

Гарячий обтиск в матриці спеціального профілю вісесиметричних порожнистих заготовок із високовуглецевої сталі

В. Калюжний¹ • С. Ситник¹ • А. Титаренко¹

Received: 14 September 2022 / Accepted: 1 October 2022

Анотація. *Методом скінченних елементів створені математичні моделі і проведено дослідження прямого і зворотного способів гарячого обтиску в матриці спеціального профілю порожнистих заготовок із високовуглецевої сталі зі змінною товщиною стінки по висоті. Використана пластикна модель металу і циліндричні координати. Розрахунковим шляхом встановлено форму і розміри вихідної заготовки для обтиску, які забезпечили необхідні розміри виробу. Перед обтиском здійснювався нагрів частини заготовки по висоті, яка підлягала деформуванню в матриці. Застосування матриці спеціального профілю з деформуючою поверхнею, виконаної з кільцевими виступами, дозволило отримати виріб за один перехід завдяки зменшенню впливу сил тертя при формоутворенні. Визначена швидкість деформування для дотримання режиму гарячої деформації протягом обтиску. Встановлено залежність осьового зусилля на деформуючому інструменті від переміщення пуансонів і розподілу питомих зусиль на контактуючих поверхнях. Застосування прямого обтиску призводить до зниження силових режимів і питомих зусиль на інструменті. Визначено кінцевий напружено-деформований стан металу, форму і розміри виробу. По розподілу інтенсивності деформації проведена оцінка пропрацювання структури металу пластикною деформацією. На основі даних моделювання розроблена конструкція загального виду штампового оснащення для виконання прямого обтиску.*

Ключові слова: *метод скінченних елементів, обтиск, порожниста заготовка, зусилля, питомі зусилля, напруження, інтенсивність деформації, штампове оснащення.*

Вступ

В теперішній час при виготовленні балонів, різноманітних ємностей, перехідників для трубопровідної арматури, заготовок гільз або снарядів та інших деталей використовують процеси обтиску порожнистих заготовок з дном [1–5]. Такі заготовки отримані видавлюванням із гарячекатаних прутків або витягуванням із листових заготовок. В наведених джерелах приведені експериментальні дані та відомості з виробничому досвіду по розробленню технології і конструюванню штампового оснащення для обтиску в конусних та сферичних матрицях. Можливість формоутворення обтиском за один перехід визначається коефіцієнтом обтиску. Величина коефіцієнта обтиску залежить від марки матеріалу і геометричної форми виробу, відношення

товщини заготовки до її діаметра та коефіцієнту тертя. При відкритому обтиску, коли на недеформовану частину стінки заготовки відсутня дія інструменту, виникають дефекти у вигляді поперечних гофр на циліндричній частині заготовки або в місці переходу циліндричної частини в обтиснуту частину та можливе виникнення меридіональних гофр на обтиснутій частині [3]. Використання схеми закритого обтиску, при якій зменшується вірогідність втрати стійкості стінок заготовки завдяки використанню зовнішніх жорстких упорів, дозволяє збільшити ступінь деформації за один перехід. Для обох варіантів обтиску, крім гофроутворення, характерне потовщення стінок недеформованої частини заготовок, яке виникає при досягненні зусиллям обтиску певної величини. Зниження зусилля обтиску і потовщення стінок можна забезпечити застосуванням матриці спеціального профілю, у якій деформуюча поверхня виконана у вигляді кільцевих виступів і канавок. Обтиснута частина заготовки контактує тільки по виступах поверхні, що приводить до зменшення сил тертя і зусилля обтиску та збільшує ступінь деформації за один перехід [6–8].

✉ В. Л. Калюжний
kwl_2011@ukr.net

¹ КПІ, імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Використання комп'ютерного моделювання з використанням метода скінченних елементів (МСЕ) і програми DEFORM для аналізу процесів обтиску по різних схемах дозволяє дослідити закономірності формозміни, визначити силові режими, напружено-деформований стан металу з урахуванням пружної деформації, встановити кінцеві форми і розміри виробів та суттєво скоротити час на підготовку виробництва [8–10]. При цьому практично непотрібне доопрацювання експериментальними роботами встановлених параметрів обтиску.

При виробництві корпусів снарядів і гільз з використанням на останньому переході штампування операції холодного або гарячого обтиску актуальними задачами є зменшення кількості переходів обтиску. По причині потовщення обтиснутої частини стінки в процесі формоутворення обтиском виникають суттєві складнощі при визначенні форми і розмірів вихідної заготовки для обтиску, щоб отримати необхідні кінцеві розміри внутрішньої поверхні порожнини виробу, яка в подальшому не підлягає обробленню. Моделювання з використанням МСЕ дозволяє також вирішити і цю проблему [11], а встановлену форму і розміри заготовки можна отримати на попередньому переході перед обтиском витягуванням з потоншенням.

Якщо для процесів холодного обтиску є достатньо інформації [6–8, 10] по використанню матриць спеціального профілю з метою скорочення кількості переходів обтиску, то для гарячого обтиску порожнистих заготовок із високовуглецевих сталей практично відсутні дані, що дозволяють проектувати технологію формоутворення і штампове оснащення.

Метою роботи є встановлення комп'ютерним моделюванням з використанням МСЕ параметрів гарячого прямого і зворотного обтисків в матриці спеціального профілю порожнистих заготовок із високовуглецевої сталі, які мають змінну по висоті товщину стінок.

