

# Варіанти обтиску в контейнері і матриці спеціального профілю вісесиметричних порожнистих заготовок із сталі С60

В.Л. Калюжний<sup>1</sup> • В.М. Левченко<sup>2</sup> • О.В. Калюжний<sup>3</sup> • С.В. Ситник<sup>1</sup>

Received: 14 February 2023 / Revised 22 March 2023 / Accepted: 29 March 2023

**Анотація.** *Методом скінченних елементів створені математичні моделі і проведено дослідження варіантів гарячого, напівгарячого і холодного обтиску в контейнері та матриці спеціального профілю вісесиметричних порожнистих заготовок із високовуглецевої сталі зі змінною товщиною стінки по висоті. Використана пластикна модель металу. Перед гарячим та напівгарячим обтиском здійснювався нагрів частини заготовки по висоті, яка підлягала деформуванню. Розрахунковим шляхом визначено форму і розміри вихідної заготовки для обтиску, які забезпечили необхідні розміри виробу. Застосування контейнера та матриці спеціального профілю з деформуючою поверхнею, виконаною з кільцевими виступами, дозволило отримати виріб за один перехід для розглянутих варіантів обтиску завдяки зменшенню впливу сил тертя при формоутворенні. Визначено швидкість деформування для дотримання режиму гарячої та напівгарячої деформації протягом обтиску. Встановлено залежність осьового зусилля на деформуючому інструменті від переміщення пуансону і розподілу питомих зусиль на контактуючих поверхнях. Застосування холодного обтиску призводить до підвищення точності форми та розмірів виробу, зниження енергозатрат та витрат металу. Визначено кінцевий напружено-деформований стан металу, форму та розміри виробу. По розподілу інтенсивності деформації проведена оцінка пропрацювання структури металу напівгарячою та холодною пластичною деформацією та виконано прогнозування межі текучості металу після обтиску. На основі даних моделювання розроблена конструкція загального вигляду штампового оснащення для виконання холодного обтиску.*

**Ключові слова:** *гарячий, напівгарячий та холодний обтиск, метод скінченних елементів, порожниста заготовка, зусилля, питомі зусилля, напруження, інтенсивність деформацій, штампове оснащення.*

## Вступ

В теперішній час при виготовленні балонів, різноманітних ємностей, перехідників для трубопроводної арматури, заготовок гільз і снарядів використовують процеси обтиску трубчастих або порожнистих заготовок з дном. Порожністі заготовки з дном можуть бути отримані гарячим чи холодним видавлюванням із гарячекатаних прутків або витягуванням із листових заготовок. Для гільз і снарядів обтиск є останньою операцією штампування, яка виконується для малих і середніх калібрів в умовах холодної пластичної

деформації, а для великих калібрів – в умовах гарячої деформації. При цьому в багатьох випадках обтиск здійснюється за декілька переходів. Сучасне виробництво гільз і снарядів ставить задачі підвищення продуктивності виготовлення та якості наведених деталей, що можна забезпечити відповідно за рахунок скорочення кількості переходів штампування та збільшення точності розмірів після пластичного формоутворення. Скорочення кількості переходів при обтиску досягається завдяки використанню деформуючого інструменту спеціального профілю з деформуючими поверхнями у вигляді виступів і впадин, який дозволяє зменшити площі контактуючих поверхонь між металом і інструментом та знизити вплив сил тертя на формоутворення обтиском. Збільшення точності розмірів деталей, отриманих обтиском, забезпечується шляхом заміни гарячого обтиску на напівгарячий, а напівгарячого – на холодний обтиск. Тому актуальним є проведення досліджень, що направлені на застосування деформуючого

✉ В. Л. Калюжний  
kwl\_2011@ukr.net

<sup>1</sup> КПІ, імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна

<sup>2</sup> Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, Україна

<sup>3</sup> Академія ІТ освіти, Київ, Україна

інструменту спеціального профілю для формоутворення обтиском виробів із високовуглецевих сталей, а також на встановлення можливості здійснення холодного обтиску при виробництві снарядів.

### Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В джерелах [1–5] приведено експериментальні дані та відомості з виробничого досвіду по розробленню технології і конструюванню штампного оснащення для обтиску в конусних та сферичних матрицях заготовок з постійною товщиною стінки по висоті. Можливість гарячого чи холодного формоутворення обтиском за один перехід визначається коефіцієнтом обтиску (відношення зовнішнього діаметру заготовки до діаметру обтиснутої частини). Величина коефіцієнту обтиску залежить від марки матеріалу заготовки, геометричної форми виробу, відношення товщини стінки заготовки до її діаметру та коефіцієнту тертя.

