

Калюжний О. В.  
Калюжний В. Л.  
Чучин О. В.

## ВПЛИВ КУТА КОНУСНОГО ПУАНСОНУ НА ВІДБОРТУВАННЯ ОТВОРІВ У ПРОФІЛЬОВАНІЙ ЛИСТОВІЙ ЗАГОТОВЦІ

*В статті методом скінченних елементів і програмного забезпечення DEFORM проведено дослідження впливу кута конусного пуансону на процеси вісесиметричного відборткування отворів у профільованій листовій заготовці із алюмінію AL-3003 COLD. Профільована заготовка отримана шляхом формоутворення отвору видавлюванням з пробиванням перемички і має максимальну товщину біля отвору з подальшим лінійним зменшенням товщини до вихідної на радіусі матриці. Застосування профільованої заготовки приводить до отримання фланцю з постійною товщиною стінки по довжині, яка дорівнює товщині вихідної заготовки. Для моделювання використано пружно-пластичну модель металу. Встановлено залежності зусиль відборткування і вилучення пуансонів від їх переміщення. Пуансон з кутом при вершині конусу 40о забезпечує мінімальне зусилля відборткування. Для такого пуансону визначено розподіли компонент напружень у zdeформованій заготовці при максимальному зусиллі відборткування та розподіли кінцевих компонент деформацій у фланці. Показано форму і розміри фланцю після відборткування та вилучення пуансону. На основі даних моделювання спроектовано і виготовлено штамп з комплектом інструментів для проведення експериментальних досліджень по виготовленню профільованої заготовки і виконанню відборткування. Результати експериментів показали хорошу збіжність з даними моделювання по зусиллях видавлювання, відборткування і розмірах фланцю. При цьому фланець має перевагу в міцності завдяки покращенню макроструктури при утворенні отвору видавлюванням. Отримано можливість значного збільшення висоти циліндричної частини завдяки подальшому виконанню витягування з потоншенням.*

**Ключові слова:** профільована заготовка, відборткування отворів, метод скінченних елементів, зусилля, напруження, деформації, форма і розміри фланцю.

Визначення параметрів відборткування на основі виробничого досвіду достатньо добре описано в джерелах [1–3]. Під час відборткування традиційних листових заготовок відбувається значне потоншення стінок по довжині отриманих фланців та має місце викривлення торця стінки фланцю від поверхні матриці при вилученні пуансону. Зменшення різновтовщинності стінки фланцю, усунення викривлення стінки при відбортванні можна забезпечити шляхом використання профільованої листової заготовки [4]. Профільована заготовка має найбільшу товщину біля отвору з поступовим зменшенням до вихідної товщини на початку радіуса заокруглення матриці. Профільовання заготовки здійснюють шляхом видавлювання при отриманні отвору для відборткування.

Використання методу скінченних елементів (МСЕ) для моделювання відборткування дозволяє встановити параметри такого процесу та визначити форму і розміри фланців.

В роботі [5] МСЕ в пружно-пластичній постановці було використано для розрахунку відборткування отворів у круглих заготовках із маловуглецевої сталі. Показано можливість прогнозування граничного формоутворення і форми фланців. Результати моделювання порівняно з даними експериментів.

Авторами [6] за допомогою МСЕ досліджено вплив якості поверхні отвору на відборткування фланців. Низька якість поверхні приводить до утворення тріщин при відбортванні, а покращена якість забезпечує збільшення висоти фланців.

З використанням пружно-пластичної моделі МСЕ та експериментального аналізу було досліджено вплив притискання заготовки на процес відборткування фланців у алюмінієвому сплаві в джерелі [7]. Результати експериментів продемонстрували, що скінченно-елементна модель може бути використана для визначення відповідних умов утримання заготовки в кожному конкретному випадку відборткування.

Появу та вплив вигладжування в процесі відборткування отворів розглянуто в роботі [8]. Було розроблено пружно-пластичну скінченно-елементну модель для дослідження впливу відношення зазору до товщини при відбортванні. Для листа із алюмінієвого сплаву серії 1000 товщиною 2 мм встановлено критичне значення цього відношення, яке є межею між відборткуванням з розтягуванням та відборткуванням з вигладжуванням. Було визначено навантаження

на пуансоні, кінематику формоутворення і геометрію фланців. Результати моделювання підтверджено експериментальними даними.

