

УДК 621.7

В.Л. Калюжний, А.М. Потятиник

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ СХЕМ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ

Методом скінченних елементів проведений розрахунковий аналіз формоутворення порожнистих вісесиметричних виробів із металу BRASS-CDA-377 зворотним видавлюванням, прямим видавлюванням з роздачою та зворотним видавлюванням з роздачою. Визначені зусилля видавлювання, розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті і зусилля виштовхування виробів із матриці. Встановлені напружено-деформований стан при формозміні заготовок, температура zdeформованого металу, кінцеві форми і розміри виробів з урахуванням пружної деформації. Використання прямого видавлювання з роздачою і зворотного видавлювання з роздачою приводить до зменшення зусилля деформування на 10%, зниженню питомих зусиль на деформуючому інструменті та підвищенню стійкості пуансонів. При цьому має місце більш рівномірне пропрацювання структури металу пластичною деформацією по ширині стінки порожнистих виробів. Застосування зворотного видавлювання забезпечує високу точність форми порожнистого виробу.

Ключові слова: порожнистий виріб, холодне видавлювання, метод скінченних елементів, зусилля видавлювання, питомі зусилля, напруження, деформації, форма і розміри виробів.

Калюжний В.Л., Потятиник А.М.**АНАЛИЗ СХЕМ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛИВАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОЛЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Методом конечных элементов проведен расчетный анализ холодного формообразования осесимметричных полых изделий из металла BRASS-CDA-377 обратным выдавливанием, прямым выдавливанием с раздачей и обратным выдавливанием с раздачей. Определены усилия деформирования, распределения удельных усилий на деформирующем инструменте. Установлены усилия извлечения пуансона из сформированной заготовки и усилия выталкивания изделий из матрицы. Определены напряженно-деформированное состояние при формоизменении заготовок, температура сформированного металла, конечные формы и размеры изделий с учетом упругой деформации. Использование прямого выдавливания с раздачей и обратного выдавливания с раздачей приводит к снижению усилия деформирования до 10%, уменьшению удельных усилий на деформирующем инструменте и повышению стойкости пуансонов. При этом имеет место более равномерная проработка структуры металла пластической деформацией по ширине стенки полых изделий. Использование обратного выдавливания обеспечивает высокую точность формы полого изделия.

Ключевые слова: полое изделие, холодное выдавливание, метод конечных элементов, усилие выдавливания, удельные усилия, напряжения, деформации, форма и размеры изделий.

V. Kaljuzhny, A. Potjatynik**SCHEMA ANALYSIS OF COLD EXTRUDING OF THE AXISMETRIC HOLLOW ARTICLES**

The finite element method was used for numerical analysis the cold forming of axisymmetric hollow articles of metal BRASS-CDA-377 by backward extrusion, forward extrusion with bulging and backward extrusion with bulging. There are determined forces of deformation, distribution of specific forces on the deforming tool. There're identified the forces of extraction of the punch from the deformed workpiece and the force of pushing the articles out of the matrix. There are determined stress-strain state during forming of the workpiece, the temperature of the deformed metal, the final shapes and sizes of articles, taking into account the elastic deformation. Using forward extrusion with bulging and backward extrusion with bulging leads to a reduction of the deformation's force to 10%, a reduction of the specific forces on the deforming tool, and an increase of the durability of the punches. In this case, a more even deformation of the metal structure by plastic deformation along the width of the wall of hollow articles takes place. Using backward extrusion provides high accuracy of the hollow article shape.

Keywords: hollow article, cold extruding, finite element method, extruding's force, specific force, strain, deformation, shape and sizes of articles.

Для високопродуктивного виготовлення точних порожнистих виробів із сталей і кольорових металів широко використовують холодне видавлювання. Схеми видавлювання таких виробів пуансоном з конусним робочим торцем із позначеннями приведені на рис. 1. Найбільш розповсюдженим способом виготовлення є зворотне видавлювання (рис. 1а). Ліворуч від вісі симетрії показане положення перед видавлюванням, праворуч – після видавлювання. Вихідну заготовку 1 діаметром D_0 і висотою H_0 встановлюють в матриці 2 на виштовхувач 3. Формоутворення виконують за допомогою опускання пуансона 4 і отримують виріб 5. Технологія