При виготовленні гільз і снарядів використовують схему закритого обтиску, при якій порожнисту заготовку зі змінною товщиною стінки по висоті розміщують в контейнері, а формоутворення здійснюють в матриці, форма і розміри якої відповідають формі і розмірам виробу. Течія металу по поверхнях контейнеру і матриці приводить до виникнення сил тертя, які істотно збільшують зусилля обтиску та обмежують заповнення профілю матриці. Зростання зусилля обтиску також є причиною потовщення стінки частини заготовки, яка не деформується. Зниження зусилля обтиску і запобігання потовщенню можна забезпечити застосуванням контейнеру і матриці спеціального профілю, у яких деформуючі поверхні виконані у вигляді кільцевих виступів і канавок. Недеформована і обтиснута частини заготовки контактує тільки по виступах поверхонь, що приводить до зменшення сил тертя і зусилля обтиску та збільшує коефіцієнт обтиску [6–8].

Використання комп'ютерного моделювання із застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ) і програми DEFORM для аналізу процесів обтиску по різних схемах дозволяє дослідити закономірності формоутворення обтиском, встановити силові режими, напружено-деформований стан металу. З урахуванням пружної деформації можна визначити кінцеві форми і розміри виробів [8–10]. Розрахунок МСЕ дозволяє також вирішити проблему по виявленню форми і розмірів вихідної заготовки зі стінкою змінної товщини для обтиску, щоб отримати виріб потрібної форми та розмірів [11].

Якщо для процесів холодного обтиску є достатньо інформації [6–8, 10] по використанню матриць спеціального профілю, то для гарячого обтиску великих порожнистих заготовок зі змінною товщиною стінки по довжині із високовуглецевих сталей практично мало даних, що дозволяють проектувати технологію формоутворення обтиском і штампове оснащення. Для

напівгарячого і холодного обтиску для отримання виробів із вказаних сталей така інформація відсутня.

### Мета і задачі дослідження

Мета роботи полягає у визначенні комп'ютерним моделюванням за допомогою МСЕ параметрів гарячого, напівгарячого і холодного обтисків порожнистих заготовок із високовуглецевої сталі із застосуванням контейнеру і матриці спеціального профілю. Задачами досліджень є встановлення зусиль і питомих зусиль на деформуючому інструменті, виявлення напружено-деформованого стану металу при формоутворенні обтиском та визначення кінцевих форм і розмірів виробів після пластичного деформування.

### Матеріали та методи дослідження

Для проведення досліджень використана схема обтиску порожнистої заготовки із використанням контейнеру і матриці спеціального профілю, яку наведено на рис. 1. Тут ліворуч від вісі симетрії наведено положення на початку обтиску, а праворуч – в кінці обтиску. Вихідна порожниста заготовка 1 розміщена в контейнері 2 і спирається торцем стінки на матрицю 3. Деформуючі поверхні контейнеру 2 і матриці 3 утворені перетином кіл діаметром  $d$ , що розташовані з постійним кроком  $t$ . В матриці 3 встановлений виштовхувач 4. Контейнер 2 і матриця 3 зафіксовані між собою та закріплені на плиті 5. Деформування зусиллям  $P$  виконується пуансоном 6. При опусканні пуансону 6 зі швидкістю  $V_0$  отримується виріб 7. В даному випадку виникають сили тертя від переміщення недеформованої частини заготовки 1 по контейнеру 2, а деформованої частини по матриці 3. Вилучення виробу із матриці 3 і контейнера 2 здійснюється виштовхувачем 4.

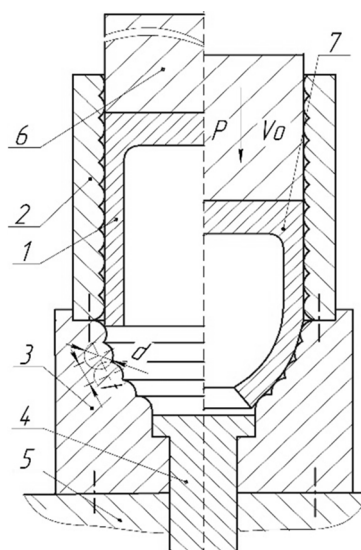


Рис. 1. Схема обтиску порожнистої заготовки в контейнері і матриці спеціального профілю

На рис. 2 зображено ескізи меридіональних перетинів виробу і вихідної заготовки для обтиску. Трьома варіантами обтиску необхідно отримати виріб із високовуглецевої сталі С60 (рис. 2 *а*). Для цього потрібна порожниста заготовка з різними розмірами по довжині стінки, яка підлягає обтиску (рис. 2 *б*). Необхідно відмітити, що висота заготовки менша від висоти виробу, а розміри її донної частини залишилися без змін. При цьому зовнішній діаметр та профіль порожнини заготовки можна забезпечити відповідно розмірами матриці і пуансону шляхом штампування витягуванням з потоншенням. Для гарячого і напівгарячого варіантів обтиску необхідно було виконати розігрів частини висоти стінки, що підлягає формоутворенню. Моделювання трьох варіантів обтиску виконувалося з використанням скінченно-елементної програми DEFORM, пластичної моделі металу і циліндричної системи координат. Частина висоти стінки вихідної заготовки, яка підлягала гарячому обтиску розігрівалася до температури  $T=1000^{\circ}\text{C}$  [12], а напівгарячому – до  $T=700^{\circ}\text{C}$  [13]. Донні частини заготовок були в холодному стані.

