

Інтенсифікація процесу холодного обтиску порожнистих напівфабрикатів для отримання виробів зі змінною товщиною стінки

В.Л. Калюжний • О.С. Ярмоленко

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 15 March 2019 / Accepted: 25 March 2019

Анотація. *Методом скінченних елементів проведені дослідження для визначення за кресленням деталі форми вихідної заготовки для обтиску і встановлення параметрів холодного обтиску такої заготовки з високовуглецевої сталі з отриманням порожнистого виробу зі змінною товщиною стінки заданих розмірів. Розрахунковим шляхом встановлені форма і розміри вихідної заготовки. Показано, що використання для холодного обтиску матриці традиційної форми не дозволяє отримати виріб необхідної форми внаслідок великого зусилля деформування і потовщення стінок в донній частині zdeформованої заготовки. Застосування матриці спеціального профілю, у якій деформуюча поверхня утворена перетином торів з однаковим діаметром перерізу і послідовно розташованих з однаковим кроком, забезпечило зменшення впливу сил тертя, зниження зусилля обтиску і формоутворення порожнистого виробу із стінкою змінної товщини. Встановлено зусилля і роботу деформації, розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях. Визначені напружено-деформований стан металу, кінцеві форма і розміри виробу. За розподілом інтенсивності деформацій проведено прогнозування механічних властивостей zdeформованого металу.*

Ключові слова: *метод скінченних елементів, обтиск, заготовка, порожнистий виріб, високовуглецева сталь, зусилля, питоми зусилля, напруження, інтенсивність деформацій.*

Обтиск порожнистих напівфабрикатів з дном, які отримані видавлюванням із гарячекатаних прутків чи витягуванням із листових заготовок та з використанням подальшого витягуванням з потоншенням, використовують при виготовленні балонів, різноманітних емностей, перехідників для трубопровідної арматури, заготовок гільз або снарядів та інших деталей. В теперішній час використовують схеми обтиску, які приведені в джерелах [1 – 4]. Можливість формоутворення виробу за один перехід визначається коефіцієнтом обтиску $k = D/d_o$ (тут D – діаметр вихідної заготовки, d_o – діаметр обтиснутої частини). Коефіцієнт k залежить від величини відношення товщини заготовки S_o до діаметра D , геометричної форми матриці та коефіцієнта тертя μ . При відкритому обтиску, коли донна частина порожнистої заготовки стоїть на плиті, а формоутворення виконується за допомогою переміщення матриці, виникають дефекти у вигляді поперечних гофр на циліндричній частині заготовки або в місці переходу циліндричної частини в обтиснуту частину. Також можливе виникнення меридіональних гофр на обтиснутій частині [3]. Використання схем закритого обтиску, при яких зменшується вірогідність втрати стійкості стінок заготовки завдяки використанню зовнішніх жорстких упорів, дозволяє збільшити коефіцієнт обтиску. У вказаних джерелах приведені експериментальні дані та відомості з виробничого досвіду по розробленню технології і конструюванню штампного оснащення для обтиску в конусних та сферичних матрицях. Для обтиску в конусній матриці в джерелі [5] запропоновані формули по визначенню форми і розмірів вихідних заготовок.

Додаткове збільшення коефіцієнта обтиску в сферичних та конусних матрицях забезпечує застосування матриць спеціального профілю, у яких деформуючі поверхні виконані у вигляді кільцевих канавок, що зменшують площу контакту zdeформованої частини заготовок з матрицею та знижують сили тертя і зусилля обтиску [6 – 8].

Суттєві складнощі виникають при розробленні технології обтиску в матрицях складної форми з отриманням виробів із заданими розмірами здеформованої частини по причині потовщення стінки при формоутворенні обтиском. Це потребує обов'язкового уточнення форми і розмірів стінки вихідних заготовок при виготовленні дослідної партії виробів.

Використання комп'ютерного моделювання із застосуванням методу скінченних елементів і програми DEFORM для аналізу процесів обтиску за різними схемами 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, 9] завдяки усуненню необхідності доопрацювання параметрів обтиску експериментальним шляхом.

У наведених джерелах практично відсутні дані по визначенню параметрів обтиску в матрицях складної форми і в матрицях спеціальної форми для отримання виробів із високовуглецевих сталей з заданими розмірами здеформованої частини.

Метою роботи є інтенсифікація процесу холодного обтиску порожнистих напівфабрикатів завдяки використанню комп'ютерного моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) для встановлення форми і розмірів вихідної заготовки за кресленням деталі та визначення параметрів холодного обтиску такої заготовки із високовуглецевої сталі в матриці спеціального профілю.

