

О. В. Калюжний¹, В. Л. Калюжний², С. В. Ситник², К. М. Шульга², М. В. Готра²

¹Кременчуцький національний технічний університет імені Михайла Остроградського

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОПРАЦЮВАННЯ ПЛАСТИЧНОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ СТІНОК І ДОННОЇ ЧАСТИНИ ПОРОЖНИСТОГО НАПІВФАБРИКАТУ ПРИ ГАРЯЧОМУ ЗВОРОТНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ

Методом скінченних елементів з використанням програми DEFORM-3D створені математичні моделі та проведений комп'ютерний аналіз процесів гарячого зворотного видавлювання з роздачою круглих порожнистих напівфабрикатів із низьковуглецевої сталі із циліндричних і квадратних заготовок. Розглянуто процеси видавлювання, вилучення пуансонів із отриманих напівфабрикатів та виштовхування напівфабрикатів із матриць. Встановлено залежності зусиль таких процесів від переміщення деформуючого інструменту. Зусилля видавлювання напівфабрикату із круглої заготовки на 8% менше від зусилля видавлювання із квадратної заготовки. Визначено форми і розміри напівфабрикатів з розподілами температури, напружень і деформацій в кінці видавлювання. Пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією оцінено по розподілу інтенсивності деформації. Використання квадратної заготовки при видавлюванні приводить до збільшення пропрацювання структури металу по висоті стінки на 12% і на 16% у донній частині напівфабрикату.

Ключові слова: гаряче видавлювання; круглий напівфабрикат; метод скінченних елементів; зусилля видавлювання; напруження; деформації; форма і розміри напівфабрикатів.

O. Kaliuzhnyi, V. Kaliuzhnyi, S. Sytnyk, K. Shulga, M. Hotra

INCREASE OF PLASTIC DEFORMATION WORKOUT OF WALLS AND BOTTOM PART OF HOLLOW SEMI-FINISHED PRODUCT DURING HOT REVERSE EXTRACTION

Computer analysis of the processes of hot reverse extrusion with crushing of round hollow semi-finished products from cylindrical and square billets made of mild steel by the finite element method using the DEFORM-3D program has been carried out. The extrusion with crushing provides hollow semi-finished products with external dimensions that are larger than the dimensions of the billets. The processes of extrusion, removal of punches from the obtained semi-finished products and pushing of semi-finished products out of dies are considered. The dependences of the forces of such processes on the movement of the deforming tool have been established. The extrusion force of semi-finished product from round billet is 12% less than the extrusion force from square billet. Shapes and sizes of semi-finished products with distributions of temperature, stresses and deformations at the end of extrusion are determined. The elaboration of metal structure by hot plastic deformation is estimated by the distribution of strain intensity in semi-finished products. The use of a square billet in extrusion leads to an increase in the elaboration of the metal structure along the wall height by 12% and by 16% at the bottom part of the semi-finished product.

Keywords: hot extrusion; round semi-finished product; finite element method; force; stresses; deformations; shape and dimensions of semi-finished products.

Постановка проблеми. Для виготовлення порожнистих виробів великих розмірів із різноманітних марок сталей використовують процеси гарячого зворотного видавлювання. Визначення параметрів такого видавлювання та рекомендації по проектуванню штампного оснащення достатньо добре описані в джерелі [1]. При виробництві виробів спеціального призначення певного калібру гаряче зворотне видавлювання порожнистих напівфабрикатів є першим переходом штампування. На цьому переході необхідно забезпечити інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією донної частини напівфабрикату для досягнення відповідних механічних властивостей у здеформованому металі. Пропрацювання структури металу стінки відбувається на подальших переходах витягування з потоншенням та кінцевій операції обтиску.

Традиційно для видавлювання порожнистих виробів круглої форми використовують циліндричні заготовки, які встановлюють з центруванням по матриці. При видавлюванні осередок деформації охоплює всю донну частину заготовки, але пропрацювання структури металу пластичною деформацією може бути недостатнє для досягнення механічних властивостей.

Тому актуальними є дослідження, які спрямовані на збільшення пропрацювання структури металу при гарячому пластичному формоутворенні порожнистих виробів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. 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.

Використання 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 В95 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 температури 1000...1050°C, а швидкість деформування складала 5 мм/с.

З використанням МСЕ та програми Forge, досліджено процес радіально-зворотного видавлювання роторною голівкою. 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 деформованому 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.

