

УДК 621.7-621. 983

Калюжний В.Л., д.т.н., проф., Цибенко А.С., д.т.н., проф., Чувільов Ю.О., Чувільов Є.О.
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ХОЛОДНОГО ШТАМПУВАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ПОРОЖНИСТОГО ВИРОБУ З НЕОБХІДНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ЗДЕФОРМОВАНОГО МЕТАЛУ

Kaljuzny V., Tsybenko A., Chuvilov Ju., Chuvilov Je.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (kwl_2011@ukr.net)

USING OF COLD FORMING FOR GETTING PRODUCT WITH THE NECESSARY PROPERTIES OF DEFORMED METAL

Показана можливість виготовлення порожнистого виробу заданої форми з необхідними властивостями здеформованого металу. На першому переході напівфабрикат отримують холодним комбінованим видавлюванням. На другому переході виконується витягуванням з потоншенням для зменшення товщини стінки та збільшення висоти виробу. Методом скінченних елементів встановлені параметри видавлювання, які забезпечують одночасну течію металу в двох напрямках та формоутворення виробу при знижених зусиллях, а також необхідні розміри послідовно розташованих матриць для витягування з потоншенням. Визначені силові режими видавлювання, розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті, зусилля виштовхування напівфабрикату з матриці та напруження і деформації у напівфабрикаті. видавлювання дозволило отримати відповідне пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією в донній частині майбутнього виробу з досягненням необхідної межі текучості у здеформованому металі. Для витягування з потоншенням отриманого напівфабрикату, з урахуванням накопичених деформацій, виявлені залежність зусилля витягування від переміщення пуансону, кінцева форма та розміри виробу, а також інтенсивність деформацій та ступінь використання ресурсу пластичності у здеформованому металі стінки виробу

Ключові слова: порожнистий виріб, комбіноване видавлювання, витягування з потоншенням, метод скінченних елементів, зусилля деформування, напівфабрикат, напруження і деформації, кінцева форма та розміри виробу.

Виробництво виробів холодним об'ємним штампування, в порівнянні з обробкою різанням, дозволяє суттєво підвищити продуктивність виготовлення та забезпечує значну економію металу. Завдяки зміцненню при холодній пластичній деформації є можливість замінити марку матеріалу виробів без зміни їх службових властивостей. В підсумку зменшується собівартість виробів, що робить продукцію конкурентоспроможною. Холодне об'ємне штампування (ХОШ) також дозволяє отримувати вироби з необхідними механічними властивостями здеформованого металу. Визначення параметрів отримання виробів процесами ХОШ та проектування штампного оснащення в теперішній час виконуються на основі виробничого досвіду та експериментальних даних [1, 2]. При холодному видавлюванні порожнистих виробів використовують схеми видавлювання з одночасним прикладанням розтягуювального зусилля до стінки заготовки та видавлювання з роздачею, які дозволяють зменшити зусилля і питомі зусилля видавлювання та підвищити стійкість деформуючого інструменту [3, 4]. Використання комбінованого видавлювання, при якому метал має два ступені свободи течії металу, приводить до інтенсивного пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією донної частини виробу [5]. Однак, комбіноване видавлювання не дозволяє отримати порожнисті вироби з тонкою стінкою. Для зменшення товщини стінки у порожнистих напівфабрикатах, що отримані зворотним або комбінованим видавлюванням, використовують операцію витягування з потоншенням через послідовно розташовані дві чи три матриці. При витягуванні процес формоутворення розподіляється на певну кількість стадій для досягнення необхідної кінцевої товщини стінки, причому кожна наступна стадія починається після завершення попередньої стадії, або при суттєвому зменшенні зусилля на попередній стадії. Для комбінованого видавлювання порожнистих виробів актуальними задачами є встановлення форми та розмірів матриць і пуансонів, які забезпечують одночасну течію металу в прямому та зворотному напрямках, що приводить до зменшення зусилля і питомих зусиль видавлювання та підвищення стійкості деформуючого інструменту. Для витягування з потоншенням мало даних по можливості формоутворення кінцевого виробу без проведення відпалу напівфабрикату, який отриманий комбінованим видавлюванням. Виключення відпалу дозволяє зберегти механічні властивості донної частини порожнистих виробів.

Метою роботи є встановлення розрахунковим шляхом, з використанням методу скінченних елементів (МСЕ), параметрів холодного комбінованого видавлювання та подальшого витягування з потоншення для отримання порожнистого виробу заданої форми та необхідними властивостями здеформованого металу.

