

Розрахунок розмірів вихідної порожнистої заготовки із тонкою стінкою змінної товщини та обтиск її в матриці з конусно-циліндричною деформуючою поверхнею

В. Л. Калюжний¹ • О. В. Калюжний² • К. Л. Марчук¹

Received: 30 September 2020 Accepted: 24 November 2020

Анотація. Робота присвячена отриманню з низьковуглецевої сталі конусних з циліндричною частиною порожнистих виробів із тонкою стінкою з різною товщиною по висоті. Методом скінченних елементів визначені форма і розміри вихідної порожнистої заготовки та встановлені параметри холодного обтиску такої заготовки. Форма і розміри вихідної заготовки встановлені шляхом двоетапного моделювання вирівнювання стінки виробу у відповідність із розмірами досягненням циліндричної зовнішньої поверхні. На першому етапі виконується моделювання випрямлення роздачою за допомогою пуансона циліндричної частини стінки і місця переходу циліндричної частини в конічну. На другому етапі також роздачою пуансоном досягається циліндрична зовнішня поверхня стінки. При отриманні вихідної заготовки відбувається потоншення стінки і збільшення її висоти. Таку вихідну заготовку для обтиску можна отримати за два переходи з використанням операцій видавлювання і витягування з потоншенням. При аналізі обтиску в матриці з конічно-циліндричною деформуючою поверхнею використана пружно-пластична модель металу. Встановлено залежності зусилля обтиску і зусилля виштовхування виробу з матриці від переміщення деформуючого інструменту. Визначено напружено-деформований стан zdeформованої заготовки в кінці обтиску. Виявлено кінцеві форма і розміри виробу. Результати моделювання обтиску, при якому відбувається потоншення стінки, підтвердили можливість визначення розрахунковим шляхом форми і розміри заготовки. За розподілом інтенсивності деформацій проведено прогнозування межі текучості zdeформованого металу по висоті стінки виробу.

Ключові слова: метод скінченних елементів, вихідна заготовка, обтиск, порожнистий виріб, виштовхування, зусилля, обтиску, напруження, інтенсивність деформацій.

Вступ

При виготовленні балонів, різноманітних ємностей, переходників для трубопровідної арматури, гільз, снарядів та інших деталей широко застосовують операцію обтиску. Для цього використовують схеми відкритого і закритого обтиску, які приведені в джерелах [1–3]. Можливість формоутворення обтиском за один перехід визначається коефіцієнтом обтиску, який представляє собою відношення діаметра заготовки до діаметра обтиснутої частини. На коефіцієнт обтиску в основному впливають величина відношення товщини заготовки до діаметра заготовки, геометрична форма матриці та коефіцієнта тертя. При відкритому обтиску,

коли в матриці деформується тільки частина порожнистої або трубчастої заготовки, коефіцієнт обтиску обмежений по причині втрати стійкості стінки недеформованої частини заготовки, яка приводить до утворення гофр. При закритому обтиску вірогідність втрати стійкості стінки суттєво зменшується завдяки повному розміщенню вихідної порожнистої заготовки з дном у матриці. В обох випадках обтиску формоутворення за один перехід в конусних матрицях може бути обмежене також по причині виникнення поздовжніх гофр на обтиснутій частині [2].

Додаткове збільшення коефіцієнта обтиску в сферичних та конусних матрицях забезпечує застосування матриць спеціального профіля, у яких деформуючі поверхні виконані у вигляді кільцевих канавок, що зменшує площу контакту zdeформованої частини заготовок з матрицею та знижує сили тертя і зусилля обтиску [5–8]. При цьому використання методу скінченних елементів (МСЕ) дозволяє встановлювати параметри

✉ В. Л. Калюжний
kwl_2011@ukr.net

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

² академія ІТ освіти, Київ, Україна

для проектування технології обтиску та визначати кінцеву форму і розміри виробів [7, 8].

При обтиску відбувається потовщення стінки здеформованої частини заготовки. В джерелах [2–4] запропоновані формули, які дозволяють визначити розміри стінки виробу після обтиску порожнистих заготовок з дном, або трубчастих заготовок, які мають стінку постійної товщини. Практично відсутні дані по встановленню розмірів вихідних заготовок для отримання обтиском виробів зі змінною товщиною стінки по висоті та немає таких даних для виготовлення обтиском тонкостінних конусних порожнистих виробів з циліндричною частиною. Тому актуальною задачею є розрахункове виявлення форми і розмірів вихідних порожнистих заготовок з дном для отримання обтиском виробів із заданими розмірами, що суттєво зменшить терміни підготовки виробництва таких виробів завдяки виключенню допрацювання експериментальними роботами. Спроба визначення за допомогою МСЕ форми і розмірів товстостінної вхідної заготовки під подальший обтиск з отриманням здеформованої частини із змінною товщиною стінки приведена в джерелі [9].

