УДК. 621.777.4 DOI: 10.37142/2076-2151/2025-1(54)113

Калюжний О. В.
Калюжний В. Л.
Солянов Д. О.

ЗУСИЛЛЯ, НАПРУЖЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ТРЬОХ ВАРІАНТАХ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ НАПІВФАБРИКАТІВ ДЛЯ ВИТЯГУВАННЯ З ПОТОНШЕННЯМ

В статті за допомогою скінченно-елементної програми DEFORM і пружно-пластичної моделі металу проведено дослідження трьох варіантів холодного видавлювання із сталі AISI-1015 вісесиметричних порожнистих напівфабрикатів для подальшого витягування з потоншенням. Використано варіанти широко розповсюдженого традиційного зворотного видавлювання, прямого видавлювання з роздачою та зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці. Встановлено залежності зусиль видавлювання, виймання пуансонів із напівфабрикатів та виштовхування напівфабрикатів із матриць від переміщення деформуючого інструмента. Раціональним варіантом для отримання напівфабрикатів для витягування є зворотне видавлювання з роздачою в рухомій матриці, яке забезпечує менше зусилля деформування в порівнянні зі зворотним видавлюванням та більш високу продуктивність виготовлення в порівнянні з прямим видавлюванням з роздачою. Для варіанту традиційного зворотного видавлювання та зворотного видавлювання в рухомій матриці проведено порівняння результатів моделювання по розподілах питомих зусиль на деформуючому інструменті, по розподілах температури в об'ємах напівфабрикатів і компонент напружень у донних частинах напівфабрикатів в кінці видавлювання та по розподілах компонент деформацій у стінках і донних частинах. Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією по ширині стінок і у донних частинах напівфабрикатів оцінено по розподілу і величині інтенсивності деформацій. Видавлювання в рухомій матриці забезпечує більш інтенсивне пропрацювання по ширині стінки та у донній частині напівфабрикату. Виявлено форму і розміри напівфабрикатів. По даних моделювання спроектовано і виготовлено штамп для зворотного видавлювання та проведено експерименти на гідравлічному пресі. Результати експериментів по зусиллю видавлювання показали хорошу узгодженість з розрахунковими даними.

***Ключові слова**: Холодне видавлювання, порожнистий напівфабрикат, метод скінченних елементів, зусилля, питомі зусилля. напруження, деформації.*

Холодне видавлювання порожнистих напівфабрикатів використовується у якості першого переходу штампування при виготовленні складових виробів спеціального призначення певного калібру. В умовах масового виробництва напівфабрикатів холодним пластичним формоутворенням на першому місці стоїть завдання підвищення стійкості деформуючого інструменту, що приведе до збільшення продуктивності виробництва та зменшення собівартості напівфабрикатів. Збільшення стійкості можна досягти завдяки зниженню зусиль видавлювання і питомих зусиль на пуансонах, виштовхувачах і матрицях. Для видавлювання порожнистих напівфабрикатів в теперішній час широко використовують варіант зворотного видавлювання, при якому розмір заготовки однаковий із зовнішнім діаметром напівфабрикату. Вихідні заготовки із гарячекатаного круглого прокату отримують шляхом безвідхідного відрізання зсувом в штампах на пресах. При відрізанні потрібно вирішувати задачу підвищення геометричної точності заготовок. Застосування варіантів прямого видавлювання з роздачою та зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці приводять до зниження зусилля деформування на пуансонах, в порівнянні з традиційним зворотним видавлюванням, та потребують використання заготовок меншого діаметра при однакових зовнішніх розмірах напівфабрикатів, що приводить до підвищення точності при відрізанні.

В процесі видавлювання порожнистих напівфабрикатів, крім отримання необхідної форми, потрібно провести відповідне пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією донної частини для досягнення заданих механічних властивостей у цьому місці. Донна частина напівфабрикатів не деформується на подальших переходах витягування з потоншенням і обтиску при виготовленні вищевказаних виробів. Тому на етапі розроблення технології видавлювання актуальними є завдання встановлення параметрів по отриманню форми напівфабрикатів для витягування з потоншенням та визначення пропрацювання структури металу пластичною деформацією у донних частинах.

На рис. 1 приведено три варіанти видавлювання порожнистих напівфабрикатів з донними частинами конусної форми для подальшого витягування з потоншенням. На цьому рисунку ліворуч від вісі симетрії показано положення на початку видавлювання, а праворуч – в кінці видавлювання. Найбільш широко розповсюджений варіант традиційного зворотного видавлювання (рис. 1а). Заготовку 1 розміщено на конусній поверхні матриці 2 з виштовхувачем 3. Деформування здійснюють пуансоном 4, при переміщенні якого отримують напівфабрикат 5 з конусною поверхнею на донній частині. Варіант прямого видавлювання з роздачою (розширенням) зображено на рис. 1б. Заготовку 1 встановлено в матриці 2 на пуансоні 3. При переміщенні штовхача 4 отримують напівфабрикат 5 із зовнішнім діаметром, який більший за діаметр заготовки 1. Варіант потребує меншого зусилля деформування та використання заготовки меншого діаметра в порівнянні з попередньою схемою. При реалізації такого варіанту виникають складнощі вилучення напівфабрикату 5 із штампу. Вказаний недолік відсутній для варіанту зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці (рис. 1в). Заготовку 1 встановлено в матриці 2 на виштовхувачі 3. При одночасному переміщенні пуансона 4 і матриці 2 з однаковою швидкістю отримують напівфабрикат 5.

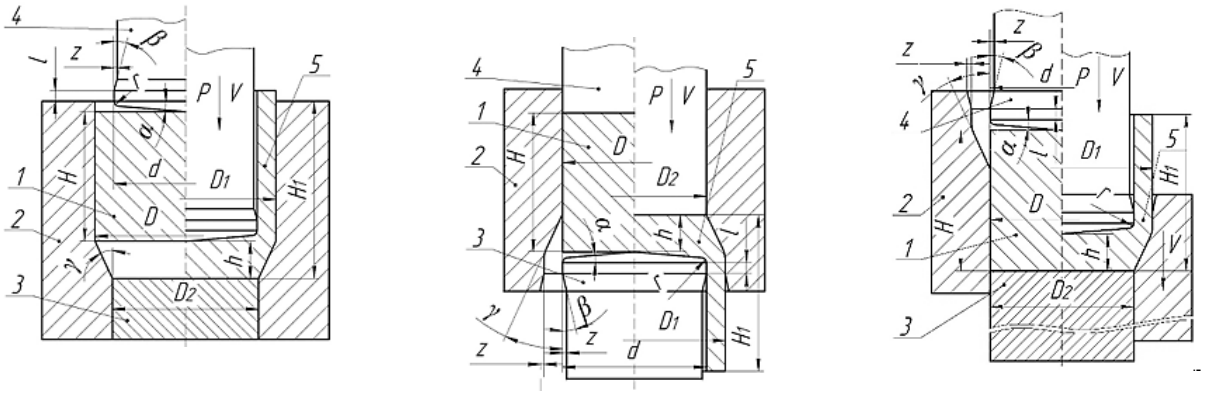


Рис. 1. Варіанти видавлювання порожнистих напівфабрикатів для подальшого витягування з потоншенням:

а – традиційне зворотне видавлювання, б – пряме видавлювання з роздачою, в – зворотне видавлювання з роздачою в рухомій матриці

Авторами [1] методом скінченних елементів (МСЕ) із застосуванням жорстко-пластичної моделі металу проведено розрахунковий аналіз трьох стадійного процесу холодного видавлювання з рухомою матрицею. Визначено швидкість матриці для зменшення навантаження на деформуючий інструмент.

