

Варіанти холодного видавлювання вісесиметричних порожнистих напівфабрикатів для подальшого витягування з потоншенням

В. В. Драгобецький¹ - ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9637-3079>

О. В. Калюжний² - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4526-6473>

В. Л. Калюжний³ - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4904-8879>

Received: 14 June 2025 / Revised: 6 November 2025 / Accepted: 24 December 2025

Анотація. Проблематика. Холодне видавлювання порожнистих напівфабрикатів використовується у якості першого переходу штампування при виготовленні гільз і корпусів снарядів певного калібру. В умовах масового виробництва напівфабрикатів на першому місці стоїть задача підвищення стійкості деформуючого інструменту при холодному пластичному формоутворенні, що приведе до зменшення собівартості напівфабрикатів. Збільшення стійкості можна досягти завдяки зниженню зусиль видавлювання і питомих зусиль на деформуючому інструменті, зокрема на пуансонах і матрицях. Для отримання порожнистих напівфабрикатів в теперішній час широко використовують схему зворотного видавлювання, при якому діаметр заготовки однаковий із зовнішнім діаметром напівфабрикату. Вихідні заготовки із гарячекатаного круглого прокату отримують шляхом безвідхідного відрізання зсувом в штампах на пресах. Застосування схем прямого видавлювання з роздачою та зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці приводять до зниження зусилля деформування, в порівнянні зі зворотним видавлюванням, та потребують використання заготовок меншого діаметра при однакових зовнішніх розмірах напівфабрикатів. Зменшення діаметра прокату для виготовлення заготовок шляхом розділення зсувом приводить до підвищення геометричної точності отриманих заготовок, що є другою задачею при видавлюванні порожнистих напівфабрикатів. Мета. Проведення порівняльного аналізу холодного видавлювання порожнистих напівфабрикатів для подальшого витягування з потоншенням по схемах зворотного видавлювання, прямого видавлювання з роздачою та зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці на основі моделювання методом скінченних елементів. Методика реалізації. Шляхом моделювання холодного видавлювання порожнистих напівфабрикатів по трьох схемах формоутворення встановлюються параметри, на базі аналізу яких вибирається раціональна схема для використання на виробництві. Результат. За допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) проведено моделювання процесів холодного видавлювання круглих порожнистих напівфабрикатів по схемах традиційного зворотного видавлювання, прямого видавлювання з роздачою та зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці. Встановлено залежності зусиль видавлювання, виїмання пуансонів із напівфабрикатів та виштовхування напівфабрикатів із матриць від переміщення деформуючого інструменту. Виявлено питомі зусилля на пуансонах, матрицях і виштовхувачах. Визначено розподіли температури та інтенсивності деформацій у здеформованому металі в кінці видавлювання. Проведено оцінку пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією по ширині стінок і у донних частинах порожнистих напівфабрикатів. Схема зворотного видавлювання в рухомій матриці забезпечує знижені значення зусилля деформування і потребує використання заготовки меншого діаметру в порівнянні зі зворотним видавлюванням та має підвищену продуктивність в порівнянні з прямим видавлюванням. Висновки. Для реалізації виготовлення порожнистих напівфабрикатів на виробництві запропоновано схему зворотного видавлювання в рухомій матриці.

Ключові слова: метод скінченних елементів, холодне видавлювання, порожнистий напівфабрикат, зусилля, температура інтенсивність деформацій.

Вступ

При виготовленні боєприпасів стрілецького і артилерійського озброєння певного калібру використовують операції холодного пластичного формоутворення в наступній послідовності: видавлювання порожнистих напівфабрикатів за один перехід, подальше деформування напівфабрикатів витягуванням з потоншенням за декілька переходів та одна-дві операції обтиску на

¹ Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна, <https://ror.org/05jv80548>

² Академія навчання ІТ, Київ, Україна

³ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна, <https://ror.org/00syn5v21>

✉ Володимир Калюжний
kw1_2011@ukr.net



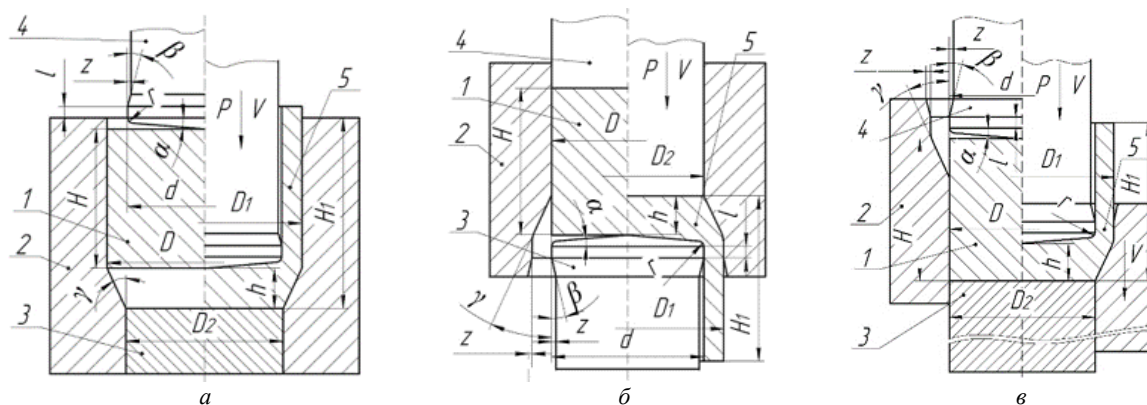


Рис. 1. Схеми видавлювання порожнистих напівфабрикатів: *a* – традиційне зворотне видавлювання, *б* – пряме видавлювання з роздачою, *в* – зворотне видавлювання з роздачою в рухомій матриці

кінцевому етапі виготовлення. При цьому вихідні заготовки з гарячекатаного прокату з урахуванням серійності виробництва отримують шляхом відрізанням зсувом в штампах на пресах. При холодному видавлюванні для підвищення продуктивності і зменшення собівартості напівфабрикатів вирішують завдання збільшення стійкості пуансонів, матриць і виштовхувачів. Зростання стійкості можна забезпечити шляхом зменшення зусилля видавлювання і питомих зусиль на вказаному деформуючому інструменті.

