

Калюжний О. В.  
Горностай В. М.  
Левченко В. М.

## ВИКОРИСТАННЯ ПРОФІЛЬОВАНОГО ДЕФОРМУЮЧОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ГАРЯЧОМУ ОБТИСКУ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ПОРОЖНИСТИХ ЗАГОТОВОК

*Методом скінченних елементів створено математичні моделі та проведено дослідження прямого і зворотного способів гарячого обтиску з використанням традиційного деформуючого інструменту та деформуючого інструменту спеціального профілю. Для обтиску використано порожнисті заготовки із високовуглецевої сталі зі змінною за висотою товщиною стінки та з нагрівом до температури гарячої деформації частини стінки, яка підлягала деформуванню. При моделюванні процесу методом скінченних елементів використано пластичну модель суцільного середовища, задачу розглядали в циліндричній системі координат. Встановлено, що прямим і зворотним обтиском традиційним інструментом отримати виріб потрібних розмірів за один перехід неможливо. Проведені розрахунки показали, що застосування матриці і контейнеру спеціального профілю з деформуючими поверхнями, виконаними з кільцевими виступами і впадинами, дозволяє отримати виріб за один перехід завдяки зменшенню впливу сил тертя при формоутворенні. Визначено швидкість деформування, необхідну для дотримання режиму гарячої деформації на протязі процесу обтиску, та наведено кінцевий розподіл температури металу. Отримано залежності осьової сили на деформуючому інструменті від переміщення пуансону при прямому обтиску і матриці при зворотному та розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях. Встановлено, що застосування прямого обтиску призводить до пом'якшення силового режиму і зниження питомих зусиль на інструменті. Також визначено кінцевий напружено-деформований стан металу, форму і розміри виробу. За розподілом інтенсивності деформації проведено оцінку пропрацювання структури металу пластичною деформацією. Наведено розроблену на основі результатів моделювання конструкцію загального виду штампового оснащення для виконання прямого обтиску.*

**Ключові слова:** обтиск, порожниста заготовка, метод скінченних елементів, штампове оснащення, профільований інструмент, питоми зусилля, напружено-деформований стан.

При виробництві виробів спеціального призначення використовуються процеси холодного або гарячого пластичного формоутворення в наступній послідовності: видавлювання, витягування з потоншенням та обтиску. На операції обтиску потрібно забезпечити кінцеві форму і розміри порожнини, яка в подальшому практично не підлягає обробленню. Обтиск порожнистих заготовок зі стінкою постійної за висотою товщини в теперішній час достатньо добре вивчений. В джерелах [1–5] наведено теоретичні і експериментальні дані та відомості з виробничого досвіду щодо розроблення технології і конструювання штампового оснащення для обтиску в матрицях різноманітної конфігурації. Можливість формоутворення обтиском за один перехід визначається відповідним коефіцієнтом. Величина коефіцієнта обтиску залежить від марки матеріалу і геометричної форми виробу, відношення товщини заготовки до її діаметру та від коефіцієнта тертя. При відкритому обтиску, при якому на недеформовану частину стінки заготовки відсутня дія інструменту, можуть виникати дефекти у вигляді поперечних гофр на циліндричній частині стінки або в місці переходу циліндричної частини в обтиснуту частину та можливе виникнення меридіональних гофр на обтиснутій частині [3]. Застосування закритого обтиску, при якому зменшується вірогідність втрати стійкості стінок заготовки завдяки використанню зовнішніх жорстких упорів, дозволяє збільшити ступінь деформації за один перехід. Для обох варіантів обтиску, крім вказаних дефектів, є характерним потовщення стінок недеформованої частини заготовок, яке виникає при досягненні сили обтиску певної величини. Зниження сил відкритого і закритого обтиску та виключення потовщення стінки можна забезпечити застосуванням матриці спеціального профілю, у якій деформуючу поверхню виконано у вигляді кільцевих виступів і канавок. Обтиснута частина заготовки контактує тільки виступами поверхні, що призводить до зменшення сил тертя і сили деформування та додатково збільшує ступінь деформації за один перехід обтиску [6–8]. Для закритого обтиску використання контейнеру з деформуючою поверхнею аналогічної форми також призводить до зниження сили деформування. Значні складнощі виникають при проектуванні технології обтиску заготовок зі змінною за висотою товщиною стінки з причини потовщення обтиснутої

частини стінки. Тому вихідна заготовка для обтиску, що отримується на переході витягування з потоншенням, також повинна мати змінну за висотою товщину.

Комп'ютерне моделювання процесів обтиску з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) дозволяє дослідити закономірності формозміни, визначити силові режими та напружено-деформований стан металу з урахуванням пружної деформації, встановити кінцеву форму і розміри zdeформованих заготовок та суттєво скоротити час на підготовку виробництва [8–10]. При цьому практично непотрібне експериментальне доопрацювання прийнятих параметрів обтиску. Моделювання МСЕ дозволяє також вирішити задачу з визначення форми і розмірів вихідної заготовки для обтиску за креслеником виробу [11].

Для процесів холодного обтиску є достатньо інформації [6–8, 10] з використання матриць спеціального профілю з метою скорочення кількості переходів обтиску, але для гарячого обтиску порожнистих заготовок із високовуглецевих сталей практично відсутні дані, які дозволяють проектувати технологію формоутворення в матриці і контейнері спеціального профілю.

Метою даної роботи є встановлення комп'ютерним моделюванням з використанням МСЕ параметрів гарячого прямого і зворотного обтисків в матриці і контейнері спеціального профілю осесиметричних порожнистих заготовок з високовуглецевої сталі зі змінною за висотою товщиною стінок.