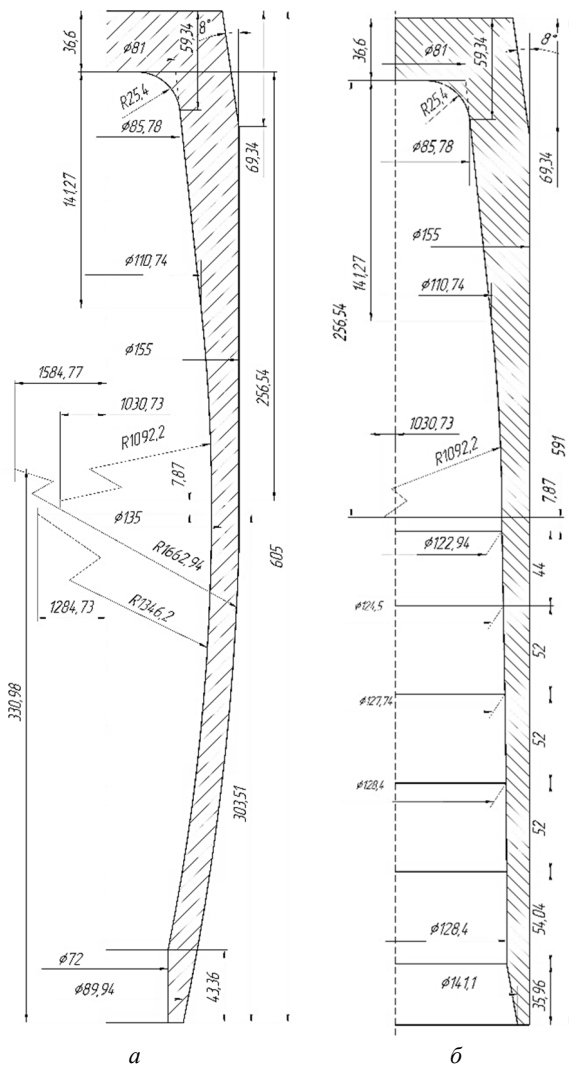


Рис. 2. Ескізи меридіонального перетину виробу (*а*) і вихідної заготовки (*б*)

## Результати дослідження

Далі представлено результати моделювання трьох варіантів обтиску. Застосування контейнеру і матриці спеціального профілю забезпечило можливість отримання виробу за один перехід для розглянутих варіантів обтиску. Розрахункові положення в розрізі деформуючого інструменту і заготовки з розподілом температури для на початку і в кінці гарячого і напівгарячого обтиску зображено на рис. 3. Положення на початку гарячого обтиску показано на рис. 3 *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 контейнеру 2 і витрати металу на його виготовлення. Деформування здійснюється шляхом переміщення пуансону 4. Розігріта частина стінки має необхідну температуру металу  $T=1000^{\circ}\text{C}$  з подальшим зменшенням до  $T=23^{\circ}\text{C}$  в області донної частини. При переміщенні пуансону 4 отримується виріб 5, в якому показано розподіл температури у здеформованому металі (рис. 3 *б*). Час формоутворення виробу склав біля 6 секунд. В шарах металу зовнішньої поверхні обтиснутої частини температура металу зменшилася до  $T=820^{\circ}\text{C}$ . На рис. 3 *в* наведено положення інструменту і заготовки на початку напівгарячого обтиску. Вихідна заготовка 1 після нагрівання має аналогічний з попереднім випадком вигляд розподілу температури, яка змінюється від  $T=700^{\circ}\text{C}$  в частині, що підлягає деформуванню, до  $T=22^{\circ}\text{C}$  в донній частині. Положення в кінці обтиску з отриманим виробом 5 і розподілом температури в ньому показано на рис. 3 *г*. В обтиснутій частині має місце невелике підвищення температури в порівнянні з вихідним положенням, що пов'язано із зростанням впливу сил тертя на контактуючій поверхні матриці. Шари металу здеформованої заготовки біля цієї поверхні охолоджуються до температури  $T=600^{\circ}\text{C}$ . Заміна гарячого обтиску на напівгарячий дозволяє зменшити витрати часу і енергії на нагрівання заготовок, знизити припуски на окалиноутворення та підвищити точність розмірів виробу.