У джерелі [2] представлено п'ятиперехідну технологію холодного видавлювання. Моделюванням МСЕ в програмі Deform-2D було встановлено параметри формоутворення. Результати експериментів підтвердили можливість реалізації такої технології.

Досліджено вплив геометричних параметрів матриці на навантаження при радіальному видавлюванні заготовок із алюмінію AA606 у роботі [3]. Для чисельного розрахунку на жорстко-пластичній моделі використано середовище Deform-2D. Достовірність результатів моделювання була перевірена за допомогою експериментальних даних із літератури.

Авторами [4] на прикладі процесу зворотного видавлювання чашки показано, що завдяки керованим рухам інструменту можна контролювати надійність процесу формоутворення та його продуктивність, що приводить до розширення меж видавлювання.

В роботі [5] розглянуто процес прямого-зворотного видавлювання порожнистих деталей, що реалізує значну пластичну деформацію для ультрадрібнозернистих металів. Аналіз МСЕ для чистого алюмінію показав вищу величину деформації та більшу рівномірність деформації по товщині і довжині виробу.

Шляхом моделюванням МСЕ в програмі Deform-2D у джерелі [6] встановлено вплив конструктивних параметрів матриці на холодне пряме видавлювання з роздачою порожнистих виробів з латуні. Визначено зусилля і питомі зусилля видавлювання, форми і розміри виробів, розподіли напружень, деформацій і температури у деформованому металі.

Дослідження авторів [7] присвячено детальному вивченню впливу ступеню деформації і кута нахилу пуансона на течію металу і питомі зусилля при зворотному видавлюванні. Моделювання МСЕ здійснено з використанням жорстко-пластичної моделі металу.

У джерелі [8] проведено порівняння традиційного зворотного видавлювання порожнистих виробів із запропонованим авторами методом зворотного видавлювання пуансоном з рухомою оправкою. Для дослідження використано експериментальні методи та МСЕ. По запропонованому методу пластична деформація приблизно вдвічі вища, ніж при традиційному видавлюванні, що може покращити механічні властивості деформованого металу.

Моделювання МСЕ авторами роботи [9] використано для визначення впливу розміру заготовки, ступеню деформації, кута нахилу пуансона на формоутворення при холодному зворотному видавлюванні порожнистого виробу із сталі AISI 1010. Встановлено зусилля на пуансоні, напруження і деформації у деформованому металі.

Результати моделювання в програмі Deform-2D процесів холодного видавлювання порожнистих виробів з використанням пружно-пластичної і пластичної моделей металу приведено в монографії [10]. Для виробів із сталей і кольорових металів встановлено раціональні параметри для проектування технології та штампового оснащення.

Новий метод формування фланців на порожнистих деталях із алюмінієвого сплаву EN AW 6060 шляхом радіальної екструзії, який був перевірений аналізом МСЕ з використанням програмного пакету Deform-3D та експериментальними випробуваннями, представлено авторами [11]. Метод дозволив отримати фланці з відносно великим діаметром і рівномірною товщиною.

За допомогою МСЕ в середовищі Deform-2D у джерелі [12] досліджено вплив швидкості деформування на процес холодного зворотного видавлювання з роздачою вісесиметричних порожнистих деталей із бронзи BRASS 377 CDA. При збільшенні швидкості деформування зменшується зусилля видавлювання і зростає температура деформованого металу, знижується зусилля вилучення пуансону із деформованої заготовки та зусилля виштовхування деталі із матриці.

В роботі [13] досліджено процес зворотного видавлювання порожнистого виробу із алюмінієвого сплаву пуансоном, який обертався при поступальному русі. Виконано моделювання МСЕ в середовищі Deform та проведено натурні експерименти. Завдяки обертанню пуансона заготовка розігрівається і в осередку деформації процес змінюється з холодного на гаряче видавлювання. Отриманий виріб має підвищену міцність та меншу пластичність в порівнянні з традиційним способом зворотного видавлювання.

Досліджено в роботі [14] спосіб видавлювання порожнистих виробів за два переходи для зменшення нерівномірності деформації. На першому переході одночасно виконується зворотне видавлювання стінки корпусу і пряме видавлювання з утворенням технологічного уступу в донній частині. На другому переході відбувається витіснення металу з уступу назад у донну частину корпусу. Наведено результати моделювання МСЕ і експериментального дослідження, які підтверджують перевагу способу в зниженні силових режимів та нерівномірності деформацій.

Авторами [15] було проведено моделювання МСЕ та експериментальні дослідження п'ятиперехідного процесу холодного штампування гайок з низьковуглецевої сталі AISI 1010 з використанням переходів зворотного видавлювання. Порівняння зусиль формоутворення, отриманих в експерименті, з результатами чисельного моделювання показало хорошу узгодженість.

Авторами [16] Розроблено і досліджено спосіб видавлювання за один перехід порожнистих конічних виробів зі змінною товщиною стінки. Для моделювання МСЕ використано програму Deform-2D, яке дозволило виявити зусилля деформування, розподіли питомих зу-

силь на інструменті та напружень і деформацій у деформованому металі. Розрахунком показано і експериментально підтверджено можливість зниження силових режимів при формоутворенні конічних порожнистих виробів.