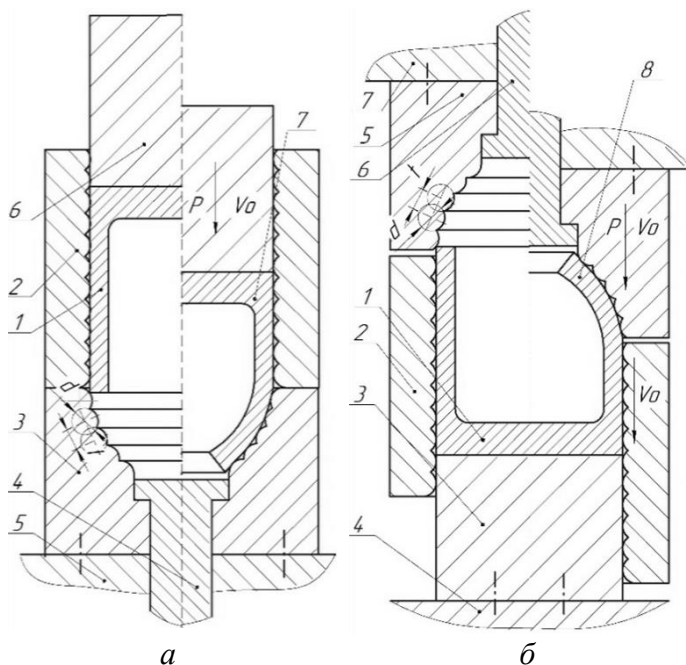


Рис. 1. Схеми ПО (а) і ЗО (б) порожнистої заготовки в матриці та контейнері спеціального профілю

Вилучення виробу 7 з матриці 3 і контейнера 2 здійснюється виштовхувачем 4.

Схему зворотного обтиску (ЗО) представлено на рис. 1, б. Вихідну заготовку 1 розміщено в контейнері спеціального профілю 2 і вона спирається нижнім торцем на пуансон 3, що закріплений на плиті 4. Матрицю спеціального профілю 5, в якій встановлено виштовхувач 6, прикріплено до рухомої плити 7. При опусканні плити 7 із матрицею 5 і виштовхувачем 6 зі швидкістю  $V_0$  створюється сила 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 призводить до збільшення сили 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.

Схеми двох варіантів закритого обтиску порожнистої заготовки в матриці і контейнерах спеціального профілю зображено на рис. 1. На рис. 1, а показано схему прямого обтиску (ПО). Тут і надалі ліворуч від вісі симетрії наведено положення на початку обтиску, а праворуч – в його кінці. Вихідну заготовку 1 розміщено в контейнері спеціального профілю 2 і вона спирається торцем стінки на матрицю спеціального профілю 3. Деформуючі поверхні контейнеру 2 і матриці 3 утворено перетином кіл діаметром  $d$ , що розташовані з кроком  $t$ . В матриці 3 встановлено виштовхувач 4. Контейнер 2 і матрицю 3 закріплено на плиті 5. Деформування з силою  $P$  виконується пуансоном 6. При опусканні пуансону 6 зі швидкістю  $V_0$  отримується виріб 7. При обтиску течія металу відбувається в напрямку переміщення пуансону 6.

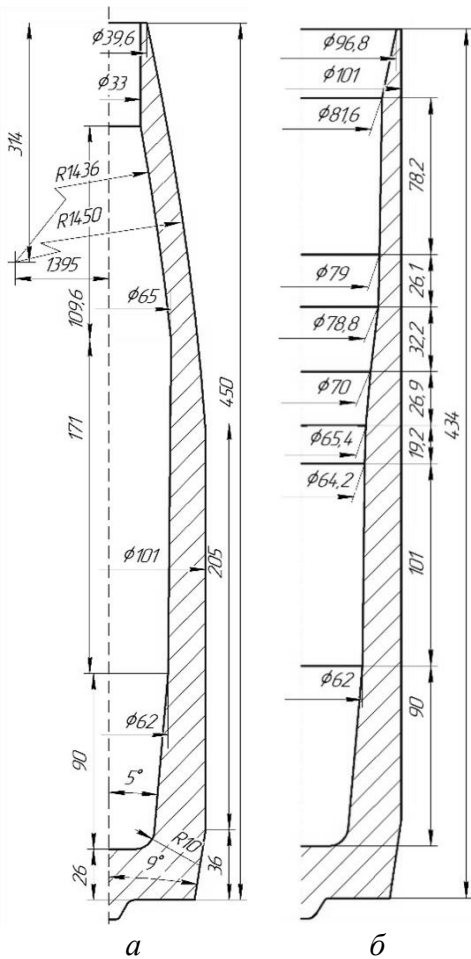


Рис. 2. Ескізи половин виробу (а) і заготовки (б)

На рис. 2 представлено ескізи половин виробу і вихідної заготовки, розміри якої встановлено за розмірами виробу згідно методики джерела [11]. Розміри виробу зображено на рис. 2, а, а розміри вихідної заготовки – на рис. 2, б. Необхідно відмітити, що висота розрахункової заготовки менша від висоти виробу, а розміри донної частини виробу залишилися без змін.

Моделювання гарячого обтиску виконували з використанням скінченно-елементної програми DEFORM в циліндричній системі координат. Розглянуто прямий і зворотний процеси обтиску з традиційним деформуючим інструментом та деформуючим інструментом спеціального профілю. Використано вихідну заготовку зі сталі С 60, для якої виконано нагрів до температури гарячого штампування частини стінки, яка підлягає деформуванню. Ця частина висоти стінки 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 пуансону 6 при ПО та матриці 5 при ЗО складала  $V_o = 100$  мм/сек. Тертя враховано за Зібелем з коефіцієнтом тертя  $\mu = 0,25$ . Деформуючі поверхні матриць і контейнерів було спроектовано за розмірами зовнішньої поверхні обтиснутої частини виробу. Профіль таких поверхонь утворено перетином кіл діаметром  $d = 4$  мм, які розташовано з постійним кроком  $t = 1,5$  мм (див. рис. 1). Матриця, контейнер і пуансон вважалися абсолютно жорсткими. Для отримання виробу переміщення пуансону при ПО і матриці при ЗО

складало 187 мм.

Спочатку проводили розрахунковий аналіз обтиску з використанням традиційного деформуючого інструменту. Силкові режими при традиційному обтиску зображено на рис. 3.