Мета роботи

Метою роботи є використання методу скінченних елементів для встановлення по кресленню деталі форми і розмірів тонкостінної вихідної заготовки змінної товщини та аналізу процесу холодного обтиску

такої заготовки для отримання конусного виробу з циліндричною частиною.

Дослідження

Схема закритого обтиску порожнистої заготовки з отриманням виробу, який має конусну і циліндричну частину та ескіз виробу показані на рис. 1. На рис. 1а зображена схема обтиску. Ліворуч від вісі симетрії приведене положення перед початком обтиску, а праворуч – в кінці обтиску. Вихідна заготовка 1 розміщена в матриці 2. Деформування здійснюється пуансоном 3. При опусканні пуансона 3 із швидкістю V_0 створюється зусилля деформування P_d і отримується виріб 4. Якщо зусилля обтиску невелике і не приводить до втрати стійкості стінки заготовки, то використовують відкритий обтиск, коли матриця 2 не охоплює бокову поверхню заготовки 1.

Ескіз виробу із сталі AISI 1010 COLD із змінною товщиною стінки, для якого потрібно визначити форму і розміри вихідної заготовки та встановити параметри обтиску, зображений на рис. 1б. Виріб має циліндричну частину, перехід цієї частини в конусну з відповідними радіусами заокруглення та конусну частину. Стінка виробу має різну товщину по висоті. Такі тонкостінні вироби отримують холодним обтиском із порожнистих заготовок, які виготовляють холодним чи гарячим видавлюванням і подальшим витягуванням з потоншенням. Витягуванням з потоншенням забезпечує

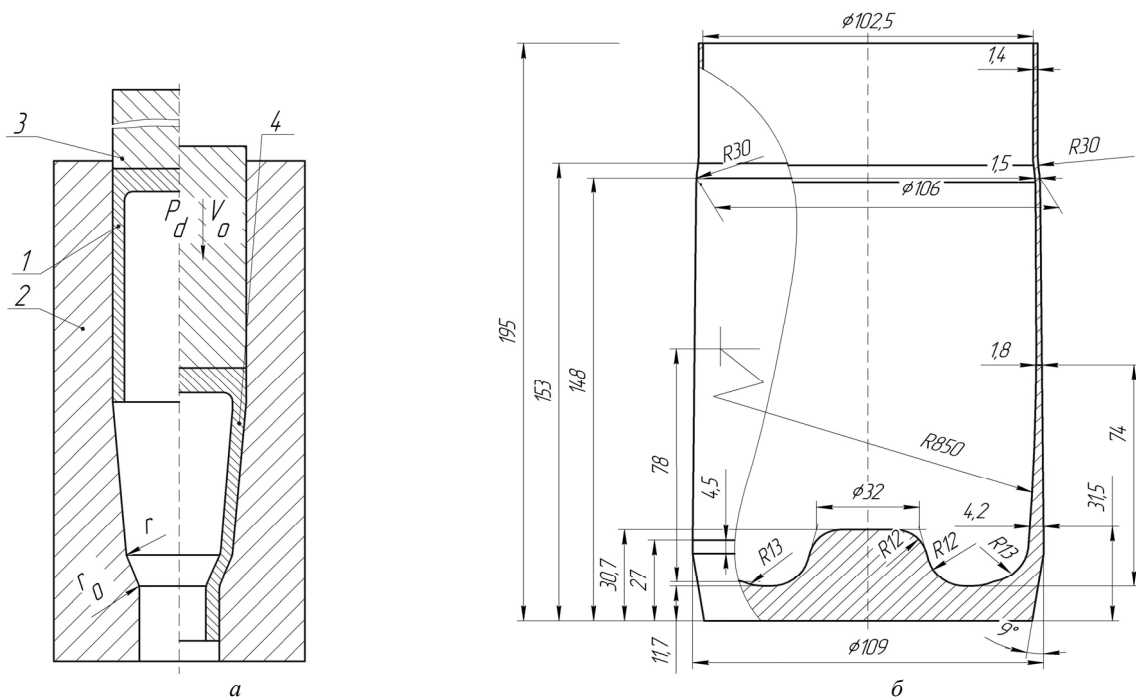


Рис. 1. Схема обтиску конусного виробу з циліндричною частиною та ескіз виробу: а – схема обтиску, б – ескіз виробу

