

Калюжний О. В.
Калюжний В. Л.
Левченко В. М.

ВІДБОРТУВАННЯ ОТВОРУ В ДОННІЙ ЧАСТИНІ ПОРОЖНИСТОГО НАПІВФАБРИКАТУ ПІСЛЯ ВИТЯГУВАННЯ

В статті представлено результати дослідження, отримані за допомогою методу скінченних елементів і програми DEFORM при моделюванні процесу вісесиметричного відбортування з утворенням борту по контуру отвору у донній частині круглого порожнистого напівфабрикату, витягнутого з листової заготовки із сталі AISI-1010COLD. Враховано потоншення та деформації у донній частині після витягування. Використано пружно-пластичну модель металу. Досліджено вплив радіусу матриці на параметри відбортування. Виконано аналіз формоутворення відбортуванням та вилучення пуансону із борта. Отримано залежності зусиль відбортування і вилучення від переміщення пуансону. Показано, що зменшення радіусу матриці призводить до зростання зусиль відбортування, яке досягає максимуму при різних переміщеннях пуансонів. З урахуванням пружної деформації визначено форму і розміри бортів. Встановлено, що при відбортуванні має місце викривлення і потоншення стінки бортів. Викривлення, потоншення та пружна деформація стінки збільшуються при зменшенні радіусу матриці. Отримано розподіли компонент напружень при максимальній величині зусиль відбортування. Показано, що при відбортуванні найбільші значення мають розтягувальні тангенціальні напруження. Визначено розподіли компонент кінцевих деформацій і ступеню використання ресурсу пластичності у zdeформованому металі бортів. Встановлено, що радіус матриці несуттєво впливає на деформований стан при відбортуванні, а ресурс пластичності практично вичерпується у внутрішніх і зовнішніх шарах металу в області торців стінок бортів. Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією у бортах оцінено за величиною інтенсивності деформацій. За даними моделювання спроектовано і виготовлено штамп для відбортування. Проведено експерименти по відбортуванню на гідравлічному пресі. Результати експериментів показали узгодженість з розрахунковими даними.

Ключові слова: порожнистий напівфабрикат, відбортування отвору, метод скінченних елементів, зусилля, напруження, деформації, ресурс пластичності.

Раціональна технологія виготовлення ємностей різного об'єму для нагрівання води включає наступні операції. Шляхом витягування за один перехід з листових заготовок отримують порожнисті напівфабрикати з подальшою обрізкою торців стінок. В одному із напівфабрикатів на вісі донної частини виконують отвір та здійснюють відбортування – операцію по утворенню борта по контуру отвору. Потім за допомогою зварювання порожнистого напівфабрикату і напівфабрикату з бортом їх з'єднують між собою для утворення ємності.

Визначення параметрів відбортування на основі виробничого досвіду достатньо добре описано в джерелах [1–3]. Під час відбортування відбувається потоншення стінки борту. При цьому має місце відхід стінки борта від поверхні матриці при вилученні пуансону, що призводить до місцевого викривлення стінки. Зменшення різновисочинності стінки борту, усунення викривлення стінки та створення можливості отримання товщини стінки, яка дорівнює товщині заготовки, можна забезпечити шляхом використання попередньо спрофільованої заготовки [4]. Попереднє профілювання заготовки здійснюють при отриманні отвору для відбортування.

Використання методу скінченних елементів (МСЕ) для моделювання відбортування дозволяє встановити параметри такого процесу та визначити форму і розміри бортів. В роботі [5] МСЕ в пружно-пластичній постановці було використано для розрахунку відбортування отворів у круглих заготовках із маловуглецевої сталі. Показано можливість прогнозування граничного формоутворення і форми бортів. Результати моделювання порівняно з даними експериментів.

Авторами [6] за допомогою МСЕ досліджено вплив якості поверхні отвору на відбортування бортів. Низька якість поверхні призводить до утворення тріщин при відбортуванні, а покращена якість забезпечує збільшення висоти бортів.

З використанням пружно-пластичної моделі МСЕ та експериментального аналізу в джерелі [7] було досліджено вплив притискання заготовки на процес відбортування отворів

в алюмінієвому сплаві. Результати експериментів продемонстрували, що скінченно-елементна модель може бути використана для визначення відповідних умов отримання заготовки в кожному конкретному випадку відбортування.

Пружно-пластична скінченно-елементна модель з урахуванням анізотропії разом з експериментами та аналітичними розв'язками була проаналізована в роботі [8] по відбортуванню отворів в тонколистовому металі. Досліджено вплив діаметру отвору на геометричні параметри бортів і запропоновано практичні діаграми для визначення параметрів відбортування.

