

Вплив швидкості деформування на процес гарячого видавлювання з роздачою круглих порожнистих напівфабрикатів

В.В. Драгобецький¹ • О.В. Калюжний² • В.Л. Калюжний³ • С.В. Ситник³

Received: 23 January 2024 / Revised: 19 February 2024 / Accepted: 1 March 2024

Анотація. Штампування круглих порожнистих напівфабрикатів гарячим зворотним видавлюванням є однією з початкових операцій при виготовленні порожнистих виробів спеціального призначення. На зусилля і формозміну металу при гарячому пластичному формоутворенні суттєво впливає швидкість деформування або швидкість переміщення деформуючого інструменту. Для виробів спеціального призначення потрібно забезпечити певні механічні властивості по висоті стінки і в донній частині. Властивості по висоті стінки забезпечуються на подальших переходах витягування з потоншенням напівфабрикату, що отримано гарячим видавлюванням, при якому здійснюється пропрацювання структури металу пластичною деформацією з досягненням необхідних властивостей. Тому актуальною задачею є дослідження впливу швидкості деформування на зусилля і формозміну металу при гарячому зворотному видавлюванні порожнистих напівфабрикатів.

Визначення за допомогою моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) впливу швидкості деформування на параметри гарячого зворотного видавлювання з роздачою порожнистих напівфабрикатів із заготовок круглого і квадратного перерізу та порівняння результатів теоретичних досліджень.

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

За допомогою МСЕ проведено моделювання процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою із маловуглецевої сталі круглих порожнистих напівфабрикатів з виступами на торці донної частини зі сторони порожнини та на зовнішній поверхні. Швидкість деформування була у межах 20–80 м/сек. Використані заготовки круглого і квадратного перерізу. Встановлено залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансону. Виявлено розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті. Визначено напружено-деформований стан та температурний розподіл у здеформованому металі в кінці видавлювання. Проведено оцінку пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією та виконано порівняння отриманих результатів.

Встановлено вплив швидкості деформування на параметри гарячого зворотного видавлювання з роздачою круглих порожнистих напівфабрикатів

Ключові слова: метод скінченних елементів, гаряче зворотне видавлювання, заготовка круглого і квадратного перерізу, порожнистий напівфабрикат, швидкість деформування, температура, зусилля, напруження, деформації.

Вступ

При виготовленні порожнистих виробів спеціального призначення, в залежності від розмірів і марки матеріалу, використовують процеси холодного чи

гарячого зворотного видавлювання на перших переходах штампування та операції витягування з потоншенням і обтиску на подальших переходах. Для таких виробів, крім отримання потрібної форми, необхідно забезпечити певне пропрацювання структури металу пластичною деформацією для досягнення відповідних механічних властивостей у здеформованому металі донної частини та по висоті стінки. Гаряче зворотне видавлювання напівфабрикатів із круглих заготовок, яке застосовують при виробництві виробів великих розмірів, та проектування штампного оснащення достатньо добре описано в джерелі [1]. На цьому переході забезпечується пропрацювання пластичною деформацією

✉ С.В. Ситник
sytnykstas@ukr.net

¹ НТУ ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

² Академія навчання ІТ, Київ, Україна

³ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

донної частини напівфабрикатів. Використання вихідних заготовок квадратного перерізу дозволяє здешевити виробництво порожнистих напівфабрикатів та збільшити пропрацювання пластичною деформацією структури металу донної частини таких напівфабрикатів [2].

На процеси гарячого пластичного формоутворення значний вплив має швидкість деформування. Тому актуальними є дослідження, які спрямовані на визначення впливу швидкості деформування на гаряче зворотне видавлювання порожнистих напівфабрикатів.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

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

Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) для удосконалення існуючих і розробки нових технологій по гарячому пластичному формоутворенню різноманітних виробів із кольорових металів наведено в роботі [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 порожнистого виробу з матеріалу In718 за допомогою способу гарячого зворотного видавлювання. В різних частинах отриманої деталі досліджено структуру зерна. Автори вказують, що більш дрібну та рівномірну структуру зерна вдалося отримати із заготовки, яка перед початком зворотного видавлювання була розігріта до температур 1000–1050 °С, а швидкість деформування складала 5 мм/с.

З використанням МСЕ та програми Forge, досліджено процес радіально-зворотного видавлювання роторною головкою [6]. Також проведено натурний експеримент такого процесу за допомогою торсійного пластоміру STD 810. 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]. Новизна схеми полягає в наступному. Між пуансоном та матрицею розміщено нерухому втулку, що має в собі отвір, в якому встановлено заготовку. Пуансон спочатку деформує заготовку в отворі втулки, внаслідок чого матеріал заготовки починає текти між втулкою та матрицею доки виріб не набуде необхідної гео-

метричної форми. Дослідження виконано за допомогою МСЕ та проведено натурні експериментів на заготовках із алюмінію. Автори дослідження, вказують на те, що при застосуванні такої схеми зворотного видавлювання порожнистого виробу ступінь деформації збільшується, структура матеріалу покращується за рахунок зменшення дефектів в zdeформованому металі отриманого виробу.

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

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

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

Досліджено процес зворотного видавлювання порожнистого виробу [11]. Авторами проведено чисельне моделювання з використанням МСЕ в програмному комплексі DEFORM та виконано натурні експерименти. Вихідним матеріалом для заготовки обрано алюмінієвий сплав. Заготовка циліндричної форми розміщувалась у матриці, а деформування її відбувалось за допомогою пуансона, який при поступальному русі також обертався. Автори стверджують, що завдяки такому обертанню, 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 традиційним способом зворотного видавлювання.

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

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є визначення математичним моделюванням з використанням МСЕ впливу швидкості деформування на параметри гарячого зворотного видавлювання з роздачою із сталі 25 круглих порожнистих напівфабрикатів. Задачами дослідження є встановлення зусиль видавлювання і питомих зусиль на деформуючому інструменті; визначення кінцевих форм і розмірів напівфабрикатів; виявлення напружено-деформованого стану і пропрацювання структури металу пластичною деформацією; порівняння отриманих результатів між собою.