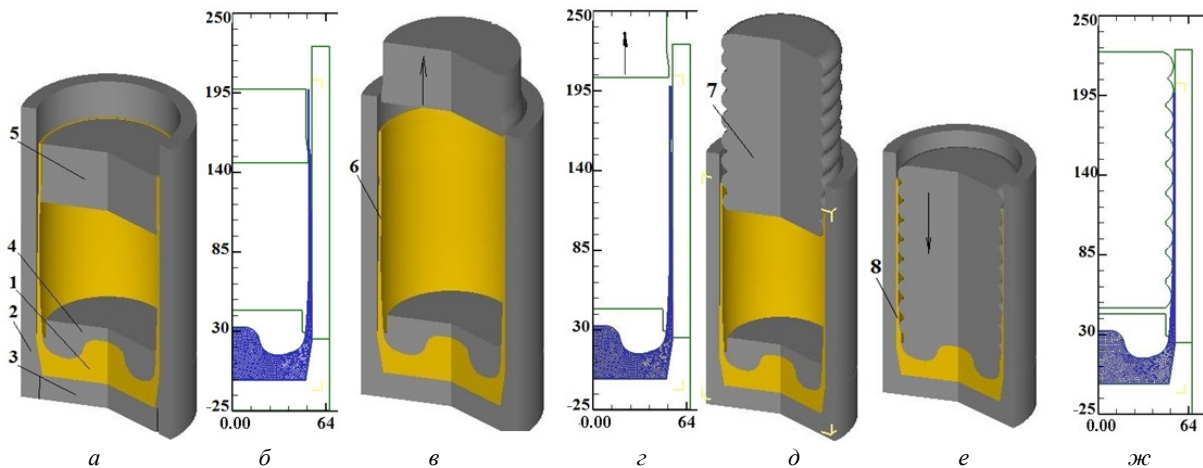


Рис. 2. Етапи визначення форми і розмірів вихідної заготовки

виготовлення заготовки із циліндричною зовнішньою поверхнею і стінкою змінної товщини по висоті.

Як було відмічено вище, в літературних джерелах практично відсутні дані для визначення форми і розмірів вихідної заготовки для вказаного виробу. При обтиску відбувається потовщення стінки, тому мають місце значні складнощі при визначенні товщини стінки по висоті для вихідної заготовки. Оскільки виріб має циліндричну поверхню діаметром $D = 109$ мм, то зовнішній діаметр вихідної заготовки повинен мати такий же діаметр. Донна частина стінки не повинна деформуватися при обтиску. Етапи визначення форми і розмірів вихідної заготовки виконані з використанням скінченно-елементної програми DEFORM та зображені на рис. 2. На ньому показані розрахункові схеми в розрізі та форма і розміри напівфабрикату, що в початковому стані має розміри по ескізу виробу. Тут і в подальшому по всіх представлених розмірах в міліметрах, а тонкими лініями показаний деформуючий інструмент. На рис. 2а і 2б зображений початок першого етапу. Напівфабрикат 1 з розмірами по ескізу виробу встановлений в матриці 2 на опорі 3 та зафіксований до неї притискачем 4. Вирівнювання переходу конусної частини в циліндричну та збільшення діаметра циліндричної частини здійснюється шляхом роздачі при переміщенні вгору пуансона 5. При цьому не повинно бути розтягування стінки, яка розташована нижче пуансона 5. Кінець першого етапу, коли пуансон 5 повністю вийшов із порожнини, наведений на рис. 2в і 2г.

На другому етапі потрібно вирівняти всю висоту стінки із забезпеченням зовнішнього діаметра $D=109$ мм. Початок другого етапу зображений на рис. 2д. Вирівнювання стінки здійснюється також роздачою за допомогою пуансона 7. На цьому етапі не повинно бути осаджування стінки, тому пуансон 7 виконаний ступінчастим для зменшення площі контакту із заготовкою та зниження зусилля роздачі. Розміри виступів пуан-

сона 7 перемінні по висоті і виявляються моделюванням, щоб забезпечити потрібний зовнішній діаметр заготовки. При опусканні пуансона 7 відбувається роздача та отримуються кінцеві форма і розміри вихідної заготовки 8. Ескіз розрахункової заготовки показаний на рис. 3.