Ескіз порожнистого виробу та можливі переходи його штампування показані на рис. 1. На рис. 1а зображений ескіз виробу із сталі 45, який по існуючій технології виготовляється обробкою різанням. Необхідно

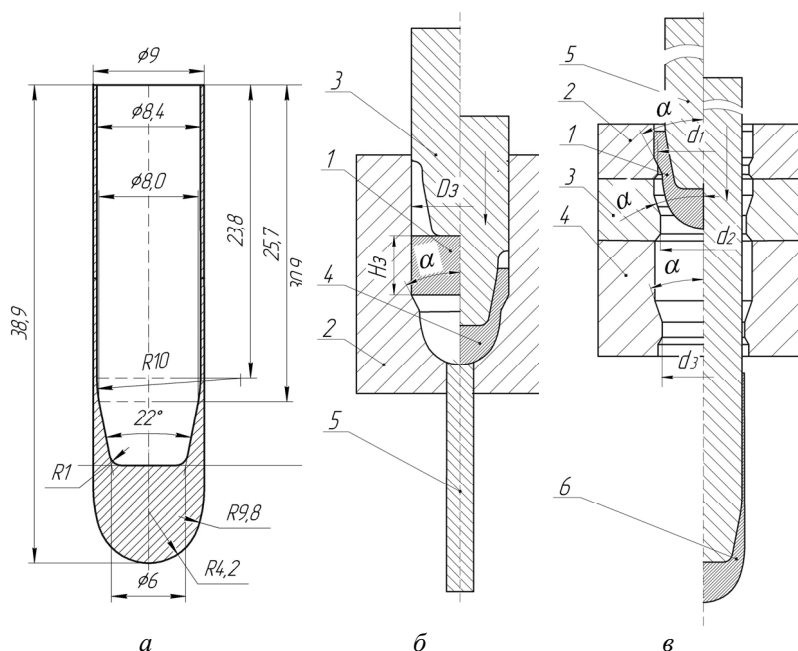


Рис. 1. Ескіз виробу та можливі переходи його штампування:
а – ескіз виробу, б – перший перехід комбіноване видавлювання,
в – другий перехід витягування з потоншенням

було встановити можливість заміни сталі 45 на сталь 10 без зміни механічних властивостей виробу. Сталь 10 має більшу пластичність, тому є можливість використати операції холодного об'ємного та листового штампування з високими ступенями деформації. На першому переході напівфабрикат можна отримати комбінованим видавлюванням (рис. 1б). Ліворуч від вісі симетрії показане вихідне положення, праворуч – в процесі видавлювання. Вихідну циліндричну заготовку 1 діаметром D_3 і висотою H_3 встановлюють в матриці 2 з куту нахилу α , який необхідний для подальшого витягування з потоншенням. Видавлювання виконують за допомогою пуансону 3, а виштовхування напівфабрикату 4 з матриці проводять штовхачем 5. Кінцеву форму та розміри виробу отримують на другому переході витягуванням з потоншенням (рис. 1в).

Напівфабрикат 1 після першого переходу встановлюють в деформуючий інструмент, який складається з трьох послідовно розташованих матриць 2, 3 і 4. Деформування напівфабрикату 1 виконують пуансоном 3. Матриці мають однаковий кут нахилу α та різний внутрішній діаметр d . Найбільший ступінь деформації при такій формі напівфабрикату можна реалізувати в матриці 2 з діаметром d_1 , а найменший – в матриці 3 з діаметром d_3 . Діаметр d_3 відповідає зовнішньому діаметру виробу.

Розрахунковий аналіз проведений шляхом моделювання за допомогою МСЕ в програмному комплексі DEFORM. Для отримання кінцевих розмірів напівфабрикату та виробу вирішували вісесиметричні задачі у пружно-пластичній постановці. Деформуючий інструмент вважався абсолютно жорстким. Враховано зміцнення металу по ступеневій апроксимації діаграми істинних напружень, тертя на контактуючих поверхнях по Кулону з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,08$ та в'язкості руйнування металу при холодному формоутворенні. Використання програми DEFORM також дозволяє враховувати накопичені деформації та напруження при багатоперехідному холодному штампуванні виробів.

Моделювання першого переходу комбінованого видавлювання для отримання напівфабрикату. Було проведено багато розрахунків для наступних змінних параметрів: вихідних заготовок з різними розмірами D_3 і H_3 , кута матриці α та різною висотою місця переходу донної частини напівфабрикату в конусну частину та стінку (див. рис. 1б). При цьому, форма і розміри донної частини та порожнини відповідали кресленню виробу. Оскільки при комбінованому видавлюванні має місце течія металу з двома ступенями свободи, то необхідно було встановити такі параметри формоутворення, які забезпечують одночасну течію металу в двох напрямках, що приводить до мінімального зусилля видавлювання і найменших питомих зусиль на деформуючому інструменті. Крім цього, треба було забезпечити відповідне пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією донної частини виробу для отримання необхідних величин інтенсивності деформацій та напружень. Це дозволить провести заміну марки сталі виробу на сталь 10. Розрахунком було встановлено, що діаметр заготовки $D_3 = 10,8$ міліметрів (мм), висота $H_3 = 7$ мм та кут матриці $\alpha = 27^\circ$ забезпечують вищевказані вимоги до процесу отримання напівфабрикату.