Сутність інтенсифікації з однієї сторони полягає в тому, що запропоновано шляхом моделювання за робочим кресленням виробу встановити форму і розміри вихідної заготовки для отримання обтиском виробу заданих розмірів. Таку заготовку можна отримати вирівнюванням обтиснутої частини з отриманням циліндричної зовнішньої поверхні, але стінка буде мати різну товщину по довжині завдяки потоншенню при вирівнюванні. Вихідна заготовка зі змінною товщиною стінки і циліндричною зовнішньою поверхнею отримується витягуванням з потоншенням пуансоном, зовнішня поверхня якого відповідає внутрішній поверхні заготовки. З іншого боку, для досягнення необхідного коефіцієнта обтиску при холодному формоутворенні обтиском заготовки з важкодеформівної високовуглецевої сталі, запропоновано використати матрицю спеціального профілю.

На рис. 1 наведений ескіз виробу зі змінною товщиною стінки із високовуглецевої сталі. Вироби такої форми, зазвичай, виготовляються обтиском із напівфабрикату, отриманого зворотним видавлюванням з подальшим витягуванням з потоншенням. Витягування дозволяє забезпечити постійний зовнішній діаметр напівфабрикату, який для даного виробу складає 153 мм. Обтиском необхідно отримати частину виробу висотою 248 мм, в якій товщина стінки змінюється з 16,7 мм при діаметрі 90 мм в області торця до 21,4 мм в місці переходу здеформованої частини в циліндричну.

Результати моделювання в середовищі DEFORM по визначенню форми і розмірів вихідної заготовки для обтиску шляхом вирівнювання обтиснутої частини з розмірами по ескізу виробу зображені на рис. 2.

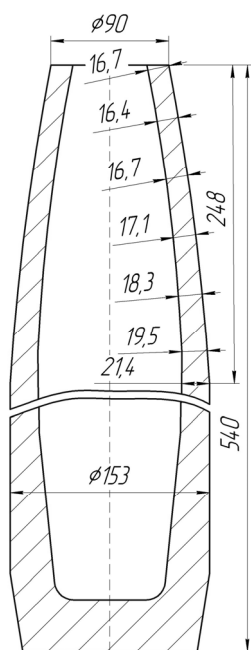


Рис. 1. Ескіз порожнистого виробу зі змінною товщиною стінки

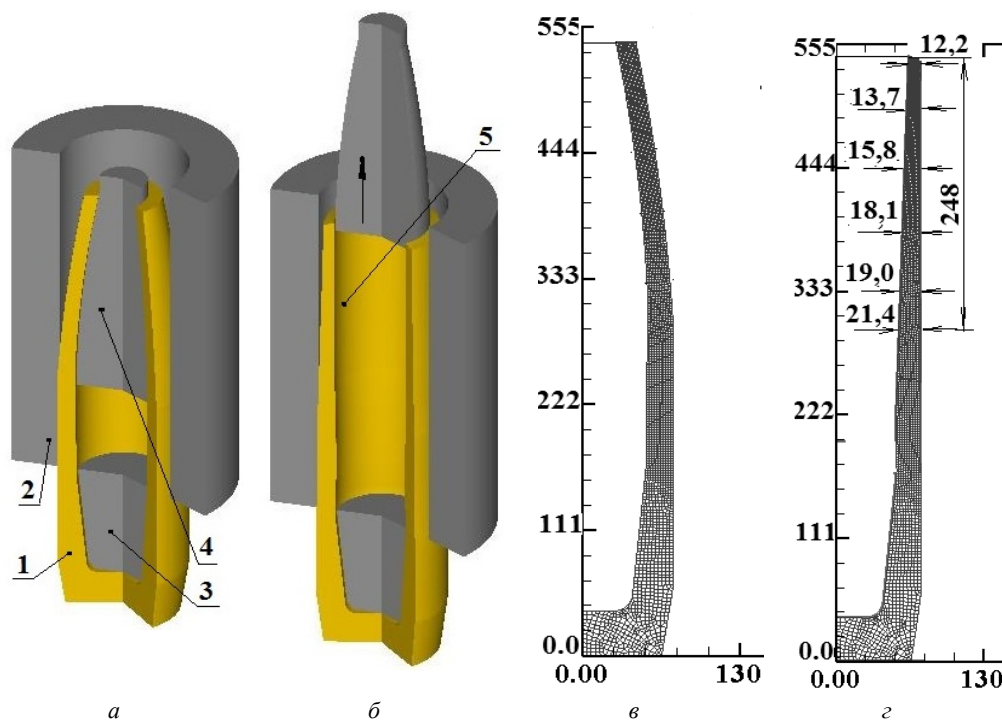


Рис. 2. Розрахункові схеми для визначення форми і розмірів заготовки для обтиску: *a* – схема перед вирівнюванням стінки, *б* – схема після вирівнювання стінки, *в* – половина заготовки з розмірами по ескізу, *г* – заготовка після вирівнювання