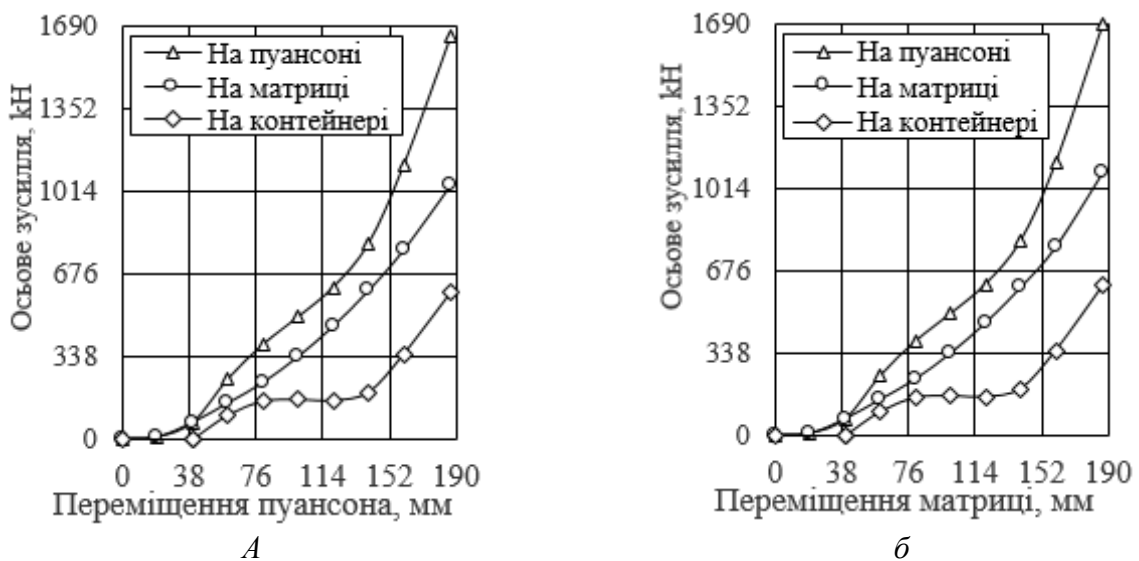


Рис. 3. Осьова сила на деформуючому інструменті при традиційному обтиску для ПО (а) та ЗО (б)

На рис. 3, *а* наведено залежності осьових сил, які виникають на пуансоні, матриці і контейнері при ПО, від переміщення пуансону. Аналогічні залежності таких сил від переміщення матриці для ЗО показано на рис. 3, *б*. В обох випадках обтиску при досягненні сили  $P \approx 800$  кН формоутворення на поверхнях матриць закінчується і надалі відбувається потовщення стінок обтиснутих частин до кінцевого переміщення пуансону і матриці, що представлено на рис. 4.

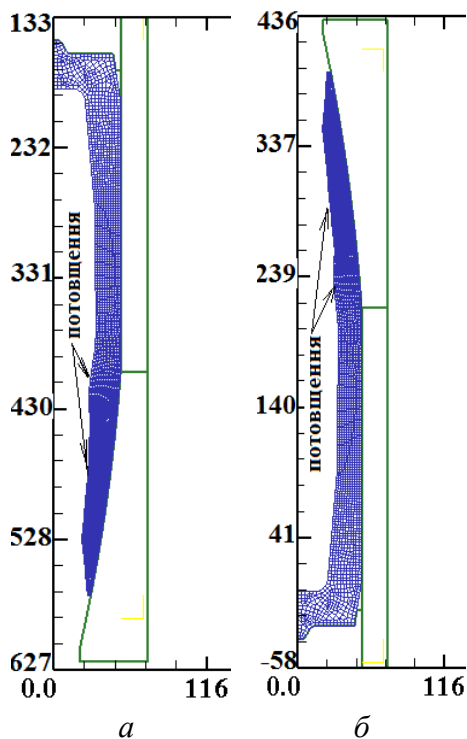


Рис. 4. Здеформовані заготовки при ПО (*а*) та ЗО (*б*)

Для зменшити висоту контейнера 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  $T = 97^{\circ}\text{C}$  в області донної частини. При опусканні пуансону 4 отримується виріб 5 (рис. 5, *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 зменшувалася до  $T = 820^{\circ}\text{C}$ . На рис. 5, *в* наведено положення інструменту і заготовки на початку ЗО. Вихідна заготовка 1 після нагрівання має аналогічний з попереднім випадком розподіл температури та встановлюється в контейнері 2 і спирається нижнім торцем на пуансон 3. Формоутворення обтиском виконується матрицею 4. Положення в кінці обтиску з отриманим виробом 5 представлено на рис. 5, *г*. Вигляд розподілу температури у виробі 5 також аналогічний попередньому обтиску, але величини температури zdeформованого металу дещо відрізняються. Охолодження металу до  $T = 850^{\circ}\text{C}$  відбувається в місці переходу обтиснутої частини в недеформовану та в шарах металу біля зовнішньої поверхні цієї частини, що пов'язано з відсутністю руху заготовки контейнером в процесі обтиску.

На рис. 6 для двох варіантів обтиску зображено силові режими та розподіл нормальних напружень на пуансоні, матриці і контейнері. Залежності осьових сил, які виникають на інструменті, від переміщення пуансону при ПО показано на рис. 6, *а*. При обтиску сили постійно зростають і сягають максимальних значень в кінці формоутворення виробу. Найбільшу силу (1050 кН) сприймає пуансон. На матриці отримано значення сили 709 кН, на контейнері – 338 кН. Сила на пуансоні і робота деформації є необхідними для вибору пресового обладнання, а сили на матриці і контейнері – для проектування штампового оснащення. Аналогічні залежності

На рис. 4, *а* зображено zdeформовану заготовку при ПО, а на рис. 4, *б* – при ЗО. Тут і в подальшому представлено половини zdeформованих заготовок, тонкими лініями наведено деформуючий інструмент, а розміри вздовж осей показано в міліметрах. З цих рисунків видно, що суттєве потовщення має місце в області переходу обтиснутої частини стінки в недеформовану. Причиною потовщення є значні сили тертя, які виникають на деформуючих поверхнях матриць. Таким чином, обтиском з використанням традиційного деформуючого інструменту отримати виріб за один перехід неможливо.