Видавлювання порожнистих напівфабрикатів для подальшого витягування з потоншенням, які мають конусну форму зі сторони донної частини, в основному виконують по трьох схемах формоутворення (рис. 1). Тут ліворуч від вісі симетрії показано вихідне положення на початку видавлювання, а праворуч – в кінці видавлювання. Найбільш широко розповсюджена схема зворотного видавлювання (рис. 1 *a*). Заготовку 1 встановлено в матриці 2, що має виштовхувач 3. Деформування здійснюють пуансоном 4, при переміщенні якого отримують напівфабрикат 5. На рис. 1 *б* зображено схему прямого видавлювання з роздачою (розширенням). Заготовку 1 розміщено в матриці 2 на пуансоні 3. При переміщенні штовхача 4 отримують напівфабрикат 5 із зовнішнім діаметром, який більший за діаметр заготовки. Така схема потребує меншого зусилля деформування та використання заготовки меншого діаметру в порівнянні з попередньою схемою. При цьому виникають складнощі при вилученні напівфабрикату 5 із штампу. Вказаний недолік відсутній для схеми зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці (рис. 1 *в*). Заготовку 1 встановлено в матриці 2 на виштовхувачі 3. При одночасному переміщенні в одному напрямку пуансона 4 і матриці 2 отримують напівфабрикат 5. Використання заготовок меншого діаметру забезпечує підвищення геометричної точності і точності дозування об'єму заготовок при розділенні прокату на заготовки шляхом відрізання зсувом в штампах на пресах.

При видавлюванні порожнистих напівфабрикатів для виготовлення вищевказаних виробів, крім отримання необхідної форми, потрібно провести певне пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією донної частини для досягнення заданих механічних властивостей у цьому місці. Тому на стадії розроблення технології видавлювання актуальними є завдання по визначенню параметрів по отриманню форми напівфабрикатів для витягування та встановлення пропрацювання структури металу пластичною деформацією у донних частинах.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Авторами [1] використано жорстко-пластичну модель МСЕ для моделювання трьох стадійного процесу холодного видавлювання з рухомою матрицею. Встановлено швидкість матриці, яка приводить до зменшення навантаження на деформуючий інструмент.

У статті [2] представлено п'ятиперехідну технологію холодного видавлювання. Спочатку було проведено визначення параметрів формоутворення на основі моделювання МСЕ в програмі Deform-2D. Результати експериментів підтвердили можливість реалізації такої технології.

У роботі [3] для алюмінію AA6063 досліджено вплив геометричних параметрів матриці на навантаження на деформуючому інструменті при радіальному видавлюванні. Для чисельного дослідження на жорстко-пластичній моделі було використано програмне забезпечення Deform-2D.

Достовірність результатів моделювання, була перевірена за допомогою експериментальних даних, наведених в літературі.

Авторами [4] представлено систему керування течією металу під час процесів холодного видавлювання. На прикладі процесу зворотного видавлювання

чашки показано, що завдяки керованим рухам компонентів інструменту можна контролювати надійність процесу формоутворення та його продуктивність, що приводить до розширення меж видавлювання.

Процес прямого-зворотного видавлювання порожнистих деталей, що реалізує значну пластичну деформацію для обробки ультрадрібнозернистих матеріалів наведено в роботі [5]. Аналіз МСЕ для чистого алюмінію показав вищу величину деформації та більшу рівномірність деформації в цьому процесі. Було досягнуто рівномірної еквівалентної пластичної деформації по товщині і довжині зразка.

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

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

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

В роботі [9] моделювання МСЕ 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.

В монографії [10] приведено результати моделювання в програмі Deform-2D процесів холодного видавлювання порожнистих і стержневих виробів з використанням пружно-пластичної і пластичної моделі металу та різних схем формоутворення. Для виробів різної конфігурації, в тому числі із необхідними механічними властивостями, із сталей і кольорових металів встановлено раціональні параметри для проектування технології та штампового оснащення.

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

У джерелі [12] за допомогою МСЕ і програми Deform-2D 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 збільшується температура деформованого металу, знижується зусилля вилучення пуансона із деформованої заготовки та зусилля виштовхування деталі із матриці.

Досліджено процес зворотного видавлювання порожнистого виробу із алюмінієвого сплаву в роботі [13]. Авторами виконано чисельне моделювання з використанням МСЕ в програмному комплексі DEFORM та проведено натурні експерименти. Деформування заготовки циліндричної форми в матриці відбувалось за допомогою пуансона, який обертався при поступальному русі. Автори стверджують, що завдяки обертанню заготовка розігрівається та в зоні деформування процес змінюється з холодного на гаряче видавлювання. Вказано, що отриманий виріб має підвищену міцність та меншу пластичність в порівнянні з традиційним способом видавлювання, коли пуансон рухається поступально без обертання.

Для зменшення нерівномірності деформації досліджено новий спосіб видавлювання порожнистих виробів за два переходи в роботі [14]. На першому переході одночасно виконується зворотне видавлювання стінки корпусу і пряме видавлювання з утворенням технологічного уступу в донній частині корпусу, а на другому переході відбувається витіснення металу з уступу назад в донну частину корпусу. Наведено результати експериментального дослідження та скінченно-елементного моделювання двохстадійного процесу, які підтверджують перевагу способу в зниженні силових режимів та нерівномірності деформацій.