З використанням МСЕ, виконано чисельні розрахунки процесу гарячого зворотного видавлювання порожнистого виробу з титанового сплаву марки Ti-6Al-4V [9]. Також проведено натурний експеримент такого процесу. Результати отриманих чисельних розрахунків було порівняно з результатами натурального 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 натурального експерименту.

Досліджено процес зворотного видавлювання порожнистого виробу [10]. 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 пуансону, який при поступальному русі також обертвся. 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 [11]. 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.

Постановка завдань. Метою роботи є збільшення пропрацювання структури металу пластичною деформацією при гарячому зворотному видавлюванні порожнистих напівфабрикатів із маловуглецевої сталі.

Завданнями дослідження є встановлення зусиль видавлювання, вилучення пуансонів із zdeформованої заготовки і виштовхування напівфабрикатів із матриць; визначення кінцевих форми і розмірів напівфабрикатів, виявлення напружено-деформованого стану і пропрацювання структури металу пластичною деформацією.

Для проведення дослідження було використано схему гарячого зворотного видавлювання з розмірами деформуючого інструменту, яку зображено на рис. 1 на прикладі формоутворення напівфабрикату круглої форми із квадратної заготовки.

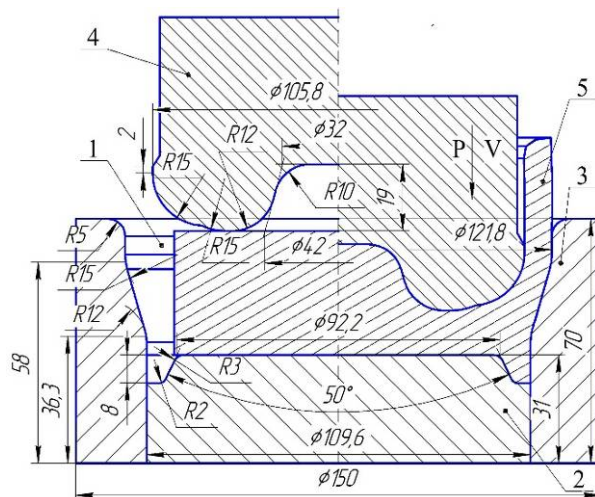


Рис. 1. Схема зворотного видавлювання: 1 – заготовка, 2 – плита, 3 – матриця, 4 – пуансон, 5 – напівфабрикат

напівфабрикату круглої форми із квадратної заготовки. Ліворуч від вісі симетрії показано положення інструменту та заготовки на початку видавлювання, а праворуч – в кінці видавлювання. Вихідна квадратна заготовка 1 розміщена з центруванням в циліндричній частині матриці 3 та спирається на плиту 2. Процес деформування зусиллям P виконується при опусканні пуансону 4 зі швидкістю V з отриманням напівфабрикату 5. Після вилучення пуансону 4 із отриманого напівфабрикату 5 при зворотному переміщенні здійснюється виштовхування напівфабрикату 5 із матриці 3 за допомогою плити 2. Розміри порожнини напівфабрикату 5 визначаються розмірами пуансону 4, а

розміри зовнішньої поверхні і торцю – розмірами матриці 3 і плити 2.

Для видавлювання використано заготовки із сталі 25 квадратної форми з розмірами сторін 76,1x76,1 мм і висотою 56,6 мм та циліндричної форми з діаметром 109,6 мм і висотою 35,5 мм. Об'єми вихідних заготовок однакові. Початкова температура цих заготовок була $T=1000^{\circ}\text{C}$.

Розрахунковий аналіз процесів видавлювання, вилучення пуансонів із zdeформованих заготовок та виштовхування напівфабрикатів із матриць проведено методом скінченних елементів (МСЕ) з використанням програми DEFORM3D. Тертя на контактуючих поверхнях абсолютно жорсткого деформуючого інструменту підігрітого до температури $T=400^{\circ}\text{C}$ враховано по Зібелю з коефіцієнтом тертя $\mu=0,25$. Швидкість деформування складала $V=40$ мм/сек.

Викладення основного матеріалу. Розрахункові схеми при видавлюванні напівфабрикату із квадратної заготовки наведено на рис. 2. Схему в розрізі по площині zox на початку видавлювання зображено на рис. 2а. Квадратна заготовка 1 з центруванням кутами в матриці 2 встановлено на плиті 3. Деформування виконується пуансоном 4, при опусканні якого отримується напівфабрикат 5 із виступами на донній частині зі сторони порожнини та на нижньому торці (рис.2б). При зворотному переміщенні пуансону 4 проходить вилучення його із напівфабрикату 5, який залишається в матриці 2 (рис. 2в). Виштовхування напівфабрикату 5 із матриці 2 відбувається при переміщенні плити 3 (рис. 2г).