Новий і гнучкий процес інкрементного відбортування отворів в листі із AA7075-O досліджено в джерелі [9]. При такому відбортуванні, як показало числове моделювання, спостерігається покращення формоутворення бортів, але має місце низька якість бортів та суттєво збільшується час на відбортування.

Авторами [10] було створено скінченно-елементну модель і перевірено шляхом порівняння з експериментальними результатами для дослідження відбортування отворів і утворення бортів. Всебічно проаналізовано навантаження, течію металу та розподіл пошкоджень під час процесу формоутворення, а також виявлено взаємозв'язок між товщиною заготовки і товщиною стінки та висотою борту.

За допомогою числового моделювання та експериментів в роботі [11] розглянуто високошвидкісне відбортування отворів в заготовках із алюмінієвого сплаву AA7075. Таке відбортування призводить до усунення викривлення стінки та збільшення висоти бортів.

З аналізу літературних джерел слідує, що для визначення параметрів відбортування бортів і встановлення їх розмірів необхідно виконувати моделювання МСЕ з використанням пружно-пластичної моделі металу для конкретних розмірів борта в деталі.

Метою роботи є визначення за допомогою МСЕ параметрів відбортування борту у віссиметричному порожнистому напівфабрикаті із маловуглецевої сталі. Завданнями досліджень передбачено встановлення впливу радіусу матриці на зусилля відбортування і зусилля вилучення пуансону із zdeформованої заготовки, форму і розміри бортів, напружено-деформований стан при відбортуванні. Також необхідно провести експериментальні дослідження з отримання бортів у напівфабрикаті та виготовлення ємності для нагрівання води.

Розміри напівфабрикату з отвором для відбортування наведено на рис. 1. Розрахунки були проведені за допомогою моделювання з використанням скінченно-елементної програми

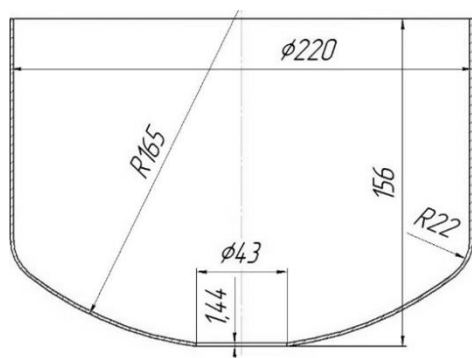


Рис. 1. Ескіз напівфабрикату з отвором для відбортування

DEFORM, циліндричної системи координат та пружно-пластичної моделі металу. Швидкість деформування (швидкість переміщення пуансону) складала $V_0 = 2$ мм/с. Тертя на контактуючих поверхнях з абсолютно жорстким деформуючим інструментом було враховано по Кулону з величиною коефіцієнту тертя $\mu = 0,08$. Досліджено вплив радіусу матриці величиною 3, 5 і 7 мм.

Виконано моделювання процесів відбортування і вилучення пуансонів із zdeформованого напівфабрикату. Розрахункові схеми в розрізі на початку і в кінці відбортування та після вилучення пуансону зображено на рис. 2. На рис. 2, а показано схему на початку відбортування. Порожнистий напівфабрикат 1, який отримано витягуванням, та має отвір розмі-

щено в матриці 2 з притискачем 3. При опусканні пуансону 4 із сферичним торцем здійснюється відбортування отвору з отриманням борту 5 (рис. 2, б). Вилучення пуансону відбувається при його зворотному переміщенні (рис. 2, в).

Силкові режими при відбортуванні наведено на рис. 3. Залежність зусилля відбортування від переміщення пуансону зображено на рис. 3, а. Збільшення радіусу матриці призводить до зменшення зусилля відбортування та зростання переміщення пуансону, при якому зусилля відбортування досягає максимального значення. Для відбортування в матриці з $R = 3$ мм

це значення складо 17,3 кН при переміщенні пуансону 20 мм, для $R = 5$ мм отримано 15,3 кН при переміщенні пуансону 18 мм, а для $R = 7$ мм – 14,6 кН при переміщенні 16 мм.