У джерелі [15] було проведено чисельне 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 новий спосіб видавлювання за одну операцію порожнистих конічних виробів зі змінною товщиною стінки. Для моделювання за допомогою МСЕ використано програму Deform-2D, яке дозволило виявити зусилля деформування, розподіли питомих зусиль на інструменті та напружень і деформацій. Розрахунком показано і експериментально підтверджено можливість зниження силових режимів при формоутворенні конічних порожнистих виробів.

На основі аналізу літературних даних встановлено, що для отримання порожнистих напівфабрикатів і виробів в основному використовують схему холодного зворотного видавлювання, в якому діаметр вихід-

ної заготовки однаковий із зовнішнім діаметром виробу. При цьому має місце недостатнє пропрацювання структури металу пластичною деформацією донних частин напівфабрикатів для отримання заданих механічних властивостей при виробництві виробів спеціального призначення. Застосування схем прямого видавлювання з роздачою і зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці дозволяє усунути недолік попередньої схеми та зменшити зусилля деформування і підвищити стійкість деформуючого інструменту. Однак в літературних джерелах практично відсутні дані по видавлюванню з роздачою для кутів $\gamma < 20^\circ$ (див. рис. 1 б), які потрібні для подальшого витягування з потоншення отриманих напівфабрикатів. Для проведення моделювання холодного видавлювання порожнистих напівфабрикатів раціональним є використання скінченно-елементної програми Deform, яка дозволяє враховувати всі основні фактори, що впливають на таке формоутворення, та дозволяє визначити необхідні параметри по проектуванню технології і штампового оснащення для отримання напівфабрикатів потрібної форми з заданими механічними властивостями деформованого металу.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є порівняльний аналіз результатів моделювання за допомогою МСЕ холодного видавлювання порожнистих напівфабрикатів по трьох схемах формоутворення. Задачами дослідження було встановлення зусиль видавлювання, вилучення напівфабрикатів із штампів та питомих зусиль на деформуючому інструменті; визначення кінцевих форм і розмірів напівфабрикатів; виявлення напружено-деформованого стану і пропрацювання структури металу пластичною деформацією; обґрунтування раціональної схеми для видавлювання.

Матеріали та методи дослідження

Для проведення дослідження було використано три вищенаведені схеми видавлювання порожнистих напівфабрикатів із сталі 15 (AISI 1015). Моделювання вісесиметричного видавлювання проведено в скінченно-елементній програмі Deform 2D [17] з використанням пружно-пластичної моделі металу для можливості визначення зусиль виймання пуансонів із деформованих заготовок та виштовхування напівфабрикатів із матриць. Швидкість деформування складала $V = 2$ мм/сек, а тертя враховано по Кулону з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,08$.

При видавлюванні по трьох схемах використовували пуанسونи та отримували напівфабрикати з однаковими розмірами. Розміри заготовок і інструменту: $H = 72$ мм, $D = 40$ мм для схеми 1 а (див. рис. 1) і $H = 100$ мм, $D = 34$ мм для схем 1 б і 1 в; $D_1 = 40$ мм, $D_2 = 34$ мм, $h = 15$ мм, $d = 30$ мм, $\alpha = 7^\circ$, $\beta = 7^\circ$, $r = l = 2$ мм, $z = 0,15$ мм, $\gamma = 12^\circ$. Розміри напівфабрикатів: $D_1 = 40$ мм, $D_2 = 34$ мм, $h = 15$ мм, $d = 30$ мм, $H_1 = 150$ мм.

Експериментальні дослідження проведено на гідравлічному пресі ДБ 2436 з визначенням зусилля по показниках манометра пресу.

Результати дослідження

Розрахункові положення із програми Deform в розрізі заготовки і деформуючого інструменту при моделюванні по трьох варіантах видавлювання представлено на рис. 2.

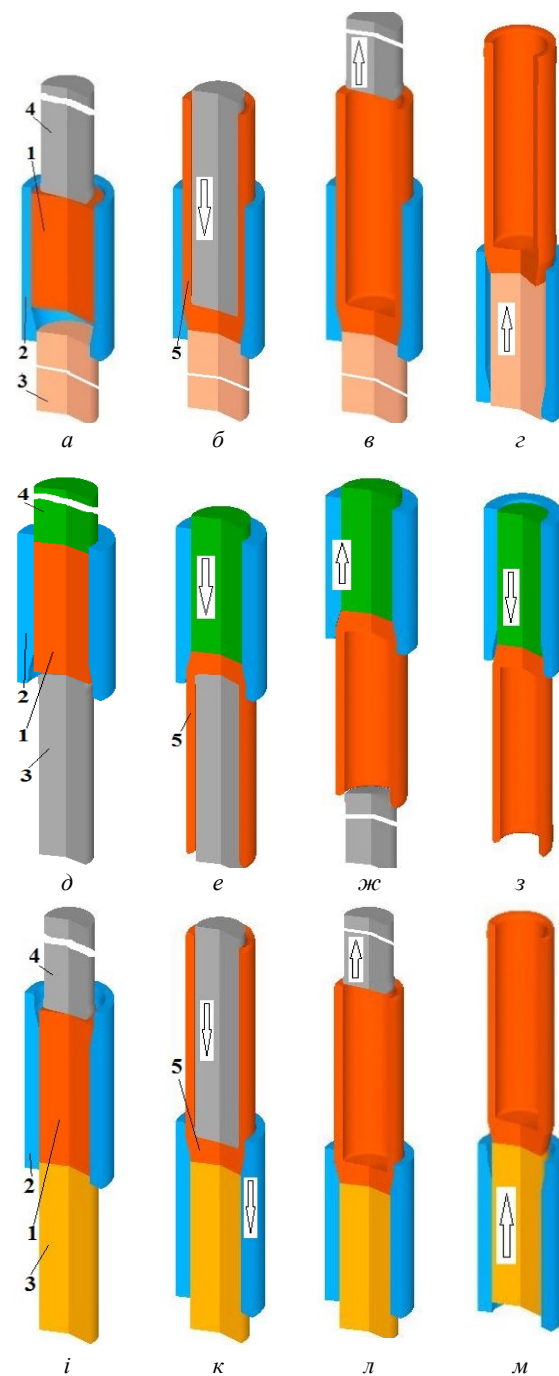


Рис. 2. Розрахункові положення заготовки і деформуючого інструменту: а–г при зворотному видавлюванні, д–з при прямому видавлюванні з роздачою, і–м при зворотному видавлюванні з роздачою в рухомій матриці