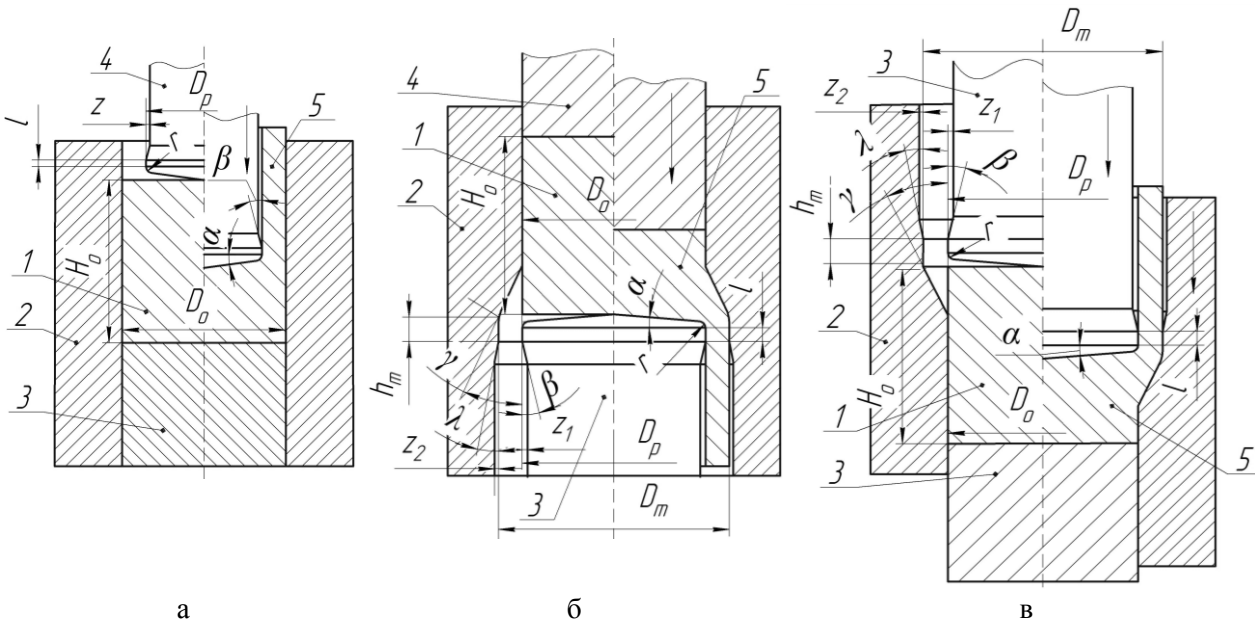


Рис. 1. Схеми видавлювання порожнистих виробів: а – зворотне видавлювання, б – пряме видавлювання з роздачою

Рис. 2. Схема зворотного видавлювання з роздачою

і штампове оснащення виготовлення виробів зворотним видавлюванням проектується в основному на базі виробничого досвіду і експериментальних даних [1]. При цьому практично відсутні дані по кінцевій формі і розмірах виробів з урахуванням пружної деформації, а також температури, яка виникає у zdeформованому металі. Схема виготовлення порожнистих виробів прямим видавлюванням з роздачою наведена на рис. 1б [2]. Вихідну заготовку, діаметр D_o якої менший за зовнішній діаметр D_m виробу, розміщують в матриці 2 на пуансоні 3. Формоутворення виконують за допомогою зміщення штовхача 4 та отримують виріб 5. Проведені дослідження [2-7] показали, що застосування такої схеми приводить до зниження зусилля деформування на пуансоні та підвищення його стійкості. Зниження зусилля, в порівнянні зі зворотним видавлюванням, досягається завдяки течії метала в одному напрямку та зменшенню величини по абсолютній величині гідростатичного тиску в осередку деформації. Суттєвим недоліком прямого видавлювання з роздачою є низька продуктивність, яка обумовлена складністю видалення готового виробу із штампа. Тому ця схема не знайшла широкого розповсюдження в промисловості. Для усунення вказаного недоліка запропонована схема зворотного видавлювання з роздачою (рис. 2). Вихідну заготовку 1 встановлюють в рухомій матриці 2 на виштовхувач 3. Деформування заготовки 1 виконують за допомогою пуансона 4. При видавлюванні матрицю 2 опускають вниз із однаковою швидкістю з пуансоном 4. Якщо виріб 5 залишиться в матриці, то видалення виконують за допомогою виштовхувача 3 з одночасним поверненням матриці 2 у вихідне положення. А якщо деталь залишиться на пуансоні 4, то знімання виробу можна виконати за допомогою кільця, яке зв'язане з нижньою плитою штампа. В теперішній час відсутні дані по впливу конструктивних і технологічних факторів на формоутворення виробів по схемі зворотного видавлювання з роздачою.

Метою роботи є порівняльний аналіз формоутворення порожнистих виробів з однаковими зовнішніми діаметрами і діаметрами порожнини по вищенаведених схемах холодного видавлювання.