Схеми двох варіантів закритого обтиску порожнистої заготовки в матрицях спеціального профілю зображені на рис. 1. На рис. 1 а показана схема прямого обтиску (ПО). Тут і надалі ліворуч від вісі симетрії наведено положення на початку обтиску, а праворуч – в кінці обтиску. Вихідна заготовка 1 розміщена в контейнері 2 і спирається торцем стінки на матрицю спеціального профілю 3. Деформуюча поверхня матриці 3 утворена перетином кіл діаметром d , що розташовані з кроком t . В матриці 3 встановлений виштовхувач 4. Контейнер 2 і матриця 3 закріплені на плиті 5. Деформування зусиллям P виконується пуансоном 6. При опусканні пуансона 6 зі швидкістю V_0 отримується виріб 7. При обтиску течія металу відбувається в напрямку переміщення пуансона 6. В даному випадку виникають сили тертя від переміщення заготовки 1 по контейнеру 2, що збільшує зусилля деформування. Вилучення виробу із матриці 3 і контейнера 2 здійснюється виштовхувачем 4.

Схема зворотного обтиску (ЗО) представлена на рис. 1 б. Вихідна заготовка 1 розміщена в контейнері 2 і спирається нижнім торцем на пуансон 3, що закріплений на плиті 4. Деформування здійснюється матрицею спеціального профілю 5, в якій встановлений виштовхувач 6. Матриця 5 прикріплена до рухомої плити 7. При опусканні плити 7 із матрицею 5 і виштовхувачем

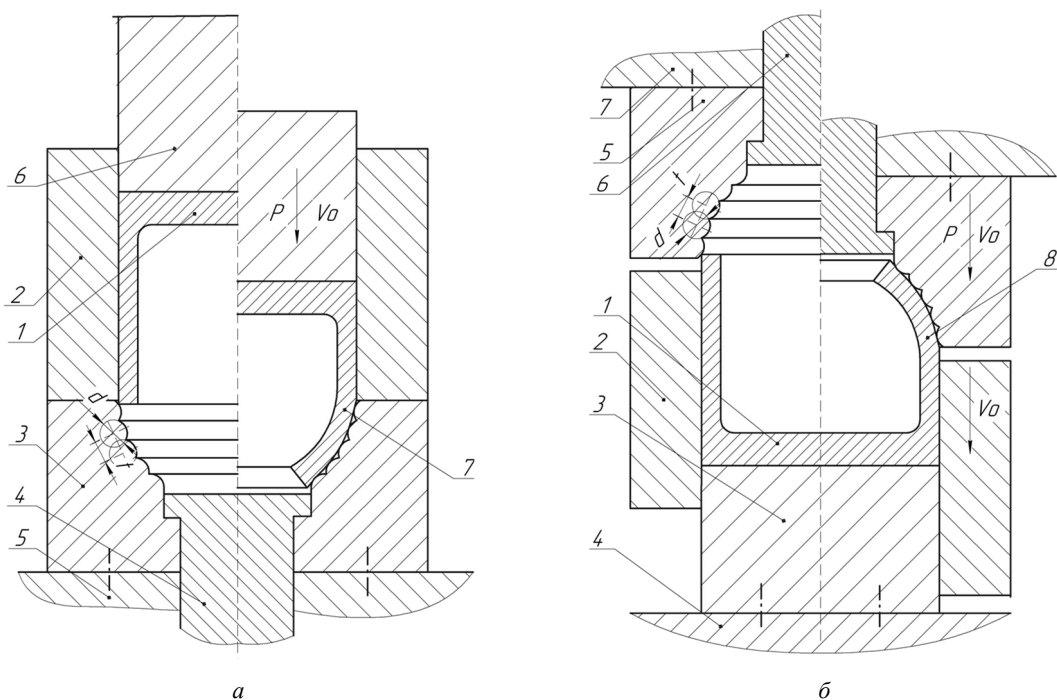


Рис. 1. Схеми прямого і зворотного закритого обтиску порожнистої заготовки в матриці спеціального профілю

б зі швидкістю V_0 створюється зусилля деформування P та отримується виріб 8. При цьому течія металу проходить в зворотному напрямку відносно переміщення матриці 5. Тут має місце зустрічний рух металу, що деформується, і матриці 5. Це приводить до збільшення зусилля формоутворення. Якщо виріб залишиться в контейнері 2, то вилучення його здійснюється пуансоном 3, а якщо в матриці 5 – то виштовхувачем 6. Ще одним недоліком цієї схеми обтиску є необхідність застосування відповідних пристроїв для переміщення контейнера 2 при обтиску та повертання його в вихідне положення.

В обох варіантах обтиску використана вихідна заготовка, для якої необхідно виконати розігрів до температури гарячого штампування частини стінки, що підлягає деформуванню. Для прямого обтиску розігрів заготовки потрібно здійснювати поза зоною штампу, а для зворотного обтиску розігрів можна реалізувати після встановлення заготовки в контейнері.

Моделювання по визначенню форми і розмірів заготовки для обтиску по розмірах виробу та гарячого обтиску виконувалося з використанням скінченно-елементної програми DEFORM і циліндричної системи координат. Частина висоти стінки вихідної заготовки, яка підлягала обтиску розігрівалася до температури $T = 1000^\circ\text{C}$. Донна частина стінки залишалася в холодному стані для запобігання потовщення цієї частини стінки при обтиску. Швидкість переміщення деформуючого інструменту складала $V_0 = 100$ мм/сек. Тертя враховане по Зібелю з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,25$. Деформуючий поверхня матриці була спроектована по розмірах зовнішньої поверхні обтиснутої частини виробу. Профіль цієї поверхні радіусом $R=1450$ мм (див. рис. 2 а) утворений перетином кіл діаметром $d = 4$ мм, які розташовані з постійним кроком $t = 1,5$ мм (див. рис. 1). Матриця контейнер і пуансон вважалися абсолютно жорсткими.