На рис. 2 показані форма та розміри напівфабрикату для різних значень переміщення пуансону при формоутворенні комбінованим видавлюванням. Тонкими лініями зображений деформуючий інструмент. На початку процесу (рис. 2а) заготовка нижнім торцем торкається конусної поверхні матриці, циліндрична поверхня якої відповідає діаметру заготовки. В процесі видавлювання (рис. 2б і 2в) має місце одночасна течія металу в прямому та зворотному напрямках відносно переміщення пуансону. Метал заповнює нижню частину

матриці та витікає в стінку в зазор між матрицею та пуансоном. В кінці процесу видавлювання (рис. 2г) у напівфабрикаті сформовані кінцеві форма та розміри донної частини та конусної частини порожнини, які відповідають кресленню деталі. Загальний вигляд напівфабрикату в розрізі показаний на рис. 3.

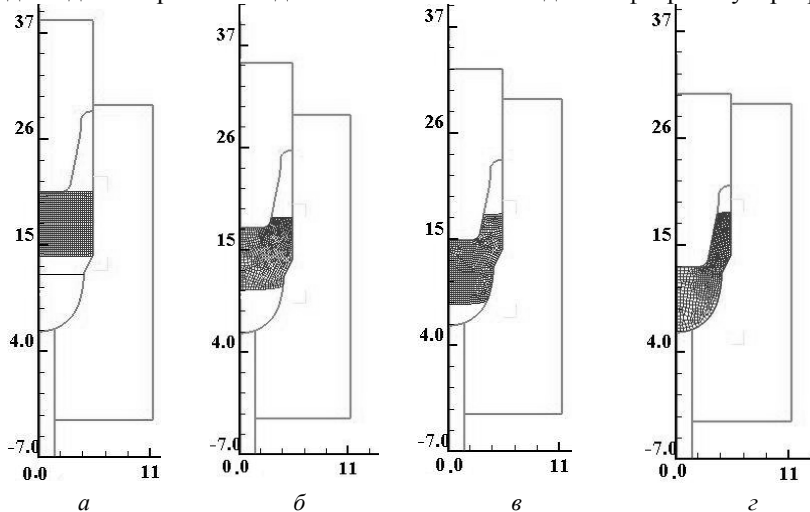


Рис. 2. Форма та розміри в міліметрах напівфабрикату в процесі комбінованого видавлювання при різних значеннях переміщення пуансону: а – 0 мм, б – 3 мм, в – 6 мм, г – 8 мм

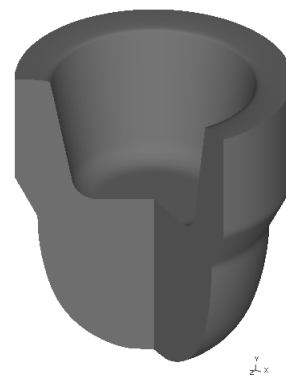


Рис. 3. Загальний вигляд напівфабрикату в розрізі

Для вибору пресового обладнання, проектування штампового оснащення та прогнозування стійкості деформуючого інструменту відповідно необхідно знати зусилля видавлювання та розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті. Питомі зусилля можна оцінити по нормальних напруженнях σ_n на контактуючих поверхнях заготовки та деформуючого інструменту. На рис. 4 наведені зусилля видавлювання та розподіл нормальних напружень на поверхнях інструменту. Залежність зусилля видавлювання від переміщення