Застосування метода скінчених елементів (МСЕ) для теоретичного аналізу процесів холодного видавлювання дозволяє встановлювати дані для проектування технології і штампового оснащення, які не потребують доопрацювання експериментальними роботами [6,7]. В роботі використана скінченно-елементна програма DEFORM. Метал заготовок вважався пружно-пластичним зі зміцненням, деформуючий інструмент – абсолютно жорстким. Використання такої моделі металу дозволяє визначити кінцеві форму і розміри виробів, а також виконати моделювання процесів виймання пуансона із zdeформованої заготовки та виштовхування її із матриці після видавлювання. Враховано вплив тертя по Кулону з коефіцієнтом тертя $\mu=0,08$. Швидкість деформування складала $V_o=2$ мм/сек.

Для зворотного видавлювання вихідна заготовка мала розміри $D_o=52$ мм, $H_o=52$ мм. Видавлюванню з роздачою підлягали заготовки із $D_o=48$ мм, $H_o=52$ мм. Розміри робочого торця конусного пуансона для всіх схем видавлювання: $D_p=42$ мм, $\alpha=7^\circ$, $r=2$ мм, $z=z_1=0,15$ мм, $\alpha=5^\circ$, $l=2$ мм. Матриця для прямого і зворотного видавлювання з роздачою мала розміри: $D_m=52$ мм, $h_m=8$ мм, $\gamma=\lambda=10^\circ$. При таких розмірах заготовки і деформуючого інструмента для розглянутих схем видавлювання зовнішній діаметр виробу і товщина стінки були однаковими.

Розрахункові схеми в розрізі на початку та в кінці видавлювання показані на рис. 3. На рис. 3а зображена схема на початку зворотного видавлювання. Заготовка 1 встановлена в матриці 2 на виштовхувачі 3. При зміщенні пуансона 4 виконується формоутворення виробу 5 (рис. 3б). На рис. 3в наведено положення на початку прямого видавлювання з роздачою. Заготовка 1 розміщена в матриці 2 на пуансоні 3. При опусканні штовхача 4 отримується виріб 5 (рис. 3г). Положення на

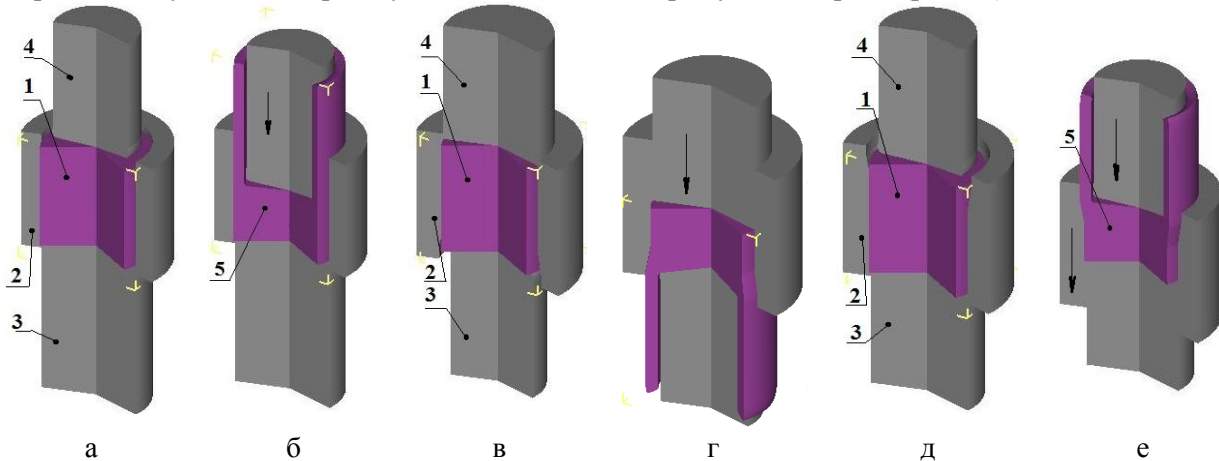


Рис. 3. Розрахункові схеми в розрізі на початку та в кінці видавлювання

початку зворотного видавлювання з роздачою показане на рис. 3д. Вихідна заготовка 1 розміщена в матриці 2 на виштовхувачі 3. При одночасному зміщенні пуансона 4 із матрицею 2 виконується формоутворення виробу 5 (рис. 3е).