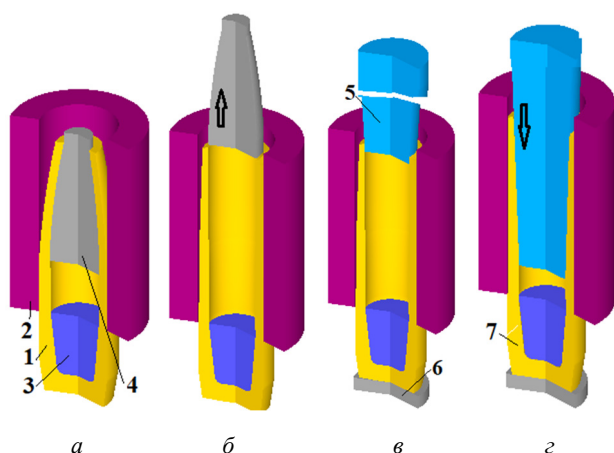


Рис. 2. Стадії визначення форми і розмірів заготовки: а – початок першої стадії, б – кінець першої роздачі стінки, в – початок другої стадії, з – кінець другої стадії

Спочатку моделюванням МСЕ були визначені форма і розміри заготовки для обтиску по методиці джерела [11], яка полягає в вирівнюванні роздачою стінки обтиснутої частини виробу. Процес моделювання розділений на 2 стадії – початкову і заключну, які показані на рис. 2. На рис. 2 а показаний в розрізі початок 1 стадії. Виріб 1 розміщений у циліндричному контейнері 2 із внутрішнім діаметром по максимальному зовнішньому діаметру виробу. В порожнині встановлені нерухомий пуансон 3 для утримання виробу та рухомий конусний пуансон 4 для роздачі. Вирівнювання роздачою стінки здійснюється шляхом багаторазового переміщення пуансона 4. Кінець 1 стадії представлений на рис. 2 б. При цьому на кожному наступному переміщенні розміри пуансона 4 необхідно збільшувати з забезпеченням умови, щоб при роздачі не було розтягування стінки. Початок 2 стадії зображений на рис. 2 в. Далі вирівнювання роздачою виконується пуансоном 5. Для запобігання зміщення під дією пуансона 5 деформованого виробу передбачена плита 6. Роздача пуансоном 5 здійснюється до досягнення стінкою циліндричної поверхні контейнера 2. Кінець 2 стадії наведений на рис. 2 з. В результаті вирівнювання отримується заготовка для обтиску 7, яка має циліндричну зовнішню і багатоконусну внутрішню поверхні. Причому діаметр основи нижньої конусної поверхні визначається діаметром стінки порожнини виробу, на якому закінчується обтиснута частина по кресленню виробу. Діаметр зовнішньої поверхні заготовки дорівнює діаметру такої поверхні виробу.

Ескізи половини виробу, по якому визначалися форма і розміри заготовки для обтиску та отримані розрахункові розміри її стінки зображені на рис. 3. Ескіз половини виробу наведений на рис. 3 а, а половини заготовки на рис. 3 б. Необхідно відмітити, що висота заготовки менша від висоти виробу, а розміри її донної частини залишилися без змін. При цьому зовнішній діаметр 101 мм заготовки можна отримати по діаметру отвору матриці, а профіль порожнини забезпечується розмірами пуансона на попередньому переході витягування з потоншенням.

Далі представлені результати моделювання двох варіантів обтиску. Розрахункові положення в розрізі деформуючого інструменту і заготовки з розподілом температури зображені на рис. 4. Положення на початку прямого обтиску показане на рис. 4 а. Вихідна заготовка 1 після нагрівання частини стінки, що деформується, до температури гарячого штампування розміщена в контейнері 2, який встановлений на матриці 3. Частина заготовки виступає з контейнера 2 на певну висоту, при якій не відбувається деформація по ширині стінки по мірі опускання заготовки при обтиску. Це дозволяє зменшити висоту контейнера 2 і витрати металу на його виготовлення. Деформування здійснюється шляхом переміщення пуансона 4. Розігріта частина стінки має необхідну температуру металу $T = 1000^\circ\text{C}$ з подальшим зменшенням до $T = 97^\circ\text{C}$ в області донної

частини. При опусканні пуансона 4 отримується виріб 5 (рис. 4 б). Час формоутворення виробу склав біля 2 секунд. В області переходу zdeформованої частини в недеформовану та в шарах металу зовнішньої поверхні обтиснутої частини температура металу зменшилася до $T = 820\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис. 4 в наведене положення інструменту і заготовки на початку зворотного обтиску. Вихідна заготовка 1 після нагрівання має аналогічний з попереднім випадком розподіл температури встановлюється в контейнері 2 і спирається нижнім торцем на пуансон 3.

переходу обтиснутої частини в недеформовану та в шарах металу біля зовнішньої поверхні цієї частини отримано $T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$, що пов'язано з відсутністю руху заготовки по контейнеру в процесі обтиску.