На рис. 2а показана розрахункова схема в розрізі перед вирівнюванням. Виріб 1 розміщений у циліндричній матриці 2 із внутрішнім діаметром 153 мм. У виробі 1 встановлені нерухомий пуансон 3 та рухомий пуансон 4, форми яких відповідають формі внутрішньої поверхні виробу. Вирівнювання здійснюється шляхом

переміщення пуансона 4 вгору (рис. 2б). На рис. 2в зображена форма і розміри в міліметрах половини заготовки перед вирівнюванням. Вихідна заготовка з розмірами після вирівнювання приведена на рис. 2г. При вирівнюванні відбулося потоншення стінки. На висоті 248 мм товщина стінки не змінилася, а на торці товщина зменшилася з 16,7 мм (див. рис. 1) до 12,2 мм. Така форма і розміри вихідної заготовки були використані для моделювання обтиску з отриманням заданих форми і розмірів виробу.

Моделювання в середовищі DEFORM холодного обтиску проводилося в матриці традиційної форми (ТМ), розміри якої відповідали геометричній формі зовнішньої поверхні виробу (див. рис. 1). Також проведено моделювання обтиску в матриці спеціального профілю (МСП), схема якого наведена на рис. 3. Ліворуч від вісі симетрії показане положення на початку обтиску, праворуч – в кінці обтиску (рис. 3а). Вихідна заготовка 1 розміщена в матриці 2, на якій встановлений контейнер 3. В матриці 2 розміщений штовхач 4. Зусилля деформування P_0 прикладається за допомогою пуансона 5, при переміщенні якого виконується формоутворення виробу 6. Деформуюча поверхня матриці 2 і бокова поверхня контейнера 3 утворені перетином торів з постійним діаметром перерізу d , які розташовані послідовно з кроком t . При цьому дотичні до виступів поверхонь матриці 2 і контейнера 3 відповідають розмірам бокової поверхні виробу згідно ескізу. Крок t підбирається таким чином, щоб не було вигинання стінки у впадинах деформуючих поверхонь при формоутворенні обтиском. Після обтиску виріб 6 видаляється із матриці шляхом прикладання зусилля P_6 за допомогою штовхача 4 (рис. 3б). При моделюванні застосовані наступні розміри деформуючих поверхонь матриці і контейнера: $d=10$ мм, $t=3$ мм. Використані циліндрична система координат і пружно-пластична зі зміцненням модель металу. Така модель дозволяє визначити зусилля видалення zdeформованої заготовки із матриці, а також встановити кінцеві форму і розміри виробу. Тертя враховано по Кулону з коефіцієнтом тертя $\mu=0,08$.

На рис. 4 зображені в розрізі розрахункові схеми формоутворення виробу обтиском. Схема на початку обтиску показана на рис. 4а. Вихідна заготовка 1 розміщена в матриці 2, на якій стоїть контейнер 3. При переміщенні пуансона 4 виконується формоутворення виробу 5 (рис. 4б). Схема після видалення виробу із матриці показана на рис. 4в.

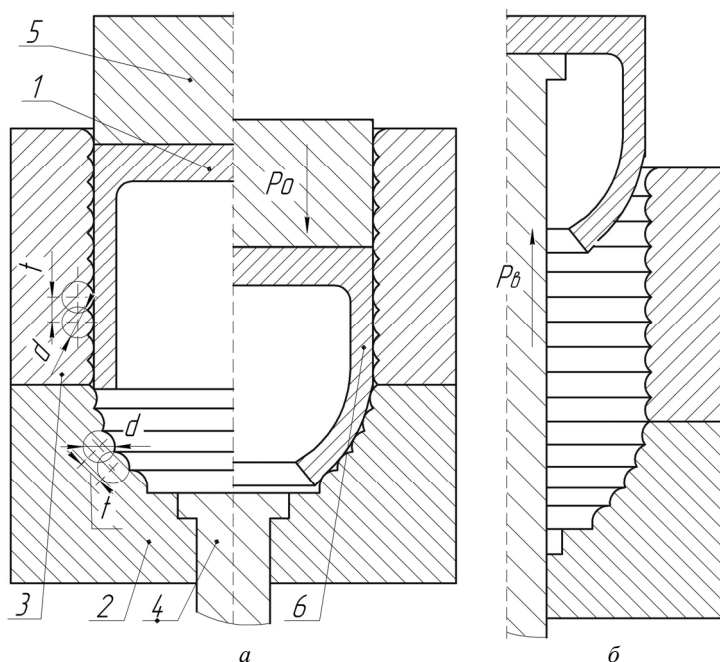


Рис. 3. Схема обтиску в матриці спеціального профілю: а – схема на початку та в кінці обтиску, б – схема після виштовхування виробу