На рис. 4 для трьох варіантів обтиску зображено силові режими на деформуючому інструменті. В процесі обтиску осьові зусилля постійно зростають і досягають максимальних значень в кінці формоутворення виробу. Залежності осьових зусиль, які виникають на пуансоні, контейнері і матриці від переміщення пуансону для гарячого обтиску показано на рис. 4 *а*. Найбільше зусилля (0,53 МН) сприймає пуансон. На контейнері отримано 0,05 МН, на матриці – 0,48 МН. Аналогічні залежності для напівгарячого обтиску представлено на рис. 4 *б*. Величини зусиль більші в порівнянні з гарячим обтиском. На пуансоні отримано 1,52 МН, на контейнері – 0,27 МН, на матриці – 1,25 кН. Найбільші

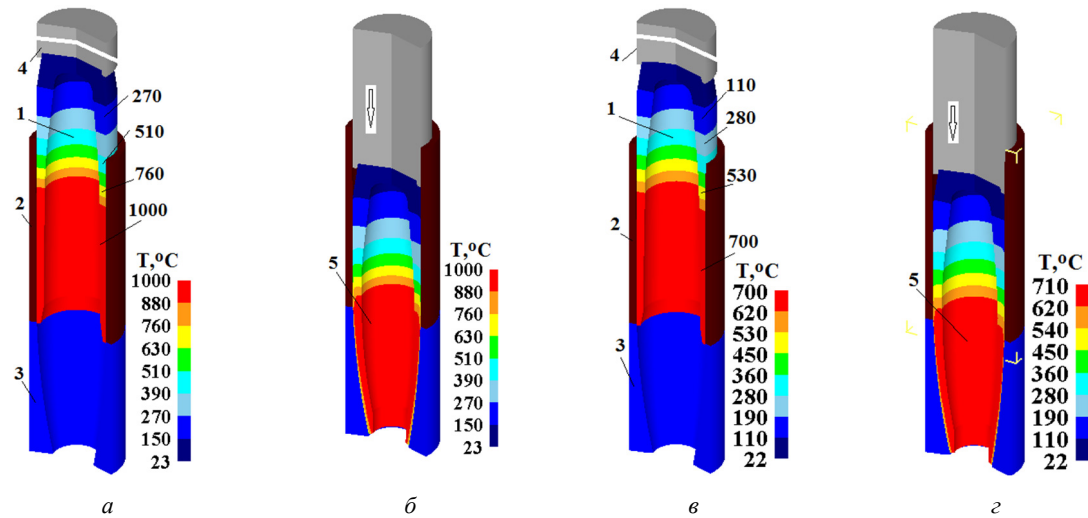


Рис. 3. Розрахункові положення в розрізі деформуючого інструменту і заготовки з розподілом температури: *a* – на початку гарячого обтиску, *б* – в кінці гарячого обтиску, *в* – на початку напівгарячого обтиску, *г* – в кінці напівгарячого обтиску

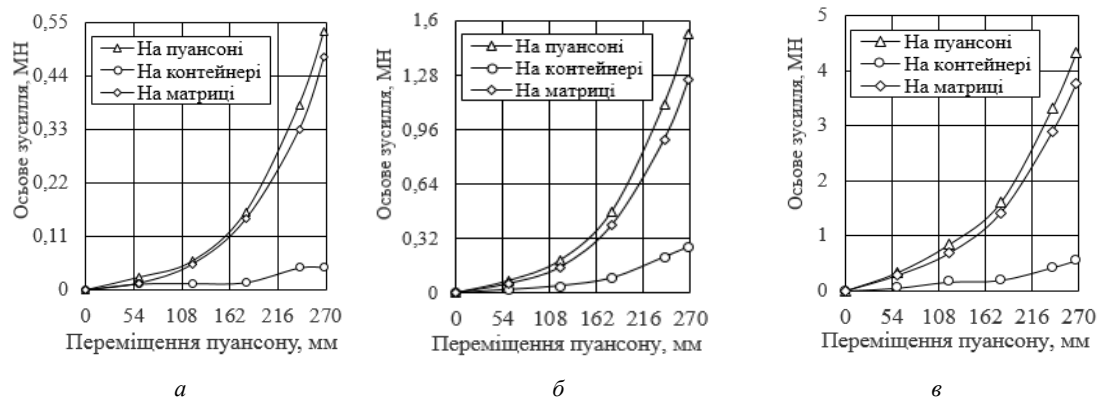


Рис. 4. Залежності осьових зусиль на пуансоні, контейнері і матриці від переміщення пуансону: *a* – для гарячого обтиску, *б* – для напівгарячого обтиску, *в* – для холодного обтиску