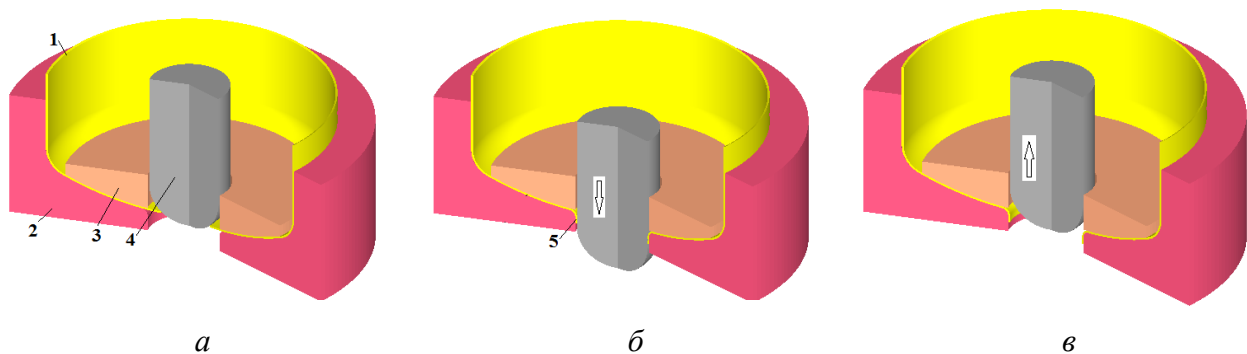


Рис. 2. Розрахункові схеми в розрізі при відбортуванні:

a – на початку відбортування, *б* – в кінці відбортування, *в* – після вилучення пуансону

Залежності зусилля вилучення пуансонів від їх зворотного переміщення зображено на рис. 3, *б*. Найбільші значення зусилля вилучення виникають на початку зворотного переміщення пуансонів і досягають величин, які складають 11 % від зусилля відбортування.

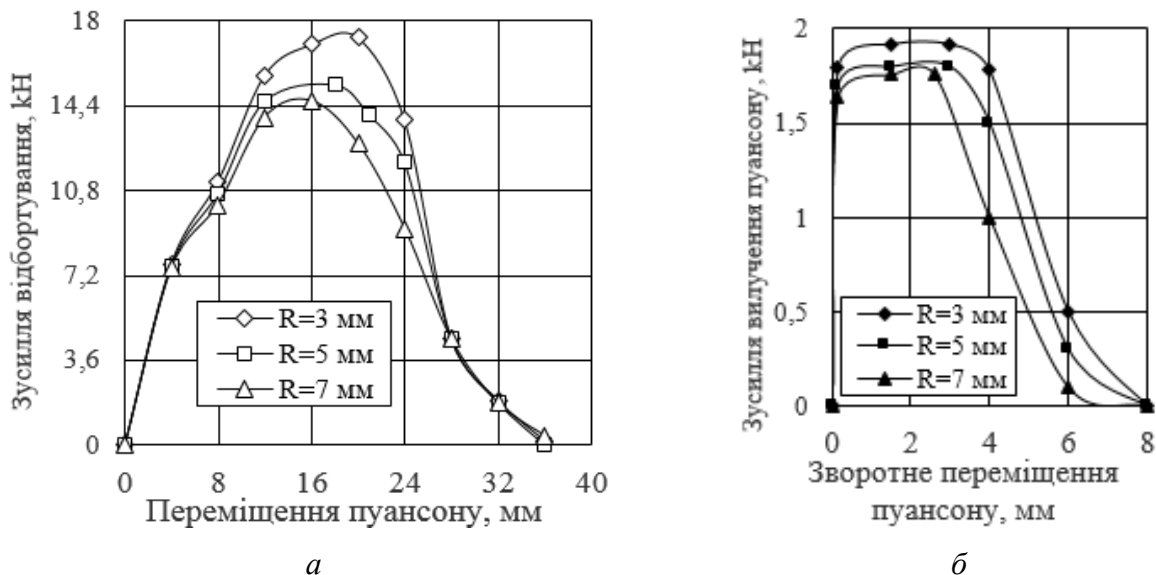


Рис. 3. Зусилля при відбортуванні:

a – залежність зусилля відбортування від переміщення пуансонів, *б* – залежність зусилля вилучення пуансонів від їх зворотного переміщення

Форму і розміри бортів після відбортування в матрицях з різним радіусом заокруглення R зображено на рис. 4. Наведено в міліметрах розміри товщини стінок (L) та відхилення торців стінок (I) від поверхонь матриць після вилучення пуансонів. Радіус R практично не впливає на форму і розміри бортів. На самому радіусі заокруглення матриці товщина стінки зменшується до $L = 1,4$ мм. Циліндрична частина бортів має товщину $L = 1,29$ мм, а в області торцю отримано $L = 1,19$ мм. Після вилучення пуансону із борту торець стінки має відставання від матриці (викривлення) $I = 0,29$ мм.