Форму і розміри напівфабрикатів в розрізі по площині zox (див. рис. 2а) після видавлювання заготовок різної форми представлено на рис. 3. Після видавлювання циліндричної заготовки отримується круглий напівфабрикат з рівною висотою стінки по периметру торцю (рис. 3а). Торець стінки має утяжини зі сторони порожнини та зі сторони зовнішньої поверхні. При цьому на проміжній стадії видавлювання повністю заповнюються виступи на донній частині зі сторони порожнини та на торці цієї частини.

Після видавлювання квадратної заготовки стінка напівфабрикату має чотири виступи в місцях, які відповідають кутовим зонам заготовки (рис. 3б). Торець стінки має утяжину зі сторони зовнішньої поверхні напівфабрикату. Розміри порожнин з виступами напівфабрикатів відповідають розмірам пуансону, а розміри зовнішньої поверхні з виступами на торцях напівфабрикатів визначаються розмірами матриці і плити (див. рис. 1).

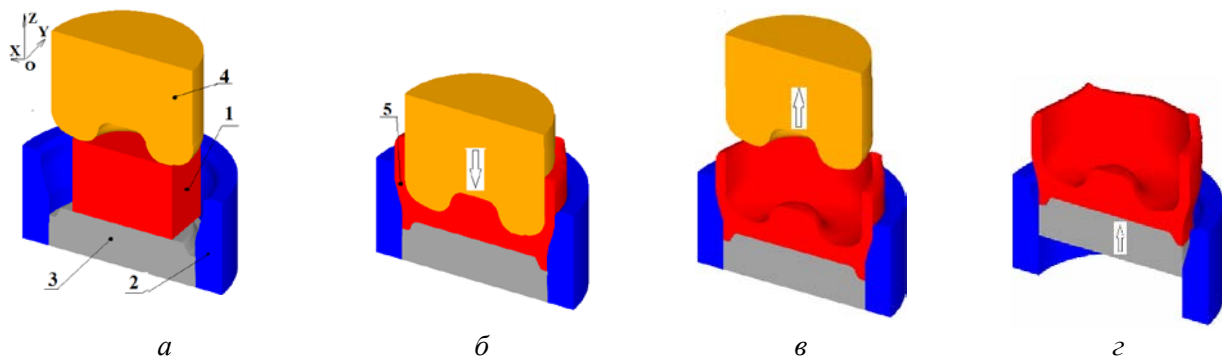


Рис. 2. Розрахункові схеми: *a* – на початку видавлювання; *б* – в кінці видавлювання; *в* – після вилучення пуансону із напівфабрикату; *г* – після виштовхування напівфабрикату із матриці

На рис. 4 показано розподіли температури у zdeформованому металі напівфабрикатів в кінці видавлювання заготовок круглої і квадратної форми. Встановлено, що швидкість деформування $V=40$ мм/сек забезпечує витримку температурного інтервалу гарячого видавлювання в обох варіантах формоутворення виробів. При видавлюванні круглої заготовки температура zdeформованого металу у донній частині та у стінці виробу знижується до $T=940^{\circ}\text{C}$ (рис. 4а), а при

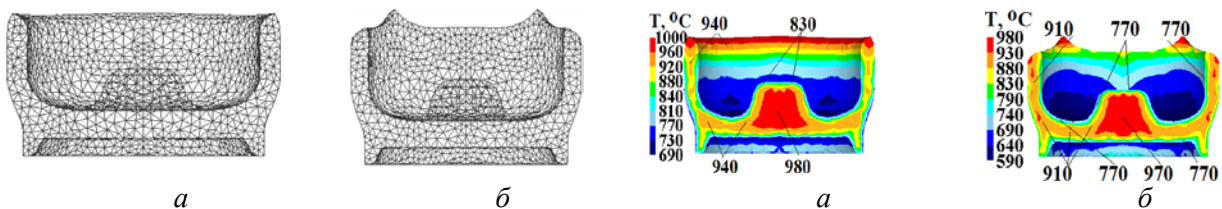


Рис. 3. Форма і розміри напівфабрикатів після видавлювання: *a* – круглої заготовки, *б* – квадратної заготовки

Рис. 4. Розподіли температури у напівфабрикатах в кінці видавлювання: *a* – круглої заготовки, *б* – квадратної заготовки

видавлюванні квадратної заготовки – до $T=910^{\circ}\text{C}$ (рис. 4б). Різниця в температурах пов'язана з різною висотою вихідних заготовок та часом на формоутворення напівфабрикатів. Найбільше охолодження відбувається у шарах металу біля контактуючих поверхонь з деформуючим інструментом. У першому випадку в таких шарах отримано $T=830^{\circ}\text{C}$, а у другому - $T=770^{\circ}\text{C}$. Таким чином, відкриваються можливості виконання деформування стінок отриманих напівфабрикатів наступним переходом витягуванням з потоншенням без проміжного підігріву.