В джерелі [9] МСЕ на основі аналізу розподілу напружень використано для дослідження механізму формування фланців прямокутної форми та впливу на цей процес напрямків орієнтації задирок вгору і вниз. Вивчено вплив зазору при пробиванні отвору, товщини фланцю і коефіцієнт відбортування на формоутворення фланцю та його геометричну точність.

Для отримання фланців з більшою висотою в роботі [10] запропоновано новий метод відбортування отворів для товстого листа за допомогою суміщення процесів осаджування і відбортування. Вплив геометричних параметрів на висоту фланця було детально вивчено з використанням МСЕ і програми DEFORM. Проведені експерименти показали хорошу узгодженість з результатами моделювання. Відмічено перевагу в міцності отриманих фланців завдяки зміцненню при подальших процесах механічної обробки і складання в порівнянні з традиційним відбортуванням.

Авторами [11] з використанням МСЕ проведено прогнозування місця руйнування при невісесиметричному розтягуванні фланців із АА 5052. Відмічено великий вплив на деформований стан та тріщиноутворення на торці фланцю мають початкова довжини фланцю та зазор між пуансоном і матрицею. Результати моделювання щодо тріщин і зусиллю на пуансоні співпали з експериментальними даними.

Пружно-пластична скінченно-елементна модель з урахуванням анізотропії разом з експериментами та аналітичними розв'язками була проаналізована в роботі [12] по відбортуванні отворів в тонколистовому металі. Досліджено вплив діаметру отвору на геометричні розміри фланців і запропоновано практичні діаграми для визначення параметрів відбортування.

Здійснено скінченно-елементне моделювання вісесиметричного відбортування фланців у листовому металі в джерелі [13]. Розглянуто традиційне відбортування і поступове формоутворення фланців. Результати моделювання і експериментів представлено з точки зору зміни товщини стінки по висоті фланців.

Авторами [14] продемонстровано, що інкрементне відбортування відповідає поточним вимогам і тенденціям промисловості. Досліджено за допомогою МСЕ вплив радіусу пуансону на відбортування отворів різного діаметру в листах із АА7075-О. Встановлено раціональний час відбортування і розподіл товщини фланцю по довжині.

Новий і гнучкий процес інкрементного відбортування отворів в листі із АА7075-О досліджено в джерелі [15]. При такому відбортуванні, як показало чисельне моделювання, спостерігається покращення формоутворення фланців, але має місце низька якість фланців та суттєво збільшується час на відбортування.

В роботі [16] досліджено дві різні концепції інструментів, які дозволяють виконувати операції поетапного відбортування фланців на високих швидкостях. Перша концепція полягає в використанні одного інструменту, а друга - в використанні чотирьох інструментів, що приводить до підвищення геометричної точності фланців. Відбортування на високих швидкостях не має істотного впливу на показники товщини фланців, величини деформацій, сил та геометричної точності.

Надання деформуючому інструменту у формі лопаті оберտального руху одночасно з поступальним при поетапному відбортуванні фланців, як стверджують автори [17], дозволило суттєво скоротити час на відбортування. Експериментально встановлено підвищення ступеню деформації до руйнування завдяки виникненню деформацій зсуву та підвищення температури заготовки внаслідок тертя при формоутворенні.

Авторами [18] було створено скінченно-елементну модель і перевірено шляхом порівняння з експериментальними результатами для дослідження відбортування отворів і утворення фланців. 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 фланцю.

Вплив підготовки отвору штампуванням, різанням і лазерною обробкою на властивості металу та обмеження при відбортуванні фланців вивчено чисельним моделюванням в програмному забезпеченні PAM-Stamp і експериментально розглянуто в джерелі [19]. Для відбортування використано лист із сталі S420MC товщиною 4 мм. Показано можливість покращення границь відбортування за рахунок використання механічної обробки.

В роботі [20] шляхом термомеханічного моделювання МСЕ визначено вплив високошвидкісного обертання пуансону одночасно з поступальним рухом на температуру в процесі відбортування фланців у заготовці із алюмінієвого сплаву EN AW-6181-T1 товщиною 0,8 мм і порівняно результати з традиційним відбортуванням при поступальному переміщенні пуансону. Моделюванням встановлено збільшення коефіцієнту розширення отвору в першому випадку на 30 %. Експериментально підтверджено зростання на 170 %. Автори пояснюють це виникненням деформацій зсуву при обертанні пуансону.