Матеріали та методи дослідження

Для проведення дослідження було використано схему гарячого зворотного видавлювання з роздачою із циліндричних заготовок та заготовок квадратного перерізу, яку зображено на рис. 1 з розмірами деформуючого інструменту. Ліворуч від вісі симетрії показано положення інструменту та заготовки на початку видавлювання, а праворуч – в кінці видавлювання. Вихідна заготовка 1 розміщена з центруванням в циліндричній частині матриці 3 та спирається на плиту 2, яка виконує роль виштовхувача. Процес деформування зусиллям P виконується при опусканні пуансону 4 зі швидкістю V , внаслідок чого утворюється напівфабрикат 5. Сутність роздачі при видавлюванні полягає в тому, що зовнішній діаметр отриманих напівфабрикатів більший за такі розміри вихідних заготовок. Після вилучення пуансону 4 із здеформованої заготовки 5 здійснюється її виштовхування із матриці 3 за допомогою плити 2. Для видавлювання було використано із сталі 25 циліндричну заготовку з діаметром 107,6 мм і висотою 35,5 мм та заготовку квадратного перерізу з розмірами сторін 76,1×76,1 мм та висотою 56,6 мм. Розміри заготовок наведено з урахуванням дії температури. Об'єми вихідних заготовок однакові. Температура цих заготовок була $T = 1000$ °С. Досліджено вплив швидкостей деформування величиною $V = 20, 40, 60$ і 80 мм/сек.

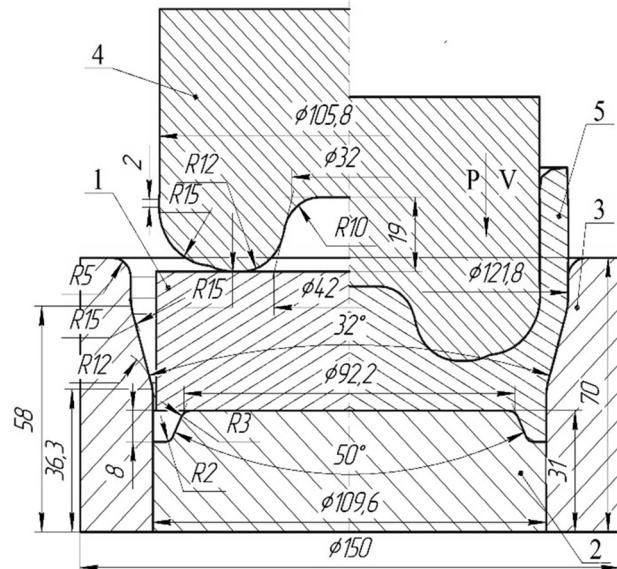


Рис. 1. Схема зворотного видавлювання: 1 – заготовка; 2 – плита; 3 – матриця; 4 – пуансон; 5 – напівфабрикат

Розрахунковий аналіз процесів видавлювання проведено методом скінченних елементів з використанням програми DEFORM3D. Тертя на контактуючих поверхнях абсолютно жорсткого деформуючого інструменту враховано по Зібелю з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,25$. Для скорочення часу моделювання розглянуто четверту частину заготовок.

Результати дослідження

Розрахункові схеми в розрізі на початку і в кінці видавлювання при отриманні напівфабрикатів із циліндричної заготовки та заготовки квадратного перерізу наведено на рис. 2. Схему на початку та в кінці видавлювання четвертої частини циліндричної заготовки зображено відповідно на рис. 2а і 2б. Заготовку 1 з центруванням по діаметру встановлено на плиті 2 в матриці 3. Деформування виконується пуансоном 4, при опусканні якого отримано напівфабрикат 5 із виступами на донній частині зі сторони порожнини та на нижньому торці. Схеми на початку і в кінці видавлювання заготовки квадратного перерізу представлено на рис. 2в і 2г. В цьому випадку заготовка має більшу висоту та центрується в матриці 3 по діагоналях.

Необхідно відмітити, що формоутворення напівфабрикату із циліндричної заготовки забезпечує отримання рівного по периметру торця стінки. При видавлюванні заготовки квадратного перерізу в кутових зонах утворюються виступи на торці стінки (рис. 3). На рис. 3а показано в розрізі по площині zoy четверту частину здеформованої заготовки квадратного перерізу, яка розділена на скінченні елементи. Для кращого уявлення на рис. 3б представлено в розрізі половину такої заготовки.

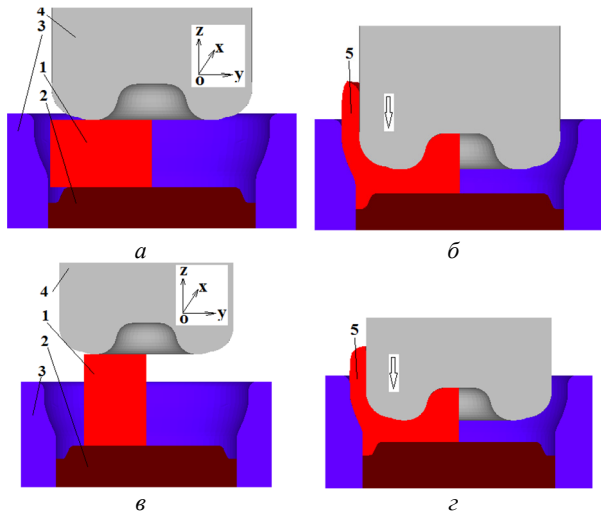


Рис. 2. Розрахункові схеми на початку і в кінці видавлювання: *a* і *б* – циліндричної заготовки; *в* і *г* – заготовки квадратного перерізу