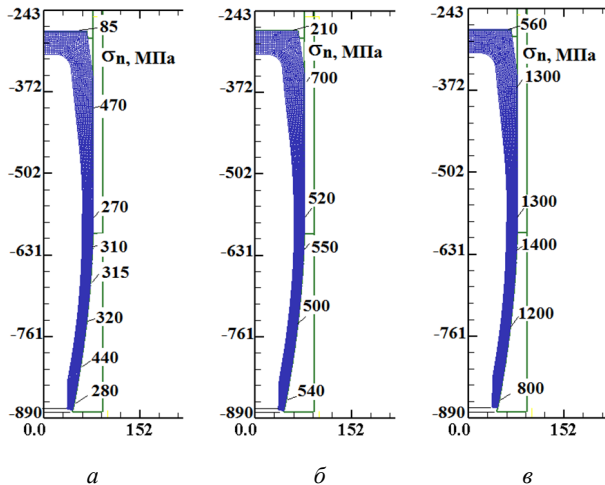
значення осьових зусиль на деформуючому інструменті мають місце для холодного обтиску і досягають величини 4,32 МН на пуансоні, 0,55 МН на контейнері і 3,76 МН на матриці (рис. 3 *в*). Зусилля на пуансоні і робота деформації необхідні для вибору пресового обладнання і проектування опорної плити під пуансон і верхньої плити штампу, а зусилля на матриці і контейнері – для проектування нижньої плити штампу.

Для розрахунку і проектування деформуючого інструменту потрібно мати розподіли питомих зусиль на ньому при максимальних значеннях осьових зусиль. Питомі зусилля можна оцінити по розподілу нормальних напружень  $\sigma_n$ , які виникають на контактуючих поверхнях. Розподіли таких напружень приведено на рис. 5. Тут і надалі показано половину здеформованої заготовки, тонкими лініями приведено деформуючий інструмент, а розміри по всіх наведено в міліметрах. На рис. 5 *а*, такі розподіли представлено для гарячого обтиску. Найбільші величини питомих зусиль склали:

на пуансоні  $\sigma_n = 85$  МПа, на контейнері  $\sigma_n = 470$  МПа, на матриці  $\sigma_n = 440$  МПа. Розподіли нормальних напружень для напівгарячого обтиску показано на рис. 5 *б*. Питомі зусилля збільшуються і досягають значень  $\sigma_n = 210$  МПа на пуансоні,  $\sigma_n = 700$  МПа на контейнері та  $\sigma_n = 550$  МПа на матриці. Найбільші величини питомих зусиль виникають при холодному обтиску (рис. 5 *в*). На пуансоні отримано  $\sigma_n = 560$  МПа, на контейнері  $\sigma_n = 1300$  МПа, на матриці  $\sigma_n = 1400$  МПа. Наведені значення питомих зусиль дозволяють встановити товщини плит і опорних плит штампу, вибрати матеріал для пуансону та призначити кількість і розміри бандажів для контейнеру та матриці, а також дають можливість прогнозувати стійкість деформуючого інструменту.

Для трьох варіантів обтиску визначений напружено-деформований стан металу в кінці формоутворення обтиском. Найбільші величини у здеформованих

частинах заготовок отримані для стискаючих тангенціальних напружень, розподіли яких приведені на рис. 6. При гарячому обтиску напруження в обтиснутій частині знаходяться у межах  $\sigma_{\theta} = -80 \div -160$  МПа, при напівгарячому обтиску  $\sigma_{\theta} = -180 \div -400$  МПа, при холодному обтиску  $\sigma_{\theta} = -630 \div -1000$  МПа. При цьому напруження зростають по абсолютній величині від початку обтиснутої частини до області торця стінки. Виявлені величини напружень не приводять до виникнення поздовжніх гофр на обтиснутих частинах.

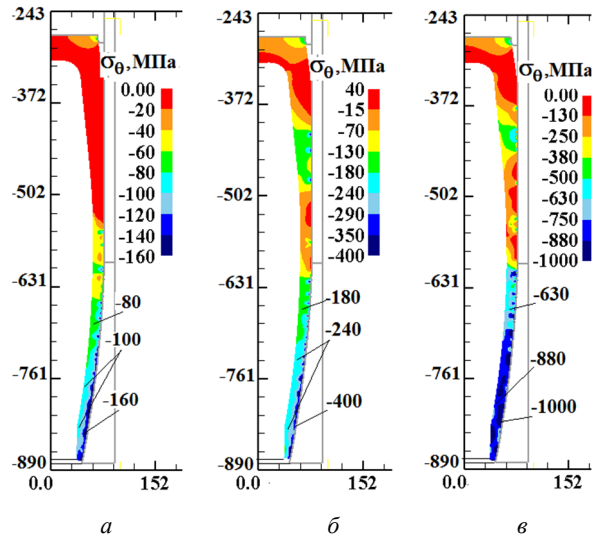


**Рис. 5.** Розподіли нормальних напружень  $\sigma_n$  на контактуючих поверхнях при максимальному значенні осьового зусилля на пуансоні: *a* – розподіл для гарячого обтиску, *б* – розподіл для напівгарячого обтиску, *в* – розподіл для холодного обтиску