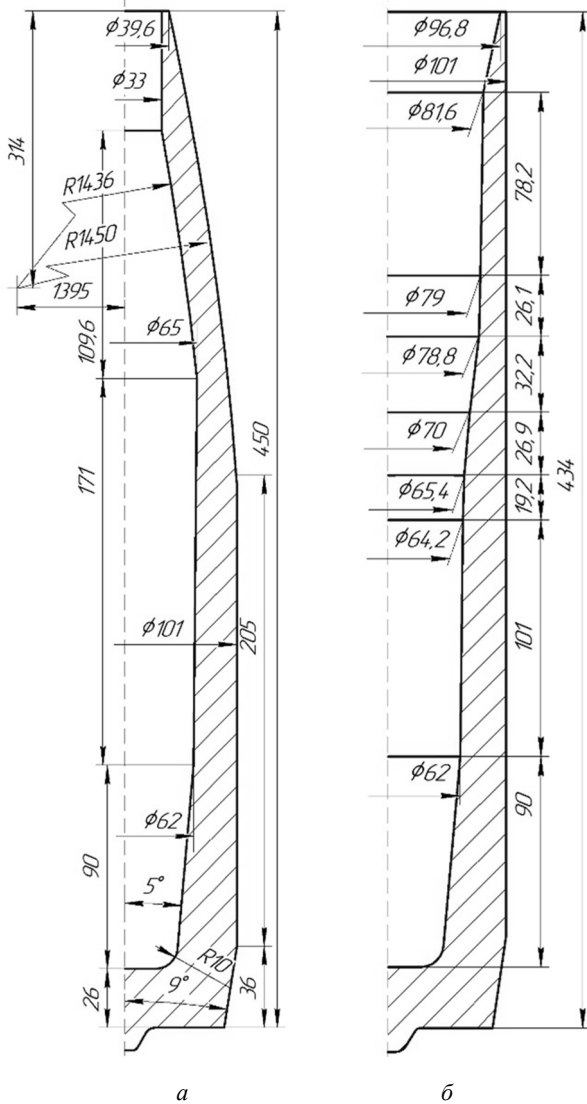


Рис. 3. Ескізи половини виробу і половини вихідної заготовки з розмірами: а – половина виробу, б – половина заготовки

Формоутворення обтиском виконується матрицею 4. Положення в кінці обтиску з отриманим виробом 5 представлено на рис. 4 г. Вигляд розподілу температури у виробі 5 також аналогічний попередньому обтиску, але величини температури zdeформованого металу дещо відрізняються. Охолодження металу в місці

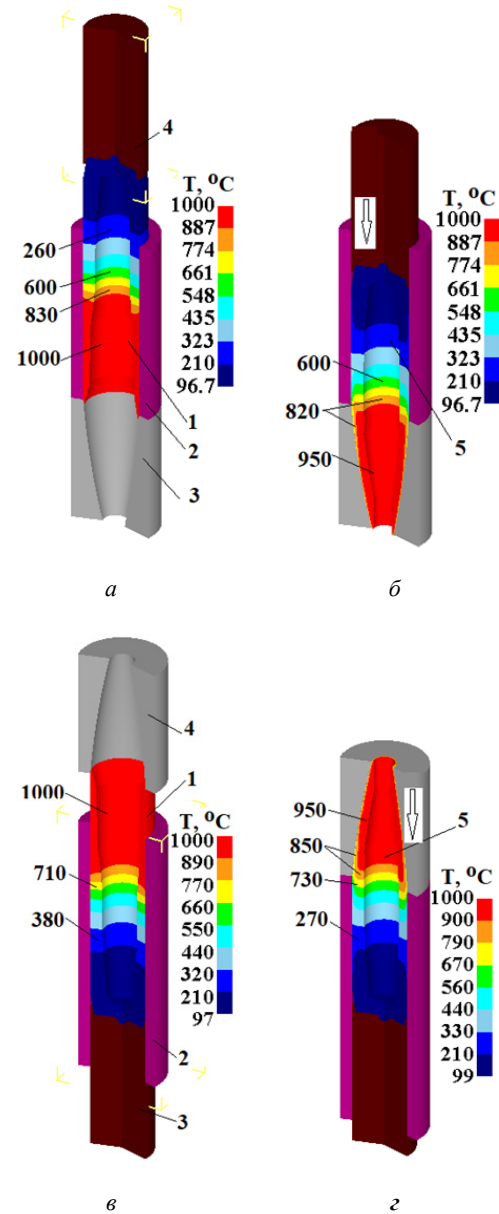


Рис. 4. Розрахункові положення в розрізі деформуючого інструменту і заготовки з розподілом температури: а – на початку ПО при ПО, б – в кінці ПО, в – на початку ЗО, г – в кінці ЗО

На рис. 5 для двох варіантів обтиску зображені силові режими та розподіли нормальних напружень на деформуючому інструменті. Залежності осьових зусиль, які виникають на інструменті, від переміщення пуансона при прямому обтиску показані на рис. 5 а. В процесі обтиску зусилля постійно зростають і досягають максимальних значень в кінці формоутворення виробу. Найбільше зусилля (1050 кН) сприймає пуансон.