Далі представлено результати моделювання двох варіантів обтиску зі застосуванням деформуючого інструменту спеціального профілю. Розрахункові положення деформуючого інструменту і заготовки в розрізі з розподілом температури зображено на рис. 5. Положення на початку ПО показано на рис. 5, *а*. Вихідну заготовку 1 після нагрівання частини стінки, що деформується, до температури гарячого штампування розміщено в контейнері 2, який встановлено на матриці 3. Частина заготовки виступає з контейнера 2 на певну висоту, при якій не відбувається деформація по зовнішньому діаметру по мірі опускання заготовки при обтиску. Це дозво-

осьових сил від переміщення матриці при ЗО наведено на рис. 6, б. Тут величини сил є більшими у порівнянні з прямим обтиском. На пуансоні отримано значення сили 1170 кН, на матриці – 773 кН, на контейнері – 396 кН. Це зростання сил обумовлено збільшенням впливу сил тертя, які виникають при зустрічному русі матриці і zdeформованого металу в процесі обтиску.

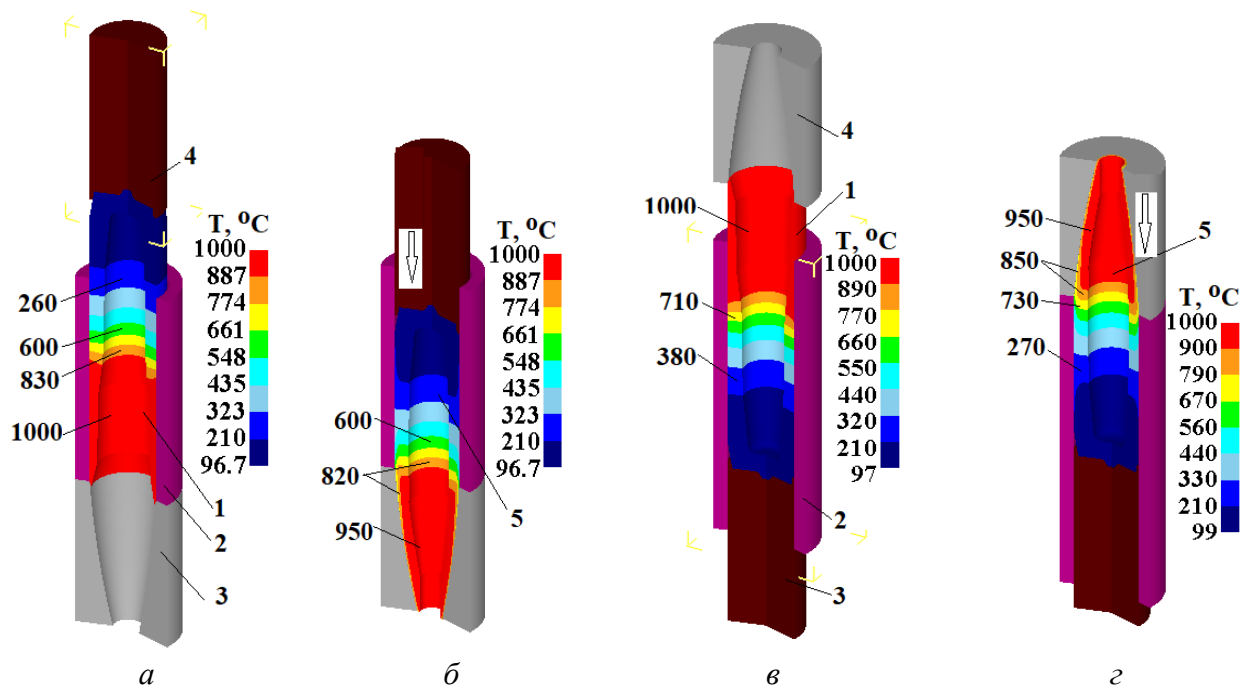


Рис. 5. Розрахункові положення інструменту і заготовки в розрізі з розподілом температури: а – на початку ПО, б – в кінці ПО, в – на початку ЗО, г – в кінці ЗО