Напружений стан у zdeформованому металі визначено при максимальному зусиллі відбортування. На рис. 5 представлено розподіли компонент напружень у zdeформованому борту при відбортуванні в матриці з $R = 5$ мм. Розподіл осьових напружень σ_z зображено на рис. 5, *a*. В зоні контакту з пуансоном виникають стискаючі напруження у межах $\sigma_z = -470$ – 600 МПа.

В іншій частині борта отримано розтягувальні напруження σ_z , максимальні значення яких знаходяться у зовнішніх шарах металу циліндричної частини стінки та досягають величин $\sigma_z = 320\text{--}450$ МПа.

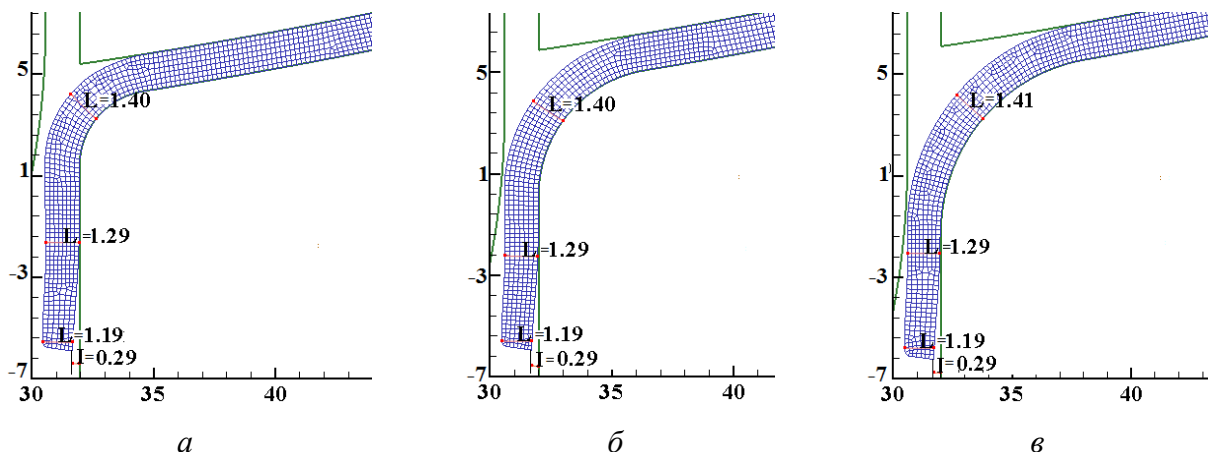


Рис. 4. Форма і розміри бортів після відбортування в матрицях з різним радіусом заокруглення R :

$a - R = 3$ мм, $b - R = 5$ мм, $v - R = 7$ мм

Розподіл радіальних напружень σ_r наведено на рис. 5, б. У більшій частині борта ці напруження стискаючі і досягають значень у межах $\sigma_r = -460\text{--}600$ МПа в шарах металу на радіусі матриці. У внутрішніх шарах в цьому місці отримано розтягувальні напруження $\sigma_r = -370\text{--}510$ МПа. Тангенціальні напруження у zdeформованому борту розтягувальні та досягають максимальних значень $\sigma_\theta = 520\text{--}650$ МПа в області торцю борта (рис. 5, в). В шарах металу на радіусі матриці такі напруження стають стискаючими у межах $\sigma_\theta = -270\text{--}410$ МПа.

Розподіл інтенсивності напружень σ_i наведено на рис. 5, г. В області торцю борта отримано $\sigma_i = 480\text{--}550$ МПа з подальшим зменшенням до $\sigma_i = 340\text{--}550$ МПа по довжині борту у місці, яке розташоване на радіусі матриці.