Порівняння традиційного відбортування фланців з використанням пуансону і матриці і поступового (інкрементного) формоутворення фланців без спеціальної матриці шляхом моделювання МСЕ проведено в роботі [21]. Здійснено оцінку формозміни у листах із AA6061-T6 та порівняно механізми деформації та руйнування у цих двох процесах. Показано, що напружено-деформований стан при інкрементному відбортуванні є дуже нелінійним і непропорційним на відміну лінійному при традиційному відбортуванні. Це приводить до зменшення межі формування в першому випадку.

За допомогою чисельного моделювання та експериментів в роботі [22] розглянуто високошвидкісне відбортування отворів в заготовках із алюмінієвого сплаву AA7075. Таке відбортування приводить до усунення викривлення стінки та збільшення висоти фланців.

З аналізу літературних джерел слідє, що для визначення параметрів відбортування отворів і встановлення розмірів фланців раціонально виконувати моделювання МСЕ з використанням пружно-пластичної моделі металу.

*Метою роботи є визначення за допомогою МСЕ впливу кута конусу пуансону на параметри відбортування отворів у зпрофільованій листовій заготовці. Завданнями досліджень передбачено встановлення впливу вказаного кута на зусилля відбортування і зусилля вилучення пуансонів із zdeформованих заготовок, визначення форми і розмірів фланців та напружено-деформованого стану металу при відбортуванні. Також необхідно провести експериментальні дослідження по відбортуванню фланців та порівняти результати моделювання і експериментів.*

Моделювання по відбортуванню отворів проведено з використанням скінченно-елементної програми DEFORM, циліндричної системи координат та пружно-пластичної моделі металу. Схему відбортування профільованої заготовки з позначеннями приведено на рис. 1.

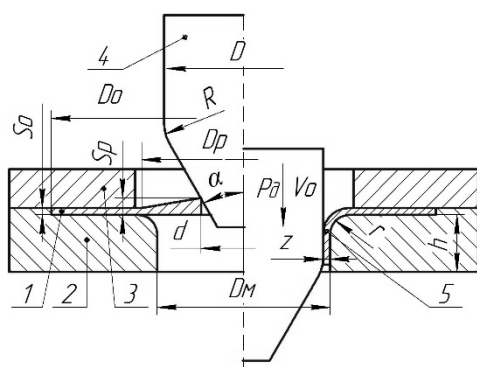


Рис. 1. Схема відбортування профільованої заготовки

Ліворуч від вісі симетрії показано положення заготовки і деформуючого інструменту перед відбортуванням, а праворуч – в процесі відбортування. Попередньо профільовану листову заготовку 1 розміщено в матриці 2 і зафіксовано притискачем 3. Деформування зусиллям  $P_0$  зі швидкістю переміщення  $V_0$  здійснюють пуансоном 4. В результаті відбортування утворюється деталь з фланцем 5. Форму і розміри профільованої заготовки 1 було отримано попереднім моделюванням МСЕ формоутворення отвору видавлюванням з подальшим пробиванням перемички. Форма і розміри такої заготовки забезпечували отримання після відбортування фланцю з постійною товщиною стінки по довжині, яка дорівнювала вихідній товщині заготовки.

Спочатку приведемо результати моделювання по отриманню профільованої заготовки.

На рис. 2 показано в розрізі розрахункові схеми при видавлюванні профільованої заготовки з перемичкою та при пробиванні перемички з отриманням профільованої заготовки з отвором.

Листову заготовку 1 із алюмінію AL-3003COLD діаметром  $D_o = 100$  мм і товщиною  $S_o = 1,5$  мм розміщено на плиті 2 і зафіксовано притискачем 3 (рис. 2, *a*). Притискач 3 має порожнину для отримання у заготовці профілю висотою  $S_p = 2$  мм і діаметром  $D_p = 52$  мм (див. рис. 1). Видавлювання здійснюють циліндричним пуансоном діаметром 22 мм з плоскоконусним торцем, який має плоску частину діаметром 11 мм, конусну частину з кутом при вершині  $176^\circ$  та радіус переходу конусної поверхні в циліндричну розміром 0,2 мм. При переміщенні пуансону 4 отримують профільовану заготовку 5 з перемичкою, яка має мінімальну висоту 0,3 мм (рис. 2*б*). На рис. 2*в* показано профільовану заготовку з перемичкою.