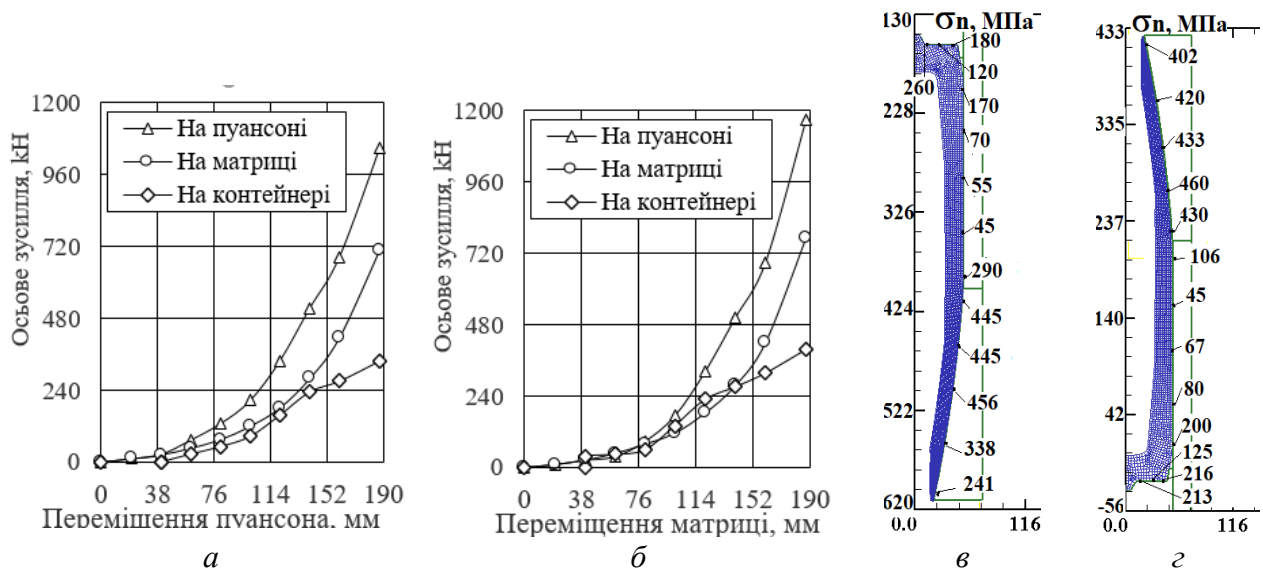


Рис. 6. Осьові сили обтиску при ПО (а) та ЗО (б) та розподіли нормальних напружень  $\sigma_n$  при ПО (в) та ЗО (г)

Питомі зусилля на деформуючому інструменті можна оцінити за розподілом нормальних напружень  $\sigma_n$ , які виникають на контактуючих поверхнях при максимальному значенні осьового зусилля. На рис. 6, в такий розподіл представлено для ПО, а на рис. 6, г – для ЗО. Для обох варіантів обтиску найбільші величини питомих зусиль у межах  $\sigma_n = 300 \dots 500$  МПа отримано на контактуючих поверхнях матриць з обтиснутими частинами заготовок. На контейнері при ПО ці зусилля сягають значення  $\sigma_n = 290$  МПа, а при ЗО –  $\sigma_n = 200 \dots 300$  МПа. На торцях

пуансонів питомі зусилля отримано у межах  $\sigma_n = 120 \dots 280$  МПа для ПО та  $\sigma_n = 125 \dots 216$  МПа для ЗО.

Для двох варіантів обтиску визначено напружений стан металу при максимальній силі деформування. Розподіл компонент напружень у здеформованій заготовці при ПО наведено на рис. 7. Радіальні напруження  $\sigma_r$  за всією висотою стінки є стискаючими (рис. 7, а). В шарах металу зі сторони порожнини отримано  $\sigma_r = -15$  МПа, зі сторони зовнішньої поверхні ці напруження знаходяться у межах  $\sigma_r = -25 \dots -75$  МПа. Осьові напруження  $\sigma_z$  також стискаючі за висотою стінки (рис. 7, б). У донній частині стінки вони сягають значень  $\sigma_z = -145 \dots -175$  МПа. У обтиснутій частині в зоні торця стінки  $\sigma_z = -45 \dots -75$  МПа, а в середній області стінки  $\sigma_z = -115 \dots -145$  МПа. Найбільші за абсолютною величиною величини мають тангенціальні напруження  $\sigma_\theta$  в обтиснутій частині стінки (рис. 7, в). У шарах металу зі сторони порожнини і у донній частині стінки отримано  $\sigma_\theta = -105 \dots -160$  МПа, а в шарах металу зі сторони зовнішньої поверхні обтиснутої частини  $\sigma_\theta = -185$  МПа. На рис. 7, г показано розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$ . У донній частині стінки ці напруження знаходяться у межах  $\sigma_i = 115 \dots 145$  МПа. В обтиснутій частині маємо  $\sigma_i = 115 \dots 175$  МПа. Розподіл гідростатичного тиску  $\sigma_{cp}$  зображено на рис. 7, д. В обтиснутій частині величина гідростатичного тиску знаходиться у межах  $\sigma_{cp} = 90 \dots -175$  МПа, а в донній частині  $\sigma_{cp} = -90 \dots -115$  МПа.

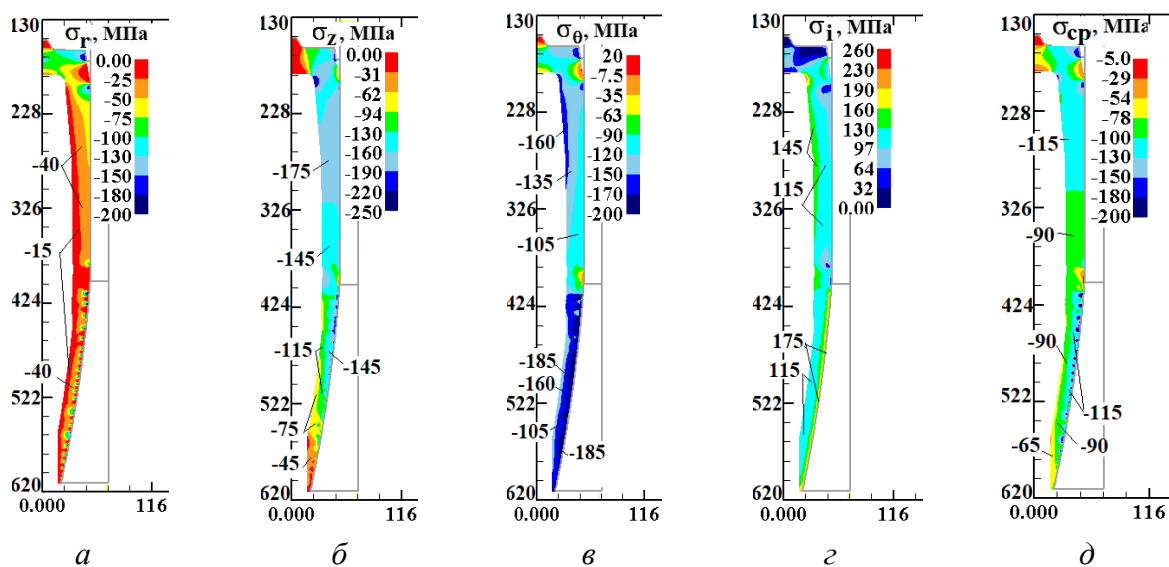


Рис. 7. Розподіл напружень при ПО: а –  $\sigma_r$ , б –  $\sigma_z$ , в –  $\sigma_\theta$ , г –  $\sigma_i$ , д –  $\sigma_{cp}$