Моделюванням для кожної схеми видавлювання встановлена послідовність видалення готових виробів із матриць після видавлювання. На рис. 4 зображені розрахункові схеми при вийманні пуансона із здеформованої заготовки та при виштовхуванні виробу із матриці. Після зворотного видавлювання спочатку пуансон 1 виходить із виробу 2 (рис. 4а). При цьому виріб 2 залишається в матриці 3. Виштовхування виробу із матриці виконується зміщенням виштовхувача 4 (рис. 4б). Після прямого видавлювання з роздачою при переміщенні матриці 1 вона захоплює за

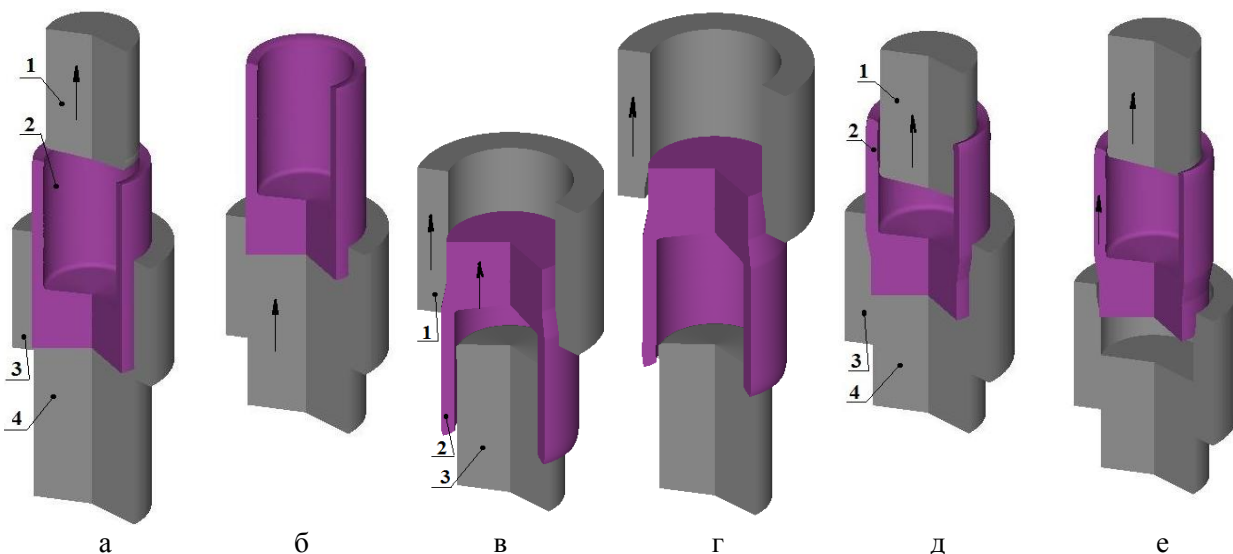


Рис. 4. Розрахункові схеми при вийманні пуансона із здеформованої заготовки та при виштовхуванні виробів із матриць

собою виріб 2 до тих пір, поки торець виробу досягає калібруючого пояса торця пуансона 3 (рис. 4в). Після цього виріб залишається на пуансоні 3 при подальшому зміщенні матриці 1 (рис. 4г). Тому для такої схеми видавлювання необхідно передбачити у штампі пристрій для знімання виробу із пуансона. Після зворотного видавлювання з роздачою при русі пуансона 1 вгору виріб 2 спочатку залишається в матриці до тих пір поки калібруючий пояс торця пуансона торкнеться торця виробу (рис. 4д). При подальшому зміщенні пуансона 1 виріб 2 залишається на пуансоні і повністю виходить із матриці (рис. 4е). Тут також необхідний пристрій в штампі для знімання виробу із пуансона.