Для двох варіантів формоутворення напівфабрикатів визначено залежності зусиль видавлювання, вилучення пуансонів із напівфабрикатів та виштовхування напівфабрикатів із матриць від переміщення деформуючого інструменту. На рис. 5 зображено залежності зусиль видавлювання в напрямку вісі z (див. рис. 2а) на пуансоні, виштовхувачі і матриці від переміщення пуансону. При видавлюванні із круглої заготовки такі залежності зусиль наведено на рис. 5а. Зусилля на пуансоні і плиті постійно зростають та досягають максимальних значень відповідно 4812 кН і 4440 кН в кінці видавлювання. На матриці зусилля змінюється незначно і досягає найбільшої величини 472 кН.

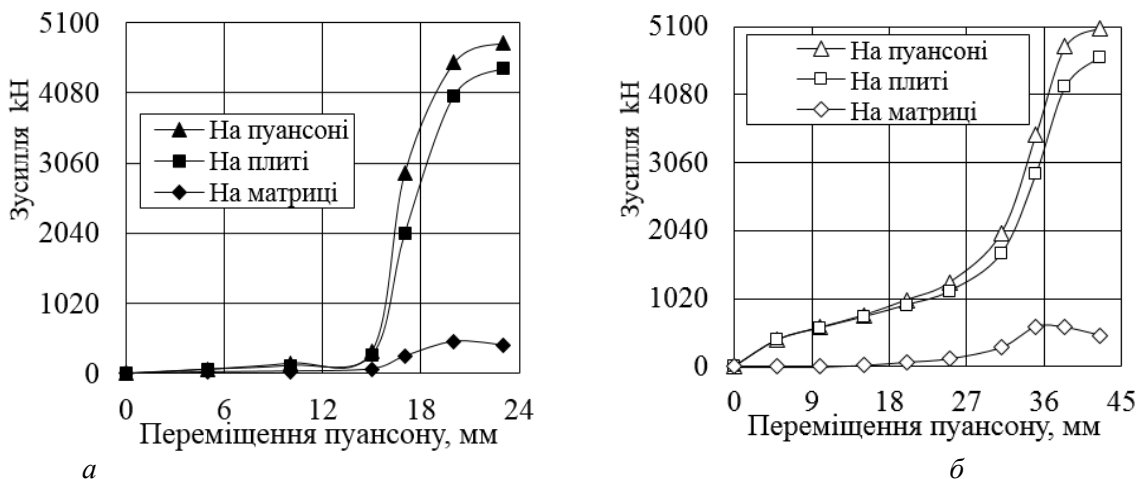


Рис. 5. Залежності зусиль видавлювання на пуансоні, плиті і матриці від переміщення пуансону: а – при видавлюванні круглої заготовки, б – при видавлюванні квадратної заготовки

Аналогічні залежності зусиль при видавлюванні квадратної заготовки представлено на рис. 5б. Зусилля на пуансоні і плиті спочатку зростають повільно до переміщення пуансону 30 мм, а потім відбувається інтенсивне збільшення зусиль до величин 5080 кН і 4640 кН в кінці видавлювання. На матриці отримано 600 кН. Різниця в зусиллях, в порівнянні з видавлюванням круглої заготовки, зв'язана з різною величиною гідростатичного тиску, який виникає при видавлюванні.

На рис. 6 наведено розподіли гідростатичного тиску $\sigma_{cp} = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3$ у zdeформованому металі напівфабрикатів в кінці видавлювання. В кінці видавлювання круглої заготовки (рис. 6а) у донній частині напівфабрикату отримано величину такого тиску у межах $\sigma_{cp} = -210 \div -690$ МПа, а в кінці видавлювання квадратної заготовки у цій частині стискаючі напруження зростають по абсолютній величині і величина гідростатичного тиску досягає значень у межах $\sigma_{cp} = -220 \div -750$ МПа (рис. 6б).