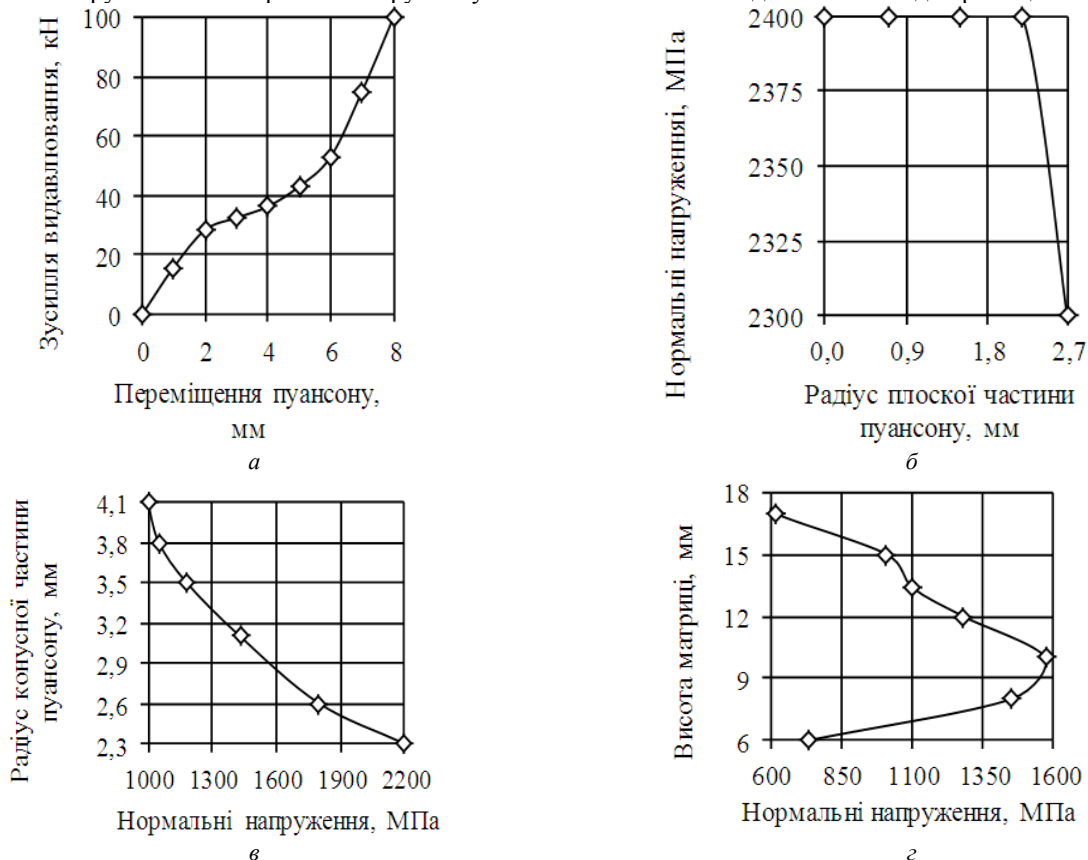


Рис. 4. Зусилля видавлювання та розподіл нормальних напружень σ_n на деформуючому інструменті:

а - залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону, б і в – розподіли напружень σ_n на плоскій та конусній частині пуансону, г – розподіл напружень σ_n на поверхні матриці

пуансону показана на рис. 4а. Зусилля постійно зростає та досягає максимального значення 98 кН в кінці процесу видавлювання. На поверхні плоскої частини пуансону (рис. 4б) величина нормальних напружень складає 2400 МПа. На конусній поверхні пуансону (рис. 4в) найбільші нормальні напруження 2200 МПа виникають на радіусі заокруглення з подальшим зменшенням до величини 1000 МПа в місці переходу конусної поверхні в циліндричну поверхню. На поверхні матриці найбільше значення нормального напруження складо 1570 МПа (рис. 4г).

Розподіли напружень та деформацій у напівфабрикаті при максимальному значенні зусилля видавлювання зображені на рис. 5. Тонкими лініями показаний деформуючий інструмент. По всьому об'єму напівфабрикату виникають стискаючі радіальні напруження σ_r (рис. 5а). В осередку деформації під пуансоном величина цих напружень знаходиться в межах $-1300 \div -1700$ МПа з подальшим зменшенням по абсолютній величині до $-530 \div -730$ МПа в зоні торця стінки. Стискаючі осьові напруження σ_z величиною $-1500 \div -2000$ МПа виникають у напівфабрикаті під пуансоном (рис. 5б). В місці переходу донної частини у стінку величина σ_z знаходиться в межах $-600 \div -840$ МПа. Розподіл тангенціальних напружень σ_θ в осередку деформації напівфабрикату аналогічний розподілу радіальних напружень σ_r (рис. 5в).