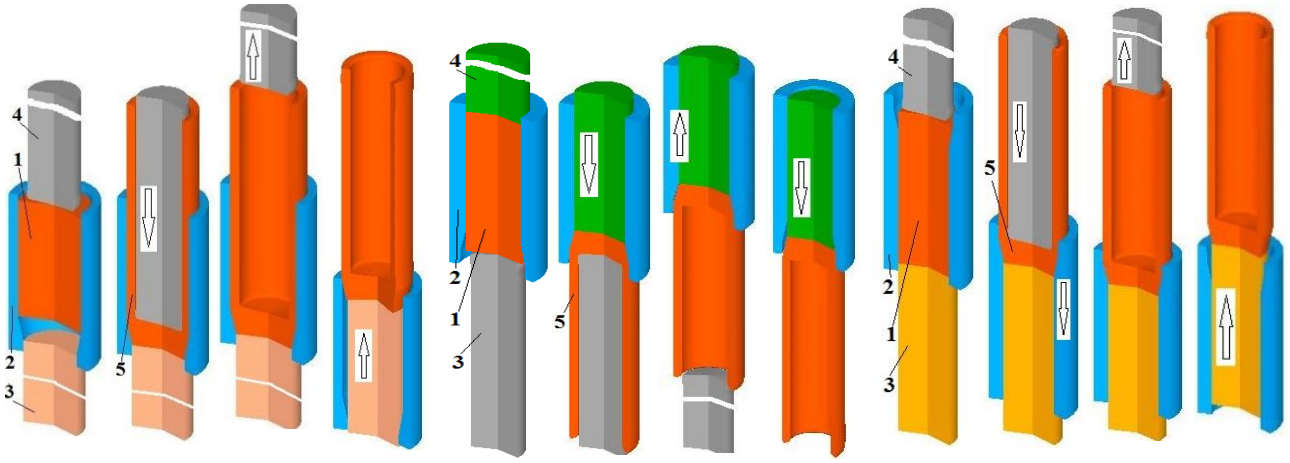
На основі аналізу літературних джерел виявлено, що для отримання порожнистих напівфабрикатів і виробів в основному застосовують варіант холодного зворотного видавлювання, в якому діаметр вихідної заготовки однаковий із зовнішнім діаметром виробу. Варіанти прямого видавлювання з роздачою і зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці потребують використання заготовок меншого діаметру та дозволяють зменшити зусилля деформування в порівнянні з попереднім варіантом, але в існуючих роботах недостатньо даних по формоутворенню напівфабрикатів із кутом $\gamma < 16^o$ (див. рис. 1б), що необхідно для подальшого витягування з потоншенням, та практично відсутня інформація про зусилля виймання пуансонів із напівфабрикатів і виштовхування їх із матриць. Для проведення моделювання холодного видавлювання порожнистих напівфабрикатів раціонально використовувати програму Deform, яка дозволяє враховувати всі основні фактори, що впливають на таке формоутворення, та дозволяє визначити параметри для проектування технології і штампового оснащення.

Метою роботи є проведення моделювання за допомогою МСЕ холодного видавлювання порожнистих напівфабрикатів з донною частиною конусної форми по трьох варіантах формоутворення та порівняння отриманих результатів. Завданнями дослідження було визначення зусиль видавлювання, зусиль виймання пуансонів із напівфабрикатів і виштовхування напівфабрикатів із матриць, питомих зусиль на деформуючому інструменті; виявлення кінцевих форм і розмірів напівфабрикатів; встановлення розподілів компонент напружень і деформацій та пропрацювання структури металу пластичною деформацією; обґрунтування раціональної схеми для видавлювання порожнистих напівфабрикатів.

Для виконання дослідження було використано три вищенаведені варіанти видавлювання (див. рис. 1) порожнистих напівфабрикатів із сталі 15 (AISI 1015). Моделювання вісесиметричного видавлювання проведено в середовищі Deform 2D з використанням пружно-пластичної моделі металу для можливості визначення зусиль виймання пуансонів із напівфабрикатів та виштовхування напівфабрикатів із матриць. Швидкість деформування складала $V = 2$ мм/сек. Тертя на контактуючих поверхнях враховано по Кулону з коефіцієнтом тертя $\mu = 0{,}08$.

Для отримання напівфабрикатів з однаковими розмірами ($D_1 = 40$ мм, $D_2 = 34$ мм, $h = 15$ мм, $d = 30$ мм, $H_1 = 150$ мм) по трьох варіантах видавлювання були використані заготовки висотою $H = 72$ мм і діаметром $D = 40$ мм для варіанту 1а та $H = 100$ мм і $D = 34$ мм для варіантів 1б і 1в (див. рис. 1). Розміри деформуючого інструменту: $D_1 = 40$ мм, $D_2 = 34$ мм, $h = 15$ мм, $d = 30$ мм, $\alpha = 7°$, $\beta = 7°$, $r = l = 2$ мм, $z = 0{,}15$ мм, $\gamma = 12°$.

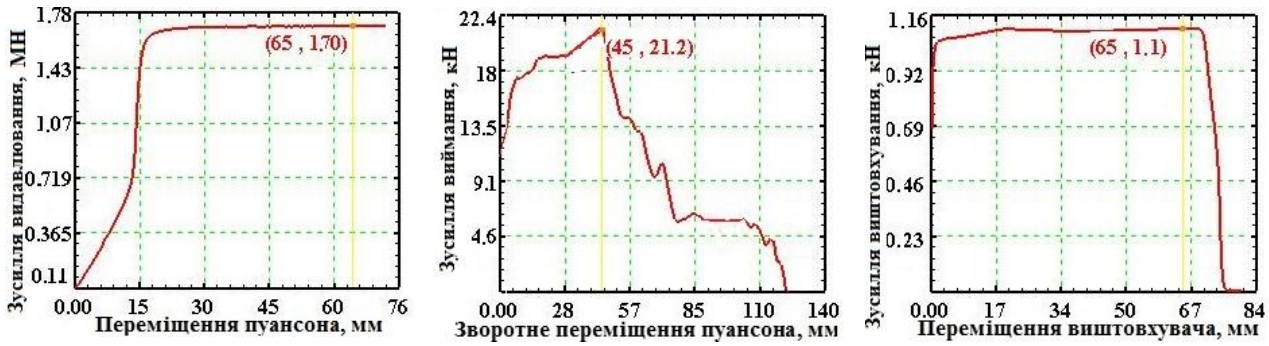
Розрахункові схеми в розрізі із програми Deform для трьох варіантів видавлювання показано на рис. 2. На рис. 2а зображено схему на початку 1 варіанту видавлювання. Заготовку 1 встановлено на конусній поверхні матриці 2 з виштовхувачем 3. При переміщенні пуансона 4 отримують напівфабрикат 5 з конусною поверхнею на донній частині (рис. 2б). Після зворотного руху пуансона 4 напівфабрикат 5 залишається в матриці 2 (рис. 2в) та видаляється з неї за допомогою виштовхувача 3 (рис. 2г). Схему на початку 2 варіанту видавлювання зображено на рис. 2д. Заготовку 1, що має менший діаметр в порівнянні із зовнішнім розміром напівфабрикату, встановлено в матриці 2 на пуансоні 3. Видавлювання здійснюють переміщенням штовхача 4 з отриманням напівфабрикату 5 (рис. 2е). При зворотному переміщенні матриці 2 із штовхачем 4 відбувається знімання напівфабрикату 5 з пуансона 3 (рис. 2ж). Виштовхування напівфабрикату 5 із матриці 2 виконують штовхачем 4 (рис. 2з). Схему на початку 3 варіанту видавлювання представлено на рис. 2і. Заготовку 1 розміщено в матриці 2 на виштовхувачі 3. При одночасному переміщенні пуансона 4 із матрицею 2 отримують напівфабрикат 5 (рис. 2к). При зворотному переміщенні пуансона 4 напівфабрикат 5 залишається в матриці 2 (рис. 2л) та видаляється з неї за допомогою виштовхувача 3 (рис. 2м). Цей варіант видавлювання, в порівнянні з попереднім, суттєво спрощує видалення напівфабрикату після формоутворення.