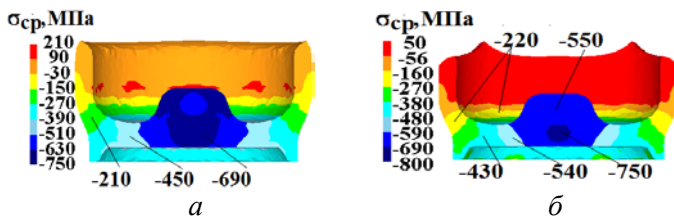


Рис. 6. Розподіли гідростатичного тиску у zdeформованому металі в кінці видавлювання: а – круглої заготовки, б – квадратної заготовки

зворотному переміщенні, та залежності зусиль виштовхування напівфабрикатів із матриць від переміщення плит. Зусилля виштовхування досягають максимальних величин на початку зворотного переміщення пуансонів і складають 28 кН після видавлювання круглої заготовки (рис. 7а) та 26 кН (рис. 7б) після видавлювання квадратної заготовки. Наведені величини зусиль необхідно враховувати при проектуванні пуансонотримачів у штамповому оснащенні. Залежності зусиль виштовхування напівфабрикатів із матриць від переміщення плити представлено на рис. 8. Найбільші значення цих зусиль складають 152 кН після видавлювання круглої заготовки (рис. 8а) і 172 кН після видавлювання квадратної заготовки (рис. 8б). Ці величини зусиль необхідно враховувати при проектуванні матрицетримачів у штамповому оснащенні.

Моделюванням визначено напружений і деформований стани металу у напівфабрикатах після видавлювання згідно вибраної системи координат (див. рис. 2а).

На рис. 9 зображено розподіли компонент напружень σ_z , σ_x , σ_y , і σ_t . Вигляди розподілів практично однакові для видавлювання круглої і квадратної заготовок, але величини напружень відрізняються.

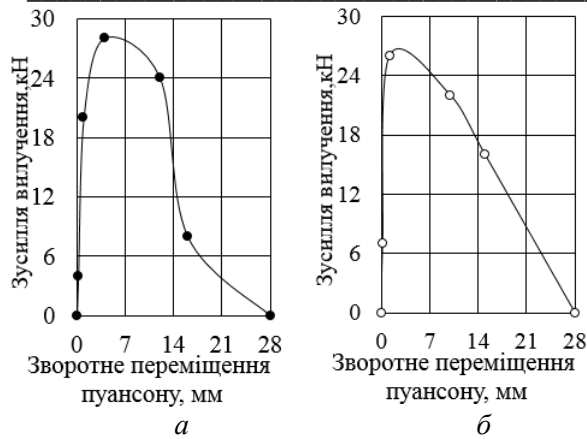


Рис. 7. Залежність зусилля вилучення пуансону від його зворотного переміщення після видавлювання: а – круглої заготовки, б – квадратної заготовки

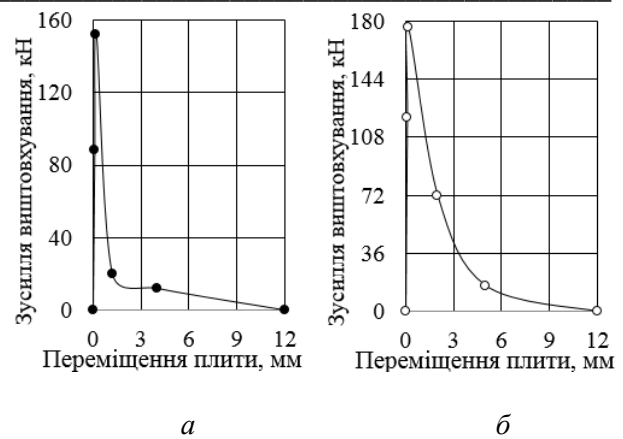


Рис. 8. Залежність зусилля виштовхування від переміщення плити: а – після видавлювання круглої заготовки, б – після видавлювання квадратної заготовки