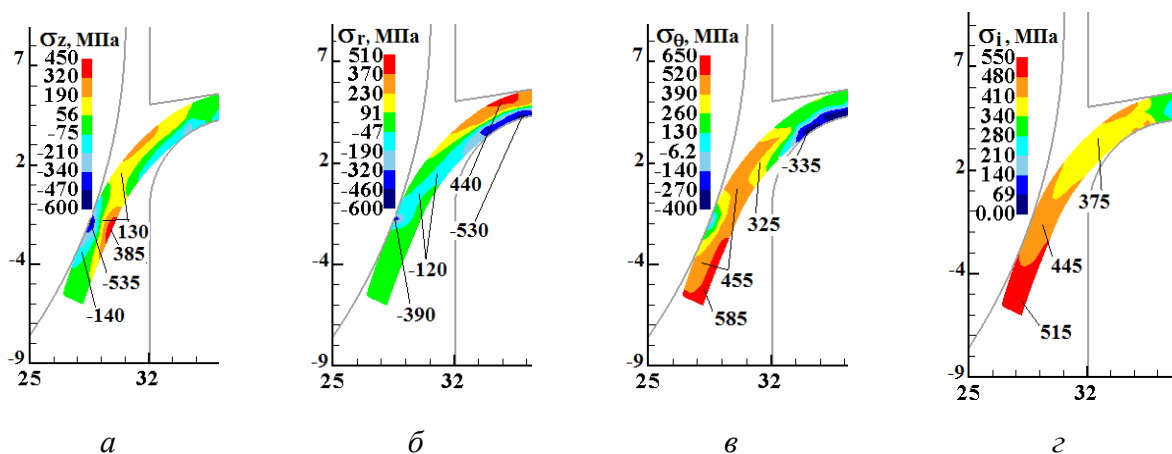


Рис. 5. Розподіли компонент напружень при максимальному зусиллі відбортування в матриці з $R = 5$ мм:

$a - \sigma_z$, $b - \sigma_r$, $v - \sigma_\theta$, $g - \sigma_i$

Розподіли компонент деформацій та ступеню використання ресурсу пластичності у металі борта після відбортування в матриці з $R = 5$ мм наведено на рис. 6. Більшу частину борта займають стискаючі осьові деформації ε_z з досягненням значення $\varepsilon_z = -0,16\text{--}0,2$ в області торцю борта (рис. 6, а). В шарах металу в зоні радіусу матриці отримано невеликі розтягувальні деформації ε_z . Аналогічних величин у борту досягають стискаючі радіальні деформації ε_r

(рис. 6, *а*). Розтягувальні деформації ε_z виникають в верхніх шарах металу стінки на радіусі матриці. По всій довжині циліндричної частини борта отримано розтягувальні тангенціальні деформації ε_θ (рис. 6, *в*). Найбільші значення у межах $\varepsilon_\theta = 0,34\text{--}0,38$ зосереджено в області торцю борта. Аналогічний вигляд розподілу і величини отримано для інтенсивності деформацій ε_i (рис. 6, *г*). Інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією циліндричної частини стінки зростає, починаючи з верхньої зони цієї частини.

Результатом напружено-деформованого стану є розподіл ступеню використання ресурсу пластичності ψ у zdeформованому металі борта (рис. 6, *д*). Найбільші величини у межах $\psi = 0,85\text{--}0,97$ отримано в шарах металу зі сторони внутрішньої і зовнішньої поверхонь борта. Виникнення тріщин починається при $\psi = 1$. Таким чином формоутворення борту відбувається без руйнування металу.

На основі результатів моделювання було спроектовано і виготовлено деформуючий інструмент для виконання відбортування в існуючому штампі для витягування порожнистих напівфабрикатів, з яких виготовляється ємність для нагрівання води. На рис. 7 зображено конструкцію штампі для проведення експериментальних досліджень по відбортуванню. Штамп складається з нижньої 1 та верхньої 2 плит. На плиті 1 встановлено чотири опори 3, які вкручено в матрицю для витягування 4, та зафіксовано гвинтами 18. На матриці 4 розміщено притискач 5 та закріплено гвинтами 15. В нижній частині матриці 4 прикріплено болтами 16 чотири корпуси 6, в яких розміщено чотири рухомі повзушки 7, що спираються на пружини 17. Також на плиті 1 встановлено матрицю для відбортування 8 і зафіксовано гвинтами 18. До верхньої плити 2 прикріплено втулку 9 за допомогою гвинта 10, який вкручено в пуансон для відбортування 11. Пуансон 11 спирається на плиту 12. В плиті 12 розміщено чотири гвинти 19 для утримання притискача 13. Зусилля притискання порожнистого напівфабрикату до матриці 8 при відбортуванні створюється поліуретановим кільцем 14.