Для ПО на рис. 8 наведено розподіл компонент кінцевих деформацій у здеформованому металі. Розтягувальні радіальні деформації зростають від  $\varepsilon_r = 0,12$  в зоні переходу обтиснутої частини в недеформовану до  $\varepsilon_r = 0,42$  в області торця стінки (рис. 8, а). Аналогічний вигляд розподілу і дещо більші значення отримано для осьових деформацій  $\varepsilon_z$  (рис. 8, б). У обтиснутій частині отримано суттєві значення стискаючих тангенціальних деформацій  $\varepsilon_\theta$ . На початку цієї частини отримано  $\varepsilon_\theta = -0,22$ , а в області торця стінки  $\varepsilon_\theta = -1,1$  (рис. 8, в). На рис. 8, г представлено розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$ , з якого 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  $\varepsilon_i = 0,22$  з подальшим збільшенням до  $\varepsilon_i = 0,9$  в зоні торця стінки. У обтиснутій частині можна прогнозувати підвищені механічні властивості здеформованого металу після термічної обробки.

Розподіл напружень у здеформованому металі при ЗО зображено на рис. 9. Розподіл напруження  $\sigma_{cp}$  представлено на рис. 9, а. У обтиснутій частині отримано  $\sigma_{cp} = -80 \dots -125$  МПа. У донній частині гідростатичний тиск сягає величин у межах  $\sigma_{cp} = -125 \dots -155$  МПа. Зростання гідростатичного тиску є причиною підвищення сили при зворотному обтиску. Також має місце підвищення величин інтенсивності напружень  $\sigma_i$  у донній частині здеформованої заготовки

(рис. 9, б). У донній частині отримано  $\sigma_i = 210$  МПа. За такої величини вже можливе потовщення вказаної частини стінки.

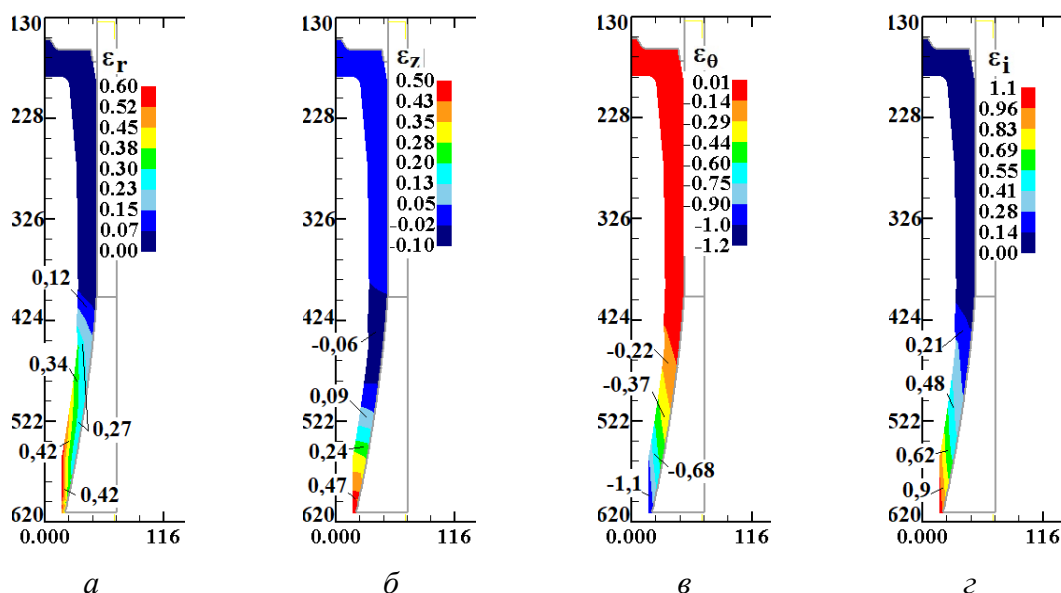


Рис. 8. Розподіли деформацій при ПО: а –  $\epsilon_r$ , б –  $\epsilon_z$ , в –  $\epsilon_\theta$ , з –  $\epsilon_i$

Для порівняння результатів на рис. 9 також наведено розподіл кінцевих тангенціальних деформацій  $\epsilon_\theta$  та інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  при зворотному обтиску. Вигляд розподілу  $\epsilon_\theta$  (рис. 9, в) та  $\epsilon_i$  (рис. 9, з) практично однаковий, а величини цих деформацій відрізняються несуттєво. Тому схема обтиску не впливає на пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією.