Розрахункову схему на початку пробивання перемички представлено на рис. 2*г*. Профільовану заготовку з перемичкою і накопиченими деформаціями після видавлювання встановлено на матриці 2 і зафіксовано притискачем 3. Пробивання здійснюють пуансоном 4 з діаметром 22 мм, при переміщенні якого відбувається відокремлення перемички 5 і отримується профільована заготовка з отвором 6 (рис. 2*д*). Вигляд профільованої заготовки з отвором показано на рис. 2*е*.

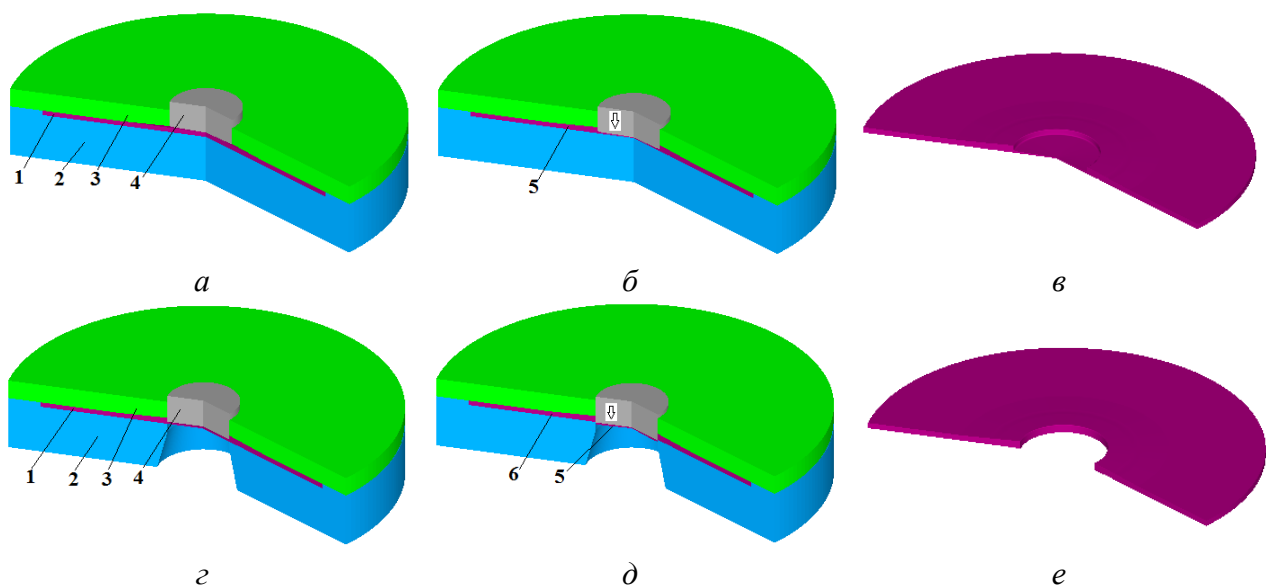


Рис. 2. Розрахункові схеми в розрізі при видавлюванні профільованої заготовки з перемичкою та при пробиванні перемички з отриманням профільованої заготовки з отвором: *a* – схема на початку видавлювання, *б* – схема в кінці видавлювання, *в* – профільована заготовка з перемичкою, *г* – схема на початку пробивання, *д* – схема в кінці пробивання, *е* – профільована заготовка з отвором

Залежності зусиль видавлювання і пробивання перемички від переміщення пуансонів зображено на рис. 3. Зусилля видавлювання постійно зростає і досягає максимального значення 400 кН в кінці процесу (рис. 3*а*). Зменшити зусилля і питомі зусилля при видавлюванні та товщину перемички можна застосуванням процесу штампування обкочуванням. На рис. 2*б* представлено залежність зусилля пробивання перемички від переміщення пуансону. Найбільше зусилля 2,7 кН отримано на проміжній стадії пробивання.