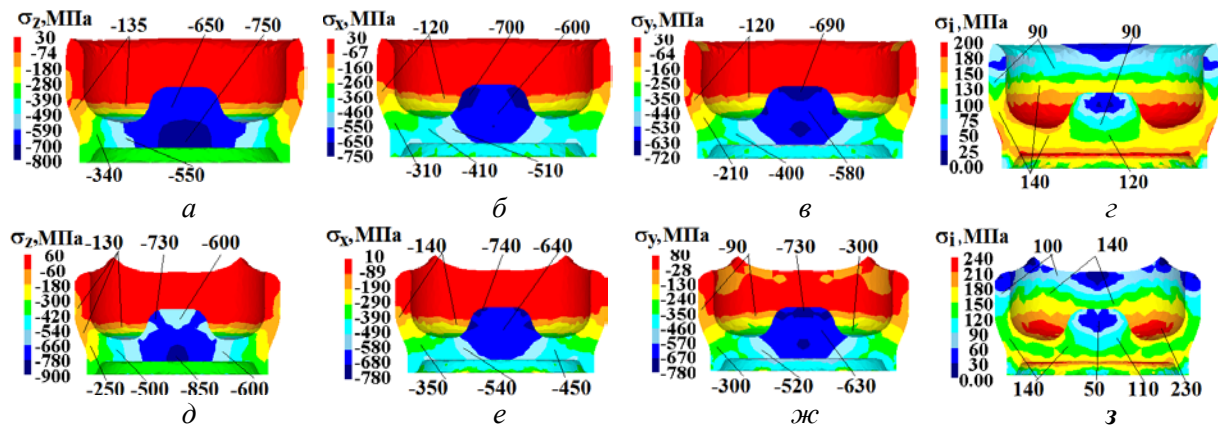


Рис. 9. Розподіли напружень σ_z , σ_x , σ_y , і σ_i у здеформованому металі напівфабрикатів в кінці видавлювання: а, б, в, з – круглої заготовки; д, е, ж, з – квадратної заготовки

У донних частинах напівфабрикатів виникають стискаючі напруження. Розглянемо напруження, які виникають при видавлюванні круглої заготовки. У донній частині напівфабрикату напруження σ_z змінюються від $\sigma_z = -135$ МПа у місці переходу стінки у донну частину до $\sigma_z = -750$ МПа в області вісі донної частини (рис. 9а). Напруження σ_x у донній частині знаходяться у межах $\sigma_x = -310 \div -510$ МПа (рис. 9б). У виступі зі сторони порожнини отримано $\sigma_x = -700$ МПа. Приблизно таких величин досягають напруження σ_y . По донній частині вони знаходяться у межах $\sigma_y = -210 \div -580$ МПа, а у виступі зі сторони порожнини отримано $\sigma_y = -690$ МПа (рис. 9в). Інтенсивність напружень σ_i змінюється від $\sigma_i = 90$ МПа у стінці напівфабрикату до $\sigma_i = 140$ МПа у донній частині (рис. 9з).

При видавлюванні квадратної заготовки розподіли компонент напружень виглядають наступним чином. Напруження σ_z змінюються від $\sigma_z = -130$ МПа у місці переходу стінки у донну частину до $\sigma_z = -850$ МПа на вісі цієї частини (рис. 9д). Напруження σ_x у донній частині знаходяться у межах $\sigma_x = -350 \div -640$ МПа (рис. 9е). Аналогічні величини отримано для напружень σ_y (рис. 9ж). Інтенсивність напружень змінюється від $\sigma_i = 100$ МПа у стінці напівфабрикату до $\sigma_i = 140$ МПа у донній частині (рис. 9з).

По напруженнях σ_z можна оцінити питомі зусилля, які виникають на контактуючих поверхнях пуансонів і плит, що дозволяє призначити марку матеріалу та прогнозувати стійкість такого інструменту для розглянутих варіантів видавлювання.

На рис. 10 зображено розподіли компонент деформацій ε_z , ε_x , ε_y і ε_i у здеформованому металі напівфабрикатів, які виготовлені із круглої і квадратної заготовок. Розподіли деформацій у напівфабрикаті, який отримано після видавлювання круглої заготовки, представлено на рис. 10а – 10г. Деформації ε_z у донній частині стискаючі ($\varepsilon_z = -0,2 \div -0,35$), а по висоті стінки – розтягувальні і збільшуються від $\varepsilon_z = 0,08$ в області торцю стінки до $\varepsilon_z = 0,6$ в зоні переходу стінки у донну частину

(рис. 10а). Деформації ε_x у стінці стискаючі та змінюються по висоті у межах $\varepsilon_x = -0,25 \div -0,9$. У донній частині ці деформації стають розтягувальними і досягають значень $\varepsilon_x = 0,15 \div 0,6$ (рис. 10б). Розтягувальні деформації ε_y (рис. 10в) виникають по висоті стінки ($\varepsilon_y = 0,15$) та у донній частині ($\varepsilon_y = 0,15 \div 0,4$). Результуюче пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ε_i (рис. 10г). По висоті стінки отримано $\varepsilon_i = 0,58$ в зоні торцю стінки зі збільшенням до $\varepsilon_i = 1,8$ у місці переходу стінки у донну частину, у якій інтенсивність деформацій змінюється у межах $\varepsilon_i = 0,58 \div 1,3$.