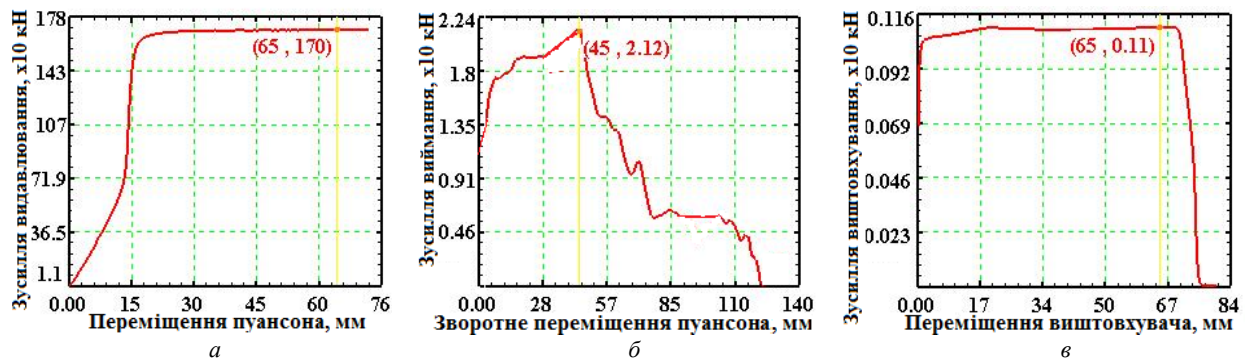


Рис. 3. Силкові режими при зворотному видавлюванні: *а* – залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона; *б* – залежність зусилля виймання від зворотного переміщення пуансона; *в* – залежність зусилля виштовхування від переміщення виштовхувача

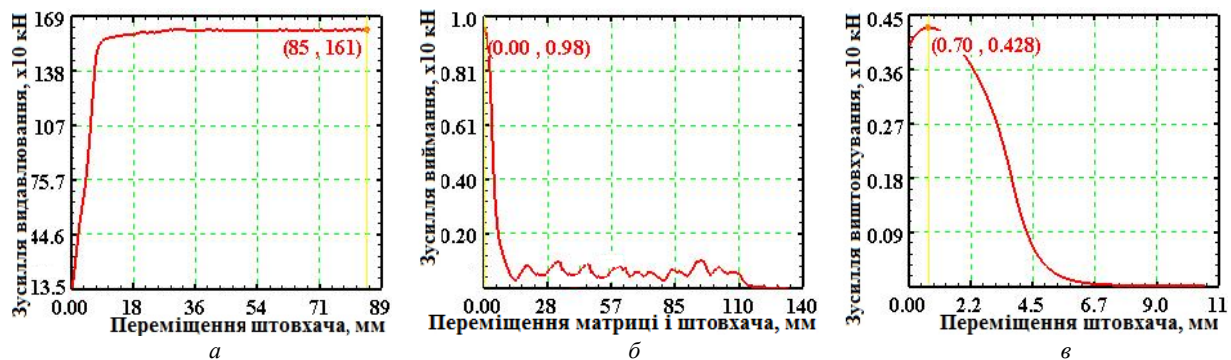


Рис. 4. Зусилля при прямому видавлюванні з роздачою: *а* – залежність зусилля видавлювання від переміщення штовхача; *б* – залежність зусилля виймання від переміщення матриці і штовхача; *в* – залежність зусилля виштовхування від переміщення штовхача

На рис. 2 *а* зображено положення на початку зворотного видавлювання. Заготовку 1 розміщено в матриці 2 з конусною поверхнею. В матриці 2 встановлено виштовхувач 3. При переміщенні пуансону 4 отримують напівфабрикат 5 з конусною поверхнею на донній частині (рис. 2 *б*). Після зворотного переміщення пуансону 4 напівфабрикат 5 залишається в матриці 2 (рис. 2 *в*) та видаляється з неї за допомогою виштовхувача 3 (рис. 2 *г*). На рис. 2 *д* показано положення на початку прямого видавлювання з роздачою. Заготовку 1, яка має менший діаметр в порівнянні з зовнішнім розміром напівфабрикату, розміщено в матриці 2 на пуансоні 3. Деформування здійснюють штовхачем 4 з отриманням напівфабрикату 5 (рис. 2 *е*). При переміщенні матриці 2 з штовхачем 4 відбувається знімання напівфабрикату 5 з пуансона 3 (рис. 2 *ж*). Виштовхування напівфабрикату 5 з матриці 2 здійснюють штовхачем 4 (рис. 2 *з*). Положення на початку зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці наведено на рис. 2 *и*. Заготовку 1 встановлено в матриці 2 на виштовхувачі 3. При одночасному переміщенні пуансона 4 матрицею 2 отримують напівфабрикат 5 (рис. 2 *к*). При зворотному переміщенні пуансона 4 напівфабрикат 5 залишається в матриці 2 (рис. 2 *л*) та видаляється з неї

за допомогою виштовхувача 3 (рис. 2 *м*). Ця схема видавлювання, в порівнянні з попередньою, дозволяє суттєво спростити видалення напівфабрикату після формоутворення.