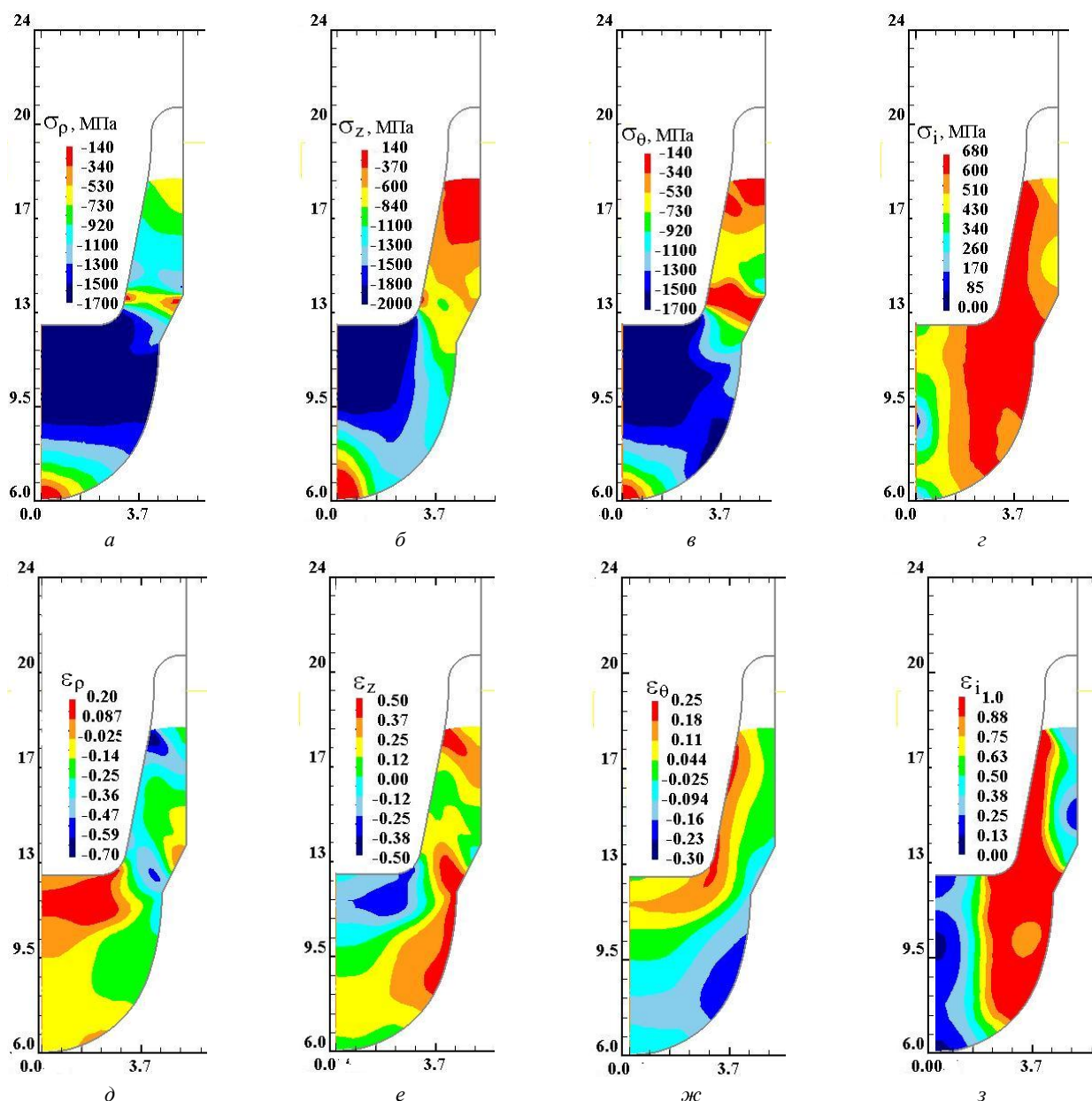


Рис. 5. Розподіли компонент напружень σ та деформацій ϵ у напівфабрикаті:
а – σ_r , б – σ_z , в – σ_θ , г – σ_i , д – ϵ_r , е – ϵ_z , ж – ϵ_θ , з – ϵ_i . Розміри по вісях в міліметрах

Інтенсивність напружень σ_i (рис. 5в) у стінці напівфабрикату знаходиться в межах $510 \div 680$ МПа. У донній частині напівфабрикату отримано $\sigma_i = 340 \div 680$ МПа, що дозволяє прогнозувати величину умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$ здеформованого металу не менше величини 340 МПа. Таким чином, заміна марки сталі виробу із сталі 45 на сталь 10 можлива. У напівфабрикаті під пуансоном виникають розтягувальні радіальні деформації в межах $\varepsilon_r = 0,08 \div 0,2$ (рис. 5д) та стискаючі осьові деформації $\varepsilon_z = -0,25 \div -0,5$ (рис. 5е). Максимальні тангенційні розтягувальні деформації $\varepsilon_\theta = 0,18 \div 0,25$ виникають у внутрішніх шарах металу стінки напівфабрикату (рис. 5ж). В осередку деформації під пуансоном ці деформації складають $\varepsilon_\theta = 0,11 \div 0,18$. Найбільш інтенсивне пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією відбувається в місці переходу донної частини напівфабрикату в стінку, а також у внутрішніх шарах металу стінки. У вказаних місцях інтенсивність деформацій знаходиться в межах $\varepsilon_i = 0,88 \div 1$ (рис. 5з).

На рис. 6 показана залежність зусилля виштовхування напівфабрикату з матриці від переміщення штовхача. Максимальне значення зусилля виштовхування склало 1,73 кН. Послідовність виштовхування напівфабрикату з матриці зображена на рис. 7. Форма та розміри в міліметрах половини напівфабрикату, який отриманий комбінованим видавлюванням, наведені на рис. 8. На торці стінки має місце утворення утяжини. На першому переході отримані необхідні розміри донної частини та конусної порожнини.