В основному при видавлюванні і частково при пробиванні відбувається пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією. На рис. 4 показано розподіл інтенсивності деформацій у профільованій частині половини заготовки після пробивання перемички. Біля отвору отримано значення у межах  $\epsilon_i = 1,5 \dots 1,8$  і  $\epsilon_i = 2,3 \dots 2,5$ . По середині профілю має місце зона з  $\epsilon_i = 0,5 \dots 0,75$ . Далі ці деформації зменшуються до нульових величин в кінці профілю на діаметрі  $D_p = 52$  мм. Для відновлення пластичності здеформованого металу потрібно перед відборткуванням проводити відпал профільованих заготовок після видавлювання. Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією частини заготовки, яка

підлягає відбортунню, дозволить підвищити механічні властивості фланців, що отримані при подальшому відбортунні отворів.

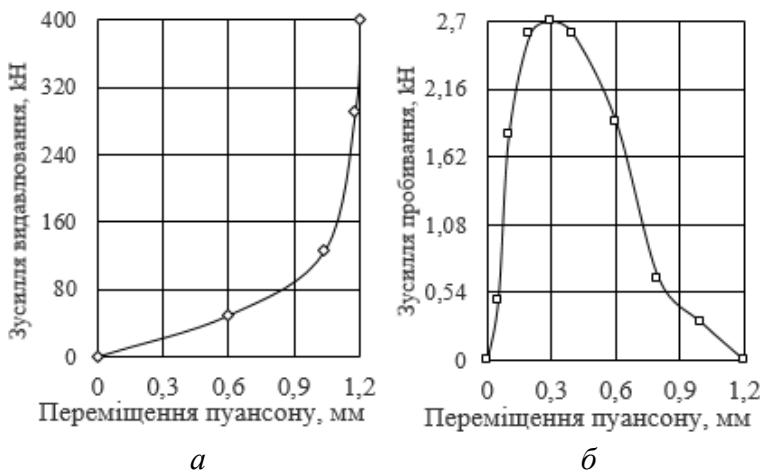


Рис. 3. Залежності зусилля видавлювання і зусилля пробивання перемички від переміщення пуансонів: *а* – зусилля видавлювання, *б* – зусилля пробивання

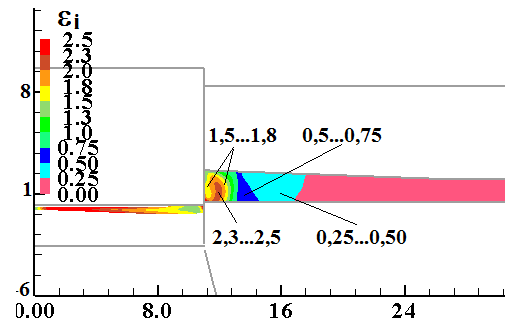


Рис. 4. Розподіл інтенсивності деформацій у профільованій заготовці з отвором

Далі представлено результати моделювання в програмі DEFORM процесів відбортуння отворів у профільованій заготовці з розмірами  $D_o = 100$  мм,  $S_o = 1,5$  мм,  $S_p = 2$  мм,  $D_p = 52$  мм і  $d = 22$  мм (див. рис. 1). Матриця для відбортуння висотою  $H_m = 15$  мм мала діаметр отвору  $D_m = 43$  мм і радіус заокруглення  $r = 7$  мм. Відбортуння виконано конусними пуансонами з кутами при вершині  $\alpha = 10, 15, 20, 25, 30$  і  $40^\circ$  і циліндричними бічними поверхнями діаметром  $D = 40$  мм та з радіусом переходу  $R = 10$  мм. Величина зазор у була  $z = 1,5$  мм. Швидкість деформування (швидкість переміщення пуансону) складала  $V_o = 2$  мм/сек. Тертя на контактуючих поверхнях з абсолютно жорстким деформуючим інструментом було враховано по Кулону з величиною коефіцієнту тертя  $\mu = 0,15$ .