Силкові режими при зворотному видавлюванні представлено на рис. 3. Тут і нижче графіки зусиль побудовані в програмі Deform і на них відмічені максимальні значення зусиль. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону показано на рис. 3 *а*. Спочатку проходить заповнення металом конусної поверхні матриці при зусиллі 720 кН. Далі зусилля інтенсивно зростає і досягає постійного значення 1700 кН на усталеній стадії процесу видавлювання. Найбільша величина зусилля виймання пуансона із напівфабрикату склала 21,2 кН (рис. 3 *б*). Зусилля виштовхування напівфабрикату із матриці отримано 1,1 кН на протязі цього процесу (рис. 3 *в*).

Зусилля при прямому видавлюванні з роздачою наведено на рис. 4. На рис. 4 *а* зображено залежність зусилля видавлювання від переміщення штовхача. Як і в попередній схемі видавлювання, зусилля на неусталеній стадії інтенсивно зростає та досягає величини 1610 кН на усталеній стадії. Зусилля виймання пуансону із напівфабрикату досягає максимального значення

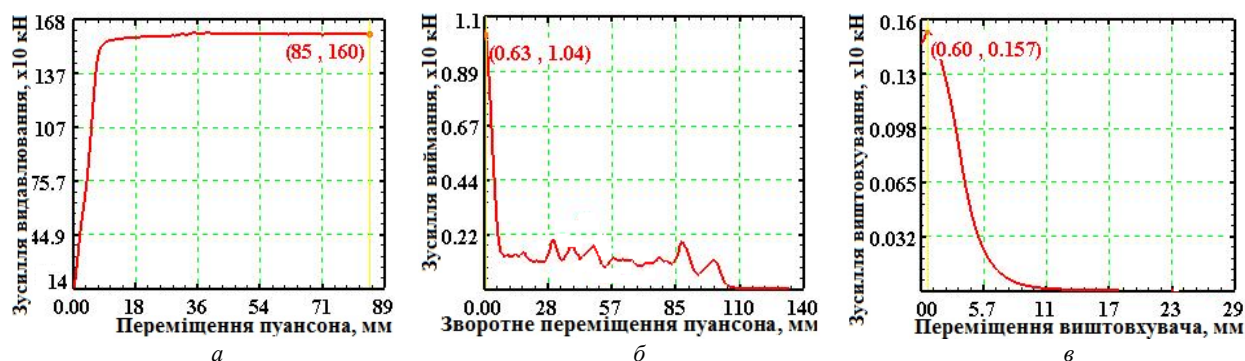


Рис. 5. Силкові режими при зворотному видавлюванні з роздачою в рухомій матриці: *a* – залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону; *б* – залежність зусилля виймання від зворотного переміщення пуансону; *в* – залежність зусилля виштовхування від переміщення виштовхувача

ня 9,8 кН на початку цього процесу (рис. 4 б). Також максимальну величину 4,28 кН має зусилля на початку виштовхування напівфабрикату із матриці (рис. 4 в).

На рис. 5 зображено силкові режими при зворотному видавлюванні з роздачою в рухомій матриці. На рис. 5 *a* показано залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону. Для цієї схеми видавлювання на усталеній стадії отримано найменшу величину зусилля (1600 кН). По аналогії зі схемою прямого видавлювання з роздачою зусилля виймання пуансону із напівфабрикату досягає максимального значення 10,4 кН на початку цього процесу (рис. 5 б), а зусилля виштовхування напівфабрикату із матриці – 1,57 кН (рис. 5 в).

Таким чином, по силкових режимах видавлювання раціональною схемою для отримання порожнистих напівфабрикатів під подальше витягування з потоншення є зворотне видавлювання в рухомій матриці. Така схема забезпечує зменшення зусилля видавлювання на 5,8 % в порівнянні з традиційним зворотним видавлюванням та не виникають складнощі при видаленні напівфабрикатів в порівнянні зі схемою прямого видавлювання з роздачою. Тому надалі будемо порівнювати результати моделювання для схем зворотного видавлювання і зворотного видавлювання в рухомій матриці.

Для проектування штампного оснащення, вибору матеріалу для деформуючого інструменту та встановлення кількості бандажів для матриці необхідно знати розподіли питомих зусиль на контактуючих поверхнях здеформованих заготовок з інструментом. Питомі зусилля можна оцінити по розподілах нормальних напружень σ_n на таких поверхнях за допомогою програми Deform. На рис. 6 представлено розподіли напружень σ_n на поверхнях половин напівфабрикатів, які контактують з пуансонами, матрицями та виштовхувачами. На рис. 6 *a* показано ці розподіли для напівфабрикату в кінці традиційного зворотного видавлювання. Тут і на подальших рисунках тонкими лініями зображено деформуючий інструмент, а розміри по ві-

сях r і z наведено в міліметрах. Найбільші величини питомих зусиль у межах $\sigma_n = 2300\text{--}2500$ МПа виникають на контактуючій поверхні торця пуансону з напівфабрикатом. На поверхні з виштовхувачем отримано $\sigma_n = 1300\text{--}1920$ МПа, а на конусній поверхні матриці – $\sigma_n = 950\text{--}1700$ МПа. Для цієї схеми видавлювання матриця повинна мати два бандажі. Розподіли σ_n в кінці зворотного видавлювання в рухомій матриці зображено на рис. 6 б. Використання цієї схеми приводить до суттєвого зменшення питомих зусиль на пуансоні ($\sigma_n = 2160\text{--}2300$ МПа) і матриці ($\sigma_n = 930\text{--}1410$ МПа). Тому слід очікувати підвищення стійкості такого інструменту.