а б в г д е ж з і к л м

Рис. 2. Розрахункові схеми при видавлюванні:
а – г – по 1 варіанту, д – з - по 2 варіанту, і – м - по 3 варіанту

Зусилля для 1 варіанту видавлювання представлено на рис. 3. Тут і нижче графіки побудовані в програмі Deform, на яких відмічено максимальні значення досягнутих зусиль. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона показано на рис. 3а. Спочатку проходить заповнення металом конусної поверхні матриці при зусиллі 0.72 МН. Далі зусилля інтенсивно зростає і досягає постійного значення 1.7 МН на усталеній стадії процесу видавлювання. Найбільша величина зусилля виймання пуансона із напівфабрикату склала 21,2 кН (рис. 3б). Зусилля виштовхування напівфабрикату із матриці отримано величиною 1,1 кН на протязі цього процесу (рис. 3в).



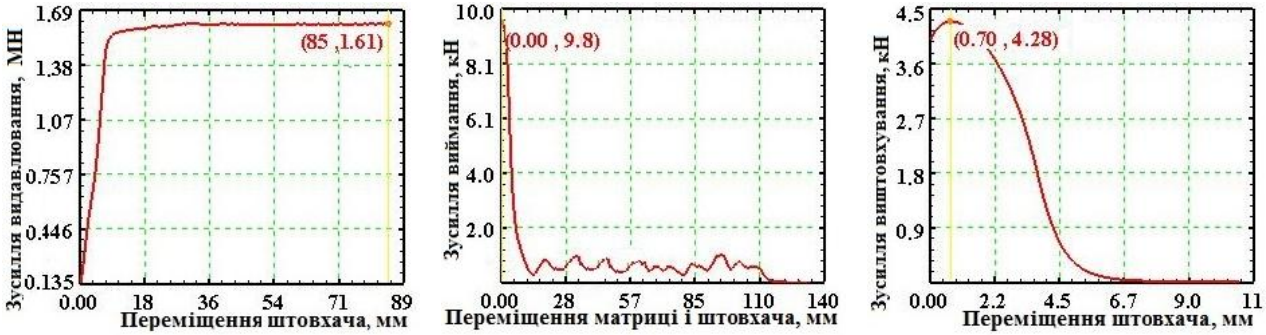
а б в

Рис. 3. Зусилля для 1 варіанту видавлювання:
а – залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона; б – залежність зусилля виймання пуансона від його зворотного переміщення; в – залежність зусилля виштовхування від переміщення виштовхувача

Зусилля для 2 варіанту видавлювання наведено на рис. 4. На рис. 4а показано залежність зусилля видавлювання від переміщення штовхача. Зусилля на неусталеній стадії інтенсивно зростає та досягає величини 1,61 МН на усталеній стадії. Зусилля виймання пуансону із напівфабрикату отримано з максимальною величиною 9,8 кН на початку цього процесу (рис. 4б). Також максимальне значення 4,28 кН має зусилля на початку виштовхування напівфабрикату із матриці (рис. 4в).

На рис. 5 приведено зусилля для 3 варіанту видавлювання. На рис. 5а показано залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона. Для цього варіанту видавлювання на усталеній стадії отримано найменшу величину зусилля (1,6 МН). Зниження зусилля склало біля 6% в порівнянні з 1 варіантом видавлювання. По аналогії з 2 варіантом видавлювання зусилля виймання пуансону із напівфабрикату досягає максимального значення 10,4 кН на по-

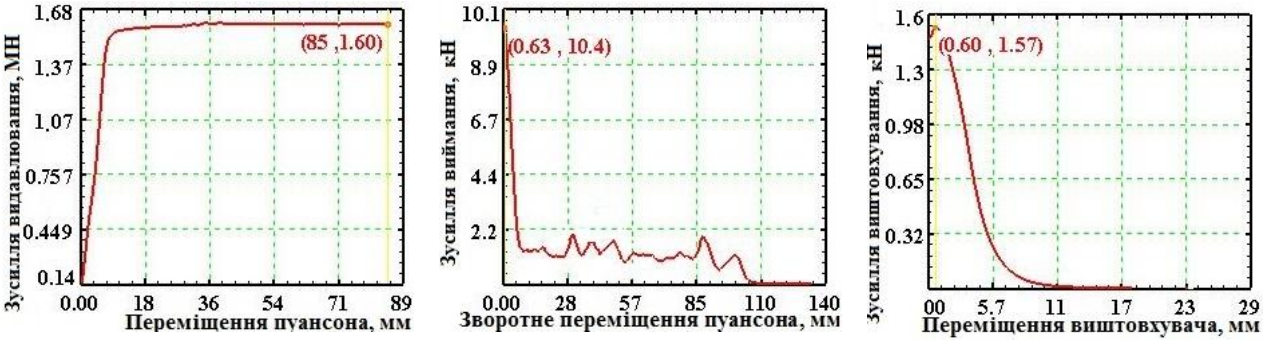
чатку цього процесу (рис. 5б), а зусилля виштовхування напівфабрикату із матриці має максимальну величину 1,57 кН (рис. 5в). Таким чином по зусиллю видавлювання і можливості видалення напівфабрикатів раціонально застосовувати 3 варіант видавлювання. Тому надалі будемо порівнювати результати моделювання для 3 і 1 варіантів видавлювання.



а б в

Рис. 4. Зусилля для 2 варіанту видавлювання:

а – залежність зусилля на пуансоні від переміщення штовхача; б – залежність зусилля виймання від переміщення матриці зі штовхачем; в – залежність зусилля виштовхування від переміщення штовхача



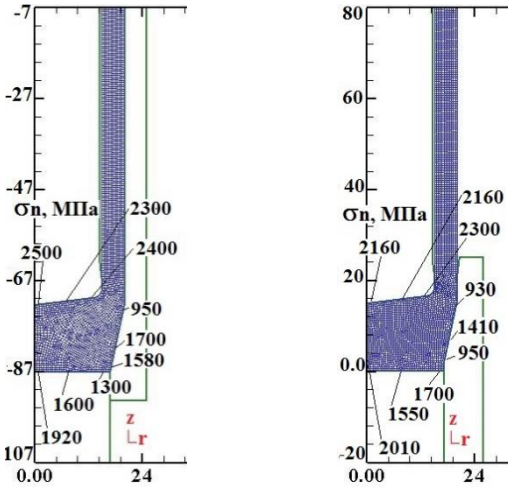
а б в

Рис. 5. Зусилля для 3 варіанту видавлювання:

а – залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона; б – залежність зусилля виймання від зворотного переміщення пуансона; в – залежність зусилля виштовхування від переміщення виштовхувача