Встановлення параметрів обтиску такої заготовки також проведено моделюванням з використанням програми DEFORM. Розглядалася вісесиметрична задача із застосуванням пружно-пластичної моделі металу. Вказана модель дозволяє провести аналіз обтиску та подальшого виштовхування виробу із матриці та встановити кінцеву форму і розміри виробу з урахуванням пружної деформації. Вплив тертя враховане по Кулону із коефіцієнтом тертя 0,08. Швидкість дефор-

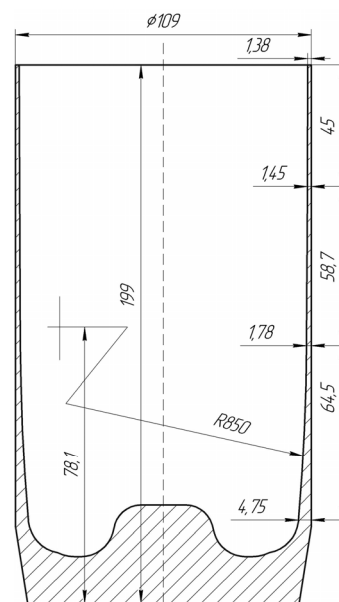


Рис. 3. Ескіз вихідної заготовки

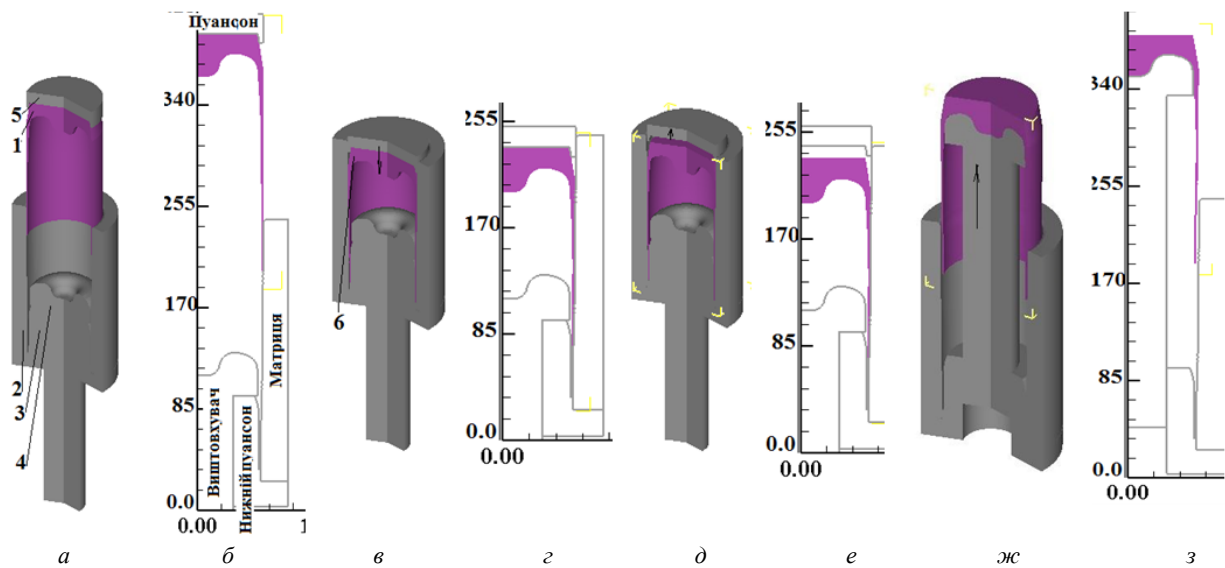


Рис. 4. Розрахункові схеми в розрізі та розміри вихідної і zdeформованих заготовок з інструментом

мування (переміщення пуансона) складала $V_o = 2$ мм/сек, що відповідає параметрам гідравлічного пресу ДБ2432, який буде використаний для реалізації обтиску.

Моделюванням встановлені можливість отримання виробу з використанням відкритого обтиску та необхідність застосування нижнього пуансона для забезпечення отримання циліндричної частини виробу. Розрахункові схеми в розрізі та форма з розмірами вихідної та zdeформованих заготовок і деформуючого інструменту показані на рис. 4. Схема на початку обтиску показана на рис. 4а. Вихідна заготовка 1 розміщена в матриці 2. В матриці 2 устанавлені нижній пуансон 3 і виштовхувач 4. Деформування здійснюється пуансоном 5. Форма і розміри деформуючого інструменту зображені на рис. 4б. Пуансон 5 охоплює донну частину заготовки 1, а розміри виштовхувача виконані по розмірах донної частини виробу зі сторони порожнини (див. рис. 1б). Зазор між матрицею 2 і нижнім пуансоном 3 також виконаний по розмірах циліндричної частини виробу. Схема в кінці обтиску і розміри zdeформованої заготовки представлені на рис. 4в і 4г. Після обтиску виконане моделювання зворотного руху пуансона для зменшення залишкових напружень у zdeформованій заготовці та врахування пружної деформації по висоті заготовки. Схема в кінці зворотного руху пуансона та розміри zdeформованої заготовки, які збільшилися по висоті в результаті пружної деформації, показані на рис. 4д і 4е. Після цього проведене моделювання виштовхування виробу із матриці 2 за допомогою переміщення виштовхувача 4. Схема після виштовхування виробу та кінцеві розміри виробу приведені відповідно на рис. 4ж і 4з.