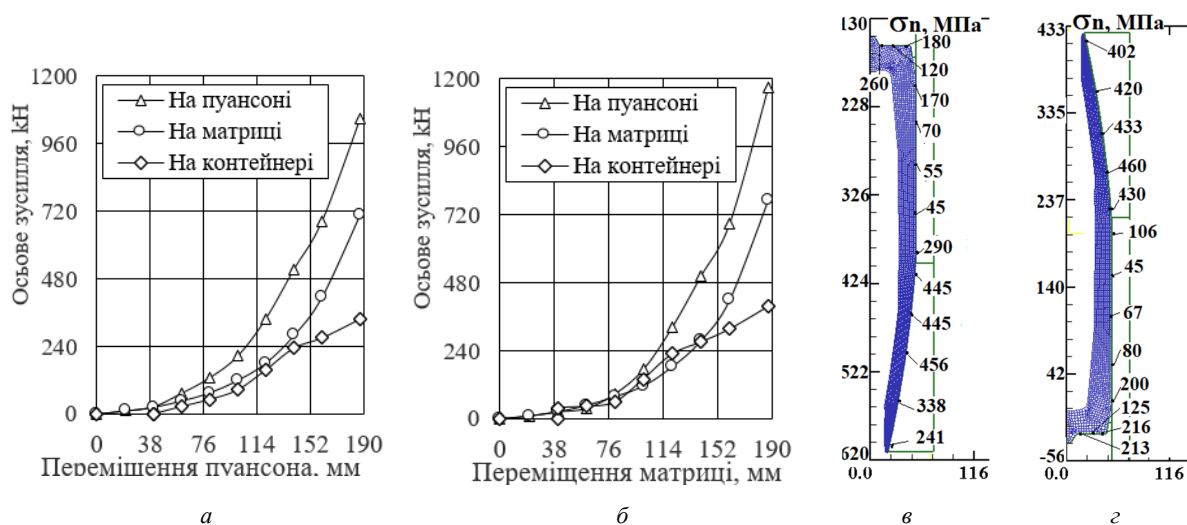


Рис. 5. Осьові зусилля при обтиску і та розподіли нормальних напружень σ_n : а – осьові зусилля при ПО, б – осьові зусилля при ЗО, в – розподіли σ_n при ПО, г – розподіли σ_n при ЗО

На матриці отримано 709 кН, на контейнері – 338 кН. Зусилля на пуансоні і робота деформації необхідні для вибору пресового обладнання, а зусилля на матриці і контейнері – для проектування штампного оснащення. Аналогічні залежності осьових зусиль від переміщення матриці при зворотному обтиску наведені на рис. 5 б. Величини зусиль більші в порівнянні з прямим обтиском. На пуансоні отримано 1170 кН, на матриці – 773 кН, на контейнері – 396 кН. Зростання зусиль обумовлене збільшенням впливу сил тертя, які виникають при зустрічному руху матриці і здеформованого металу в процесі обтиску.

Питомі зусилля на деформуючому інструменті можна оцінити по розподілу нормальних напружень σ_n , які виникають на контактуючих поверхнях при максимальному значенні осьового зусилля. На рис. 5 в такі розподіли представлені для прямого обтиску, а на рис. 5 г – для зворотного обтиску. Для обох варіантів обтиску найбільші величини питомих зусиль у межах $\sigma_n = 300 \div 500$ МПа отримані на контактуючих поверхнях матриць із обтиснутими частинами заготовок. На контейнері при прямому обтиску ці зусилля досягають значення $\sigma_n = 290$ МПа, при зворотному обтиску $\sigma_n = 200$ МПа. На торцях пуансонів питомі зусилля отримані у межах $\sigma_n = 120 \div 280$ МПа для прямого обтиску і $\sigma_n = 125 \div 216$ МПа для зворотного обтиску.

Для двох варіантів обтиску визначений напружений стан металу при максимальному зусиллі деформування. Розподіли компонент напружень у здеформованій заготовці при прямому обтиску наведений на рис. 6. Радіальні напруження σ_r по всій висоті стінки стискаючі (рис. 6 а). В шарах металу зі сторони порожнини отримано $\sigma_r = -15$ МПа, зі сторони зовнішньої поверхні ці напруження знаходяться у межах

$\sigma_r = -25 \div -75$ МПа. Осьові напруження σ_z також стискаючі по висоті стінки (рис. 6 б). У донній частині стінки вони досягають значень $\sigma_z = -145 \div -175$ МПа. У обтиснутій частині в зоні торця стінки - $\sigma_z = -45 \div -75$ МПа, а в області основи - $\sigma_z = -115 \div -145$ МПа. Найбільші величини по абсолютній величині мають тангенціальні напруження σ_θ в обтиснутій частині стінки (рис. 6 в). У шарах металу зі сторони порожнини і у донній частині стінки отримано $\sigma_\theta = -105 \div -160$ МПа, а в шарах металу зі сторони зовнішньої поверхні обтиснутої частини - $\sigma_\theta = -185$ МПа. На рис. 6 г приведений розподіл інтенсивності напружень σ_i . У донній частині стінки ці напруження знаходяться у межах $\sigma_i = 115 \div 145$ МПа. В обтиснутій частині маємо $\sigma_i = 115 \div 175$ МПа. Для порівняння напружень, які виникають при зворотному обтиску, показаний розподіл гідростатичного тиску σ_{cp} (рис. 6 д). В обтиснутій частині він знаходиться у межах $\sigma_{cp} = -90 \div -175$ МПа, а в донній частині - $\sigma_{cp} = -90 \div -115$ МПа.