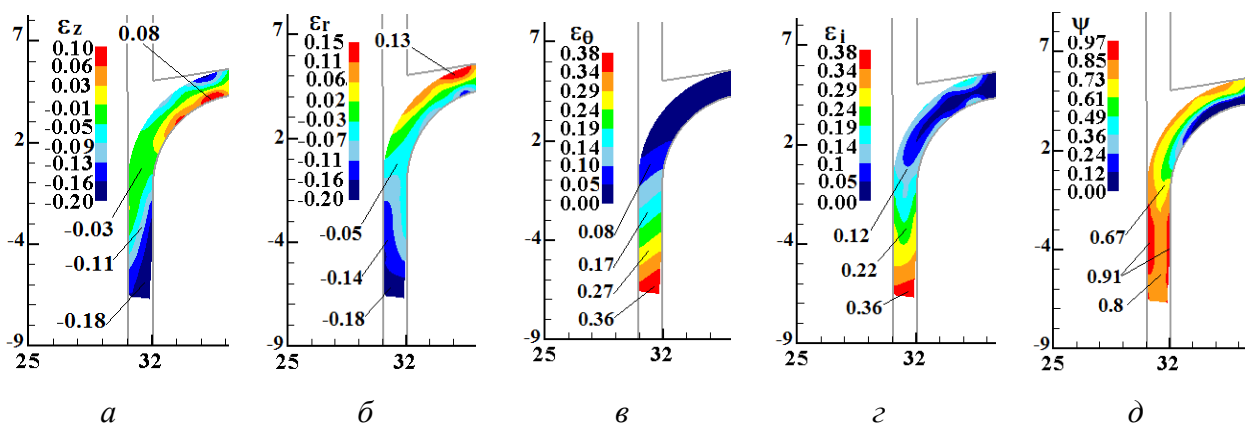


Рис. 6. Розподіли осьових ε_z , радіальних ε_r , тангенціальних ε_θ деформацій та інтенсивності деформацій ε_i і ступеню використання ресурсу пластичності ψ у борту після відбортування в матриці з $R = 5$ мм:

а – ε_z , *б* – ε_r , *в* – ε_θ , *г* – ε_i , *д* – ψ

На рис. 8 представлено експериментальне оснащення для отримання порожнистих напівфабрикатів і виконання відбортування, отримані напівфабрикати та ємність для нагрівання води. Штамп для витягування і виконання відбортування, який встановлено на гідравлічному пресі ДБ2432 зображено на рис. 8, *а*. Порожністі напівфабрикати після витягування показано на рис. 8, *б*. На рис. 8, *в* наведено матрицю з радіусом заокруглення $R = 5$ мм і пуансон для здійснення відбортування. Напівфабрикати після відбортування бортів наведено на рис. 8, *г*. Руйнування бортів при відпрацюванні відбортування не спостерігалось. Ємність для нагрівання води, яка утворена зварюванням напівфабрикатів після витягування і відбортування зображено на рис. 8, *д*.

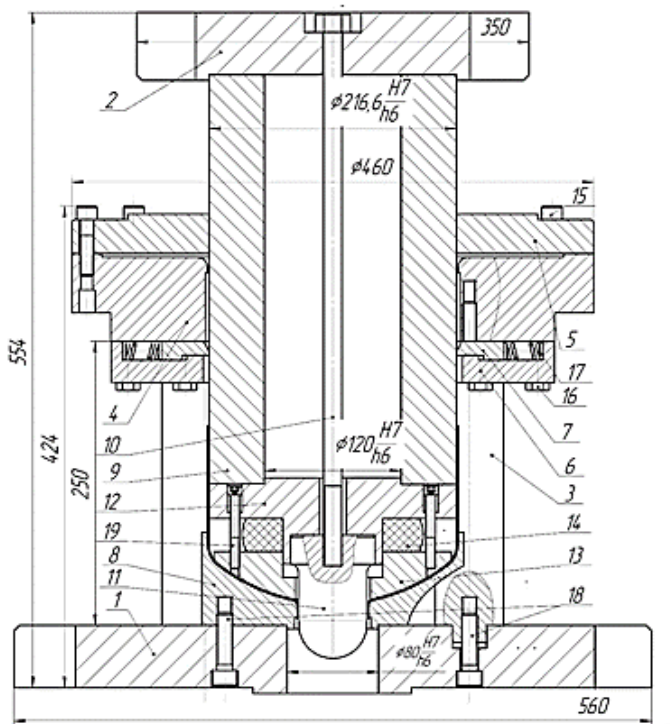


Рис. 7. Конструкція штампу для відбортування борта у порожнистому напівфабрикаті з отвором

Фотографію фрагменту розрізаної донньої частини з бортом з позначеннями розмірів стінки в міліметрах показано на рис. 9. Наведені розміри стінки практично не відрізняються від результатів моделювання (див. рис. 4, б).