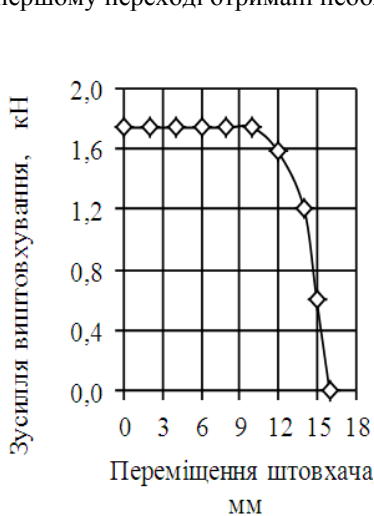


Рис. 6. Залежність зусилля виштовхування від переміщення штовхача

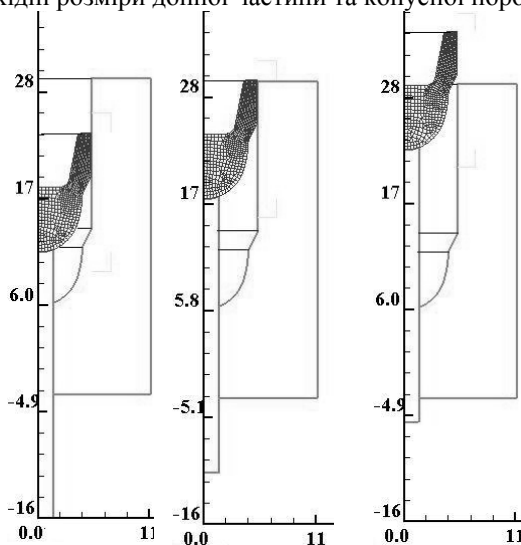


Рис. 7. Послідовність виштовхування напівфабрикату з матриці. Розміри по вісях в міліметрах

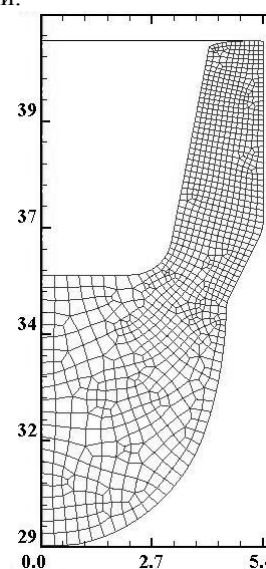


Рис. 8. Форма та розміри в міліметрах половини напівфабрикату



Рис. 9. Залежність зусилля витягування від переміщення пуансону

Наступний перехід – витягування з потоншенням. При моделюванні витягування були враховані накопичені деформації та напруження, які виникли на стадії отримання напівфабрикату. Витягування виконували пуансоном з циліндричною частиною діаметром 8,6 мм, а конусна частина відповідала розмірам порожнини напівфабрикату. Розрахункова залежність зусилля витягування з від переміщення пуансону приведена на рис. 9. На графіку видно три стадії формоутворення кінцевого виробу. Найбільша величина зусилля 25 кН отримана при потонненні стінки в першій із трьох послідовно розташованих матриць. В цій матриці отриманий найбільший ступінь деформації: зовнішній діаметр зменшився з 10,8 мм до 9,8 мм. Максимальна величина зусилля в другій матриці склала 14,3 кН. Відбулося подальше зменшення зовнішнього діаметру з 9,8 мм до 9,3 мм. В третій матриці при найбільшій величині зусилля 11 кН отримані кінцеві розміри виробу. Форма та розміри заготовки для різних величин переміщення пуансону при витягуванні з потоншенням

приведені на рис. 10. Загальний вигляд виробу в розрізі зображений на рис. 11.

На рис. 12 показані розподіли інтенсивності деформацій ε_i , ступеню використання ресурсу пластичності ψ у здеформованому металі та форма і розміри половини виробу. Найбільше пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією відбувається у стінці виробу де отримані найбільші величини

інтенсивності деформацій (рис. 12а). При цьому ступінь використання ресурсу пластичності досягає значення $\psi = 0,9$ (рис. 12б). Тому формоутворення виробу відбувається без руйнування.

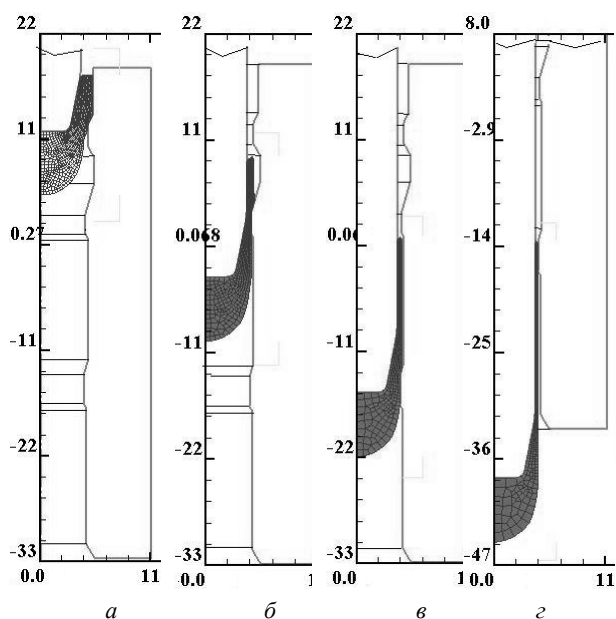


Рис. 10. Форма та розміри в міліметрах деформованих заготовок при витягуванні при різних величинах переміщення пуансону: а – 1 мм, б – 40 мм, в – 56 мм, г – 74 мм