Силкові режими обтиску та виштовхування показані на рис. 5. На рис. 5а представлена залежність зусилля обтиску від переміщення пуансона. На протязі

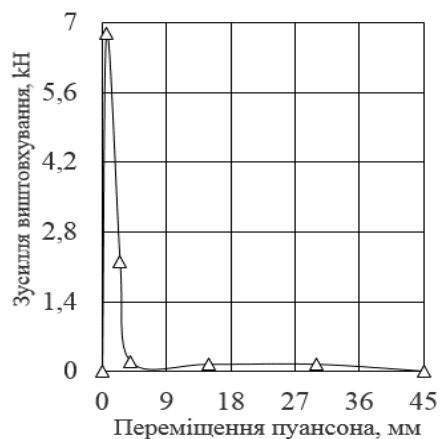
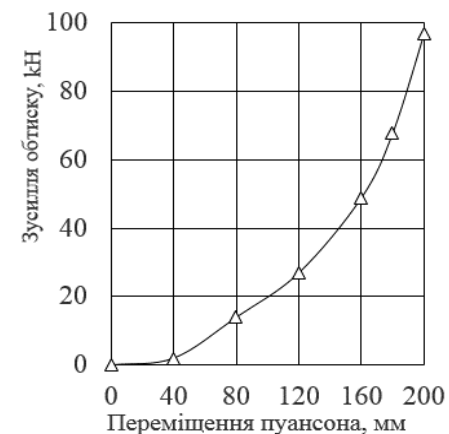


Рис. 5. Силкові режими обтиску та виштовхування: а – залежність зусилля обтиску від переміщення пуансона, б – залежність зусилля виштовхування від переміщення виштовхувача

обтиску зусилля зростає і має максимальне значення $P_d = 97$ кН в кінці деформування. Зусилля виштовхування виробу із матриці має найбільшу величину (6,8 кН) на початку виштовхування і досягає значення 0,14 кН при видаленні циліндричної частини здеформованої заготовки із зазору між матрицею і нижнім пуансоном

Розміри стінки виробу та розподіли компонент напружень у здеформованій заготовці при максимальному значенні зусилля обтиску приведені на рис. 6. Розрахункові розміри стінки виробу, які визначені в програмі DEFORM показані на рис. 6а. Товщина стінки практично співпадає з величинами товщини на ескізі виробу, що відмічені на відповідній висоті стінки (див. рис. 1). Це підтверджує можливість визначення розмірів вихідної заготовки шляхом моделювання з використанням МСЕ. Розподіл радіальних напружень σ_r зображений на рис. 6б. По всьому об'єму заготовки ці напруження стискаючі. Найбільші значення їх по абсолютній величині виникають в області переходу донної частини в стінку та в місці переходу конусної частини в циліндричну. Отримані осьові напруження σ_z також стискаючі та знаходяться у межах $\sigma_z = -65 \div -300$ МПа (рис. 6в). Розподіл тангенціальних напружень σ_θ зображений на рис. 6г. У конусній частині стінки виробу ці напруження стискаючі та отримані у межах $\sigma_\theta = -150 \div -420$ МПа. У циліндричній частині стінки напруження σ_θ стають розтягувальними і досягають значень $\sigma_\theta = 150 - 250$ МПа. Для проектування штампового оснащення потрібно мати розподіли питомих

зусиль на контактуючих поверхнях між здеформованою заготовкою і інструментом. Питомі зусилля можна оцінити по розподілу нормальних напружень σ_n на вказаних поверхнях, який зображений на рис. 6д. Найбільші значення таких напружень отримані на поверхнях здеформованої заготовки у місці переходу конусної частини в циліндричну, що контактують з матрицею і нижнім пуансоном, та досягають значень $\sigma_n = 150$ МПа і $\sigma_n = 300$ МПа відповідно.