Розподіли напружень у здеформованому металі при зворотному обтиску зображені на рис. 7. Розподіл напруження σ_{cp} представлений на рис. 7 а. У обтиснутій частині отримано $\sigma_{cp} = -80 \div -125$ МПа. У донній частині гідростатичний тиск досягає величин $\sigma_{cp} = -125 \div -155$ МПа. Зростання гідростатичного тиску є причиною підвищення зусилля при зворотному обтиску. Також має місце підвищення величин інтенсивності напружень у донній частині здеформованої заготовки (рис. 7 б). У донній частині маємо $\sigma_i = 210$ МПа. При такій величині вже можливе потовщення вказаної частини стінки.

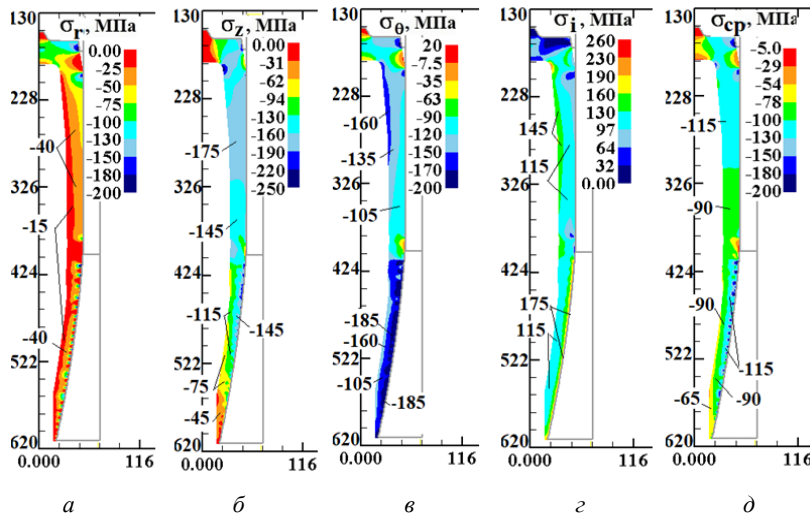


Рис. 6. Розподіли компонент напружень при прямому обтиску: *a* – розподіл σ_r , *б* – розподіл σ_z , *в* – розподіл σ_θ , *г* – розподіл σ_i , *д* – розподіл σ_{cp}

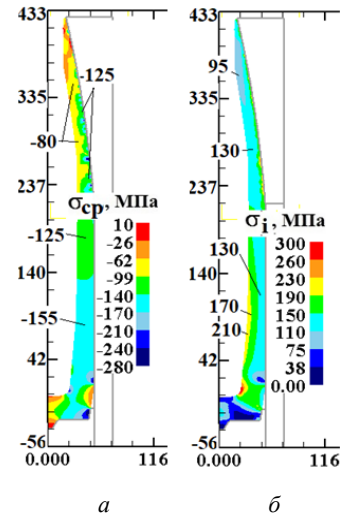


Рис. 7. Розподіл напружень при зворотному обтиску: *a* – розподіл σ_{cp} , *б* – розподіл σ_i

Для прямого обтиску на рис. 8 наведений розподіл кінцевих деформацій у zdeформованому металі. Розтягувальні радіальні деформації зростають від $\epsilon_r = 0,12$ в зоні переходу обтиснутої частини в недеформовану до $\epsilon_r = 0,42$ в області торця стінки. Аналогічний вигляд розподілу і дещо більші значення отримані для осевих деформацій ϵ_z (рис. 8 б). У обтиснутій частині отримані суттєві значення стискаючих тангенціальних деформацій ϵ_θ . На початку цієї частини отримано $\epsilon_\theta = -0,22$, а в області торця стінки - $\epsilon_\theta = -1,1$ (рис. 8 в). На рис. 8 г представлений розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i , по якому можна оцінити пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією.

Пропрацювання металу обтиснутої частини відбувається достатньо інтенсивно, починаючи з області переходу обтиснутої частини в недеформовану. Тут отримано $\epsilon_i = 0,22$ з подальшим збільшенням до $\epsilon_i = 0,9$ в зоні торця стінки. У обтиснутій частині можна прогнозувати підвищені механічні властивості zdeформованого металу після термічної обробки.

Для порівняння результатів на рис. 9 приведені розподіли кінцевих тангенціальних деформацій ϵ_θ і інтенсивності деформацій ϵ_i при зворотному обтиску. Вигляди розподілів ϵ_θ (рис. 9 а) і ϵ_i (рис. 9 б) практично однакові, а величини цих деформацій несуттєво відрізняються. Тому схема обтиску не впливає на пропрацювання структури металу пластичною деформацією.

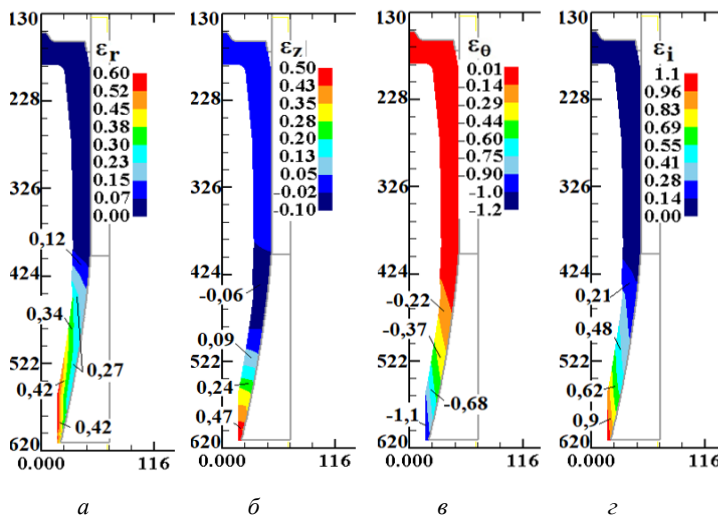


Рис. 8. Розподіли компонент деформацій при прямому обтиску: *a* – розподіл ϵ_r , *б* – розподіл ϵ_z , *в* – розподіл ϵ_θ , *г* – розподіл ϵ_i