На рис. 5 зображені розрахункові залежності зусилля видавлювання від переміщення деформуючого інструмента та розподіли нормальних напружень на поверхнях контакту заготовки з деформуючим інструментом при максимальній величині зусилля видавлювання. Залежності зусилля видавлювання, які виникають на пуансонах, від переміщення деформуючого інструмента показані на рис. 5а. Вигляд залежностей практично однаковий для розглянутих схем видавлювання. Зусилля спочатку зростають до моменту виходу металу в зазор між матрицею і калібруючим пояском пуансона, а в подальшому залишаються постійними. Найбільше значення зусилля (2490 кН) отримане при зворотному видавлюванні (ЗВ). При прямому видавлюванні з роздачою (ПВР) і зворотному видавлюванні з роздачою (ЗВР) зусилля деформування однакові і досягають величини 2250 кН, що менше на 10% в порівнянні зі зворотним видавлюванням. Для проектування пуансонів, виштовхувачів і матриць необхідно знати точний розподіл питомих зусиль на вказаному інструменті. Питомі зусилля можна оцінити по розподілу нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях здеформованої заготовки з інструментом. Розподіл таких напружень при зворотному видавлюванні (див. рис. 1а) зображений на рис. 5б. Наведена половина здеформованої заготовки, а тонкими лініями показаний деформуючий інструмент. На вісі пуансона, за допомогою якого прикладають зусилля видавлювання, отримано 1900 МПа з подальшим зменшенням до 1460 МПа на радіусі заокруглення торця пуансона. На виштовхувачі нормальні напруження досягають значень в межах $\sigma_n = 1150 \div 1240$ МПа. Найбільша величина напруження $\sigma_n = 1320$ МПа на поверхні матриці виникає напроти осередку деформації в заготовці під пуансоном. На рис. 5в зображені розподіли нормальних напружень при зворотному видавлюванні з роздачою (див. рис. 1б). Найбільші величини цих напружень отримано на вісі пуансона $\sigma_n = 1790$ МПа та на торці штовхача – $\sigma_n = 1490$ МПа. Значення $\sigma_n = 1450$ виникає на матриці у місці переходу конусної поверхні в циліндричну. Аналогічні величини нормальних напружень на поверхнях деформуючого інструмента отримані при зворотному видавлюванні з роздачою (рис. 5д). Зменшення питомих зусиль на пуансонах і виштовхувачах при видавлюванні з роздачою приводить до підвищення їх стійкості та зниження собівартості виробів.

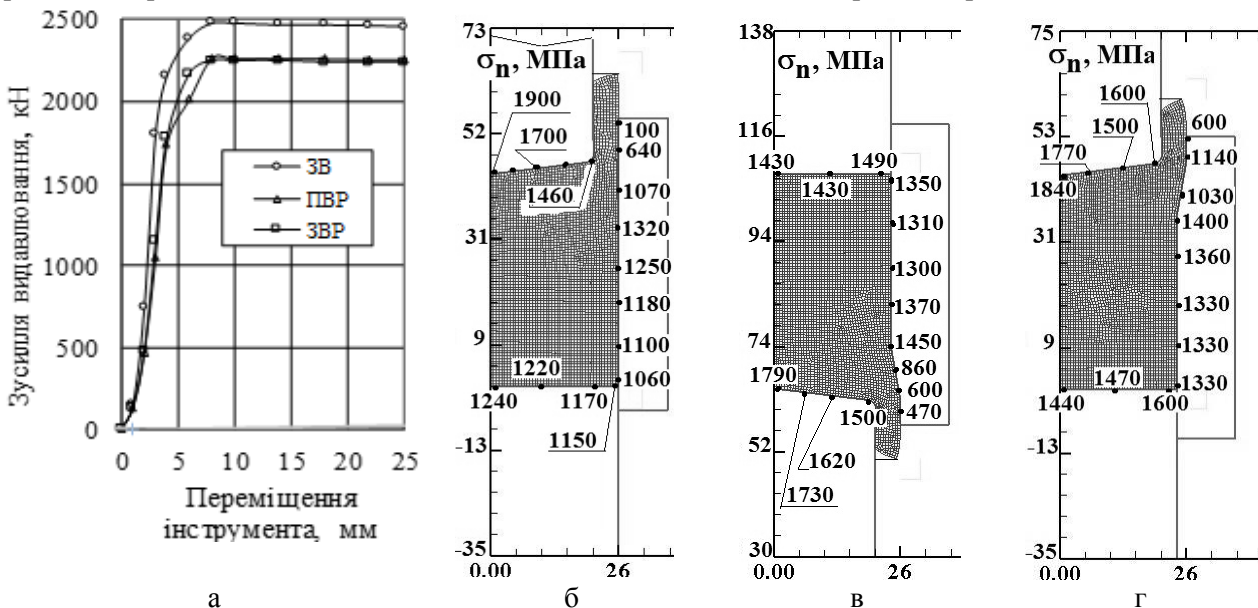


Рис. 5. Зусилля видавлювання та нормальні напруження на деформуючому інструменті при видавлюванні: а – залежності зусиль, які виникають на пуансонах, від переміщення деформуючого інструмента; б – г - розподіли нормальних напружень на деформуючому інструменті при максимальному зусиллі видавлювання

Розрахунковим шляхом встановлені залежності величин зусиль виймання пуансонів із zdeформованих заготовок та зусиль виштовхування виробів із матриць від переміщення деформуючого інструмента. Такі дані необхідні для проектування штампового оснащення. Для зворотного видавлювання максимальне значення зусилля на початку виймання пуансона із виробу складає 30 кН (див. рис. 4а), а найбільше зусилля виштовхування виробу із матриці – 32 кН (див. рис. 4б). При підніманні матриці після прямого видавлювання з роздачою максимальна величина зусилля досягає 35 кН (див. рис. 4в), а при виштовхуванні виробу із матриці – 17 кН. Після зворотного видавлювання з роздачою на початку руху пуансона вгору найбільша величина зусилля складає 19 кН (див. рис. 4г). Максимальна величина зусилля виймання пуансона із виробу досягає 13 кН.