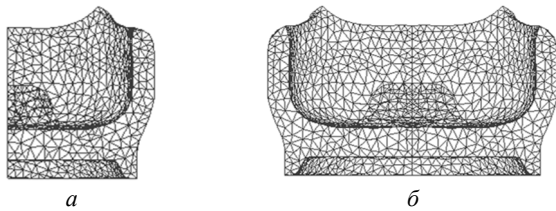


Рис. 3. Форма торця стінки після видавлювання заготовки квадратного перерізу: *a* – четвертої частини заготовки і *б* – половини заготовки

На рис. 4 зображено залежності зусиль видавлювання напівфабрикатів, які виникають в напрямку вісі *z* (див. рис. 2*a* і 2*в*) на пуансоні, плиті і матриці від переміщення пуансону. Максимальні значення зусиль на пуансоні і плиті отримано в кінці видавлювання. На матриці найбільші величини зусиль виникають на проміжній стадії видавлювання. Зі збільшенням величини швидкості деформування зусилля, які сприймають пуансони, плити та матриці, зменшуються. При цьому зусилля на плитах дещо менші чим на пуансонах.

При видавлюванні напівфабрикату з $V = 20$ мм/сек із циліндричної заготовки такі залежності зусиль наведено на рис. 4*a*. Зусилля на пуансоні досягає величини 4920 кН, на плиті 4580 кН при переміщенні пуансону 23 мм. На матриці зусилля 630 кН отримано при переміщенні пуансону 16 мм. Видавлювання із циліндричних заготовок з іншими швидкостями деформації приводить до виникнення найбільших величин зусиль при наведених переміщеннях пуансонів.

Видавлювання напівфабрикату з $V = 20$ мм/сек із заготовки квадратного перерізу здійснюється при більших переміщеннях пуансону (рис. 4*б*). Максимальні значення зусиль на пуансоні і плиті досягають відповідно 5240 кН і 4800 кН при переміщенні пуансону 43 мм, а на матриці 660 кН отримано при переміщенні

пуансону 36,5 мм. Аналогічні переміщення пуансонів мають місце для інших швидкостей деформування. Зусилля видавлювання напівфабрикату із квадратної заготовки на пуансоні зростає на 9,4 %, на плиті і матриці – на 4,6 %.

Видавлювання зі швидкістю деформації $V = 40$ мм/сек приводить до зменшення зусиль. При видавлюванні напівфабрикату із циліндричної заготовки на пуансоні отримано 4600 кН, на плиті 4240 кН, на матриці 584 кН (рис. 4*в*). Формоутворення напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу відбувається при зусиллях на пуансоні 4880 кН, на плиті 4480 кН, на матриці 646 кН (рис. 4*г*). Зниження зусиль при видавлюванні із

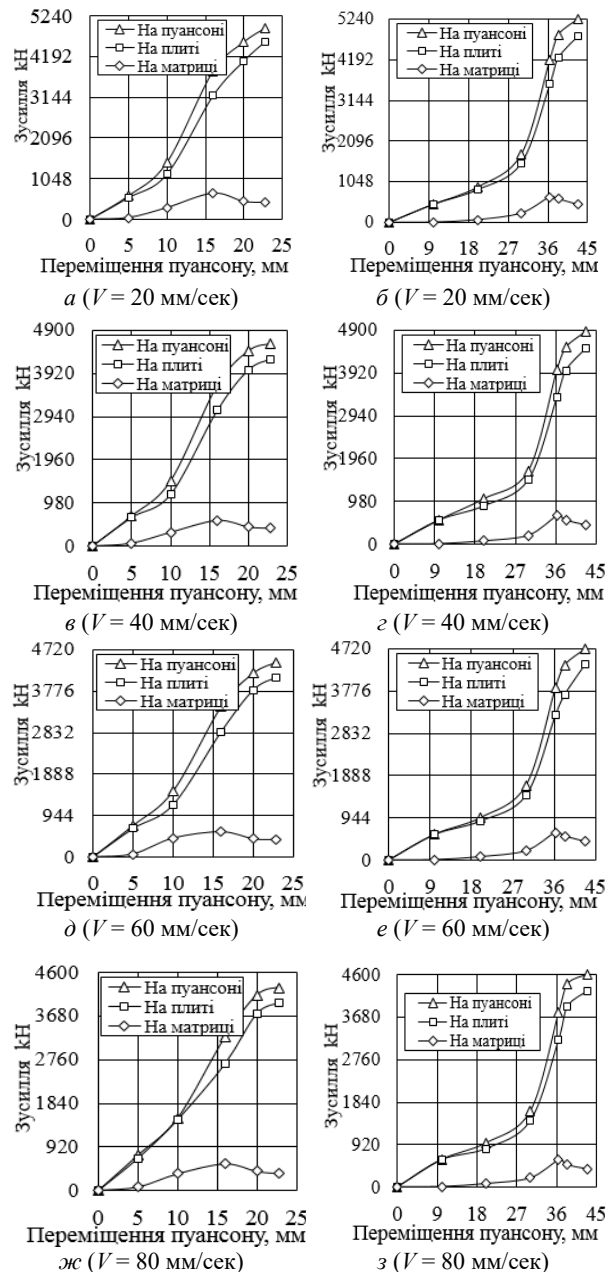


Рис. 4. Залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансонів при видавлюванні: *a*, *в*, *д*, *ж* – циліндричної заготовки; *б*, *г*, *е*, *з* – заготовки квадратного перерізу

заготовки квадратного перерізу, в порівнянні з попереднім випадком, складо: на пуансоні – на 7,9 %, на плиті і матриці на – 7,7 %.