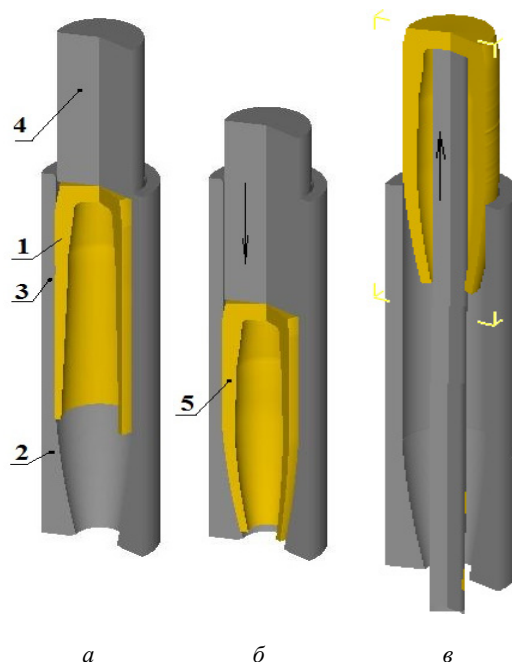


Рис. 4. Розрахункові схеми формоутворення виробу обтиском: а – на початку обтиску, б – в кінці обтиску, в – видалення виробу із матриці

При моделюванні встановлені залежності осьових зусиль, які виникають на пуансоні, матриці і контейнері протягом обтиску. Залежності вказаних зусиль від переміщення пуансона при обтиску в традиційній матриці приведені на рис. 5. Зусилля постійно зростають та досягають максимальних значень в кінці обтиску. На пуансоні зусилля обтиску складає $P_0=5860$ кН, на матриці – 4970 кН, на контейнері – 887 кН. Матриця сприймає 84% зусилля обтиску P_0 . Такі величини зусиль при холодному формоутворенні приводять до потовщення стінки у донній частині та самого дна. На рис. 6 зображені фрагменти донньої частини при обтиску в ТМ. Тут і в подальшому розміри по вісях наведені в міліметрах, а тонкими лініями зображений деформуючий

інструмент. На початку обтиску товщина дна складає 40 мм, а конусна частина має висоту 58 мм (рис. 6а). В кінці обтиску товщина дна на вісі збільшується до 40,6 мм, а висота конусної частини зменшується до 45 мм по причині потовщення стінки (рис. 6б). При цьому не забезпечується необхідна висота виробу. Таким чином, отримати виріб із необхідними розмірами холодним обтиском в традиційній матриці неможливо.

Також проведено моделювання обтиску у матриці спеціального профілю (МСП). Встановлені зусилля деформування, питомі зусилля на деформуючому інструменті, напружено-деформований стан металу та зусилля видалення здеформованої заготовки із матриці. Результати розрахунків по зусиллях і питомих зусиллях в такій матриці приведені на рис. 7. На рис. 7а зображені залежності осьових зусиль, які виникають на пуансоні, матриці і контейнері, від переміщення пуансона. Вигляд отриманих залежностей відповідає обтиску в традиційній матриці. Однак використання матриці спеціального профілю приводить до суттєвого зменшення зусиль. Кінцеве значення зусилля на пуансоні складає 4500 кН. Зниження зусилля на пуансоні порівняно з



Рис. 5. Залежності осьових зусиль, які виникають на пуансоні, матриці і контейнері, від переміщення пуансона при обтиску в ТМ

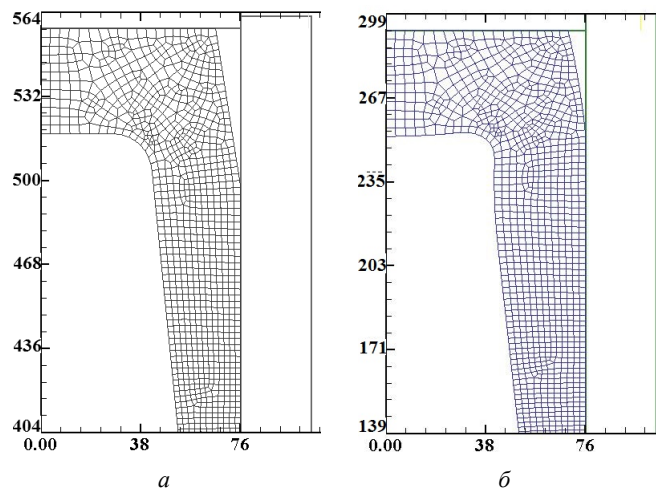


Рис. 6. Фрагменти донної частини при обтиску в ТМ: а – на початку обтиску, б – в кінці обтиску