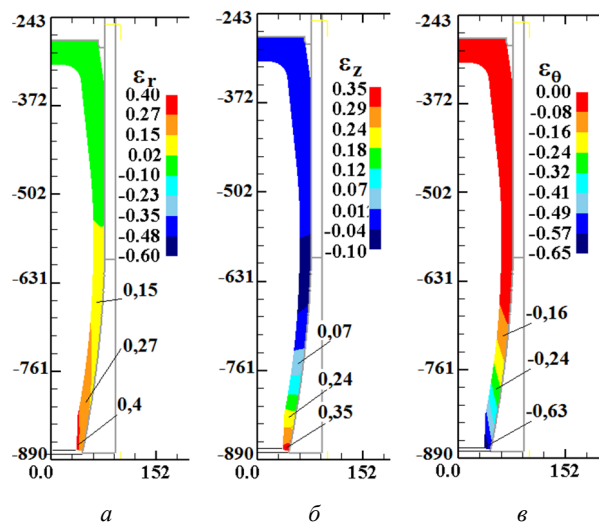
Аналіз отриманого кінцевого деформованого стану металу показав, що величини і розподіли компонент деформацій однакові для розглянутих варіантів обтиску. Для прикладу, на рис. 7, наведено розподіли радіальних  $\epsilon_r$ , осьових  $\epsilon_z$  та тангенціальних  $\epsilon_{\theta}$  деформацій, які визначені у здеформованому металі після холодного обтиску. У обтиснутій частині виникають розтягувальні радіальні деформації і змінюються від  $\epsilon_r = 0,07$  на початку цієї частини до  $\epsilon_r = 0,4$  в області торця стінки (рис. 7 *a*). Аналогічно змінюються по висоті обтиснутої частини осьові розтягувальні деформації (рис. 7 *б*). При обтиску виникають стискаючі тангенціальні деформації  $\epsilon_{\theta}$ , розподіл яких показано на рис. 7 *в*. На початку обтиснутої частини отримано  $\epsilon_{\theta} = -0,16$ , в області торця стінки –  $\epsilon_{\theta} = -0,63$ .

Пропрацювання структури металу пластичною деформацією можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$ . При гарячій деформації відбувається процес рекристалізації. Формоутворення в умовах напівгарячої деформації приводить до існування двох структур металу – здеформованої і рекристалізо-

ваної. Інтерес представляє прогнозування напруження текучості у здеформованому металі, яке можна визначити по досягнутому значенню інтенсивності деформацій, використовуючи експериментальну діаграму істинних напружень для сталі С60.



**Рис. 6.** Розподіли тангенціальних напружень  $\sigma_{\theta}$  при обтиску: *a* – розподіл для гарячого обтиску, *б* – розподіл для напівгарячого обтиску, *в* – розподіл для холодного обтиску



**Рис. 7.** Розподіли компонент деформацій при холодному обтиску: *a* – розподіл  $\epsilon_r$ , *б* – розподіл  $\epsilon_z$ , *в* – розподіл  $\epsilon_{\theta}$

На рис. 8 зображено розподіли інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  та величини прогнозованого напруження текучості  $\sigma_s$  (наведено в дужках) у здеформованих частинах виробів, що отримані напівгарячим і холодним обтиском. У виробі після напівгарячого обтиску величини інтенсивності деформацій змінюються від  $\epsilon_i = 0,15$  на початку здеформованої частини і до  $\epsilon_i = 0,28$

по середині стінки та до  $\epsilon_i = 0,55$  в області торця стінки (рис. 8 а). По цих значеннях  $\epsilon_i$  із експериментальної діаграми істинних напружень відповідно отримано  $\sigma_s = 450$  МПа,  $\sigma_s = 500$  МПа і  $\sigma_s = 520$  МПа. У виробі після холодного обтиску отримано практично аналогічні значення інтенсивності деформацій по висоті стінки обтиснутої частини (рис. 8 б). Прогнозовані значення напруження текучості для вказаних величин  $\epsilon_i$  склали:  $\sigma_s = 620$  МПа,  $\sigma_s = 760$  МПа і  $\sigma_s = 850$  МПа. Таким чином, немає необхідності в проведенні експериментальних робіт по визначенню напруження текучості здеформованого металу.

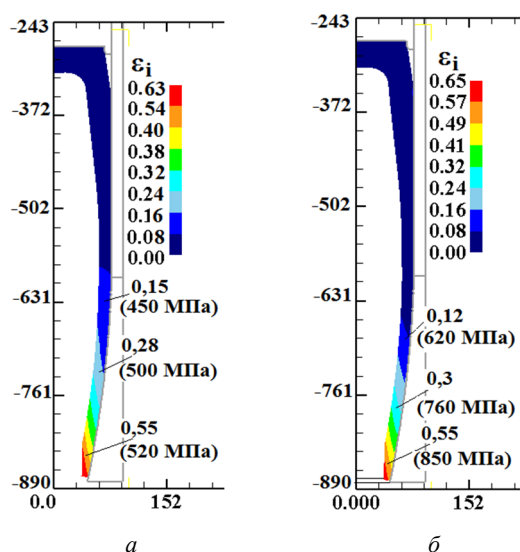


Рис. 8. Розподіли інтенсивності деформацій та величини прогнозованого напруження текучості у здеформованому металі виробу: а – для напівгарячого обтиску, б – для холодного обтиску