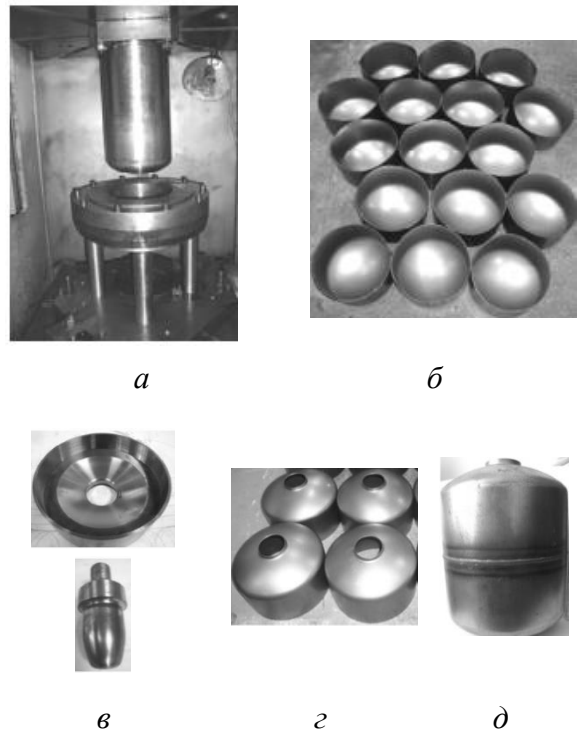


Рис. 8. Експериментальне оснащення, отримані напівфабрикати та ємність для нагрівання води

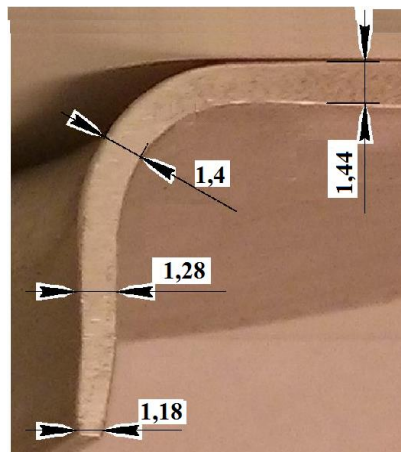


Рис. 9. Фрагмент розрізаної донньої частини з бортом

ВИСНОВКИ

За допомогою МСЕ і пружно-пластичної моделі металу в програмному комплексі DEFORM проведено розрахунковий аналіз процесу відбортування бортів у вісесиметричних порожнистих напівфабрикатах. Досліджено вплив радіусу матриці на силові параметри формоутворення бортів та напружено-деформований стан і ресурс пластичності металу.

Встановлено залежності зусиль відбортування від переміщення пуансонів та залежності зусиль вилучення пуансонів від їх зворотного переміщення. Збільшення радіусу заокруглення матриці призводить до зменшення зусиль відбортування бортів і вилучення пуансонів.

Із врахуванням пружної деформації після вилучення пуансонів визначено форму і розміри бортів. При відбортуванні відбувається потоншення стінки по довжині бортів та викривлення торцю бортів. Радіус матриці не впливає на розміри циліндричних частин бортів та викривлення торців.

Виявлено розподіли напружень при максимальній величині зусилля відбортування та кінцевий деформований стан у бортах. Радіус матриці не впливає на деформований стан бортів.

На основі даних моделювання спроектовано і виготовлено деформуючий інструмент для виконання відбортування в існуючому штампі для витягування. Проведені експериментальні дослідження по відбортуванню узгоджуються з даними розрахунків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отделение. 1979. 520 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. Т. 4: Листовая штамповка. Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.). Москва: Машиностроение. 1987. 544 с.
3. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка. Ред. Л.И. Рудман. Москва: Машиностроение. 1988. 496 с.
4. Калюжний О.В., Калюжний В.Л. Интенсификация формоутворюючих процесів холодного листового штампування. Київ: ТОВ «Сік Груп Україна». 2015. 292 с.
5. Huang Y., Chien K. Influence of the punch profile on the limitation of formability in the hole-flanging process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001.117. 1-2, pp. 43–51. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01060-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01060-3)
6. Thipprakmas S., Jin M., Murakawa M. Study on flanged shapes in fine blanked-hole flanging process (FB-hole flanging process) using finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. 192–193.10, pp. 128–133. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.040>.
7. Krichen A., Kacem A., Hbaieb M. Blank-holding effect on the hole-flanging process of sheet aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011.211. 4, pp. 619–626. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.018>.
8. Soussi H., Masmoudi N., Krichen A. Analysis of geometrical parameters and occurrence of defects in the hole-flanging process on thin sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. 234. 8, pp. 228–242. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.03.027>.
9. Martínez-Donaire A.J., Borrego M., Morales-Palma D., Centeno G., Vallengano C. Analysis of the influence of stress triaxiality on formability of hole-flanging by single-stage SPIF. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. 151. 2, pp. 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.006>.
10. Liu Y., Shu Y., Chen H., Zhang Z. Deformation characteristics analysis of the fine blanking-extrusion flanging process. *Procedia Manufacturing*. 2020. 50, pp. 129–133. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.024>.
11. Wang H., Yan Z., Xiao A., Yu Z., Chen X., Cui X. Improvement of flanging accuracy with small spring back and service performance of AA7075 using high-speed forming. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. 119.15, pp. 790–805: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.107>.