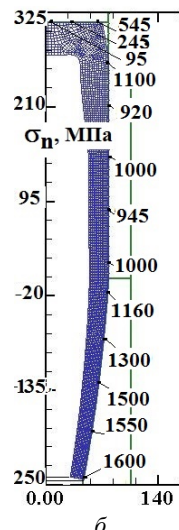
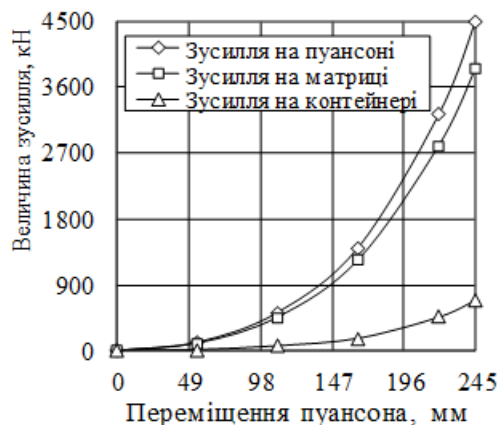


Рис. 7. Результати розрахунків по зусиллях і питомих зусиллях при обтиску в МСП: а - залежності осьових зусиль, які виникають на пуансоні, матриці і контейнері, від переміщення пуансона; б - розподіл нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях здеформованої заготовки з пуансоном, матрицею та контейнером

обтиском в традиційній матриці досягає 23,2%. Це обумовлено зменшенням площ контактуючих поверхонь заготовки з контейнером і матрицею. Відповідно також зменшуються зусилля на матриці (на 22,5%) та контейнері (на 21,2%). Для проектування штампового оснащення необхідно знати розподіли питомих зусиль на поверхнях контакту між здеформованою заготовкою і інструментом. Питомі зусилля можна оцінити за розподілом нормальних напружень σ_n при максимальному значенні зусилля обтиску. Розподіли напружень σ_n на контактуючих поверхнях здеформованої заготовки з пуансоном, матрицею та контейнером зображені на рис. 7б. На торці пуансона вказані напруження досягають величини $\sigma_n = 545$ МПа. На поверхні матриці

нормальні напруження знаходяться в межах $\sigma_n = 1160 \div 1600$ МПа. При таких величинах напружень матриця повинна бути бандажованою. На поверхні заготовки з контейнером отримано максимальне значення $\sigma_n = 1100$ МПа.

Напружено-деформований стан металу при обтиску наведений на рис. 8. Величини компонент напружень показані при максимальному значенні зусилля обтиску. Осьові σ_z , радіальні σ_r і тангенціальні σ_θ напруження в кінці обтиску стискаючі. Найбільші значення за абсолютною величиною мають напруження σ_θ , розподіл яких приведений на рис. 8а. У обтиснутій частині заготовки вони знаходяться у межах $\sigma_\theta = -450 \div -800$ МПа. На рис. 8б зображений розподіл інтенсивності напружень σ_i . Донна частина заготовки і частина, яка розміщена в контейнері, знаходяться в пружному стані. У zdeформованій частині ці напруження досягають величин у межах $\sigma_i = 450 \div 800$ МПа. При обтиску виникають розтягувальні радіальні деформації ε_r та осьові деформації ε_z , розподіли яких приведені на рис. 8в і рис. 8г відповідно. Вказані деформації в області