На основі даних моделювання холодного обтиску розроблена конструкція штампу з видаленням виробу від виштовхувача пресу. Ескіз загального вигляду штампу для реалізації холодного обтиску на гідравлічному пресі зусиллям 6,3 МН приведено на рис. 9. Штмп складається із двохбандажованої матриці 1, на яку з центруванням встановлений однобандажований контейнер 2. Внутрішні поверхні матриці 1 і контейнеру 2 мають кругові виступи діаметром 4 мм, що розташовані з кроком 1,5 мм. Матриця 1 з контейнером 2 розміщені на нижній плиті 3 штампу, яка має пази для кріплення на столі пресу. В нижню плиту 3 запресована втулка 4. За допомогою кільця 5, шести гайок 6, шайб 7 і шпильок 8 матриця 1 з контейнером 2 зафіксовані до нижньої плити 3. У втулку 4 встановлений штовхач 9, що спирається на пружину 10. До верхньої плити 11 штампу за допомогою шести гвинтів 12 прикріплений пуансонотримач 13. В пуансонотримачі 13 розміщені п'ята 14 і під'ятник 15 із сферичними опорними поверхнями. Пуансон 16 з використанням конусного кільця 17 і круглої гайки 18 зафіксований до п'яти 14.

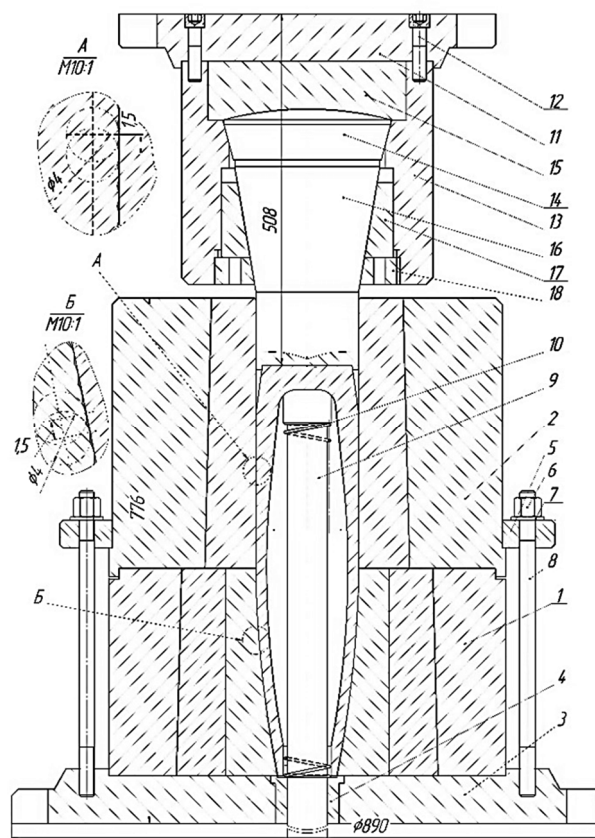


Рис. 9. Ескіз загального вигляду штампу для реалізації холодного обтиску

В вихідному стані перед обтиском відстань між нижнім торцем пуансону 16 і верхнім торцем контейнеру 2 повинна бути трохи більша за висоту виробу. Вихідна заготовка з центруванням встановлюється в контейнері 2 і донною частиною порожнини спирається на штовхач 9, якого підтримує пружина 10. Частина заготовки виступає із контейнеру 2 на висоту 175 мм. При опусканні верхньої плити 11 пуансон 16 спочатку центрується по торцю заготовки з усуненням перекосів за допомогою п'яти 14 і під'ятника 15, а далі направляється по контейнеру 2 до закінчення процесу обтиску. Робочий хід повзуна пресу зі швидкістю 50 мм/сек повинен бути не менше 270 мм. З урахуванням конструкції штампу прес повинен мати відкриту висоту 1900 мм. Після обтиску і підняття верхньої плити в вихідне положення здійснюється видалення виробу із зони штампу. Виштовхувач пресу діє на штовхач 9, за допомогою якого відбувається видалення виробу із матриці 1 і контейнеру 2. Хід виштовхувача пресу повинен бути не менше 500 мм.

## Висновки

1. Проведено аналіз гарячого, напівгарячого і холодного обтиску із високовуглецевої сталі заготовки зі змінною товщиною стінки по висоті. Використані кон-

тейнер і матриця з кільцевими виступами і впадинами на деформуючих поверхнях, що дозволило зменшити зусилля деформування та отримати виріб за один перехід для розглянутих варіантів обтиску.

2. Визначено зусилля обтиску та питомі зусилля на деформуючому інструменті. Встановлено напружено-деформований стан металу в кінці обтиску та приведені розподіли компонент напружень і деформацій в об'ємах здеформованих заготовок. Проведено прогнозування напруження текучості у стінці обтиснутих частин заготовок в умовах напівгарячої та холодної деформації.