Видавлювання напівфабрикату із циліндричної заготовки і заготовки квадратного перерізу зі швидкістю деформування $V = 60$ мм/сек привело до подальшого зниження зусиль на пуансоні, плиті і матриці. При видавлюванні із циліндричної заготовки отримано величини зусиль на пуансоні 4440 кН, на плиті 4080 кН, матриці 580 кН (рис. 4д). Деформування заготовки квадратного перерізу звершується при зусиллях на пуансоні 4720 кН, плиті 4380 кН і матриці 620 кН (рис. 4е). Зменшення зусиль на пуансонах при видавлюванні квадратної заготовки, в порівнянні зі швидкостями $V = 20$ мм/сек і $V = 40$ мм/сек відповідно складо 10 % і 4,3 %.

Найменші величини зусиль отримано при видавлюванні зі швидкістю деформування $V = 80$ мм/сек. Формоутворення напівфабрикату із циліндричної заготовки здійснюється при зусиллях на пуансоні 4280 кН, плиті 3940 кН і матриці 568 кН. В кінці видавлювання напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу на пуансоні отримано 4600 кН, на плиті – 4240 і на матриці – 596 кН. Для цієї заготовки зменшення зусиль на пуансоні, плиті і матриці, в порівнянні зі швидкостями $V = 20$ мм/сек, $V = 40$ мм/сек і $V = 60$ мм/сек, відповідно складо 12,3 %, 5,7 % і 2,6 %.

Із представлених графіків можна визначити роботу деформації. Зусилля на пуансонах і робота деформації необхідні для вибору пресового обладнання, а зусилля на плитах і матрицях потрібне для проектування нижньої плити штампового оснащення.

На рис. 5 зображено вплив величини швидкості деформування на максимальні значення зусиль на пуансонах, плитах і матрицях при видавлюванні напівфабрикатів із циліндричних заготовок і заготовок квадратного перерізу. Для формоутворення із циліндричних заготовок такий вплив зображено на рис. 5а, а із заготовок квадратного перерізу – на рис. 5б.

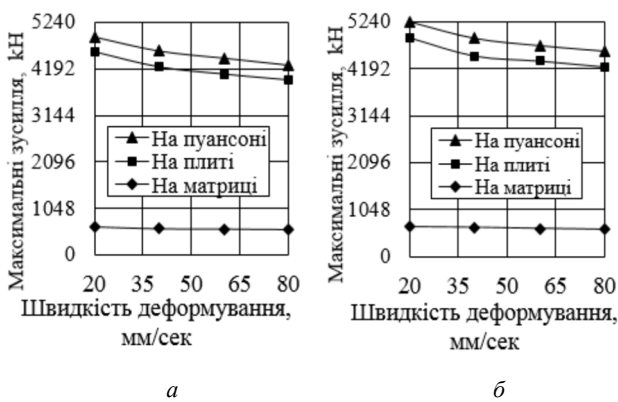


Рис. 5. Вплив величини швидкості деформування на максимальні значення зусиль при видавлюванні напівфабрикатів: а – із циліндричних заготовок, б – із заготовок квадратного перерізу

Швидкість деформування впливає на напружений стан при видавлюванні і визначає величину гідростатичного тиску $\sigma_{cp} = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ в осередку деформації у здеформованих заготовках. Відомо, що в процесах видавлювання із стискаючими напруженнями в осередку деформації чим менші значення по абсолютній величині гідростатичного тиску, тим менші величини зусиль деформування. Вигляди розподілів σ_{cp} у здеформованому металі напівфабрикатів практично однаковий для розглянутих заготовок та величин швидкостей деформацій, але величини σ_{cp} відрізняються. Для прикладу, на рис. 6, наведено розподіли гідростатичного тиску у здеформованому металі напівфабрикатів в кінці видавлювання із швидкостями деформування $V = 20$ і $V = 80$ мм/сек. Всі нормальні напруження в осередках деформацій під пуансонами стискаючі. Зростання швидкості деформування приводить до зменшення стискаючих напружень в осередках деформацій і зниження по абсолютній величині гідростатичного тиску. В кінці видавлювання з $V = 20$ мм/сек циліндричної заготовки (рис. 6а) у донній частині напівфабрикату отримано величину такого тиску у межах $\sigma_{cp} = -210 \div -710$ МПа, а в кінці видавлювання заготовки квадратного перерізу – $\sigma_{cp} = -212 \div -745$ МПа. Мінімальні значення σ_{cp} по абсолютній величині отримано для видавлювання із швидкістю $V = 80$ мм/сек. При видавлюванні циліндричної заготовки $\sigma_{cp} = -175 \div -615$ МПа (рис. 6в), а при видавлюванні заготовки квадратного перерізу – $\sigma_{cp} = -185 \div -665$ МПа (рис. 6з).

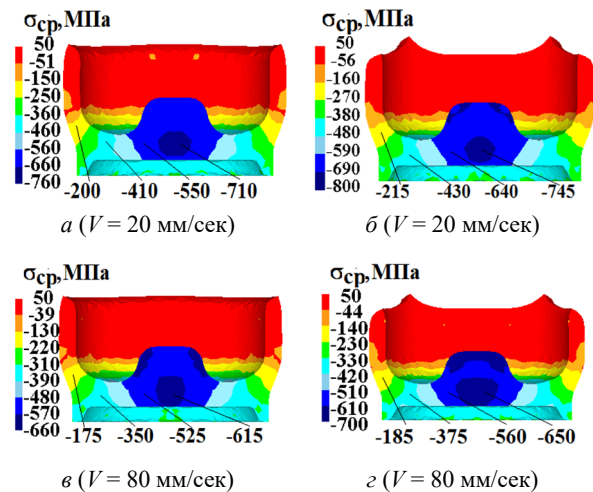


Рис. 6. Розподіли гідростатичного тиску в кінці видавлювання напівфабрикатів: а і в – із циліндричної заготовки; б і з – із заготовки квадратного перерізу

Встановлено вплив величини швидкостей деформування на розподіли температури у здеформованому металі напівфабрикатів в кінці видавлювання заготовок циліндричної і квадратної форми. Розглянуті швидкості деформування $V = 20-80$ мм/сек забезпечують витримку температурного інтервалу гарячого видавлю-

вання в обох варіантах формоутворення напівфабрикатів (рис. 7). Також виявлено охолодження шарів металу поблизу контактуючих поверхонь з деформуючим інструментом. Збільшення швидкості деформування приводить до зростання температури у здеформованому металі та зменшення охолодження шарів металу біля контактуючих поверхонь.