Моделюванням визначений напружено-деформований стан заготовок при формоутворенні порожнистих виробів для розглянутих схем видавлювання. На рис. 6 приведені розподіли напружень $\sigma_{cp} = (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z) / 3$ у zdeформованих заготовках при максимальній величині зусилля видавлювання. Розподіл напружень σ_{cp} для зворотного видавлювання показаний на рис. 6а. В області виходу металу в стінку ці напруження знаходяться в межах $\sigma_{cp} = -415 \div -880$ МПа. На вісі zdeформованої заготовки отримано $\sigma_{cp} = -1500 \div -1600$ МПа. Для схем видавлювання з роздачою в області виходу в стінку отримано $\sigma_{cp} = -100 \div -500$ МПа (рис. 6б і 6в). Зменшення по абсолютній величині напружень σ_{cp} забезпечує зниження зусилля видавлювання.

При холодному видавлюванні підвищується температура zdeформованого металу. Розподіли температури zdeформованого металу на кінцевих стадіях видавлювання наведені на рис. 7. При зворотному видавлюванні температура досягає значень в межах $T = 150^\circ - 170^\circ\text{C}$ в області виходу металу в стінку (рис. 7а), а в самому осередку деформації отримано $T = 120^\circ\text{C}$. Аналогічних значень досягає температура zdeформованого металу при прямому видавлюванні з роздачою (рис. 7б). При зворотному видавлюванні з роздачою в області виходу металу в стінку у zdeформованому металі отримано $T = 160^\circ - 180^\circ\text{C}$ (рис. 7в). Виявлені величини температур дозволяють уточнити вимоги до змащення для холодного видавлювання, а також необхідно перебачити охолодження пуансонів у серійному і масовому виробництвах.

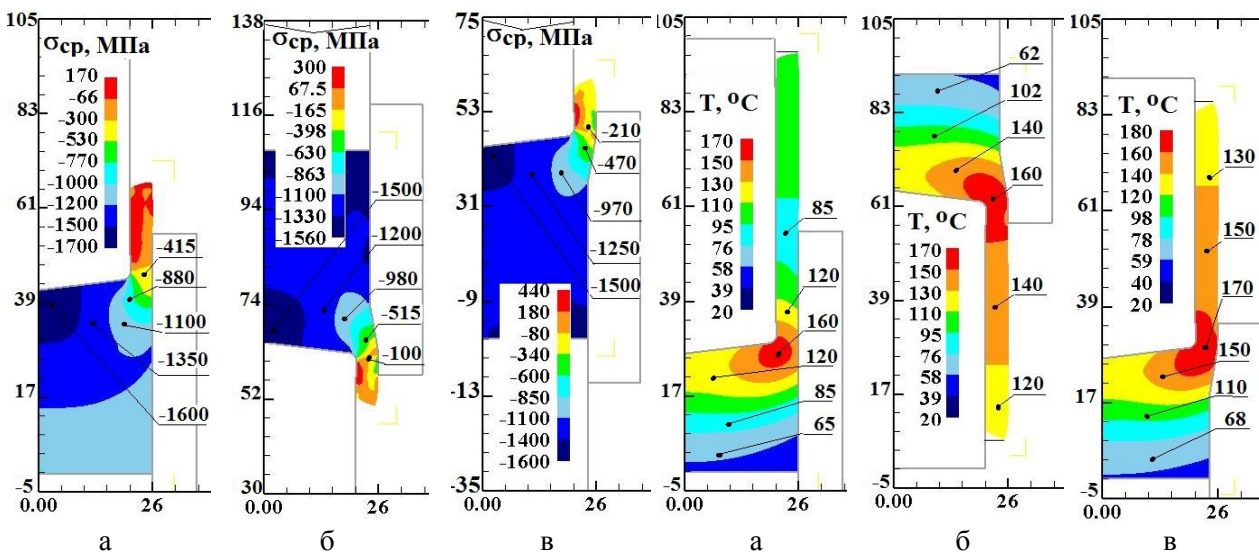


Рис. 6. Розподіли напружень σ_{cp} у

zdeформованих заготовках при максимальній величині зусилля видавлювання: а – для зворотного видавлювання, б – для прямого видавлювання з роздачою, в – для зворотного видавлювання з роздачою. Розміри по всіх показані в міліметрах