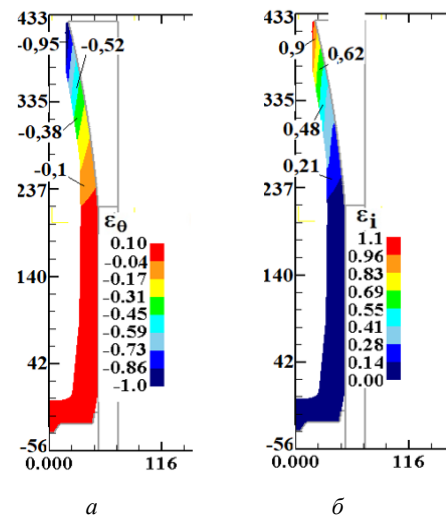


Рис. 9. Розподіли деформацій при закритому обтиску: *a* – розподіл ϵ_θ , *б* – розподіл ϵ_i

З розглянутих двох схем обтиску в матриці спеціального профілю на виробництві доцільно використовувати схему прямого обтиску. Така схема потребує менші зусилля деформування і використання простої конструкції штампового оснащення без пристроїв для переміщення контейнера при обтиску. На основі даних моделювання розроблена конструкція штампу з видаленням виробу від виштовхувача пресу. Ескіз загального вигляду штампу для реалізації прямого обтиску приведений на рис. 10. Штмп складається із нижньої плити 1, в яку запресована втулка 2. У втулці 2 розміщений штовхач 3. Також на плиті 1 розміщена центрування матриця 4. На матриці 2 встановлений контейнер 5. За допомогою шести шпильок 6, кільця 7, шайб 8 та гайок 9 матриця 4 і контейнер 5 зафіксовані до плити 1. До верхньої плити 10 штампу за допомогою шести гвинтів 11 прикріплений пуансонотримач 12, в якому розміщені під'ятник 13 і п'ята 14 зі сферичними опорними поверхнями. Пуансон 15 з використанням конусного кільця 16 і круглої гайки 17 зафіксований до п'яти 14.

В вихідному стані перед обтиском віддаль між нижнім торцем пуансона 15 і верхнім торцем контейнера 5 ненабагато більша за висоту виробу. Вихідна заготовка з центруванням встановлюється в матриці 4. При опусканні верхньої плити 10 пуансон 15 спочатку центрується по виступу на торці заготовки з усуненням перекосів за допомогою п'яти 14 і під'ятника 13, а далі направляєтья по контейнеру 5 до закінчення процесу обтиску. Робочий хід повзуна пресу зі швидкістю 100 мм/сек повинен бути не менше 640 мм, а з урахуванням конструкції штампу прес повинен мати відкриту висоту 1300 мм. Після обтиску і підняття верхньої плити в вихідне положення здійснюється видалення виробу із зони штампу. Виштовхувач пресу діє на штовхач 3, за допомогою якого відбувається видалення виробу із матриці 4 і контейнера 5. Хід виштовхувача пресу повинен не менше 500 мм.

Висновки

1. В роботі методом скінченних елементів проведений аналіз гарячого прямого і зворотного обтиску із високовуглецевої сталі заготовки зі змінною товщиною стінки по висоті. Використана матриця з кільцевими виступами і впадинами на деформуючій поверхні, що дозволило зменшити зусилля деформування та отримати виріб за один перехід.

2. Визначені зусилля та питомі зусилля на деформуючому інструменті, причому зусилля при прямому обтиску мають меншу величину в порівнянні зі зворотним обтиском.

References

- [1] V.P. Romanovskij, *Spravochnik po holodnoj shtampovke*, 6th ed., Leningrad: Mashinostroenie, 1979.
- [2] A.D. Matveeva Ed., *Listovaya shtampovka*, in *Kovka i shtampovka: Spravochnik*, Vol. 4., Moscow: Mashinostroenie, 1987.