При видавлюванні циліндричної заготовки температура здеформованого металу у стінці та у донній частині напівфабрикату знижується до $T = 875\text{--}975\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 7а), а при видавлюванні заготовки квадратного перерізу – до $T = 860\text{--}975\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 7б). Шари металу біля контактуючих поверхонь охолоджуються у першому випадку до $T = 775\text{ }^\circ\text{C}$, а у другому – до $T = 740\text{ }^\circ\text{C}$. При цьому на вісі напівфабрикатів мають місце невеликі області з температурою $T = 975\text{ }^\circ\text{C}$. Різниця в температурах тут і надалі пов'язана з різною висотою вихідних заготовок та часом на пластичне формоутворення напівфабрикатів.

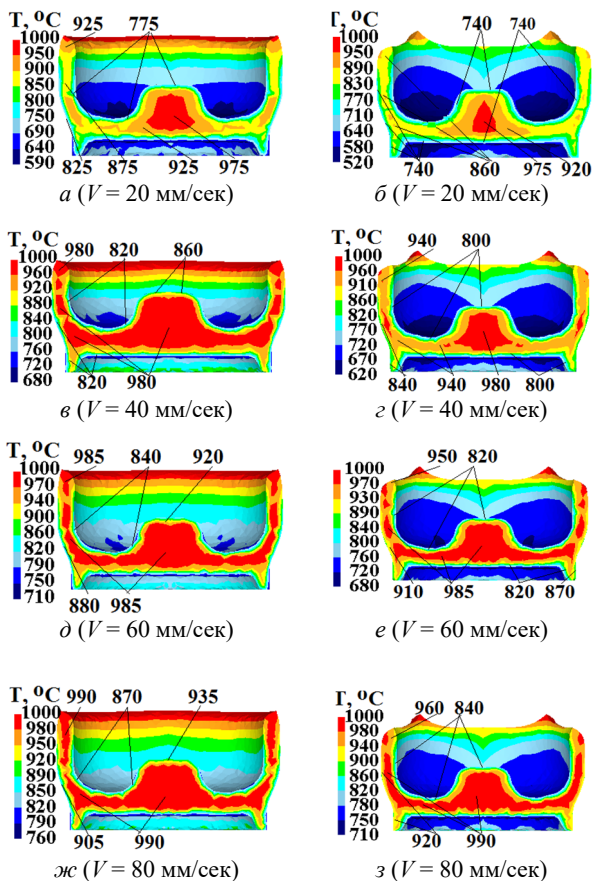


Рис. 7. Розподіли температури в кінці видавлювання напівфабрикатів: а, в, д і ж – із циліндричної заготовки, б, г, е і з – із квадратної заготовки

При швидкості деформування до $V = 40\text{ мм/сек}$ у стінці та донній частині напівфабрикату із циліндричної заготовки отримано $T = 980\text{ }^\circ\text{C}$. В шарах металу біля контактуючих поверхонь температура зменшується до

$T = 820\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 7в). У напівфабрикаті, який виготовлено із квадратної заготовки, у стінці і донній частині отримано $T = 940\text{ }^\circ\text{C}$, у приконтатних шарах металу – $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 7г).

Швидкість деформування $V = 60\text{ мм/сек}$ забезпечує однакові температури $T = 985\text{ }^\circ\text{C}$ у стінках і донних частинах отриманих напівфабрикатів (рис. 7д і 7е). Шари металу біля поверхонь з деформуючим інструментом охолоджуються до $T = 840\text{ }^\circ\text{C}$ і $T = 820\text{ }^\circ\text{C}$ відповідно.

Також для двох варіантів формоутворення напівфабрикатів із швидкістю деформування $V = 80\text{ мм/сек}$ забезпечуються однакові температури $T = 990\text{ }^\circ\text{C}$ у стінках і донних частинах отриманих напівфабрикатів (рис. 7ж і 7з). При цьому шари металу біля поверхонь з деформуючим інструментом охолоджуються до $T = 870\text{ }^\circ\text{C}$ у першому напівфабрикаті і $T = 840\text{ }^\circ\text{C}$ у другому.

Гаряче видавлювання з роздачою круглих порожнистих напівфабрикатів є першою операцією при виготовленні виробів спеціального призначення, після якої виконуються переходи витягуванням з потоншенням. З представлених розподілів температури при швидкостях деформування $V = 40\text{--}80\text{ мм/сек}$ можна зробити висновок, що таке витягування можливе одразу після видавлювання без виконання проміжного нагріву напівфабрикатів. При цьому зменшення охолодження здеформованих заготовок при збільшенні швидкості деформування є причиною зниження зусиль на деформуючому інструменті.

Розрахунковим аналізом визначено напружений і деформований стани металу у напівфабрикатах в кінці видавлювання з різними величинами швидкостей деформування.

Інтерес представляють напруження σ_z по яких можна оцінити питомі зусилля на поверхнях пуансонів і плит. Підвищення швидкості деформування приводить до зменшення по абсолютній величині напружень σ_z . Також менші значення σ_z отримано для видавлювання циліндричних заготовок.