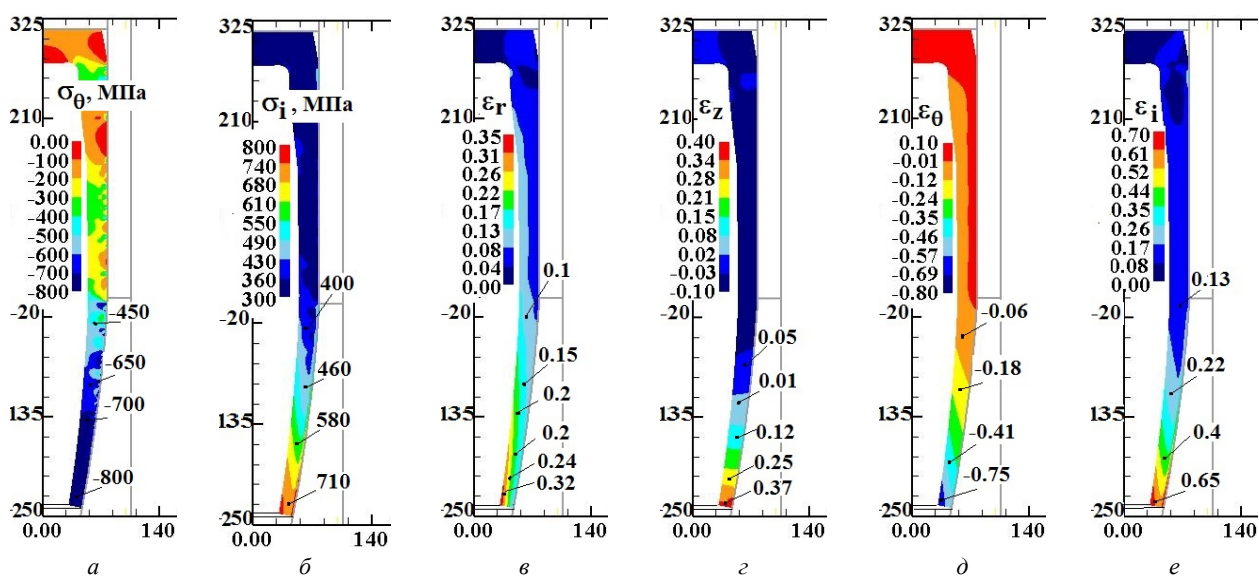


Рис. 8. Напружено-деформований стан заготовки при обтиску в МСП: а – розподіл σ_θ , б – розподіл σ_i , в – розподіл ε_r , г – розподіл ε_z , д – розподіл ε_θ , е – розподіл ε_i

торця zdeформованої частини не перевищують величини 0,4. При цьому виникають стискаючі тангенціальні деформації ε_θ , які мають значення $\varepsilon_\theta = -0,06$ в місці переходу стінки в zdeформовану частину та $\varepsilon_\theta = -0,8$ в області торця цієї частини (рис. 8д). Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією та прогнозування межі текучості zdeформованого металу можна оцінити за розподілом інтенсивності деформацій ε_i , показаним на рис. 8е. У обтиснутій частині заготовки величини інтенсивності деформації отримані у межах $\varepsilon_i = 0,13 \div 0,65$. З використанням експериментальної діаграми істинних напружень [10], яка була використана при моделюванні у середовищі DEFORM, за вказаними величинами ε_i межа текучості zdeформованого металу досягає значень $\sigma_s = 800 \div 1000$ МПа.

Для вибору пресового обладнання, крім зусилля деформування, необхідно знати зусилля видалення виробу із матриці після обтиску, для визначення зусилля виштовхувача преса. Для цього проведено моделювання видалення виробу із матриці після обтиску. Розрахункові схеми на початку видалення та після видалення наведені на рис. 9. На рис. 9а зображене положення на початку видалення. Виріб 1 після обтиску розміщений в матриці 2 і контейнері 3. Зусилля виштовхування прикладається на донну частину виробу 1 за допомогою штовхача 4 (див. рис. 9б). На рис. 10 показана залежність зусилля видалення виробу із матриці від переміщення штовхача. Максимальне значення зусилля видалення складало 450 кН.

По розрахункових даних була розроблена конструкція штампа для реалізації обтиску на існуючому гідравлічному пресі моделі ДА 2238А зусиллям 6300 кН для пресування виробів із пластмас. Відкрита висота преса складає 1600 мм, що недостатньо для встановлення вихідної заготовки в контейнер. Тому кріплення пуансона до верхньої плити має певні особливості. Ескіз штампа зображений на рис. 11. Бандажована матриця 1 встановлена на нижній плиті 2, в якій розміщений штовхач 3 з пружиною 4. На матриці 1 з центруванням встановлений контейнер 5. На контейнер 5 надіте кільце 6, за допомогою якого та шести шпильок 7, шайб 8 і гайок 9 контейнер 5 і матриця 1 зафіксовані до нижньої плити 2. До верхньої плити 10 закріплена овальна обойма 11 за допомогою гвинтів 12. В обоймі 12 розміщений круглий пуансонотримач 13 із пуансоном 14.

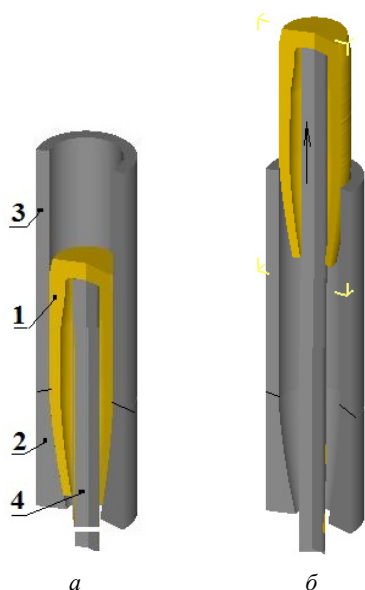


Рис. 9. Розрахункові схеми видалення виробу із матриці: *a* – на початку видалення, *б* – в кінці видалення