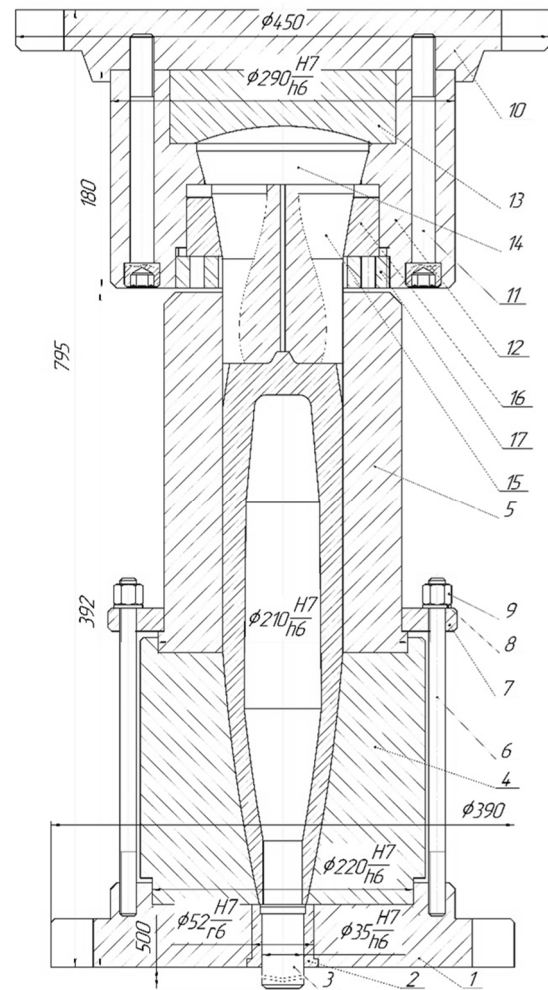


Рис. 10. Ескіз загального вигляду штампу для реалізації прямого обтиску

3. Встановлений напружено-деформований стан металу в кінці обтиску та приведені розподіли компонент напружень і деформацій в об'ємах zdeформованих заготовок.

4. На основі даних моделювання спроектовано загальний вигляд штампу для реалізації прямого обтиску на гідравлічних пресах, які мають виштовхувачі. Для цього приведені необхідні параметри пресів.

5. Подальші дослідження по такій тематиці необхідно проводити по визначенню впливу швидкості деформування на гаряче формування обтиском в матриці спеціального профілю, а також в напрямку оптимізації профілю матриць і контейнерів по критеріях зниження зусилля обтиску та збільшення ступеню деформації за один перехід.

- [3] Y.A. Averkiev and A.Y. Averkiev, *Holodnaya shtampovka*, Moscow: Mashinostroenie, 1989.
- [4] E.A. Popov, V.G. Kovalev and I.N. Shubin, *Tekhnologiya i avtomatizaciya listovoj shtampovki*, Moscow: MGТУ im. N.E. Baumana, 2000.
- [5] E.N. Sosenushkin *et al.*, *Teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty obzhima v konicheskoj matrice*, Moscow: Izvestiya MGТУ “MAMI”, 1(15), Vol. 2, pp. 139–145, 2013. DOI: doi.org/10.17816/2074-0530-68133
- [6] V.A. Krivoshein, *Sravnitel'nyj analiz teoreticheskikh i eksperimental'nykh dannykh pri issledovanii processa obzhima v matrice s kol'cevymi kanavkami*, Moscow: Izvestiya vuzov Mashinostroenie, No. 5. pp. 10–12, 2014.
- [7] O.V. Kalyuzhnyj, “Vidkritij ta zakritij obtisk trubchastih zagotovok z riznoyu visotoyu v matrici special'nogo profilyu”, *Obrabotka materialov davleniem*, No. 2 (39), pp. 144–150, 2014. DOI: doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.12.029
- [8] O.V. Kalyuzhnyj and V.L. Kalyuzhnyj, *Intensifikaciya formoutvoryuyuchih procesiv holodnogo listovogo shtampuvannya*, Kyiv: TOV “Sik Grup Ukraina”, 2015.
- [9] N.I. Shlyapugin, “Osobennosti modelirovaniya processa obzhima i razdachi trubnoj zagotovki v DEFORM_2d”, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*, No. 4, Vol. 16, pp. 240–244, 2014.
- [10] V.L. Kaliuzhnyi and O.S. Jarmolenko, “Intensifikaciya procesu holodnogo obtisku porozhnistih napivfabrikativ dlya otrimannya virobiv zi zminnoyu tovshchinoyu stinki”, *Mechanics Advanced Technologies*, No. 1(85), pp. 111–117, 2019. DOI: doi.org/10.20535/2521-1943.2019.85.164271
- [11] V.L. Kaliuzhnyi, O.V. Kaliuzhnyi and K.L. Marchuk, “Calculation of the size of a hollow workpiece with a thin wall with interchangeable thickness and determination of the parameters of its crimping in a matrix with a cone-cylindrical deforming surface”, *Mechanics Advanced Technologies*, No. 3(90), pp. 106–112, 2020. DOI: doi.org/10.20535/2521-1943.2020.0.219526

Hot crimping in a special profile matrix of axisymmetric hollow workpieces from high carbon steel

V. Kaliuzhnyi, S. Sytnyk, A. Titarenko

Abstract. Using the finite element method, mathematical models were created and studies were carried out of direct and reverse methods of hot crimping in a matrix of a special profile of hollow workpieces made of high-carbon steel with a variable wall thickness along the height. A plastic model of metal and cylindrical coordinates are used. By calculation, the shape and dimensions of the initial workpiece for crimping were established, which provided the required dimensions of the product. Before crimping, a part of the billet was heated along the height, which was subject to deformation in the matrix. The use of a matrix of a special profile with a deforming surface made with annular protrusions made it possible to obtain a product in one step due to a decrease in the influence of friction forces during shaping. The deformation rate is determined to comply with the hot deformation mode during the crimping. The dependences of the axial force on the deforming tool on the movement of punches and the distribution of specific forces on the contact surfaces are established. The use of direct crimping leads to a decrease in forces modes and specific forces on the tool. The final stress-strain state of the metal, the shape and dimensions of the product are determined. According to the distribution of strain intensity, an assessment was made of the elaboration of the metal structure by plastic deformation. Based on the simulation data, a design of the general view of the die tooling for direct crimping has been developed.

Keywords: finite element method, crimping, hollow workpiece, force, specific force, stresses, strain intensity, die tooling.