На рис. 8 зображено розподіли напружень σ_z , що виникають в кінці видавлювання напівфабрикатів. У місці переходу стінки у донну частину напівфабрикату із циліндричної заготовки для $V = 20\text{ мм/сек}$ отримано $\sigma_z = -170\text{ МПа}$ (рис. 8а). Далі у донній частині цього напівфабрикату напруження σ_z змінюються від $\sigma_z = -340\text{ МПа}$ до $-\sigma_z = -800\text{ МПа}$ на вісі такої частини. Для іншого напівфабрикату у місці переходу отримано $\sigma_z = -190\text{ МПа}$, а у донній частині напруження σ_z змінюються у межах $\sigma_z = -370\text{ } \div -840\text{ МПа}$ (рис. 8б). Тут питомі зусилля у порожнині на торці пуансону ці напруження досягають величини $\sigma_z = -780\text{ МПа}$, на вісі плити – $\sigma_z = -840\text{ МПа}$.

При видавлюванні з $V = 40\text{ мм/сек}$ у напівфабрикаті із циліндричної заготовки у місці переходу стінки у донну частину напруження σ_z досягають величини $\sigma_z = -160\text{ МПа}$. У донній частині $\sigma_z = -225\text{ } \div -745\text{ МПа}$ (рис. 8в). Для отриманого напівфабрикату із заготовки

квадратного перерізу ці напруження у вказаних місцях досягають $\sigma_z = -170$ МПа та $\sigma_z = -345 \div -805$ МПа (рис. 8з). Питомі зусилля на пуансоні склали $\sigma_z = -750$ МПа і досягають $\sigma_z = -860$ МПа на вісі плити.

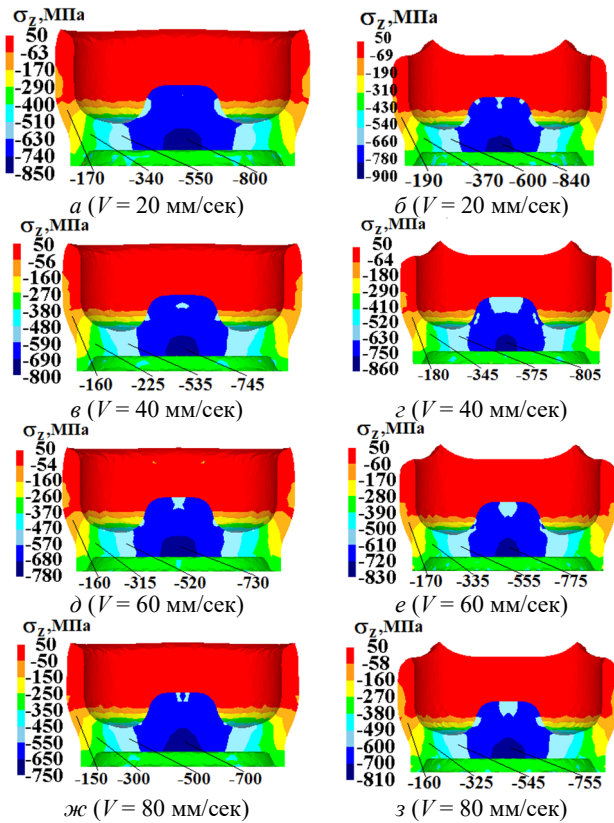


Рис. 8. Розподіли напружень σ_z в кінці видавлювання напівфабрикатів: а, в, д і ж – із циліндричної заготовки, б, з, е і з – із заготовки квадратного перерізу

При формоутворенні напівфабрикатів із $V = 60$ мм/сек відбувається подальше зменшення по абсолютній величині стискаючих напружень σ_z . У першому напівфабрикаті (рис. 8д) в області переходу стінки у донну частину отримано $\sigma_z = -160$ МПа, а в самій донній частині – $\sigma_z = -315 \div -730$ МПа. У другому напівфабрикаті у вказаних місцях $\sigma_z = -170$ МПа і $\sigma_z = -335 \div -775$ МПа (рис. 8е). Тут питомі зусилля на торці пуансоні складають $\sigma_z = -700$ МПа, на вісі плити $\sigma_z = -830$ МПа.

Найменші значення напружень σ_z по абсолютній величині мають місце при видавлюванні напівфабрикатів з $V = 80$ мм/сек. Для напівфабрикату після видавлювання циліндричної заготовки у місці переходу стінки у донну частину отримано $\sigma_z = -150$ МПа, в донній частині – $\sigma_z = -325 \div -775$ МПа (рис. 8з). Питомі зусилля на пуансоні складають $\sigma_z = -700$ МПа, на вісі плити – $\sigma_z = -810$ МПа.

Встановлено, що величина швидкості деформування практично не впливає на розподіли компонент деформацій як після видавлювання напівфабрикатів із

циліндричної заготовки, так і після видавлювання заготовки квадратного перерізу. Але величини деформацій у напівфабрикатах із циліндричної заготовки відрізняються від величин у напівфабрикатах, які отримані із заготовки квадратного перерізу. Використання заготовок квадратного перерізу приводить до збільшення величин деформацій у донних частинах і стінках напівфабрикатів. Для швидкості деформування $V = 80$ мм/сек на рис. 9 показано розподіли у напівфабрикатах деформацій ϵ_z та інтенсивності деформацій ϵ_i . Найбільший внесок в ϵ_i мають деформації ϵ_z . У напівфабрикаті із циліндричної заготовки у донній частині стискаючі деформації ϵ_z знаходяться у межах $\epsilon_z = -0,2 \div -1,2$ (рис. 9а), а у напівфабрикаті із заготовки квадратного перерізу – $\epsilon_z = -0,47 \div -1,5$. Пропрацювання структури металу гарячою деформацією у донних частинах напівфабрикатах оцінюємо по розподілах ϵ_i . У напівфабрикаті із циліндричної заготовки отримано $\epsilon_i = 0,6-1,6$ (рис. 9в). А у напівфабрикаті із заготовки квадратного перерізу – $\epsilon_i = 1,3-2,2$. Таким чином, використання заготовки квадратного перерізу забезпечує більш інтенсивне пропрацювання донної частини, наслідком чого може бути підвищення механічних властивостей здеформованого металу.