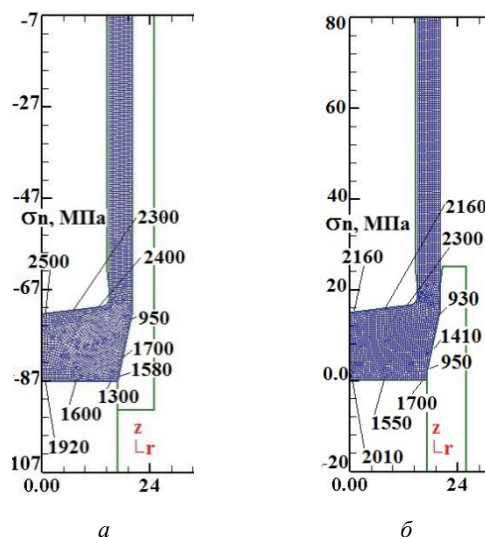


Рис. 6. Розподіли нормальних напружень на контактуючих поверхнях напівфабрикатів: *a* – в кінці зворотного видавлювання, *б* – в кінці зворотного видавлювання в рухомій матриці

При холодному пластичному формоутворенні видавлюванням підвищується температура здеформованого металу завдяки перетворенню частини пластич-

ної деформації в тепло та дії тертя на контактуючих поверхнях. На рис. 7 показано розподіли температури у напівфабрикатах в кінці видавлювання. В кінці традиційного зворотного видавлювання (рис. 7 *a*) в зоні переходу донної частини в стінку напівфабрикату отримано температуру у межах $T = 160\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$. У донній частині температура підвищується до $T = 40\text{--}160\text{ }^{\circ}\text{C}$. По висоті стінки температура змінюється від $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зоні торця до $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ в області переходу в донну частину. В кінці формоутворення по схемі зворотного видавлювання в рухомій матриці спостерігається дещо менше підвищення температури zdeформованого металу (рис. 7 *б*). В зоні переходу донної частини у стінку напівфабрикату температура підвищується до $T = 150\text{--}170\text{ }^{\circ}\text{C}$. У донній частині температура досягає значень у межах $T = 50\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$. В зоні торця стінки напівфабрикату отримано $T = 100\text{--}130\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в місці переходу стінки в донну частину – $T = 130\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зниження температури для схеми зворотного видавлювання в рухомій матриці сприяє меншому розігріву деформуючого інструменту при видавлюванні.

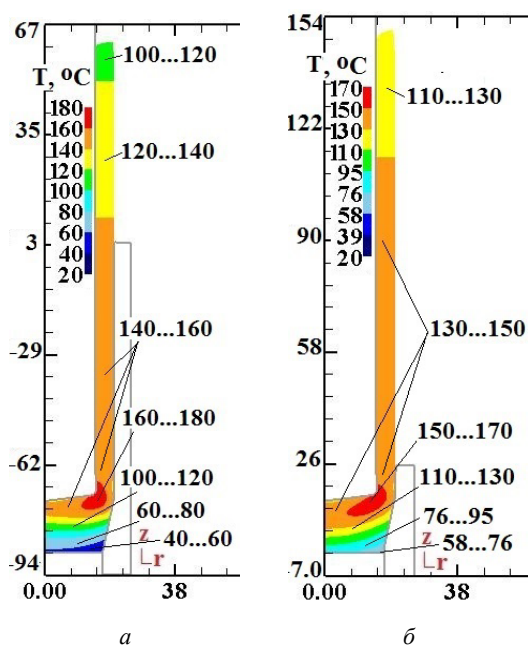


Рис. 7. Розподіли температури (T , $^{\circ}\text{C}$) по об'єму половини напівфабрикатів: *a* – в кінці зворотного видавлювання, *б* – в кінці зворотного видавлювання в рухомій матриці

Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією у напівфабрикатах після видавлювання можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ϵ_i . Розподіли ϵ_i по об'єму половини напівфабрикатів після зворотного видавлювання та зворотного видавлювання в рухомій матриці показано на рис. 8. 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 цьому місці отримано $\epsilon_i = 3.5\text{--}4.0$, по середині стінки – $\epsilon_i = 1.5\text{--}2.0$, а біля зовнішньої поверхні – $\epsilon_i = 0.5\text{--}1.0$ (рис. 8 *a*). По висоті донної частини напівфабрикату ϵ_i зменшується від значень у межах $\epsilon_i = 3.5\text{--}4.0$ в зоні біля торця пуансону до $\epsilon_i = 0.5\text{--}1.0$ на половині висоти цієї частини.

При зворотному видавлюванні в рухомій матриці відбувається незначне збільшення пропрацювання структури металу напівфабрикату холодною пластичною деформацією. В шарах металу стінки зі сторони порожнини отримано інтенсивність деформацій у межах $\epsilon_i = 3.8\text{--}4.3$, по середині стінки – $\epsilon_i = 1.6\text{--}2.2$ і в шарах металу біля зовнішньої поверхні – $\epsilon_i = 0.5\text{--}1.1$ (рис. 8 *б*). У донній частині в зоні біля торця пуансона отримано $\epsilon_i = 3.8\text{--}4.3$ зі зменшенням до $\epsilon_i = 0.5\text{--}1.1$ на половині висоти цієї частини.

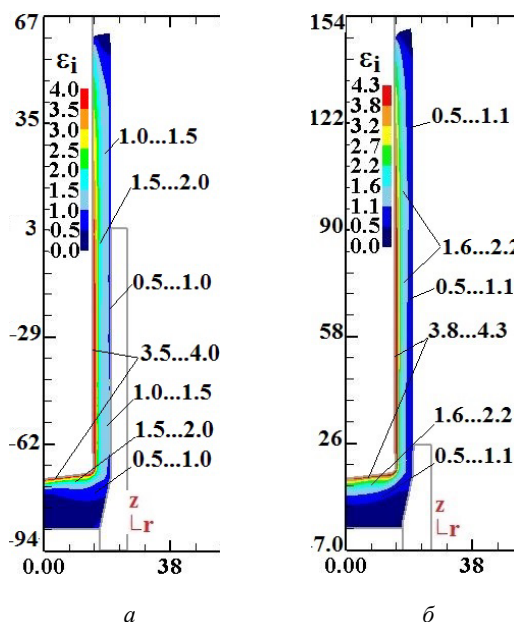


Рис. 8. Розподіли інтенсивності деформацій ϵ_i у напівфабрикатах: *a* – після зворотного видавлювання, *б* – після зворотного видавлювання в рухомій матриці

Таким чином, після видавлювання здійснюється значне пропрацювання структури металу в шарах зі сторони порожнини напівфабрикатів. При подальшому витягуванні з потоншенням таке пропрацювання має місце в шарах металу в області зовнішньої поверхні. Тому у виробках по ширині стінки слід очікувати рівномірне пропрацювання структури в результаті виконання операцій видавлювання і подальшого витягування з потоншенням.