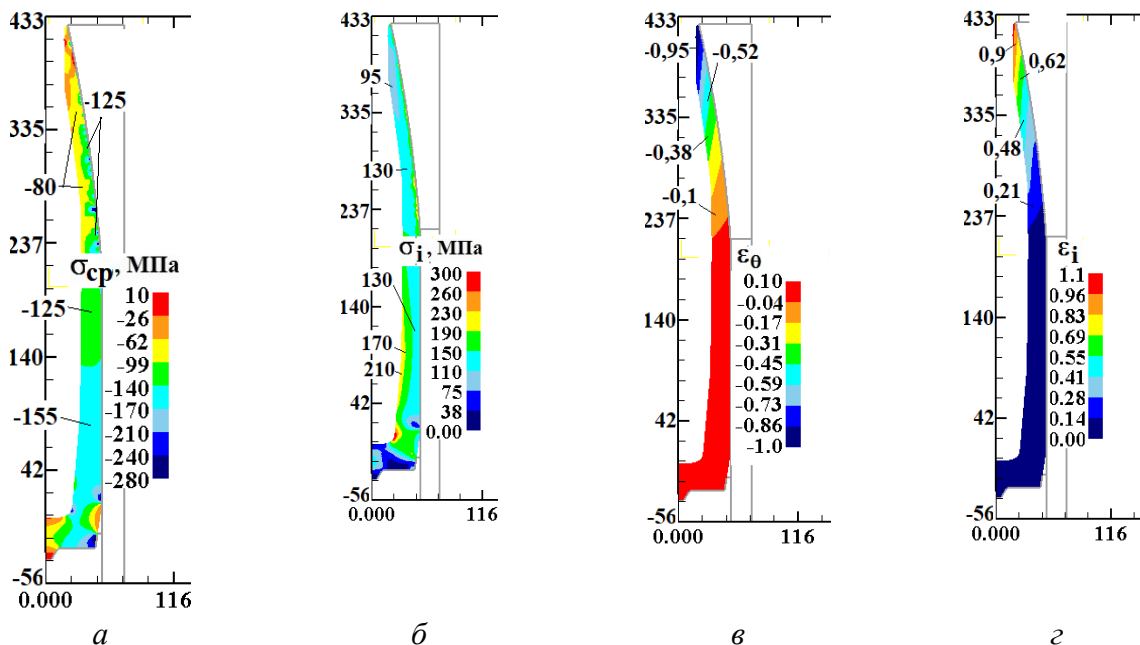


Рис. 9. Розподіл напружень та деформацій при ЗО: а –  $\sigma_{ср}$ , б –  $\sigma_i$ , в –  $\epsilon_\theta$ , з –  $\epsilon_i$

З розглянутих двох схем обтиску в контейнері і матриці спеціального профілю на виробництві доцільно використовувати схему прямого обтиску. Така схема потребує менших сил деформування і використання простої конструкції штампового оснащення без пристроїв для переміщення контейнеру при обтиску. На основі даних моделювання розроблено конструкцію штамп з видаленням виробу від виштовхувача пресу. Ескіз загального вигляду

штампу для реалізації прямого обтиску наведено на рис. 10. Штмп складається із нижньої плити 1, в яку запресовано втулку 2. У втулці 2 розміщено штовхач 3. Також на плиті 1 розміщено з центруванням матрицю 4. На матриці 4 встановлено контейнер 5. За допомогою шести шпильок 6, кільця 7, шайб 8 та гайок 9 матрицю 4 і контейнер 5 зафіксовано до плити 1. До верхньої плити 10 штамп за допомогою шести гвинтів 11 прикріплено пуансонотримач 12, в якому розміщено підп'ятник 13 і п'ята 14 зі сферичними опорними поверхнями. Пуансон 15 з використанням конусного кільця 16 і круглої гайки 17 зафіксовано до п'яти 14.

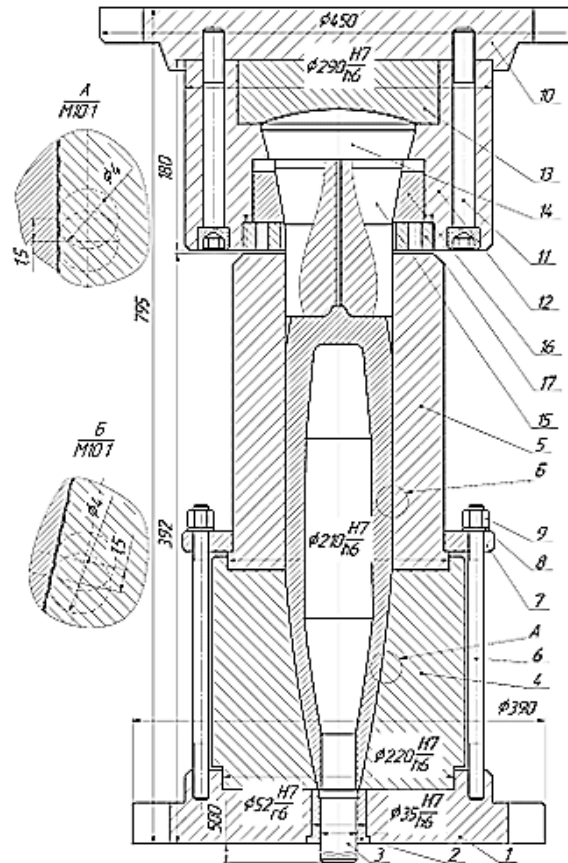


Рис. 10. Ескіз загального вигляду штамп для реалізації ПО

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

## ВИСНОВКИ

1. В роботі методом скінченних елементів проведено аналіз процесів гарячого прямого і зворотного обтиску заготовки із високовуглецевої сталі зі змінною за висотою товщиною стінки. Застосовано обтиск традиційним деформуючим інструментом та обтиск в матриці і контейнері спеціального профілю. Використання інструменту спеціального профілю дозволило зменшити силу деформування та отримати виріб за один перехід.



2. Для обтиску з використанням деформуючого інструменту спеціального профілю визначено сили та питомі зусилля на деформуючому інструменті, причому сили при прямому обтиску мають меншу величину в порівнянні зі зворотним обтиском.

3. Встановлено напружено-деформований стан металу в кінці обтиску та наведено розподіл напружень і деформацій в об'ємах zdeформованих заготовок.

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

5. Подальші дослідження за даною тематикою необхідно проводити в напрямку визначення впливу швидкості деформування на гаряче формоутворення обтиском в матриці спеціального профілю, а також в напрямку оптимізації профілю матриць і контейнерів за критеріями зниження сили обтиску та збільшення ступеню деформації за один перехід.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение. 1979. 520 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под ред. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. Москва: Машиностроение. 1985–1987. 544 с.
3. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Холодная штамповка. Москва: Машиностроение. 1989. 304 с.
4. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2000. 480 с.
5. Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А., Хачатрян Д.В. Теоретические и технологические аспекты обжима в конической матрице. *Известия МГТУ*. Москва: «МАМИ». 2013. 2. 1(15). С. 139–145.
6. Кривошеин В.А. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных при исследовании процесса обжима в матрице с кольцевыми канавками. *Известия вузов. Машиностроение*. 2014. 5. С. 10–12.
7. Калюжний О.В. Відкритий та закритий обтиск трубчастих заготовок з різною висотою в матриці спеціального. *Обработка материалов давлением*. Краматорськ: ДГМА. 2 (39). 2014. С. 144–150.
8. Калюжний О.В., Калюжний В.Л. Інтенсифікація формоутворюючих процесів холодного листового штампування. Київ: ТОВ «Сік Груп Україна». 2015. 292 с.
9. Шляпугин Н.И. Особенности моделирования процесса обжима и раздачи трубной заготовки в DEFORM\_2d. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2014. 16. 4. С. 240–244.
10. Калюжний В.Л., Ярмоленко О.С. Інтенсифікація процесу холодного обтиску порожнистих напівфабрикатів для отримання виробів зі змінною товщиною стінки. *Mechanics Advanced Technologies*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2019. 1 (85). С. 111–117.
11. Калюжний В.Л., Калюжний О.В., Марчук К.Л. Розрахунок розмірів вихідної порожнистої заготовки із тонкою стінкою змінної товщини та обтиск її в матриці з конусно-циліндричною деформуючою поверхнею. *Mechanics Advanced Technologies*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2020. 3 (90). С. 106–112.