REFERENCES

1. Romanovsky V.P. Handbook of Cold Forming. Leningrad: Mechanical Engineering. 1979. 520 p. (*in Russian*).
2. Forging and stamping: Handbook: In 4 t.; T. 4. Sheet stamping. Ed. E.I. Semenov. Moscow: Mechanical Engineering. 1987. 544 pp. (*in Russian*).
3. Die designer's handbook: Sheet stamping. Ed. L.I. Rudman. Moscow: Mechanical Engineering. 1988. 496 pp. (*in Russian*).
4. Kalyuzhnyi A.V., Kalyuzhnyi V.L. Intensification of form-building processes of cold sheet stamping. Kyiv: Sik Group Ukraine LLC. 2015. 292 p. (*in Russian*).
5. Huang Y., Chien K. Influence of the punch profile on the limitation of formability in the hole-flanging process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. 117. 1-2, pp. 43–51. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01060-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01060-3).
6. Thipprakmas S., Jin M., Murakawa M. Study on flanged shapes in fine blanked-hole flanging process (FB-hole flanging process) using finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. 192–193. 10, pp. 128–133. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.040>.
7. Krichen A., Kacem A., Hbaieb M. Blank-holding effect on the hole-flanging process of sheet aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011.211. 4, pp. 619–626. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.018>.
8. Soussi H., Masmoudi N., Krichen A. Analysis of geometrical parameters and occurrence of defects in the hole-flanging process on thin sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. 234.8, pp. 228–242. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.03.027>.
9. Martínez-Donaire A.J., Borrego M., Morales-Palma D., Centeno G., Vallengano C. Analysis of the influence

of stress triaxiality on formability of hole-flanging by single-stage SPIF. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. 151. 2, pp. 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.006>.

10. Liu Y., Shu Y., Chen H., Zhang Z. Deformation characteristics analysis of the fine blanking-extrusion flanging process. *Procedia Manufacturing*. 2020. 50, pp. 129–133. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.024>.

11. Wang H., Yan Z., Xiao A., Yu Z., Chen X., Cui X. Improvement of flanging accuracy with small spring back and service performance of AA7075 using high-speed forming. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. 119. 15, pp. 790–805: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.107>.

Kaliuzhnyi O., Kaliuzhnyi V., Levchenko V. Hole flanging at the bottom of the hollow semi-finished product after deep drawing.

In the article the research results obtained using the finite element method and the DEFORM program in simulation the process of axisymmetric flanging with forming a flange along the contour of the hole in the bottom part of a circular hollow semi-finished product drawn from a sheet workpiece from AISI-1010COLD steel are presented. Thinning and deformations in the bottom part after drawing were considered. An elastic-plastic model of the metal was used. The influence of the die radius on the flanging parameters is analyzed. An analysis of the shape forming by flanging and punch removing from the flange was carried out. The dependence of the flanging and punch removing forces vs the punch stroke was determined. It was shown that reducing the radius of the die leads to an increasing the flanging force, which reaches a maximum at different punch strokes. The shape and dimensions of the flanges are determined with consideration of the elastic deformation. It was found that during flanging, the flange wall is curved and thinned. Warping, thinning, and elastic deformation of the wall increase with decreasing die radius. The distributions of stress components at the maximum value of the flanging force were obtained. It was shown that during flanging, tensile tangential stresses have the highest values. The distributions of the components for the final deformations and the degree of plasticity resource usage in the deformed flange metal were determined. It was found that the radius of the die has an insignificant effect on the deformed state during flanging, and the plasticity resource is practically exhausted in the inner and outer layers of the metal in the area of the flange wall ends. The working of the metal structure by cold plastic deformation in the flanges was estimated by the value of the effective strain. Based on the simulation data, the dies for flanging were designed and manufactured. The experiments on flanging were performed on a hydraulic press. The results of the experiments showed accordance with the calculated data.

Keywords: hollow semi-finished product, hole flanging, finite element method, force, stress, deformation, plasticity resource.

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

Калюжний Володимир Леонідович – д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ»
Kaliuzhnyi Volodymyr – Dr. Sc, Full Professor, NTUU “KPI”
 E-mail: kwl_2011@ukr.net
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4904-8879>

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

ТОВ «Академія навчання ІТ», м. Київ
 IT Education Academy, Kyiv

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ
 ” NTUU “KPI” – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv

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

Стаття надійшла до редакції 05.03.24 р.