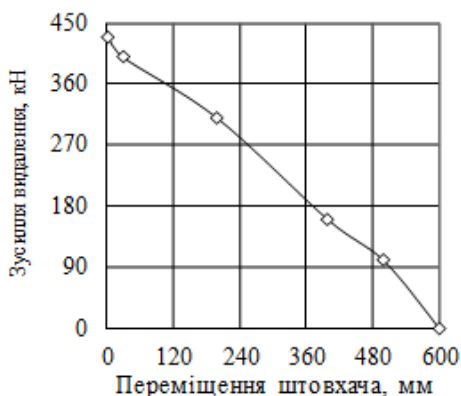


Рис. 10. Залежність зусилля видалення виробу від переміщення штовхача

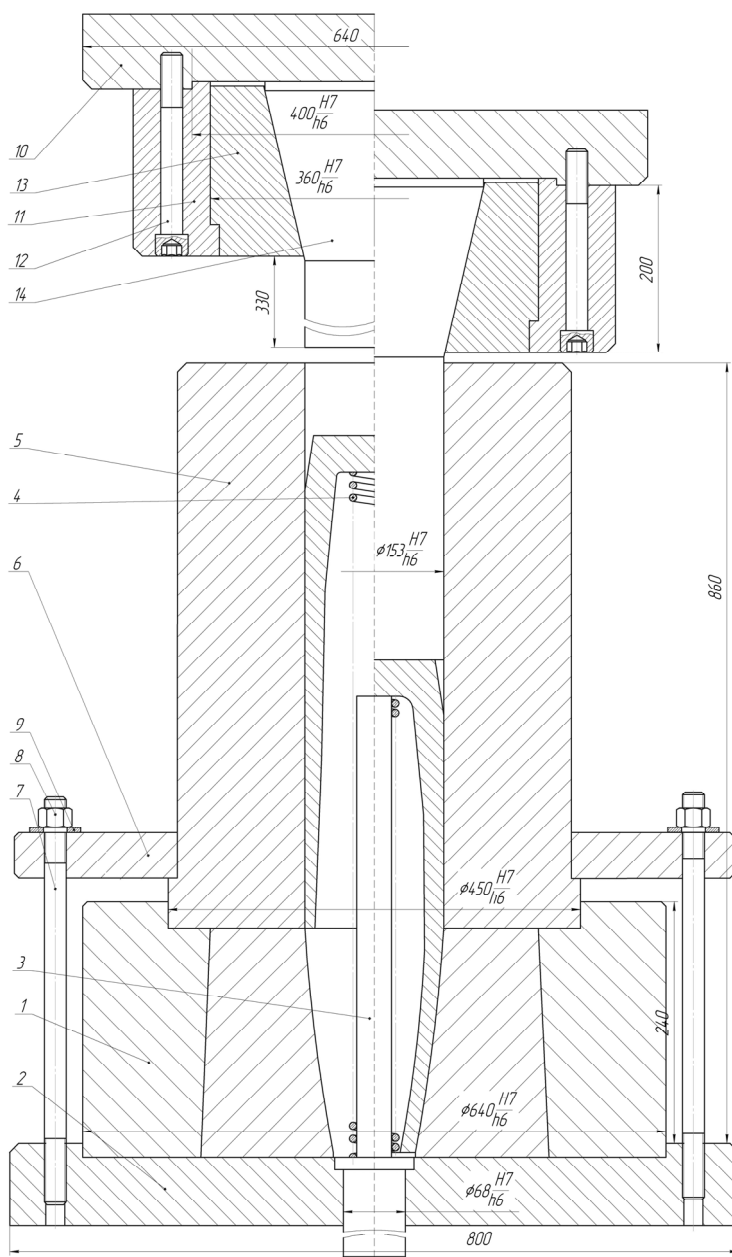


Рис. 11. Ескіз штампа для обтиску

На пуансонотримачі 13 виконані проточки в розмір 360 мм, по яких він разом із пуансоном 14 має можливість зміщуватися в напрямку, перпендикулярному площині креслення, на віддаль дещо більшу за зовнішній діаметр вихідної заготовки. Вказане зміщення необхідне для встановлення вихідної заготовки в контейнер 5, після чого пуансон 14 повертається в зворотному напрямку. Пружина 4 необхідна для пом'якшення торкання вихідної заготовки із матрицею 1. Після виконання обтиску, коли плита 2 знаходиться у верхньому положенні, пуансонотримач 13 із пуансоном 14 знову зміщується для виконання виштовхування виробу із матриці 1 і контейнера 5 за допомогою штовхача 3, який приводиться в рух від виштовхувача преса.

Висновки. 1. В роботі показана можливість визначення форми і розмірів вихідної заготовки для отримання обтиском виробу з заданими розмірами обтиснутої частини шляхом виконання вирівнювання обтиснутої частини. Такий підхід дозволяє суттєво скоротити час на розроблення технології обтиску та усунути доопрацювання форми і розмірів заготовки експериментальним шляхом.