## REFERENCES

1. Romanovskiy V.P. Reference book on cold stamping. Leningrad: Mechanical Engineering. 1979. 520 p. (in Russian)
2. Forging and stamping: Reference book: In 4 vol. T. 4. Sheet Forging / Edited by A.D. Matveev; Editorial Board: E.I. Semenov (pred.) et al. Moscow: Machine building. 1985–1987. 544 p. (in Russian)
3. Averkiev Yu.A., Averkiev A.Yu. Cold forging. Moscow: Mechanical Engineering. 1989. 304 p.
4. Popov E.A., Kovalev V.G., Shubin I.N. Technology and automation of sheet forging. Moscow: Bauman Moscow State Technical University. 2000. 480 p. (in Russian)
5. Sosenushkin, E.N., Yanovskaya E.A., Khachatryan D.V. Theoretical and technological aspects of crimping in a conical die. *Izvestiya MSTU*. Moscow: "MAMI". 2013. 2. 1(15), pp. 139–145. (in Russian)
6. Krivoshein, V.A. Comparative analysis of theoretical and experimental data in the study of the crimping process in the die with ring grooves. *Izvestia Vuzov. Mechanical Engineering*. 2014. 5, pp. 10–12. (in Russian)
7. Kaliuzhnyi, O.V. Open and closed crimping of the tubular workpieces with different height in the die of a special profile. *Materials Working by Pressure*. Kratomorsk: DSEA. 2014. 2 (39), pp. 144–150. (in Ukrainian)
8. Kalyuzhnyi, O.V., Kaliuzhnyi V.L. Intensification of forming processes of cold sheet stamping / O.V. Kalyuzhnyi, V.L. Kalyuzhnyi. Kyiv: Sik Group Ukraine, LLC. 2015. 292 p. (in Ukrainian)
9. Shlyapugin N.I. Features of simulation of the process of crimping and expansion of pipe workpieces in DEFORM\_2d *Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014. 16. 4, pp. 240–244. (in Russian)
10. Kaliuzhnyi V.L., Yarmolenko O.S. Intensification of the process of cold crimping of hollow semi-finished products to obtain products with variable wall thickness. *Mechanics Advanced Technologies*. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. 2019. 1 (85), pp. 111–117. (in Ukrainian)

11. Kaliuzhnyi V.L., Kaliuzhnyi O.V., Marchuk K.L. Calculation of the dimensions of the initial hollow workpiece with a thin wall of variable thickness and its crimping in a die with a cone-cylindrical deforming surface. *Mechanics Advanced Technologies*. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. 2020. 3 (90), pp. 106–112. (in Ukrainian)

**Kaliuzhnyi O., Gornostai V., Levchenko V. Application of a profiled deforming tool for hot crimping of axisymmetric hollow workpieces**

*Mathematical models using the finite element method were created and studies of the forward and backward methods of hot crimping using a traditional deforming tool and a special profile one were carried out. Hollow workpieces made of high-carbon steel with variable wall thickness in height for crimping with heating of the part of the wall to be deformed to the hot deformation temperature were used. The plastic model of continuum for finite element method simulation of the process was used and the problem was considered in cylindrical coordinate system. It has been determined that it is impossible to obtain a product of the required dimensions in one operation by forward and backward crimping with a traditional tool. The conducted calculations showed, that the use of a die and a container of a special profile with a deforming surface made with annular protrusions and depressions allows to obtain the product in one operation due to decreasing the influence of friction forces during forming. The deformation velocity required to provide the hot deformation regime during the crimping process is determined, and the final distribution of the metal temperature is given. The laws of dependence for the axial force on the deforming tool vs the movement of the punch for forward crimping and die for backward one and the distribution of unit forces on the contacting surfaces were obtained. It was found that the use of forward crimping leads to relaxation of force regimes and to decreasing unit forces on the tool. The final stress-strain state of the metal, the shape and dimensions of the product were also determined. Based on the distribution of effective strain, the working of the metal structure by plastic deformation was evaluated. The design of a general type of dies tooling for forward crimping developed based on results of the simulation was given.*

**Keywords:** crimping, hollow workpiece, finite element method, dies tooling, profiled tool, unit force, stress-strain state.

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

**Горностаї Вадим Миколайович** – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»  
**Gornostai Vadim** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, NTUU “Igor Sikorsky KPI”  
E-mail: [gornwad@ukr.net](mailto:gornwad@ukr.net)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5766-931X>

**Левченко Володимир Миколайович** – канд. техн. наук, мол. наук. співроб. ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАНУ  
**Levchenko Volodymyr** – Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher of Ya. Usikov IRE of NASU  
E-mail: [goldangel271@gmail.com](mailto:goldangel271@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2411-4198>

Товариство з обмеженою відповідальністю «Академія навчання ІТ» (ТОВ «Академія навчання ІТ»), м. Київ  
IT Education Academy – IT Education Academy Limited Liability Company, Kyiv

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

Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАНУ (ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАНУ), м. Харків  
O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, NAS of Ukraine (Ya. Usikov IRE), Kharkiv.