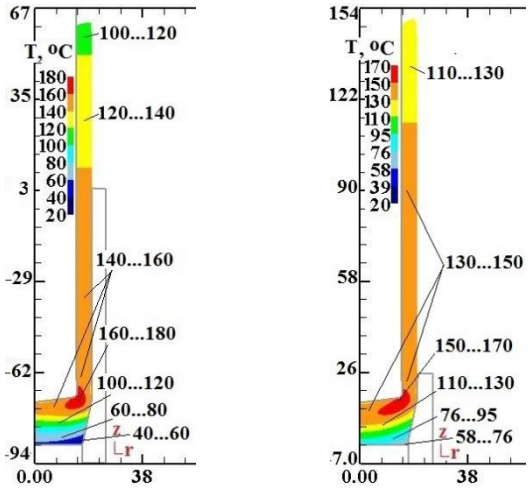
Для проектування штампового оснащення, вибору матеріалу для деформуючого інструмента та визначення кількості бандажів для матриці потрібно знати розподіли питомих зусиль на контактуючих поверхнях деформованих заготовок з інструментом. Питомі зусилля можна оцінити по розподілах нормальних напружень σ_n на таких поверхнях, які дозволяє виявити програма Deform. На рис. 6 наведено розподіли напружень σ_n на контактуючих поверхнях половин напівфабрикатів. Тут і на подальших рисунках тонкими лініями зображено деформуючий інструмент, а розміри по вісях r і z приведено в міліметрах. На рис. 6а показано ці розподіли для напівфабрикату в кінці 1 варіанту видавлювання. Найбільші величини питомих зусиль у межах σ_n = 2300÷2500 МПа виникають на контактуючій поверхні торця пуансона з напівфабрикатом. На поверхі з виштовхувачем отримано σ_n = 1300÷1920 МПа, а на конусній поверхні матриці - σ_n = 950÷1700 МПа. Для цього варіанту видавлювання матриця повинна мати два бандажі. Розподіли напружень σ_n в кінці 3 варіанту видавлювання представлено на рис. 6 б. Використання цього варіанту приводить до суттєвого зменшення питомих зусиль, які досягають значень у межах σ_n = 2160÷2300 МПа на пуансоні та σ_n = 930÷1410 МПа на матриці. Тому слід очікувати підвищення стійкості пуансонів і матриць.

При холодному видавлюванні підвищується температура здеформованого металу завдяки перетворенню частини пластичної деформації в тепло та дії тертя на контактуючих поверхнях. На рис. 7 показано розподіли температури у напівфабрикатах в кінці видавлювання. В кінці 1 варіанту видавлювання (рис. 7а) в зоні переходу донної частини в стінку напівфабрикату отримано максимальну температуру у межах T = 160÷180ºС. По висоті донної частини температура металу підвищується до T = 40÷160ºС. У стінці температура змінюється від T = 100 ºС в зоні торця до T = 160 ºС в області переходу у донну частину.



а б

Рис. 6. Розподіли напружень σ_n на контактуючих поверхнях напівфабрикатів:
а – в кінці 1 варіанту видавлювання,
б – в кінці 3 варіанту видавлювання



а б

Рис. 7. Розподіли температури (T,ºС) по об’єму половини напівфабрикатів:
а – в кінці 1 варіанту видавлювання,
б – в кінці 3 варіанту видавлювання

В кінці формоутворення по 3 варіанту видавлювання спостерігається дещо менше підвищення температури здеформованого металу (рис. 7б). В зоні переходу донної частини у стінку напівфабрикату температура підвищується до T = 150÷170 ºС. У донній частині температура досягає значень у межах T = 50 ÷ 150 ºС. В зоні торця стінки напівфабрикату отримано T = 100 ÷ 130 ºС, а в місці переходу стінки в донну частину – T = 130÷150 ºС. Зниження температури сприяє меншому розігріву деформуючого інструменту при видавлюванні.

Розподіли компонент напружень у донних частинах напівфабрикатів для 1 і 3 варіантів видавлювання представлено на рис. 8. Вигляди розподілів для радіальних σ_r, осьових σ_z, тангенціальних σ_θ і інтенсивності σ_i напружень для наведених варіантів видавлювання практично однакові, але величини напружень відрізняються. В обох випадках видавлювання у донних частинах виникають стискаючі напруження σ_r, σ_z і σ_θ. При цьому максимальні значення по абсолютній величині отримано в області біля торця пуансона. Для 3 варіанту видавлювання вказані стискаючі напруження мають менші значення. Найбільшу відмінність у значеннях отримано для напружень σ_z і σ_θ. Очевидно, що це є основною причиною зниження зусилля деформування в порівнянні з 1 варіантом видавлювання.

На рис. 9 представлено розподіли для радіальних ε_r, осьових ε_z, тангенціальних ε_θ і інтенсивності ε_i деформацій у донних частинах та стінках половин напівфабрикатів для 1 і 3 варіантів видавлювання. Розподіли компонент деформацій мають однаковий вигляд, але значення досягнутих деформацій відрізняються. Розтягувальні радіальні деформації для 1 варіанту видавлювання по висоті донних частин зменшуються від величин у межах ε_r = 0.71…1.2 в зоні під торцем пуансона до нульових значень на половині висоти, а далі ці деформації стають стискаючими (рис. 9а). У шарах металу стінки зі сторони порожнини отримано стискаючі деформації ε_r = -2.2…2.7, а у шарах біля зовнішньої поверхні стінки ε_r = -0.75. Для 3 варіанту видавлювання розтягувальні деформації ε_r у донній частині в зоні біля торця пуансона мають дещо більші значення (ε_r = 0.9…1.4) зі зменшенням до ε_r=0.0 на 3/4 висоти донної частини

(рис. 9б). В шарах металу стінки зі сторони порожнини стискаючі деформації мають значення ε_r = -2.1…-2.6, а в шарах металу зовнішньої поверхні - ε_r=-0.71. До половини висоти донної частини напівфабрикату після 1 варіанту видавлювання виникають ε_z = -2.1…-2.7, а далі по висоті ці деформації стають розтягувальними (рис. 9в). По ширині стінки розтягувальні осьові деформації змінюються від величини ε_z = 2.0 на внутрішніх шарах металу стінки до ε_z = 0.82 для зовнішніх шарів. Для 3 варіанту практично по всій висоті донної частини отримано стискаючі деформації ε_z (рис. 9г). По ширині стінки отримано ε_z = 1.6 для внутрішніх шарів і ε_z = 0.5 для зовнішніх шарів. У донних частинах і стінках напівфабрикатів виникають розтягувальні тангенціальні деформації ε_θ. Для 1 варіанту видавлювання вони досягають максимальних значень у межах ε_θ = 0.9…1.4 в донній частині та ε_θ = 1.1…1.3 у стінці (рис. 9д). Для 3 варіанту в таких місцях отримано ε_θ = 1.2…1.4 (рис. 9е).