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

4. Подальші дослідження по такій тематиці необхідно проводити по визначенню впливу швидкості деформування на напівгаряче формоутворення обтиском в контейнері і матриці спеціального профілю, а також в напрямку встановлення пружної деформації здеформованого металу при холодному обтиску.

## References

- [1] V.P. Romanovsky, *Handbook of Cold Forging*, 6th ed., Leningrad: Mashinostroenie, 1979.
- [2] E.I. Semenov *et al.*, "Sheet stamping", in *Forging and stamping: Handbook*, Vol. 4., A.D. Matveev, Ed., Moscow: Mashinostroenie, 1985–1987.
- [3] Yu.A. Averkiev and A.Yu. Averkiev, *Cold stamping*, Moscow: Mashinostroenie, 1989.
- [4] E.A. Popov, V.G. Kovalyev and I.N. Shubin, *Technology and automation of sheet stamping*, Moscow: Publishing house of MSTU im. N.E. Baumanqa, 2000.
- [5] E.A. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya and D.V. Khachatryan, "Theoretical and technological aspects of crimping in a conical die", *Izvestiya MGTU "MAMI"*, Moscow, No. 1(15), Vol. 2, pp. 139–145, 2013. DOI: 10.17816/2074-0530-68133
- [6] V.A. Krivoshein, "Comparative analysis of theoretical and experimental data in the study of the process of crimping in a matrix with annular grooves", *Izvestiya vuzov Mashinostroyeniye*, Moscow, pp. 10–12, 2014.
- [7] O.V. Kaliuzhnyi, "Open and closed crimping of tubular blanks with different heights in a matrix of a special profile", *Processing of materials by pressure. Collection of scientific papers*, Kramatorsk: DGMA, No. 2 (39), pp. 144–150, 2014.
- [8] O.V. Kaliuzhnyi and V.L. Kaliuzhnyi, *Intensification of shaping processes of cold sheet stamping*, Kyiv: TOV "Sik Grup Ukraina", 2015.
- [9] N.I. Shlyapugin, "Features of modeling the process of crimping and expansion of tubular blanks in DEFORM\_2d", *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, vol. 16, pp. 240–244, 2014.
- [10] V.L. Kaliuzhnyi, "Intensification of the process of cold pressing of empty brewery products for the production of brews from a replacement wall", *Mech. Adv. Tech.*, No. 1 (85), pp. 111–117, 2019. DOI: 10.20535/2521-1943.2019.85.164271
- [11] V.L. Kaliuzhnyi and K.L. Marchuk, "Calculation of the dimensions of the original hollow workpiece with a wall of variable thickness and crimping it in the matrix with a cone-cylindrical deforming surface", *Mechanics Advanced Technologies*, No. 3 (90), pp. 106–112, 2020. DOI: 10.1016/j.indmarman.2020.07.002
- [12] E.I. Semenov *et al.*, "Hot stamping", in *Forging and stamping: Handbook*, Vol. 2, E.I. Semenov, Ed., Moscow: Mashinostroenie, 1986.
- [13] V.A. Evstratov, *Fundamentals of technology for extrusion and design of stamps*, Kharkiv: Vyshcha shkola, 1987.

## Options of crimping in a container and matrices of a special profile of axisymmetric hollow billets made of C60 steel

V. Kaliuzhnyi<sup>1</sup>, V. Levchenko<sup>2</sup>, O. Kaliuzhnyi<sup>3</sup>, S. Sytnyk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine

<sup>3</sup> IT Education Academy, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** *Mathematical models were created using the finite element method and research was carried out on options for hot, semi-hot and cold crimping in a container and matrix of a special profile of axisymmetric hollow blanks made of high-carbon steel with variable wall thickness along the height. A plastic model of metal is used. Before hot and semi-hot crimping, the part of the workpiece was heated at the height to be deformed. The shape and dimensions of the initial blank for crimping were determined by calculation, which ensured the required dimensions of the product. The use of a container and a matrix of a special profile with a deforming surface made with ring protrusions made it possible to obtain a product in one pass for the considered options for crimping due to the reduction of the influence of frictional forces during molding. The rate of deformation was determined to maintain the mode of hot and semi-hot deformation during crimping. The dependence of the axial force on the deforming tool on the movement of the punch and the distribution of specific forces on the contacting surfaces was established. The use of cold pressing leads to an increase in the accuracy of the shape and dimensions of the product, a decrease in energy consumption and metal consumption. The final stress-strained state of the metal, the shape and dimensions of the product are determined. Based on the distribution of deformation intensity, an evaluation of the working of the metal structure by semi-hot and cold plastic deformation was carried out, and the yield point of the metal after crimping was predicted. On the basis of the simulation data, a design of the general appearance of the die equipment for cold crimping was developed.*

**Keywords:** *hot, semi-hot and cold crimping, finite element method, hollow workpiece, forces, specific forces, stress, intensity of deformation, die equipment.*