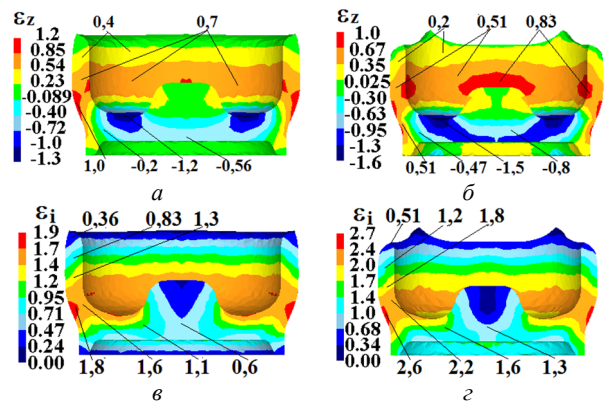


Рис. 9. Розподіли деформацій ϵ_z і інтенсивності деформацій ϵ_i у здеформованому металі після видавлювання напівфабрикатів: а, в – із циліндричної заготовки; б, г – із заготовки квадратного перерізу

На основі результатів моделювання розроблено і спроектовано штампове оснащення для гарячого видавлювання. Загальний вигляд штампуну представлено на рис. 10. Штамп складається із нижньої плити 1, до якої прикріплено матрицетримач 2 за допомогою восьми гвинтів 20. В матрицетримачі 2 розміщено опорну плиту 3 з штовхачем 4. На матрицетримачі 2 з центруванням встановлено матрицю 5 з виштовхувачем 6, на який спираються кільце 7 і пружина 18. Пружина 18 попередньо стиснута за допомогою направляючого конусного кільця 8 і циліндричного кільця 9 і восьми гвинтів 19. Конусна поверхня кільця 8 обробляється у зборі спільно з отвором матриці 5. До верхньої плити

10 штампу прикріплено пуансонотримач 11 за допомогою восьми гвинтів 23. У пуансонотримачі 11 розміщено підп'ятник 12 і п'яту 13, на які спирається пуансон 14 та фіксується конусним кільцем 15 і гайкою 16. Також у пуансонотримачі 11 встановлено з посадкою по пуансону 14 знімач 17, який утримується чотирма рухомими гвинтами 22 і спирається на чотири пружини 21. Знімач 17, крім знімання напівфабрикату з пуансону, призначений для направлення пуансону 14 відносно матриці 5 при видавлюванні.

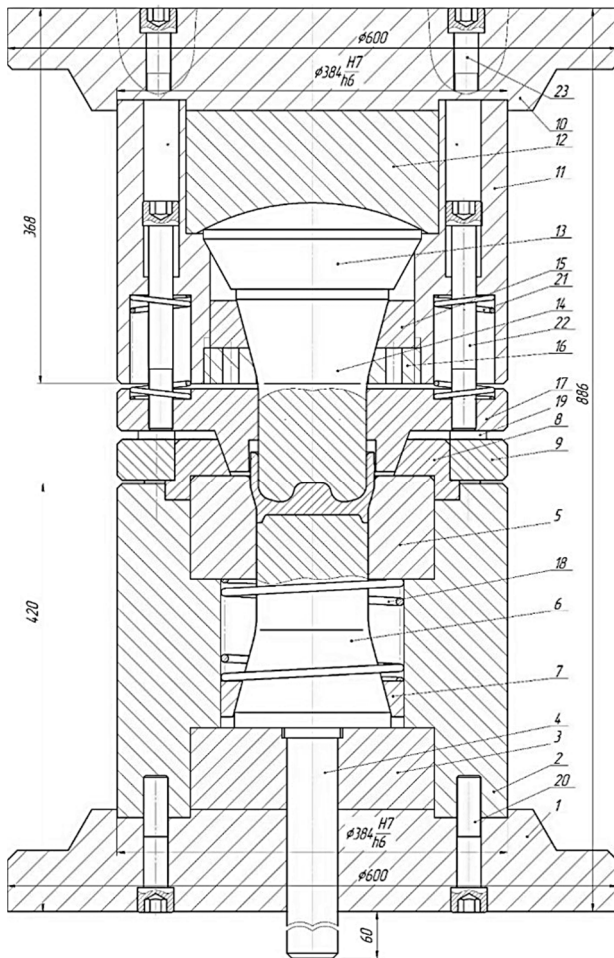


Рис. 10. Конструкція штампу для гарячого видавлювання

Нижня плита 1 має чотири пази для кріплення на столі модернізованого гідравлічного пресу ДБ 2438 зусиллям 6,3 МН, який має швидкість робочого ходу пов-

зуна не менше 20 мм/сек. Такі пази для кріплення на повзуні пресу має верхня плита 10 штампу.

У вихідному положенні віддаль між торцем пуансону 14 і кільцем 9 повинна бути дещо більшою за висоту напівфабрикату. В матрицю 5 встановлюють нагріту заготовку. При опусканні повзуна пресу з верхньою плитою 10 штампу перед початком видавлювання знімач 17 попадає в конусне кільце 8 і пуансон 14 направляється відносно матриці 5. При видавлюванні відбувається стискання пружин 21. Після видавлювання повзун пресу з верхньою плитою піднімається в вихідне положення. Якщо напівфабрикат залишиться на пуансоні, то знімання його відбувається за рахунок дії стиснутих пружин 21 і знімача 17. Коли напівфабрикат залишається в матриці 5, то видалення його здійснюється виштовхувачем 6 і штовхачем 4, які приводяться в рух від виштовхувача пресу. При цьому стискається пружина 18 і повертає виштовхувач 6 і штовхач 4 в вихідне положення при опусканні виштовхувача пресу.

Висновки

1. В роботі шляхом моделювання МСЕ проведено дослідження по впливу величини швидкості деформування на процес гарячого зворотного видавлювання із заготовок циліндричної форми і квадратного перерізу порожнистих напівфабрикатів під подальше витягування з потоншенням.