Форму і розміри верхньої і донної частин напівфабрикатів після виштовхування їх із матриць приведено на рис. 9, зображено половини напівфабрикатів, які розподілено на скінченні елементи. Торцеві стінки

напівфабрикату після зворотного видавлювання має утяжину зі сторони порожнини (рис. 9 а), а торець стінки у напівфабрикаті після зворотного видавлювання в рухомій матриці має утяжину і викривлення (рис. 9 б).

Для перевірки результатів моделювання було проведено експериментальні роботи по зворотному видавлюванню напівфабрикатів. Для видавлювання використовували заготовки, на поверхнях яких створювали пористий шар-носій змащення шляхом фосфатування, а в якості змащення використовували розчингосподарського мила.

На рис. 10 наведено графіки теоретичної і експериментальної залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансона. Різниця між експериментальними значеннями і даними моделювання складала 50 кН (біля 3 %).

На рис. 11 представлено фотографію пуансона для видавлювання.

Фотографії напівфабрикатів після видавлювання, один з яких розрізано пополам, зображено на рис. 12.

Висновки

1. В роботі шляхом моделювання МСЕ з використанням пружно-пластичної моделі металу проведено дослідження холодного видавлювання круглих порожнистих напівфабрикатів для подальшого витягування з потоншенням по схемах традиційного зворотного видавлювання, прямого видавлювання з роздачою та зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці.

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

3. Рациональною 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.

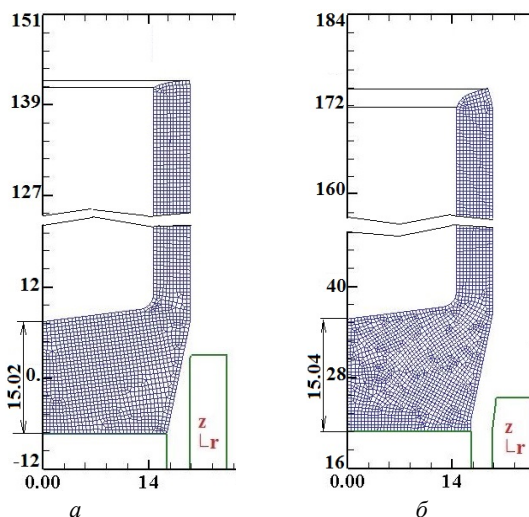


Рис. 9. Форма і розміри напівфабрикатів: а – після зворотного видавлювання, б – після зворотного видавлювання в рухомій матриці

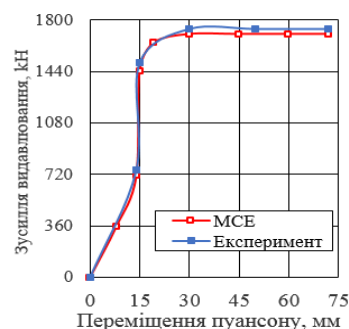


Рис. 10. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону при видавлюванні



Рис. 11. Фотографія пуансона для видавлювання

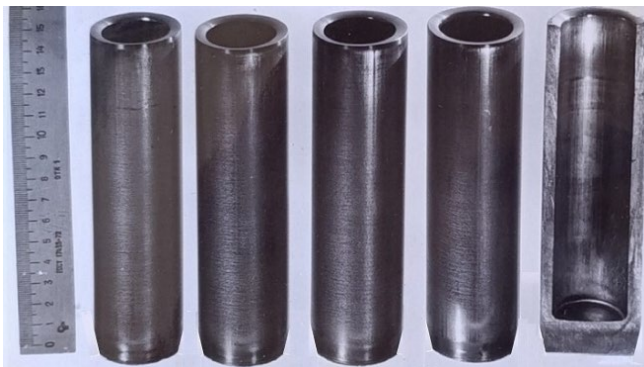


Рис. 12. Фотографія напівфабрикатів після зворотного видавлювання

4. Для схем традиційного зворотного видавлювання і зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці моделюванням визначено і проведено порівняння результатів по розподілу питомих зусиль на деформуючому інструменті і розподілу температури у здеформованому металі напівфабрикатів.

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

6. Наведено результати експериментальних досліджень по схемі зворотного видавлювання напівфабрикатів, які показали по зусиллю видавлювання хорошу збіжність даних експериментів і моделювання.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що вони не мають жодного конфлікту інтересів щодо цього дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські або будь-якого іншого характеру, які могли б вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