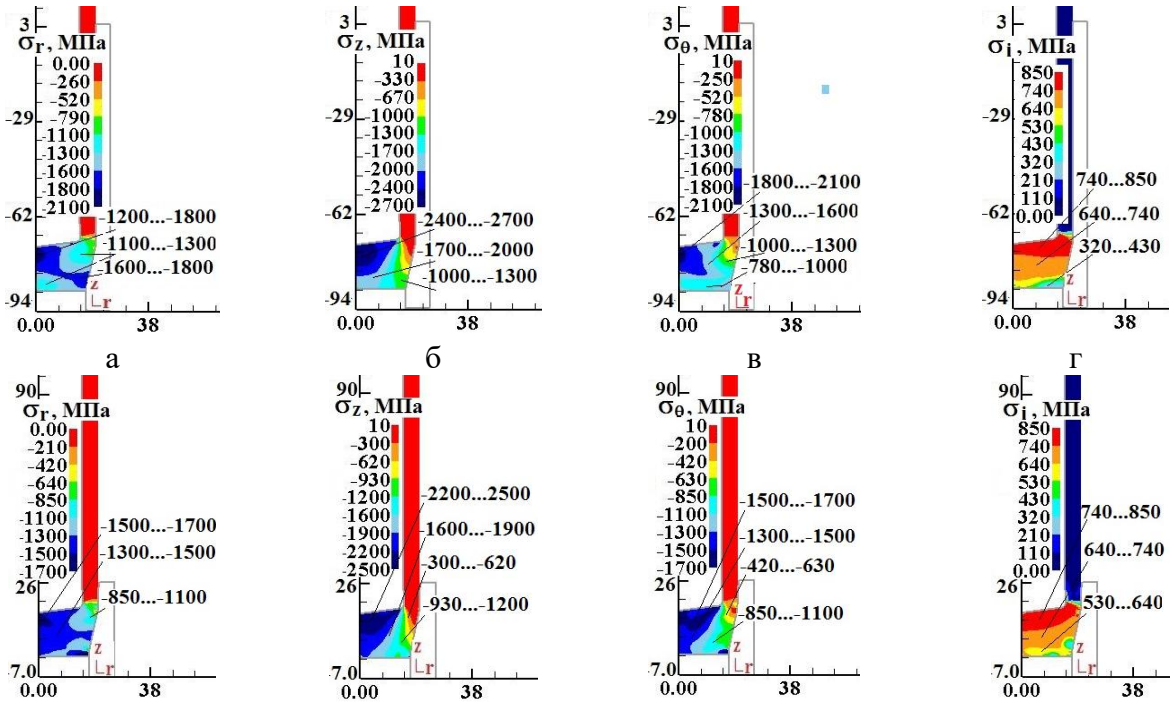


Рис. 8. Розподіли компонент напружень у донних частинах напівфабрикатів для 1 і 3 варіантів видавлювання:

а – г – для 1 варіанту видавлювання, д – з – для 3 варіанту видавлювання

Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією у напівфабрикатах після видавлювання можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ε_i. В обох випадках видавлювання спостерігається значна нерівномірність інтенсивності деформацій ε_i по ширині стінок напівфабрикатів. Найбільш інтенсивне пропрацювання відбувається у шарах металу зі сторони порожнини. Після зворотного видавлювання у шарах металу зі сторони порожнини отримано ε_i = 3.5…4.0, по середині стінки - ε_i = 1.5…2.0, а біля зовнішньої поверхні - ε_i = 0.5…1.0 (рис. 9г). По висоті донної частини напівфабрикату величина інтенсивності деформацій зменшується від значень у межах ε_i = 3.5…4.0 в зоні біля торця пуансона до ε_i = 0.5 на третині висоти по вісі, далі в напрямку радіуса до ε_i = 0.5 на половині висоти цієї частини. Для 3 варіанту відбувається збільшення пропрацювання структури металу. В шарах металу стінки зі сторони порожнини отримано інтенсивність деформацій у межах ε_i = 3.8…4.3, по середині стінки - ε_i= 1.6…2.2 і в шарах металу біля зовнішньої поверхні - ε_i = 0.5…1.1 (рис. 9з). У донній частині в зоні біля торця пуансона отримано ε_i= 3.8…4.3 зі зменшенням до ε_i=0.5 на половині висоти цієї частини по всій довжині.

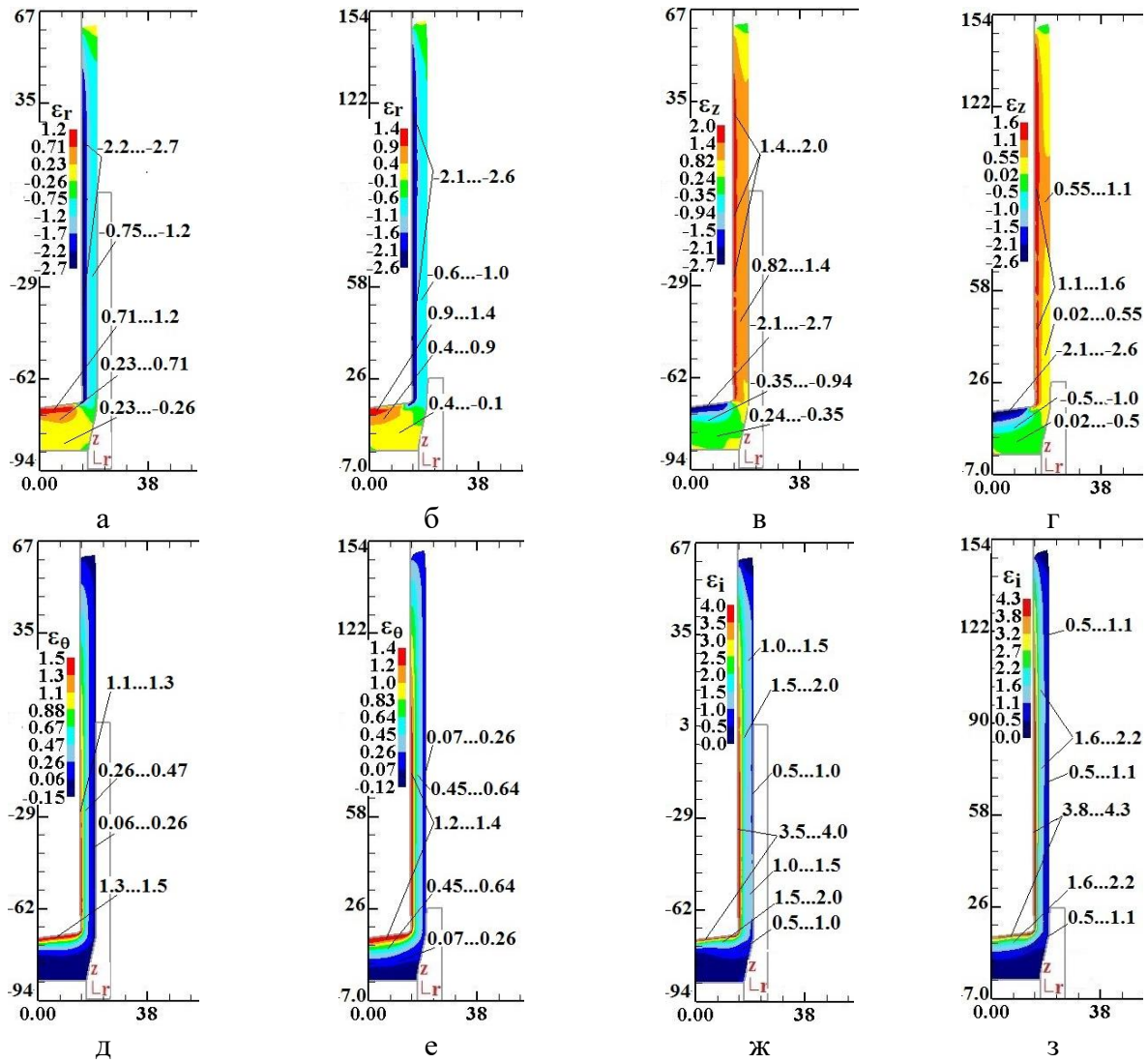


Рис. 9. Розподіли компонент деформацій у донних частинах та стінках напівфабрикатів для 1 і 3 варіантів видавлювання:

а, в, д, ж – для 1 варіанту видавлювання; б, г, е, з – для 3 варіанту видавлювання

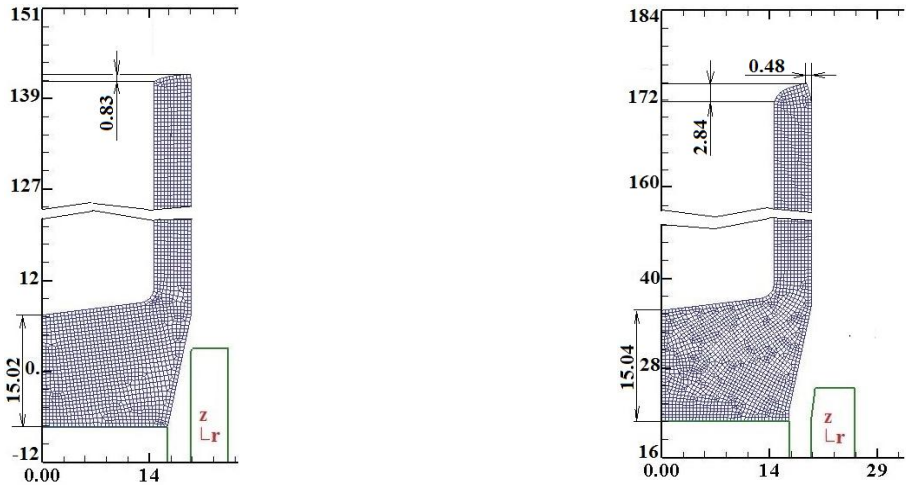


Рис. 10. Форма і розміри напівфабрикатів після виштовхування:

а – для 1 варіанту видавлювання, б – для 3 варіанту видавлювання

Таким чином, після 3 варіанту видавлювання здійснюється значне пропрацювання структури металу стінки в шарах зі сторони порожнини та на половині висоти донної частини напівфабрикатів. При застосуванні подальшого витягування з потоншенням таке пропрацювання буде в шарах металу в області зовнішньої поверхні. Тому у виробах по ширині стінки слід очікувати рівномірне пропрацювання структури в результаті виконання операцій видавлювання і витягування з потоншенням.

На рис. 10 зображено форму і розміри верхньої і донної частин напівфабрикатів після виштовхування їх із матриць. Приведено фрагменти напівфабрикатів, які розподілено на скінченні елементи. Торець стінки напівфабрикату для 1 варіанту видавлювання має невелику утяжину величиною 0.83 мм зі сторони порожнини (рис. 10а), а торець стінки напівфабрикату для 3 варіанту має більшу утяжину 2.84 мм та викривлення 0.48 мм зі сторони зовнішньої поверхні (рис. 10б).

По результатах моделювання було спроектовано і виготовлено штампове оснащення та проведено експериментальні роботи по 1 варіанту видавлювання напівфабрикатів. Для видавлювання використовували заготовки, на поверхнях яких створювали пористий шар-носій змащення шляхом фосфатування, а в якості змащення використовували розчин господарського мила. Видавлювання виконано на гідравлічному пресі зусиллям 4 МН.

На рис. 11 представлено фотографії плит штампу з деформуючим інструментом та напівфабрикати після видавлювання, один з яких наведено в розрізі.

а б в

Рис. 11. Плити штампу з деформуючим інструментом та напівфабрикати після видавлювання: а – верхня плита з пуансоном, б – нижня плита з матрицею, в – напівфабрикати

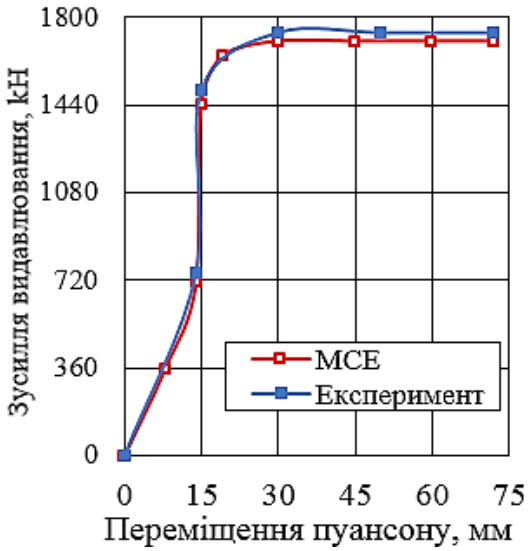


Рис. 12. Залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансону при видавлюванні

Графіки теоретичної і експериментальної залежностей зусилля видавлювання від переміщення пуансона наведено на рис. 12. Різниця між експериментальними значеннями і даними моделювання склала 50 кН (біля 3 %).

ВИСНОВКИ

1. В роботі шляхом моделювання МСЕ з використанням пружно-пластичної моделі металу проведено дослідження по 3 варіантах холодного видавлювання вісесиметричних порожнистих напівфабрикатів для застосування подальшого витягування з потоншенням. Використано традиційне зворотне видавлювання, пряме видавлювання з роздачою та зворотне видавлювання з роздачою в рухомій матриці.

2. Для розглянутих схем визначено залежності зусилля видавлювання, зусилля вимання пуансонів із напівфабрикатів та зусилля виштовхування напівфабрикатів із матриць від переміщення деформуючого інструменту.

3. Раціональною схемою для отримання таких напівфабрикатів є зворотне видавлювання в рухомій матриці, яке забезпечує менше зусилля видавлювання в порівнянні з традиційним зворотним видавлюванням та вищу продуктивність виготовлення в порівнянні з прямим видавлюванням з роздачою.

4. Для варіантів традиційного зворотного видавлювання і зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці моделюванням визначено і проведено порівняння результатів по розподілах питомих зусиль на деформуючому інструменті, розподілах температури у здеформованому металі напівфабрикатів та напружень у донних частинах напівфабрикатів.

5. Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією у напівфабрикатах після видавлювання оцінено по розподілах і величинах інтенсивності деформацій. Встановлено форму і розміри напівфабрикатів після виштовхування їх із матриць.

6. По даних моделювання спроектовано і виготовлено штамп та проведено експериментальні дослідження на гідравлічному пресі по варіанту традиційного зворотного видавлювання. Наведено експериментальні результати, які показали хорошу збіжність з даними моделювання по зусиллю видавлювання.

REFERENCES

1. Ryu C.H., Joun M.S. Finite element simulation of the cold forging process having a floating die. Journal of Materials Processing Technology**.** Vol. 112. 2001. Pp. 121-126. - https://doi.org/10.1016/S09240136(01)00567-2.
2. Ji D. S., Jin J. S., Ma W. J. et al. Multistage Cold Extrusion Process and Forming Rules of Shaft Parts Used in Gearbox. *Advanced Materials Research*. Vol. 148–149. 2010. Pp. 683–687. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.148-149.683.
3. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Abdi S.E. Numerical studies of some important design factors in radial–forward extrusion process. *Mater Manuf Processes.* Vol. 25. 2010. Pp. 857–863. https://doi.org/10.1080/10426910903536741.
4. Liewald M., Schiemann T., Mletzko C. Automatically Controlled (Cold-) Forging Processes. *Procedia CIRP*. Vol.18. 2014. Pp. 39–44. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.104.
5. Hosseini S.H., Abrinia K., Faraji G. Applicability of a modified backward extrusion process on commercially pure aluminum. *Materials & Design*.Vol. 65. 2015. Pp. 521-528. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.043.
6. Kalyuzhnyi V.L., Aliieva L.I., Kartamyshev D.A., Savchinskii I.G. Simulation of cold extrusion of hollow parts. *Metallurgist.* Vol. 61(5–6). 2017. Pp.359–365. https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1.
7. Noh J.H., Hwang B.B. Influence of punch geometry on surface deformation and tribological conditions in backward extrusion. *J Mech Sci Technol*. Vol. 32(1). 2018. Pp. 323–331. https://doi.org/10.1007/s12206-0171232-8.
8. Wang Q., Zhang Zh., Li X. et al. Development of a novel high straining backward extrusion process. *MATEC Web Conf.* Vol. 190. 2018. https://doi.org/10.1051/mateconf/201819006001.
9. Petkar P.M., Gaitonde V.N., Karnik S.R. et al. Analysis of Forming Behavior in Cold Forging of AISI 1010 Steel Using Artificial Neural Network. ***Metals.*** Vol. ***10.*** 2020 . https://doi.org/10.3390/met10111431.
10. Kalyuzhnyi V.L., Kalyuzhnyi O.V. (2020). Cold forming of hollow and rod products. Monograph. Kyiv: KIT. 248 p. (in Ukrainian).
11. Winiarski, G.; Gontarz, A.; Samołyk, G. Theoretical and Experimental Analysis of a New Process for Forming Flanges on Hollow Parts. *Materials.Vol.* ***13***. 2020. https://doi.org/10.3390/ma13184088
12. Aliiev I., Kaliuzhnyi V., Levchenko V. et al. The determination of deformation velocity effect on cold backward extrusion processes with expansion in the movable die of axisymmetric hollow: collective monograph “Mehatronics”. Vol II. Taylor and Francis Group, London. 2021. Pp. 81–100. https://doi.org/10.1201/9781003225447.

13. Broomand R., Babaei A., Bashiri H. M., et al. Processing MMC tubes via friction stir backward extrusion. *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*. Vol. 19. 2022. Pp. 225-242. https://doi.org/10.48301/KSSA.2021.287462.1550.

14. Aliiev I.S., Sivak R.I., Markov O.E. et al. The evaluation of workpiece deformability for the process of two-stage extrusion of hollow hull. *Int J Adv Manuf Technol*. Vol. 129. 2023. Pp. 1345–1353. https://doi.org/10.1007/s00170-023-12353-6.

15. Yang Ch., Liu Ch. The Study of Multi-Stage Cold Forming Process for the Manufacture of Relief Valve Regulating Nuts. *Applied Sciences.* Vol. *13*(10), 6299. 2023. https://doi.org/10.3390/app13106299.

16. Kaliuzhnyi V.L., Markov O.E., Aliieva L.I. *et al.* Investigation of hot combined extrusion of steel hollow conical parts. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* Vol.46. 2024. https://doi.org/10.1007/s40430-024-05032-4.

Kaliuzhnyi O., Kaliuzhnyi V., Solianov D. Forces, stresses and deformations at three variants of cold extrusion of semi-finished products for drawing with thinning

The article uses the finite element program DEFORM and an elastic-plastic metal model to study three variants of cold extrusion of axisymmetric hollow semi-finished products from AISI-1015 steel for drawing with thinning. The variants of the widespread traditional reverse extrusion, direct extrusion with dispensing, and reverse extrusion in a moving die were used. The dependence of extrusion forces, removal of punches from semi-finished products, and pushing semi-finished products out of dies on the movement of the deforming tool was established. A rational option for obtaining semi-finished products for pulling is reverse extrusion with dispensing in a moving die, which provides a lower deformation force compared to reverse extrusion and higher manufacturing productivity compared to direct extrusion with dispensing. For the variant of traditional reverse extrusion and reverse extrusion in a moving die, the modeling results were compared by the distributions of specific forces on the deforming tool, by the distributions of temperature in the volumes of semi-finished products and stress components in the bottom parts of semi-finished products at the end of extrusion, and by the distributions of strain components in the walls and bottom parts. The development of the metal structure by cold plastic deformation along the width of the walls and in the bottom parts of the semi-finished products was evaluated by the distribution and magnitude of the strain intensity. Extrusion in a moving die provides more intensive work along the wall width and in the bottom of the semi-finished product. The shape and dimensions of the semi-finished products were determined. Based on the modeling data, a die for reverse extrusion was designed and manufactured and experiments were conducted on a hydraulic press. The results of the experiments on the extrusion force showed good agreement with the calculated data.

Keywords: *cold extrusion, hollow semi-finished product, finite element method, forces, specific forces. stresses, strains.*

Калюжний Олександр Володимирович – канд. техн. наук, доц., ТОВ «Академія навчання ІТ»
Kaliuzhnyi Alexander – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, IT Education Academy
E-mail: alexandr.kaliuzhnyi@itea.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4526-6473

Калюжний Володимир Леонідович – д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»
Kaliuzhnyi Volodymyr - Doctor of Technical Sciences, Full Professor, NTU KPI
E-mail: kwl_2011@ukr.net
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4904-8879

Солянов Денис Олександрович – аспірант кафедри ОМТ, ДДМА
Solianov Denis – Graduate student Department of Metal Forming, DSEA
E-mail: annasolyanova.as@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0105-7241

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ
NTUU "Igor Sikorsky KPI" – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.

ТОВ «Академія навчання ІТ», Київ
"IT Training Academy" LLC, Kyiv

Стаття надійшла до редакції 25.07.25 р.