Рис. 11. Загальний вигляд виробу в розрізі

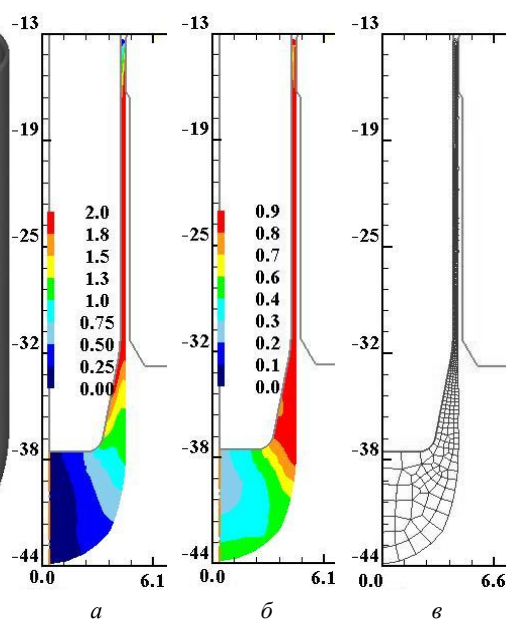


Рис. 12. Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i (а), ступеню використання ресурсу пластичності ψ (б) та форма і розміри виробу (в)

Кінцева форма та розміри половини виробу зображені на рис. 12в. Товщина стінки циліндричної частини виробу склала 0,3 мм.

Таким чином, в результаті проведених розрахунків отримані всі необхідні дані для розроблення технології та штампного оснащення для комбінованого витягування та подальшого витягування з потоншенням: зусилля деформування - для вибору пресового обладнання, розподіл питомих зусиль – для проектування штампного оснащення, форма і розміри напівфабрикату та кінцевого виробу – для прогнозування механічних властивостей деформованого металу.

Висновки.

Показана можливість виготовлення порожнистого виробу заданої форми з необхідними властивостями деформованого металу з використанням операцій холодного об'ємного та листового штампування. На першому переході холодним комбінованим видавлюванням отримують напівфабрикат з кінцевими розмірами донної частини та відповідним пропрацюванням структури металу холодною пластичною деформацією в ній. На другому переході витягуванням з потоншенням виготовляють кінцеву форму та розміри виробу. Методом скінченних елементів встановлені параметри видавлювання, які забезпечують одночасну течію металу в двох напрямках та формоутворення напівфабрикату при знижених силових режимах. З урахуванням накопичених деформацій після видавлювання проведено моделювання другого переходу витягування з потоншенням в трьох послідовно розташованих матрицях. Встановлена залежність зусилля витягування від переміщення пуансону, розподіл інтенсивності деформацій та ступеню використання ресурсу пластичності у стінці виробу.

Анотація. Показана можливість отримання изделия с полостью заданной формы с необходимыми свойствами деформированного металла. На первом переходе полуфабрикат получают холодным комбинированным выдавливанием, на втором переходе выполняется вытяжка с утонением для уменьшения толщины стенки и увеличения высоты изделия. Методом конечных элементов установлены параметры выдавливания, которые обеспечивают одновременное течение металла в двух направлениях и формообразование изделия при сниженных усилиях, а также необходимые размеры последовательно расположенных матриц для вытяжки с утонением. Определены силовые режимы выдавливания, распределения удельных усилий на деформирующем инструменте, усилия выталкивания полуфабриката с матрицы, напряжения и деформации в полуфабрикате. Выдавливание позволило получить соответствующую проработку структуры металла холодной пластической деформацией в донной части будущего изделия с достижением необходимого предела текучести в деформированном металле. Для вытяжки с утонением, с учетом накопленных деформаций, выявлены зависимость усилия от перемещения пуансона, конечные форма и размеры изделия, а также интенсивность деформации и степень использования ресурса пластичности в деформированном металле стенки изделия.