Рис. 7. Розподіли температури у

zdeформованих заготовках: а – для зворотного видавлювання, б – для прямого видавлювання з роздачою, в – для зворотного видавлювання з роздачою. Розміри по всіх показані в міліметрах

Використання МСЕ для моделювання холодного видавлювання дозволяє прогнозувати якість порожнистих виробів після видавлювання. Якість виробів можна оцінити по кінцевій формі

і розмірах виробів та по пропрацюванню структури метала холодною пластичною деформацією по ширині стінки та у донній частині виробу, яке визначається по розподілу інтенсивності деформацій ε_i . На рис. 8 наведені фрагменти торців стінок порожнистих виробів, які отримані розглянутими схемами холодного видавлювання. Найбільшу точність форми виробу забезпечує зворотне видавлювання (рис. 8а). Тут має місце невелике викривлення торця і також незначна утяжина висотою 1,8 мм. Після видавлювання і виштовхування виробу з матриці отримані наступні розміри стінки з урахуванням пружної деформації: зовнішній діаметр 52,04 мм (при діаметрі матриці $D_m=52$ мм), діаметр порожнини - 42,04 мм (при діаметрі пуансона $D_p=42$ мм).

Використання прямого видавлювання з роздачою приводить до збільшення викривлення торця стінки та зростання висоти утяжини до 2,1 мм (рис. 8б). При цьому пружна деформація діаметра порожнини та зовнішнього діаметра виробу складає 0,6 мм. На рис. 8в зображений фрагмент торця стінки після зворотного видавлювання з роздачою. Має місце подальше збільшення викривлення торця, зростання величини утяжини і пружної деформації, яка складає 0,8 мм.

На рис. 9 показані розподіли інтенсивності деформацій ε_i у стінках та донних частинах виробів, які отримані зворотним видавлюванням та прямим видавлюванням з роздачою. Розподіл ε_i після зворотного видавлювання з роздачою практично однаковий із прямим видавлюванням. Для обох випадків видавлювання має місце інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією внутрішніх шарів металу стінок, а найменше пропрацювання отримане в області торців стінок. Після зворотного видавлювання (рис. 9а) у внутрішніх шарах металу стінки виробу величина інтенсивності деформацій досягає величин в межах $\varepsilon_i=3,0\div 3,4$, а у зовнішніх шарах металу стінки - $\varepsilon_i=0,93\div 1,4$. В зоні торця стінки отримано $\varepsilon_i=0,23$. У донній частині виробу величини інтенсивності деформації змінюються від $\varepsilon_i=1,4\div 1,9$ безпосередньо під пуансоном до $\varepsilon_i=0,46\div 0,93$ на глибині 6 мм цієї частини. Після прямого видавлювання з роздачою виріб має більш рівномірне пропрацювання структури металу пластичною деформацією по ширині стінки (рис. 9б). У внутрішніх шарах металу стінки отримано $\varepsilon_i=3,2$, а у зовнішніх шарах - $\varepsilon_i=1,4$. В зоні донної частини безпосередньо під пуансоном величина інтенсивності деформацій складає $\varepsilon_i=1,9$ з подальшим зменшенням до значення $\varepsilon_i=0,21$ на глибині 6 мм. В області торця стінки отримано $\varepsilon_i=0,21$.

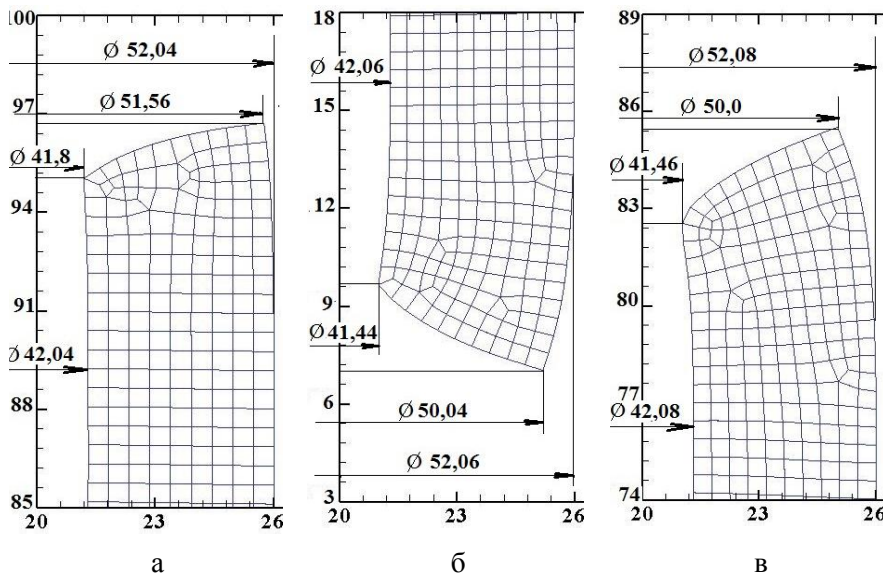


Рис. 8. Фрагменти торців стінок порожнистих виробів, які отримані різними схемами холодного видавлювання: а – після зворотного видавлювання, б – після прямого видавлювання з роздачою, в – після зворотного видавлювання з роздачою
Розміри в міліметрах