Розподіли компонент кінцевих деформацій та напруження текучості здеформованого металу зображені на рис. 7. Після обтиску виникають розтягувальні радіальні ε_r і осьові ε_z деформації, розподіли яких практично однакові і приведені відповідно на рис. 6а і 6б. В осьовому напрямку у стінці отримані дещо менші величини деформацій. Тангенціальні деформації ε_θ по всій висоті стінки стискаючі та знаходяться у межах $\varepsilon_\theta = -0,008 \div -0,038$ (рис. 6г). Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ε_i , розподіл якої приведений на рис. 6г. У стінці біля донної частини має місце найменше пропрацювання з досягненням $\varepsilon_i = 0,0075$. З наближенням до циліндричної частини стінки пропрацювання збільшується до $\varepsilon_i = 0,023$. У місці переходу конусної частини стінки в циліндричну отримано $\varepsilon_i = 0,03$, а в циліндричній частині – $\varepsilon_i = 0,037$. З використанням величин інтенсивності деформацій та експериментальної діаграми істинних напружень матеріалу заготовки можна спрогнозувати межу текучості σ_s здеформованого металу

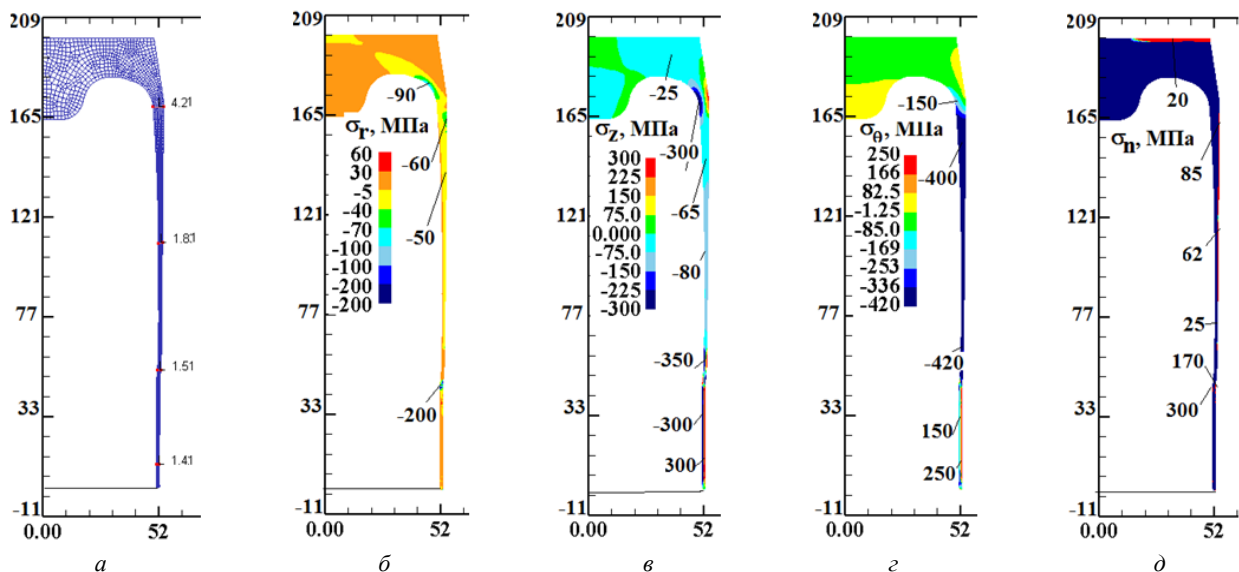


Рис. 6. Розміри стінки виробу та розподіли компонент напружень при максимальному значенні зусилля обтиску: а – розміри стінки виробу, б – розподіл радіальних напружень σ_r , в – розподіл осьових напружень σ_z , г – розподіл тангенціальних напружень σ_θ , д – розподіл нормальних напружень σ_n