Зовсім інші значення компонент деформацій ε_z , ε_x , ε_y і ε_i отримано у zdeформованому металі напівфабрикату, що виготовлений із квадратної заготовки (рис. 10д – 10з). Поведемо порівняльний аналіз з величинами таких деформацій, які отримано у напівфабрикаті після видавлювання круглої заготовки. Розтягувальні деформації ε_z в стінці досягають величин у межах $\varepsilon_z = 0,15 \div 0,9$, а стискаючі деформації у донній частині отримано у межах $\varepsilon_z = -0,65 \div -0,9$ (рис. 10д). Зростання величин цих деформацій склало в 1,5-2 рази. Стискаючі деформації ε_x по висоті стінки змінюються від $\varepsilon_x = -0,4$ в області торцю до $\varepsilon_x = -0,9$ в області переходу стінки у донну частину, в якій вони стають розтягувальними та досягають значень у межах $\varepsilon_x = 0,4 \div 0,9$ (рис. 10е). Величини розтягувальних деформацій збільшилися в 1,5 раз. Зросли в 2 рази у стінці розтягувальні деформації ε_y (рис. 10ж). Також зростають по висоті стінки і у донній частині напівфабрикату величини інтенсивності деформацій ε_i . В області торцю стінки отримано $\varepsilon_i = 0,8$, у місці переходу стінки у донну частину - $\varepsilon_i = 2,3$, а у донній частині - $\varepsilon_i = 0,8 \div 2,0$ (рис. 10з). Результуюче пропрацювання структури металу гарячою деформацією по висоті стінки збільшилося на 12%, а у донній частині зросло на 16%.

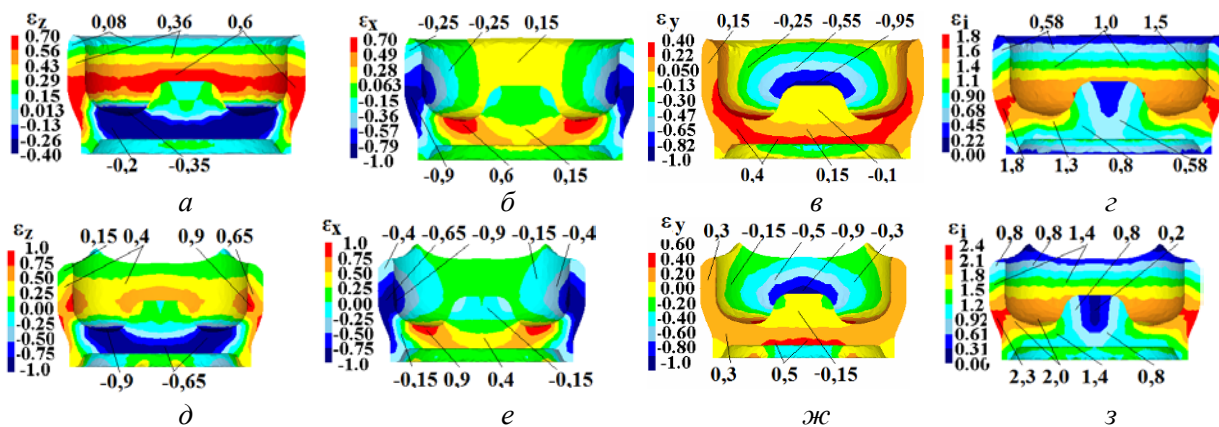


Рис. 10. Розподіли компонент деформацій ε_z , ε_x , ε_y і ε_i у напівфабрикатах після видавлювання: а, б, в, г – круглої заготовки; д, е, ж, з – квадратної заготовки

Збільшення величин інтенсивності деформацій у напівфабрикаті, який отриманий після видавлюванням із квадратної заготовки обумовлене тим, що при видавлюванні спочатку відбувається осаджування заготовки з висоти 56,6 мм до висоти 25 мм. При цьому ступінь деформації складає $\varepsilon = [(56,6 - 25) / 56,6] \times 100 = 55,8\%$ і zdeформований метал сторони квадрату досягає поверхні матриці діаметром 109,6 мм (див. рис. 1). Після цього починається заповнюватися металом зазор між пуансоном і матрицею і відбувається течія металу в стінку напівфабрикату.