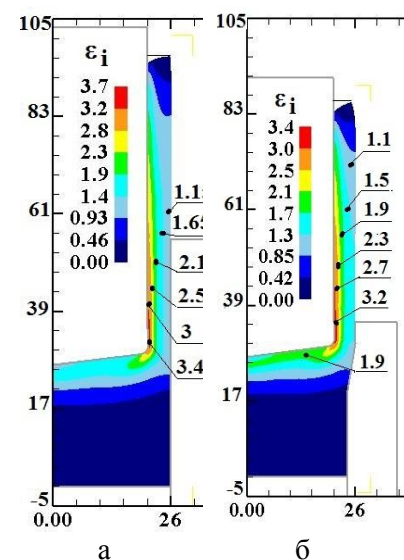


Рис. 9. Розподіли інтенсивності деформацій у стінках та донних частинах виробів: а – після зворотного видавлювання, б – після прямого видавлювання з роздачою

Висновки. Методом скінченних елементів проведений аналіз холодного видавлювання порожнистих виробів по схемах зворотного видавлювання, прямого видавлювання з роздачою та зворотного видавлювання з роздачою. Встановлені залежності зусиль видавлювання, зусиль виймання пуансонів із виробів та зусиль виштовхування виробів із матриць від переміщення деформуючого інструмента. При видавлюванні з роздачою величина зусиль видавлювання зменшується на 10%. Виявлений точний розподіл питомих зусиль на пуансонах, виштовхувачах і матрицях. Питомі зусилля при видавлюванні з роздачою в середньому на 120 МПа в порівнянні зі зворотним видавлюванням. З урахуванням пружної деформації розраховані кінцеві форми і розміри виробів, при цьому найбільш точну форму виробу забезпечує зворотне видавлювання. Встановлений напружено-деформований стан металу при формоутворенні виробів та виявлена температура здеформованого металу. Видавлювання з роздачою забезпечує більш рівномірне пропрацювання структури металу пластичною деформацією по ширині стінки виробів в порівнянні зі зворотним видавлюванням. Розрахунковим шляхом визначені всі необхідні дані для проектування технології холодного видавлювання порожнистих виробів: зусилля видавлювання – для вибору пресового обладнання; розподіл питомих зусиль – для проектування штампового оснащення; форми і розміри виробів та розподіли інтенсивності деформацій – для прогнозування якості виробів.

Список використаних джерел:

1. Ковка и объемная штамповка: Справочник. В 4-хт. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. . – Т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. - М.: Машиностроение, 1987. - 384с.
2. Джонсон У. Теория пластичности для инженеров. / У. Джонсон, П.Б. Меллор Пер. с англ. А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
3. Овчинников А.Г. Прямое выдавливание цилиндрических стаканов / А.Г. Овчинников А.В. Хабаров // - В кн.: Совершенствование процессов объемной штамповки. М.: МДНТП, 1980. – С. 103-108.
4. Дмитриев А.М. Исследование процесса выдавливания с раздачей / А.М. Дмитриев // Известия вузов. Машиностроение, 1984. - №4. - С. 140-148.
5. Гречников В.Ф. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / В.Ф. Гречников, А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь и др.; Под общ. ред. А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение. 1985. – 184 с.
6. Калюжный В.Л. Сравнительный анализ процессов обратного выдавливания и прямого выдавливания с раздачей изделий с полостью постоянного диаметра / В.Л. Калюжный, Л.И. Алиева, И.П. Куликов // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2013. - №4(37). – С. 87-92
7. Калюжный В.Л. Определение усилий извлечения пуансона из сформированной заготовки и выталкивания заготовки из матрицы при холодном выдавливании полых изделий с разной степенью деформации / В.Л. Калюжный, Л.И. Алиева, В.Н. Горностаи // Усовершенствование процессов и оборудования для обработки давлением в металлургии и машиностроении: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2016. - №1(42). – С. 90-100.

Рецензент

Гожій Сергій Петрович, д.т.н., професор кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Стаття надійшла до редакції 10.05.2017