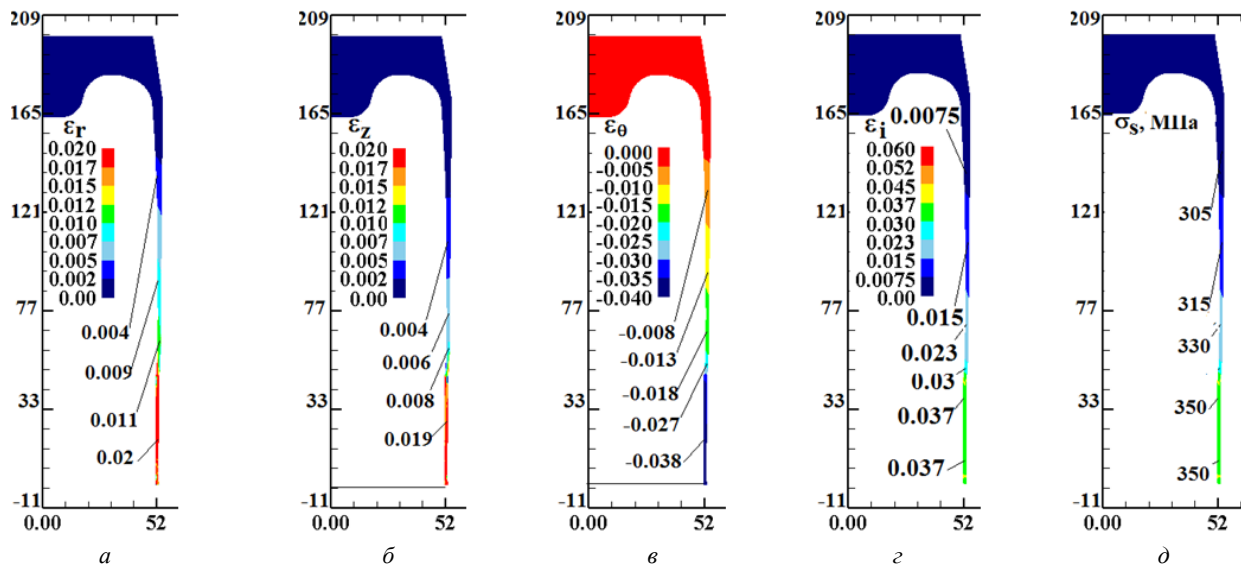


Рис. 7. Розподіли компонент кінцевих деформацій та напруження текучості здеформованого металу: *a* – розподіл радіальних деформацій ε_r , *б* – розподіл осьових деформацій ε_z , *в* – розподіл тангенціальних деформацій ε_θ , *г* – розподіл інтенсивності деформацій ε_i , *д* – розподіл напруження текучості σ_s

стілки, яка отримана в результаті обтиску. Прогнозована межа текучості по висоті стінки зображена на рис. 6д. Найбільша величина $\sigma_s = 350$ МПа отримана у циліндричній частині стінки.

Таким чином, в результаті моделювання обтиску визначені всі параметри для проектування технології: зусилля деформування і зусилля виштовхування – для вибору обладнання, розподіл питомих зусиль – для проектування штампового інструменту, форма і розміри здеформованої заготовки та межа текучості у стінці – для оцінки якості виробу.

Висновки

1. Моделюванням з використанням методу скінченних елементів визначені форма і розміри порожнистої тонкостінної вихідної заготовки із змінною товщиною стінки та встановлені параметри холодного обтиску

її в матриці з конусно-циліндричною деформуючою поверхнею.

2. Форма і розміри виявлені моделюванням випрямлення стінки шляхом роздачі напівфабрикату, який створений по кресленню виробу, з досягненням циліндричної зовнішньої поверхні. При цьому відбувається потоншення стінки і збільшується висота напівфабрикату.

3. З використанням пружно-пластичної моделі проведений аналіз обтиску розрахункової заготовки в матриці з конусно-циліндричною деформуючою поверхнею. Встановлені кінцеві форма і розміри виробу, які співпадають з ескізом виробу.

4. Виявлені залежності зусилля обтиску і виштовхування виробу із матриці від переміщення деформуючого інструменту. Визначений напружено-деформований стан здеформованого металу.

5. По інтенсивності деформацій проведено прогнозування межі текучості здеформованого металу по висоті стінки виробу.

References

- [1] A.D. Matveeva, "Listovaya shtampovka", in *Kovka i shtampovka: Spravochnik*, vol. 4, E.I. Semenov Ed., Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1985–1987.
- [2] Yu.A. Averkiev, *Kholodnaya shtampovka*, Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1989.
- [3] E.A. Popov, V.G. Kovalev and I.N. Shubin, *Tekhnologiya i avtomatizatsiya listovoi shtampovki*, Moscow, Russia: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2000.
- [4] E.N. Sosenushkin *et al.*, *Teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty obzhima v konicheskoi matritse*, Moscow, Russia: Izvestiya MGTU "MAMI", no. 1(15), t. 2, 2013, pp. 139–145.
- [5] V.A. Krivoshein, "Sravnitel'nyi analiz teoreticheskikh i eksperimental'nykh dannykh pri issledovanii protsessa obzhima v matritse s kol'tsevymi kanavkami", *Izvestiya vuzov*, Moscow, Russia: Mashinostroenie, no. 5, pp. 10–12, 2014.