Висновки.

1. За допомогою МСЕ створені моделі та проведено розрахунковий аналіз процесів гарячого зворотного видавлювання з роздачою круглих порожнистих напівфабрикатів із заготовок круглої і квадратної форми під подальше витягування з потоншенням.

2. Встановлено залежності зусилля видавлювання, вилучення пуансонів із zdeформованих заготовок та виштовхування напівфабрикатів із матриць від переміщення деформуючого інструменту. Зусилля видавлювання при використанні круглої заготовки на 16% менше від зусилля видавлювання квадратної заготовки.

3. У металі донних частин і стінках напівфабрикатів виявлено напружений стан на деформуючому інструменті, а також zdeформований стан після видавлювання. Використання квадратної заготовки забезпечує більш інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією по висоті стінки та у донних частинах напівфабрикатів.

4. Подальші дослідження в цьому напрямку необхідно проводити по вивченню впливу швидкості деформування на силові режими видавлювання і формозміну металу при видавлюванні напівфабрикатів із квадратної заготовки.

Список використаних джерел.

1. Ковка и штамповка: Справочник в 4-х. т. Москва: Машиностроение. 1986. Т.2. Горячая объемная штамповка. Под ред. Е.И. Семенова. 1986. 592 с.
2. Данченко В.Н., Миленин А.А, Кузьменко В.И. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы. Днепропетровск: Системные технологии. 2008. 448 с.
3. Снитко С.А., Калюжный В.Л. Конечно-элементное моделирование многопереходного формоизменения при производстве железнодорожных колес. *Вестник НТУУ «КПИ»*. *Машиностроение*. Киев: НТУУ «КПИ». 2011. № 11. С. 106-112.
4. Калюжный В.Л., Алиева Л.И., Алиев И.С., Горностаев В.Н. Горячая объемная штамповка полых изделий из высокопрочного алюминиевого сплава с заданными механическими свойствами. *Заготовительное производство*. Москва. 2018. №12. С. 18-25.
5. X Hu. Numerical Simulation for Microstructure Evolution in In718 Alloy During Cylindrical Cup Backward Extrusion / X Hu, R B Mei, F Zhu, Y Fan, Y B Liang, X B Wang, D G Wang and Z R Jing // *Northeastern University at Qinhuangdao Branch, Northeastern University, Qinhuangdao 066004, China*. ISSN: 1662-8985, Vol. 650. Pp. 92-97.
6. S. Zota, S. Mróz, A. Stefanik, K. Laber, R. Mola, Theoretical and experimental analysis of the backward extrusion process with a rotational die of AZ31 alloy / *Metabk 60 (2021) 1-2*. Pp. 36-38, ISSN 0543-5846.
7. S.H. Hosseini, K. Abrinia & G. Faraji (2015). Applicability of a modified backward extrusion process on commercially pure aluminium. *Materials and Design*. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.043. Vol. 65. Pp. 521-528.
8. Kuhnke S, Sanabria V, Gensch F, Nitschke R, Mueller S, Numerical Investigations on Material Flow During Indirect Extrusion of Copper-Clad Aluminum Rods / *Front. Mater.* June 2020, Volume 7, Article 157. Pp. 1-10, doi: 10.3389/fmats.2020.00157.
9. Jong-Taek Yeom, Jeoung Han Kim, Jae-Keun Hong, Nho-Kwang Park, Chong Soo Lee, Prediction of Microstructure Evolution in Hot Backward Extrusion of Ti-6Al-4V Alloy / Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Metallurgy*, Volume 2012, Article ID 989834. Pp. 1-6, doi:10.1155/2012/989834.
10. Roham Broomand, Alireza Babaei, Hadi Mazloom Bashiri, Mohammad Hasan Zaheri, 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*, Volume 19, Issue 1 – Serial, Number 57, July 2022. Pp. 225-242, doi:10.48301/KSSA.2021.287462.1550.
11. Duk Jae Yoon, Eung-Zu Kim, Kyoung Hoan Na, Yong-Shin Lee, A study on the forming characteristics of AZ 31B Mg Alloy in a combined Forward-backward extrusion at warm temperatures / *MDPI*, Received: 15 October 2018; Accepted: 2 November 2018; Published: 8 November 2018. Pp. 1-10, doi:10.3390/app8112187.

Рецензент: Ковальов Василь Анатолійович, д.т.н., професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Скорського»