References

- [1] C. H. Ryu and M. S. Joun, "Finite element simulation of the cold forging process having a floating die," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 112, pp. 121–126, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00567-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00567-2).
- [2] D. S. Ji et al., "Multistage Cold Extrusion Process and Forming Rules of Shaft Parts Used in Gearbox," *Advanced Materials Research*, Vol. 148–149, pp. 683–687, 2010, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.148-149.683>.
- [3] H. Jafarzadeh, M. Zashakoyan and E. Abdi Sobbouhi, "Numerical studies of some important design factors in radial–forward extrusion process," *Mater Manuf Processes*, Vol. 25, pp. 857–863, 2010, doi: <https://doi.org/10.1080/10426910903536741>.
- [4] M. Liewald, T. Schiemann and C. Mletzko, "Automatically Controlled (Cold-) Forging Processes," *Procedia CIRP*, Vol. 18, pp. 39–44, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.104>.
- [5] S. H. Hosseini, K. Abrinia and G. Faraji, "Applicability of a modified backward extrusion process on commercially pure aluminum," *Materials & Design*, Vol. 65, pp. 521–528, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.043>.
- [6] V. L. Kaliuzhnyi et al., "Simulation of cold extrusion of hollow parts," *Metallurgist*, Vol. 61, pp. 359–365, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>.
- [7] J. H. Noh and B. B. Hwang, "Influence of punch geometry on surface deformation and tribological conditions in backward extrusion," *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 32, pp. 323–331, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-017-1232-8>.
- [8] Q. Wang et al., "Development of a novel high straining backward extrusion process," *MATEC Web Conf.*, Vol. 190, 2018, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819006001>.
- [9] P. M. Petkar et al., "Analysis of Forming Behavior in Cold Forging of AISI 1010 Steel Using Artificial Neural Network," *Metals*, Vol. 10, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/met10111431>.
- [10] V. L. Kaliuzhnyi and O. V. Kaliuzhnyi, "Kholodne obiemne shtampuvannia porozhnistykh i sterzhnevyykh vyrobiv," Monohrafiia, Kyiv: KYT, 2020.
- [11] G. Winiarski, A. Gontarz and G. Samołyk, "Theoretical and Experimental Analysis of a New Process for Forming Flanges on Hollow Parts," *Materials*, Vol. 13, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13184088>.
- [12] I. Aliiev et al., "The determination of deformation velocity effect on cold backward extrusion processes with expansion in the movable die of axisymmetric hollow parts," in *Mechatronic Systems 2*, Taylor and Francis Group, London, pp. 81–100, 2021, doi: <https://doi.org/10.1201/9781003225447>.
- [13] R. Broomand et al., "Processing MMC tubes via friction stir backward extrusion," *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*, Vol. 19, pp. 225–242, 2022, doi: <https://doi.org/10.48301/KSSA.2021.287462.1550>.
- [14] I. S. Aliiev et al., "The evaluation of workpiece deformability for the process of two-stage extrusion of hollow hull," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 129, pp. 1345–1353, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12353-6>.
- [15] Ch. Yang and Ch. Liu, "The Study of Multi-Stage Cold Forming Process for the Manufacture of Relief Valve Regulating Nuts," *Applied Sciences*, Vol. 13(10), 6299, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/app13106299>.
- [16] V. L. Kaliuzhnyi et al., "Investigation of hot combined extrusion of steel hollow conical parts," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, Vol. 46, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05032-4>.
- [17] V. S. Parshin et al., *Practical Guide to the DEFORM 3D Software Package: textbook*. Yekaterinburg: UrFU, 2010. [Online]. Available: https://www.scribd.com/document/440818629/deform-3d-ebook-2-en?language_settings_changed=English.

Options for cold extrusion of axially symmetrical hollow semi-finished products for further drawing with thinning

Volodymyr Dragobetskyi¹ • Oleksandr Kaliuzhnyi² • Volodymyr Kaliuzhnyi³

¹ Mykhailo Ostrohradskyi National Technical University, Kremenchuk, Ukraine

² IT education academy, Kyiv, Ukraine

³ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract. *Problems.* Cold extrusion of hollow semi-finished products is used as the first stamping step in the manufacture of shell casings and bodies of certain caliber. In the context of mass production of semi-finished products, the task of increasing the stability of the deforming tool during cold forming is of paramount importance, which will lead to a reduction in the cost of semi-finished products. Increased durability can be achieved by reducing extrusion forces and specific forces on the deforming tool, in particular on punches and dies. To produce hollow semi-finished products, a reverse extrusion scheme is currently widely used, in which the diameter of the workpiece is the same as the outer diameter of the semi-finished product. Hot-rolled round billets are produced from hot-rolled round steel by waste-free shear cutting in dies on presses. The use of forward extrusion with feeding and reverse extrusion with feeding in a moving die results in a lower deformation force compared to reverse extrusion and requires the use of smaller billets with the same external dimensions of semi-finished products. Reducing the diameter of rolled products for the manufacture of blanks by shear separation leads to an increase in the geometric accuracy of the resulting blanks, which is the second objective when extruding hollow semi-finished products.

Objective. A comparative analysis of cold extrusion of hollow semi-finished products for further drawing with thinning using the schemes of reverse extrusion, direct extrusion with dispensing and reverse extrusion with dispensing in a moving die based on computer modeling by the finite element method. *Methods of realization.* By simulating the cold extrusion of hollow semi-finished products according to three molding schemes, parameters are established, based on the analysis of which a rational scheme is selected for use in production.

Results. Using the finite element method (FEM), the processes of cold extrusion of round hollow semi-finished products were modeled according to the schemes of traditional reverse extrusion, direct extrusion with dispensing, and reverse extrusion with dispensing in a moving die. The dependence of the forces of extrusion, removal of punches from semi-finished products, and pushing semi-finished products out of dies on the movement of the deforming tool was determined. The specific forces on the punch, die, and ejector were determined. The distributions of temperature and strain intensity in the deformed metal at the end of extrusion were determined. The development of the metal structure by cold plastic deformation along the width of the walls and in the bottom parts of hollow semi-finished products was evaluated. The scheme of reverse extrusion in a moving die provides reduced values of the deformation force and requires the use of a smaller diameter billet compared to the reverse extrusion and has increased productivity compared to the direct extrusion. *Conclusions.* To realize the production of hollow semi-finished products in production, a scheme of reverse extrusion in a moving die is proposed.

Keywords: finite element method, cold extrusion, hollow semi-finished product, force, temperature, strain rate.