2. Моделюванням з використанням методу скінченних елементів визначені параметри холодного обтиску в матриці спеціального профілю порожнистих заготовок із важкодеформівної високовуглецевої сталі. Використання такої матриці забезпечує зниження зусилля деформування на 23% та отримання виробу обтиском в холодному стані, що в традиційній матриці реалізувати неможливо.

3. Встановлені силові режими обтиску та виштовхування виробу із матриці, розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях між металом і деформуючим інструментом, напружено-деформований стан металу при формоутворенні, кінцеві форму і розміри виробу. Проведене прогнозування напруження текучості здеформованого металу у обтиснутій частині.

4. На основі розрахункових даних розроблена конструкція штампа для реалізації обтиску в матриці спеціального профілю на існуючому гідравлічному пресовому обладнанні.

Интенсификация процесса холодного обжима полых полуфабрикатов для получения изделий из стальной сменной толщины

В.Л. Калюжный, А.С. Ярмоленко

Аннотация. Методом конечных элементов проведены исследования по определению с чертежа детали формы исходной заготовки для обжима и установлению параметров холодного обжима такой заготовки из высокоуглеродистой стали для получения полого изделия с переменной толщиной стенки. Расчетным путем установлены форма и размеры исходной заготовки. Показано, что использование для холодного обжима матрицы традиционной формы не позволяет получить изделие необходимой формы по причине большого усилия деформирования и утолщения стенок в донной части деформированной заготовки. Применение матрицы специального профиля, у которой деформирующая поверхность образована пересечением торцов с одинаковым диаметром сечения и последовательно расположенных с одинаковым шагом, обеспечило уменьшение влияния сил трения, снижение усилия обжима и формирование полого изделия со стенкой переменной толщины. Установлены усилие и работа деформации, распределение удельных усилий на контактирующих поверхностях. Определено напряженно-деформированное состояние металла, конечные форма и размеры изделия. По распределению интенсивности деформаций проведено прогнозирование предела текучести деформированного металла.

Ключевые слова: метод конечных элементов, обжим, заготовка, полая заготовка, высокоуглеродистая сталь, усилие, удельные усилия, напряжения, интенсивность деформаций.

Intensification of the process of the cold envelope of humidified semi-fabricates for the receiving products with a changing window installation

V. Kalijuznyi, O. Jarmolenko

Abstract. The finite element method has been used to determine the drawing of the details of the shape of the initial blank for compression and to establish the parameters of cold warping of such a high-carbon steel blade to obtain a hollow product with a variable wall thickness. By calculation, the shape and size of the initial workpiece have been determined. It has been shown that the use of a cold form of compression of the matrix of the traditional form does not allow the product of the desired form to be obtained due to the great strain and thickening of the walls in the bottom part of the deformed workpiece. Application of a matrix of a special profile, in which the deformation surface is formed by intersecting troughs with the same diameter of the cross section and consistently arranged with the same step, has reduced the effect of frictional forces, reduce the force of compression and the formation of a hollow product with a wall of variable thickness. Efforts and deformation work, distribution of specific forces on contact surfaces are established. The stressed-deformed state of the metal, the final form and the size of the product are determined. By the distribution of the intensity of deformations, the prediction of mechanical properties of deformed metal is carried out.

Keywords: finite element method, compression, workpiece, hollow product, high carbon steel, forces, specific forces, stresses, intensity of deformations.

References

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., пераб. и доп. / В.П. Романовский. – Л.: 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. – М.: Машиностроение, 1985–1987. – 544 с.
3. Аверкиев Ю.А. Холодная штамповка / Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев. - М: Машиностроение, 1989. – 304 с.
4. Попов Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки / Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 480 с.
5. Сосенушкин Е.Н. Теоретические и технологические аспекты обжима в конической матрице / Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская, Д.В. Хачатрян и др. // – Москва: Известия МГТУ «МАМИ». 2013. – Том 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 / В.А. Кривошеин // Известия вузов: Машиностроение, 2014. – №5. – С. 10-12.
7. Калюжный О.В. Відкритий та закритий обтиск трубчастих заготовок з різною висотою в матриці спеціального профілю / О.В. Калюжный // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2014. – №2 (39). – С. 144-150.
8. Шляпугин Н.И. Особенности моделирования процесса обжима раздачи трубной заготовки в DEFORM_2d / Н.И. Шляпугин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. Том 16, №4. – С. 240 – 244.
9. Калюжный О.В. Інтенсифікація формоутворюючих процесів холодного листового штампування / О.В. Калюжный, В.Л. Калюжный. – К: ТОВ «Сік Груп Україна», 2015. – 292 с.
10. Кроха В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной пластической деформации / В.А. Кроха / – М: Машиностроение, 1980. – 157 с.