Ключевые слова: изделие с полостью, комбинированное выдавливание, вытяжка с утонением, метод конечных элементов, усилие деформирования, полуфабрикат, напряжения и деформации, конечные форма и размеры изделия

Abstract: *There are shown the possibility of obtaining products with a cavity given shape with the desired properties of the deformed metal. The half-stuff is obtained by cold combined extruding at the first transition, performed ironing for reducing of the wall thickness and increasing the height of the product at the second transition. There're identified the parameters of extruding by the finite element method, which provide simultaneous flow of metal in two directions and shaping products at reduced forces, as well as the required size of successive dies for ironing. Also there're identified the force modes of extruding, distribution of specific forces on the deforming tools, ejection's forces of half-stuff from die, stress and strain in the metal of half-stuff. Extruding allowed to obtain the appropriate treatment of metal structure in the bottom part of the future product by cold plastic deformation with achieving the desired yield strength in deformed metal. Identified dependence on the forces of movement of the punch, the final shape and size of the product, as well as strain intensity and degree of using of resource of plasticity in the deformed metal in the wall products for ironing in view of the accumulated strain.*

Keywords: *product with a cavity, combined extrusion, ironing, finite element method, deformation's force, half-stuff, stress and strain, the final shape and size of the product.*

Бібліографічний список використаної літератури

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т/Ред. Совет: Е.И. Семенов (предс.) и др. –М.: Машиностроение, 1987, т.3. Холодная объемная штамповка /Под ред. Г.А. Навроцкого. 1987. - 384 с.
2. Белошенко В.А. Теория и практика гидроэкструзии / В.А. Белошенко, В.Н. Варюхин, В.З. Спусканюк - К.: Наукова думка, 2007. – 246 с.
3. Калюжний В.Л. Визначення зусилля прямого холодного видавлювання з роздачею прямокутних профілів / В.Л. Калюжний., О.В.Калюжний, В.М. Горностай та ін. // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов, Краматорск, ДГМА, 2009, № 1(20). – С. 67-75.
4. Калюжний В.Л. Розрахунковий аналіз методом скінчених елементів процесу холодного видавлювання з різним ступенем деформації порожнистих виробів із сталі 20 з прикладанням розтягуючого зусилля до заготовки / В.Л.Калюжний, С.Ф. Сабол, В.В. Піманов // Вестник НТУУ КПИ. Машиностроение, Київ, 2009, № 56. – С. 300-305.
5. Калюжний В.Л. Порівняльний аналіз процесів зворотного видавлювання і прямого видавлювання з роздачею виробів з порожниною постійного діаметру / В.Л. Калюжний, Л.І. Алієва, І.П. Куліков // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов, Краматорск, ДГМА, 2013, № 4(37). - С. 87-92
6. Калюжний В.Л. Математичне моделювання комбінованого видавлювання заготовок із сталі 20 / В.Л. Калюжний, В.В. Піманов, Є.С. Носар // Вестник НТУУ КПИ. Машиностроение, Київ. 2010, №59. – С. 43-46.

References

1. Kovka i shtampovka: Spravochnik. V 4-h t/Red. Sovet: E.I. Semenov (preds.) i dr. Moscow: Mashinostroenie, 1987, t.3. Holodnaya ob'emnaya shtampovka. Pod red. G.A. Navrotskogo. 1987. 384 p.
2. Beloshenko V.A. Teoriya i praktika gidroekstruzii. V.A. Beloshenko, V.N. Varyuhin, V.Z. Spuskanyuk Kyiv: Naukova dumka, 2007. 246 p.
3. Kalyuzhniy V.L. Vznachennya zusylyya pryamogo holodnogo vidavlyuvannya z rozdacheyu pryamokutnih profiliv. V.L. Kalyuzhniy., O.V.Kalyuzhniy, V.M. Gornostay ta in. Obrabotka materialov davlenim. Sbornik nauchnyih trudov, Kramatorsk, DGMA, 2009, no 1(20). P. 67-75.
4. Kalyuzhniy V.L. Rozrahunkoviy analiz metodom skinchenih elementiv protsesu holodnogo vidavlyuvannya z riznim stupenem deformatsiyi porozhnistih virobiv iz stali 20 z prikkladanniam roztyaguyuchogo zusylyya do zagotovki. V.L.Kalyuzhniy, S.F. Sabol, V.V. Pimano. Vestnik NTUU KPI. Mashinostroenie, Kyiv, 2009, no 56. P. 300-305.
5. Kalyuzhniy V.L. Porivnyalniy analiz protsesiv zvorotnogo vidavlyuvannya i pryamogo vidavlyuvannya z rozdacheyu virobiv z porozhninoyu postynogo diametru. V.L. Kalyuzhniy, L.I. Alieva, I.P. Kulikov. Obrabotka materialov davlenim. Sbornik nauchnyih trudov, Kramatorsk, DGMA, 2013, no 4(37). P. 87-92.
6. Kalyuzhniy V.L. Matematichne modelyuvannya kombinovanogo vidavlyuvannya zagotovok iz stali 20. V.L. Kalyuzhniy, V.V. Pimanov, E.S. Nosar. Vestnik NTUU KPI. Mashinostroenie, Kyiv. 2010, no 59. P. 43-46.

Подана до редакції 20.04.2015