract. Background. Modern production of hollow products by hot reverse extrusion poses the task of reducing energy consumption and reducing metal costs for the manufacture of such products. Such problems can be solved by using them for extruding square-shaped blanks. Goal. Determination using the finite element method (FEM) of the parameters of hot reverse extrusion of hollow products from round and square blanks and comparison of the results of theoretical studies.

Methodology of implementation. Theoretical studies of force modes of extrusion, specific forces and stress-strain state of metal were carried out by simulation using MSE in the DEFORM software environment.

The results. Modeling of the process of hot reverse extrusion from low-carbon steel of a hollow product with protrusions on the end of the bottom part was carried out with the help of MSE. Round and square blanks are used. Extrusion forces, forces for removing punches from deformed blanks and forces for pushing out products from matrices are established. The distribution of specific forces on the deforming tool is revealed. The stress-strain state and temperature distribution in the deformed metal at the end of extrusion were determined. Evaluation of the working of the metal structure by hot plastic deformation was carried out and the obtained parameters were compared.

Conclusions. The use of square-shaped blanks during hot reverse extrusion of hollow products is substantiated.

Keywords: finite element method, hot reverse extrusion, hollow product, round and square workpiece, temperature, forces, stresses, deformations.