2. Встановлено залежності зусилля видавлювання на пуансонах, плитах і матрицях від переміщення пуансонів. Зі збільшенням швидкості деформування зусилля видавлювання зменшуються. Причиною зменшення зусиль є зниження по абсолютній величині величини гідростатичного тиску в осередку деформації завдяки зменшенню охолодження zdeформованих заготовок при видавлюванні.

3. Встановлені форма і розміри напівфабрикатів та розподіли напружень і деформацій по об'єму напівфабрикатів. Виявлено питомі зусилля на деформуючому інструменті. Величина швидкості деформування не впливає на кінцевий деформований стан металу при видавлюванні.

4. Подальші дослідження в цьому напрямку необхідно провести по оцінці впливу коефіцієнту тертя на силові режими і формозміну металу при видавлюванні.

References

- [1] E. I. Semenov Ed., Hot stamping, in *Forging and stamping. Handbook*, Vol. 2, Moscow: Mechanical Engineering, 1986, 592 p.
- [2] V. Kaliuzhnyi, S. Sytnyk and V. Levchenko, "Comparative analysis of hot reverse extrusion of hollow products from round and square blanks," *Mech. Adv. Technol.*, Vol. 7, No. 2 (98), pp. 236–242, Oct. 2023, doi: 10.20535/2521-1943.2023.7.2.288484.
- [3] V. N. Danchenko, A. A. Milenin and V. I. Kuzmenko, "Computer modeling of metal pressure processing processes," *Numerical methods*, Dnipropetrovsk: System Technologies, 2008, 448 p.

- [4] V. L. Kalyuzhny, L. I. Aliyeva, I. S. Aliev and V. N. Gornostay, "Hot volumetric stamping of hollow products from high-strength aluminum alloy with specified mechanical properties," *Procurement production*, Moscow, 12, pp. 18–25, 2018.
- [5] X. Hu et al., "Numerical Simulation for Microstructure Evolution in In718 Alloy During Cylindrical Cup Backward Extrusion," *Advanced Materials Research*, Vol. 650. pp. 92–97, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.650.92.
- [6] P. Szota, S. Mróz, A. Stefanik, K. Laber and R. Mola, "Theoretical and experimental analysis of the backward extrusion process with a rotational die of AZ31 alloy," *Metallurgija*, Vol. 60, No. 1–2. pp. 36–38, 2021. Available: <https://hrcak.srce.hr/clanak/357468>
- [7] 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: 10.1016/j.matdes.2014.09.043.
- [8] S. Kuhnke, V. Sanabria, F. Gensch, R. Nitschke and S. Mueller, "Numerical Investigations on Material Flow During Indirect Extrusion of Copper-Clad Aluminum Rods," *Front. Mater.*, Vol. 7, Article 157, pp. 1–10, Jun. 2020, doi: 10.3389/fmats.2020.00157.
- [9] B. B. Alamer, "The Study of Stress State in Indentation of a Flat Punch with Rounded Edge in Axisymmetric Backward Extrusion," *Eng. & Tech. Journal*, Vol. 31, No. 9, Part (A), pp. 1765–1778, 2013, doi: 10.30684/etj.2013.82188.
- [10] 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*, Vol. 2012, Article ID 989834, pp. 1–6, 2012, doi: 10.1155/2012/989834.
- [11] R. Broomand, A. Babaei, H. Mazloom Bashiri and M. H. Zaheri, "Processing MMC tubes via friction stir backward extrusion," *Kafaran*, Vol. 19, Issue 1, No. 3, pp. 225–242, 2021, doi: 10.48301/KSSA.2021.287462.1550.
- [12] 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*, pp. 1–10, 2018, doi: 10.3390/app8112187.

The effect of deformation rate on the process of hot extrusion with dispensing of round hollow semi-finished products

V.V. Dragobetskyi¹ • O.V. Kaliuzhnyi² • V.L. Kaliuzhnyi³ • S.V. Sytnyk³

¹ Mykhailo Ostrohradskyi National Technical University, Kremenchuk, Ukraine

² IT education academy, Kyiv, Ukraine

³ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract. Stamping of round hollow semi-finished products by hot reverse extrusion is one of the initial operations in the manufacture of hollow products for special purposes. The force and shape change of the metal during hot plastic forming is significantly affected by the deformation rate or the speed of movement of the deforming tool. For special-purpose products, certain mechanical properties are required in the wall height and bottom part. The wall height properties are ensured at subsequent stretching transitions with thinning of the semi-finished product obtained by hot extrusion, which involves working out the metal structure by plastic deformation to achieve the required properties. Therefore, it is an urgent task to study the effect of the deformation rate on the force and shape change of the metal during hot reverse extrusion of hollow semi-finished products.

To determine the influence of the deformation rate on the parameters of hot reverse extrusion with the dispensing of hollow semi-finished products from round and square billets by means of finite element method (FEM) modeling and to compare the results of theoretical researches.

Theoretical researches of extrusion power modes, specific forces, and the stress-strain state of metal were carried out by modeling using the FEM in the DEFORM software environment.

The FEM was used to model the process of hot reverse extrusion with dispensing of round hollow semi-finished products from mild steel with protrusions at the end of the bottom part on the side of the cavity and on the outer surface. The deformation rate was in the range of 20 to 80 mm/sec. Round and square cross-sectional blanks were used. The dependence of the extrusion force on the punch displacement was determined. The distribution of specific forces on the deforming tool was determined. The stress-strain state and temperature distribution in the deformed metal at the end of extrusion were determined. The development of the metal structure by hot plastic deformation was evaluated and the results obtained were compared.

The effect of the deformation rate on the parameters of hot reverse extrusion with dispensing of round hollow semi-finished products was determined.

Keywords: finite element method, hot reverse extrusion, round and square billet, hollow semi-finished product, deformation rate, temperature, forces, stresses, strains.