- [6] O.V. Kalyuzhnyi, "Vidkritii ta zakritii obtisk trubchastikh zagotovok z riznoyu visotoyu v matritsi spetsial'nogo profilyu", *Obrabotka materialov davleniem. Sbornik nauchnykh trudov*, Kramators'k: DGMA, no. 2 (39), 2014, pp. 144-150.
- [7] N.I. Shlyapugin, "Osobennosti modelirovaniya protsessa obzhima-razdachi trubnoi zagotovki v DEFORM-2d", *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra*, RAN, no. 4, t. 16, pp. 240-244, 2014.
- [8] O.V. Kalyuzhnyi and V.L. Kalyuzhnyi, *Intensifikatsiya formoutvoryuyuchikh protsesiv kholodnogo listovogo shtampuvannya*, Kyiv: TOV "Sik Grup Ukraïna", 2015.
- [9] V.L. Kalyuzhnyi, "Intensifikatsiya protsesu kholodnogo obtisku porozhnistikh napivfabrikativ dlya otrimannya virobiv z zminnoyu tovshchinoyu stinki", *Mechanics Advanced Technologies*, no. 85, pp. 111-117, 2019. doi: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2019.85.164271>

Расчет размеров исходной полой заготовки с тонкой стенкой сменной толщины и обжим ее в матрице с конусно-цилиндрической деформирующей поверхностью

В. Л. Калюжный, А. В. Калюжный, К. Л. Марчук

Аннотация. Работа посвящена получению из низкоуглеродистой стали конусных с цилиндрической частью полых изделий с тонкой стенкой и разной толщиной по высоте. Методом конечных элементов определены форма и размеры исходной полой заготовки и установлены параметри холодного обжима такой заготовки. Форма и размеры исходной заготовки установлены путем двухэтапного моделирования выравнивания стенки изделия по высоте с достижением цилиндрической внешней поверхности. На первом этапе выполняется моделирование выпрямления раздачей при помощи пуансона цилиндрической части стенки и места перехода цилиндрической части в коническую. На втором этапе также раздачей пуансоном достигается цилиндрическая внешняя поверхность стенки. При получении исходной заготовки происходит утонение стенки и увеличение ее высоты. Такую исходную заготовку для обжима можно получить за два перехода с использованием операций выдавливания и вытяжки с утонением. При анализе обжима в матрице с конической и цилиндрической деформирующей поверхностью использована упруго-пластическая модель металла. Установлены зависимости усилия обжима и усилия выталкивания изделия из матрицы от перемещения деформирующего инструмента. Определено напряженно-деформированное состояние сформированной заготовки в конце обжима. Выявлены конечные форма и размеры изделия. Результаты моделирования обжима, при котором происходит утолщение стенки, подтвердили возможность определения расчетным путем формы и размеры заготовки. По распределению интенсивности деформаций проведено прогнозирование предела текучести сформированного металл в стенке изделия.

Ключевые слова: метод конечных элементов, исходная заготовка, обжим, полая заготовка, выталкивание, усилие, обжима, напряжения, интенсивность деформаций

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

V. Kaliuznyi, O. Kaliuzhnyi, K. Marchuk

Abstract. The article is devoted to the production of conical hollow products with a cylindrical part and a thin wall with different thickness in height from low-carbon steel. The finite element method was used to determine the shape and dimensions of the original hollow workpiece, as well as the parameters of cold crimping of such a workpiece. The shape and dimensions of the original workpiece are determined by a two-stage simulation of the alignment of the product wall in height with the achievement of the cylindrical outer surface. At the first stage, the straightening is simulated by expansion with the help of a punch of the cylindrical part of the wall and the place of transition of the cylindrical part to the conical one. At the second stage, the cylindrical outer surface of the wall is reached by punching. Upon receipt of the original workpiece, the wall becomes thinner and its height increases. Such an original crimp blank can be obtained in two passes using extrusion and thinning stretching operations. In the analysis of crimping in a matrix with a conical and cylindrical deforming surface, an elastic-plastic metal model was used. The dependences of the crimping force and the force of pushing the product out of the matrix on the movement of the deforming tool are determined. The stress-strain state of the deformed workpiece at the end of crimping is determined. The final shape and dimensions of the product are determined. The results of crimping simulation, in which the wall thickening occurs, confirmed the possibility of calculating the shape and size of the workpiece. Prediction of the yield stress of the deformed metal along the height of the wall of the product was carried out from the distribution of the intensity of deformations.

Keywords: finite element method, original workpiece, crimping, hollow product, extrusion, crimping force, stress, strain intensity.