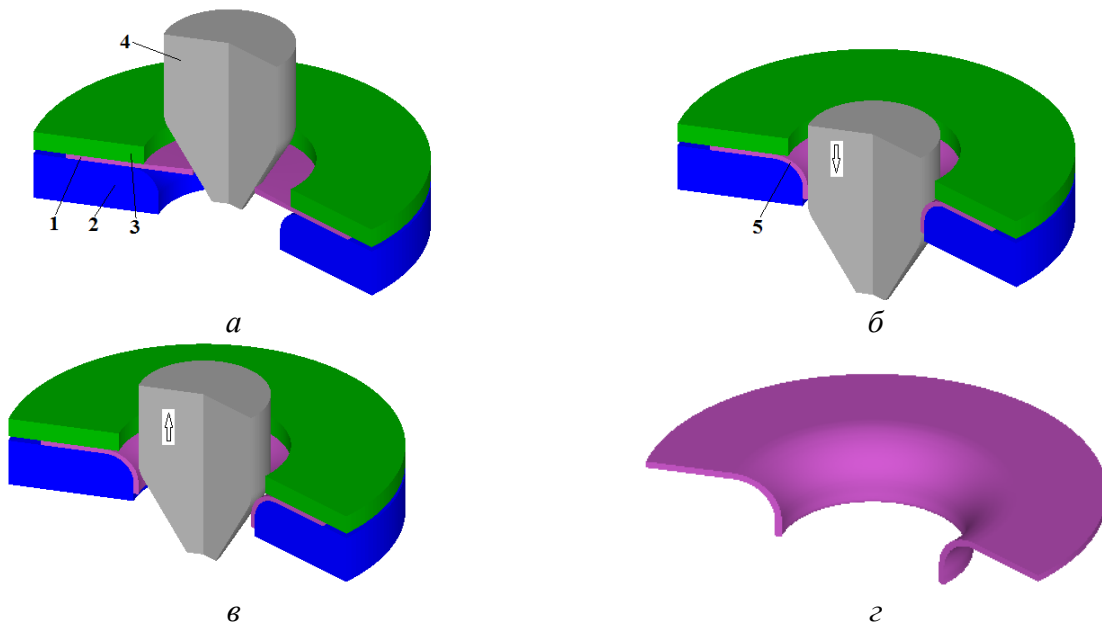


Рис. 5. Розрахункові схеми відбортуння та отриманий виріб: схема на початку відбортуння (*а*), в кінці відбортуння (*б*), і після вилучення пуансону (*в*); отриманий виріб (*г*)

Розрахункові схеми в розрізі при відбортуванні пуансоном із  $\alpha = 20^\circ$  та отриманий виріб зображено на рис. 5. На рис. 5, а показано схему на початку відбортування. Профільовану заготовку з отвором 1 розміщено на матриці 2 і зафіксовано притискачем 3. При опусканні пуансону 4 здійснюється відбортування з отриманням виробу з фланцем 5 (рис. 5, б). Вилучення пуансону 4 відбувається при його зворотному переміщенні (рис. 5, в). На рис. 5, г зображено отриману деталь.

Залежності зусиль відбортування від переміщення пуансонів з різним кутом  $\alpha$  представлено на рис. 6. Видляти графіків практично однакові для розглянутих кутів пуансонів. Зусилля спочатку зростають і досягають максимальних значень на проміжній стадії відбортування, а потім зменшуються до певної величини в кінці відбортування. Зі збільшенням величини кута зменшується переміщення пуансону при відбортуванні та знижується зусилля в кінці відбортування. Мінімальне значення зусилля на проміжній стадії відбортування  $P_d = 7,7$  кН отримано для пуансону з  $\alpha = 20^\circ$ . Тому в подальшому буде представлено результати моделювання для такого пуансону.

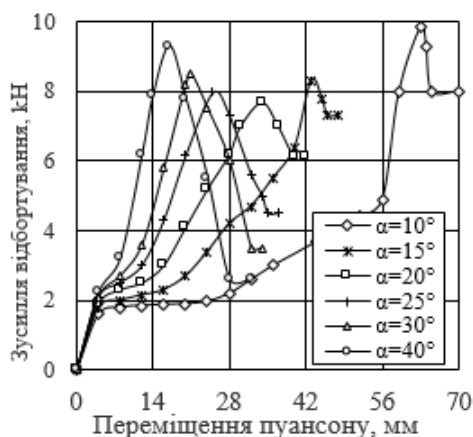


Рис. 6. Зусилля від переміщення пуансонів при відбортуванні пуансонами з різним кутом конусу  $\alpha$

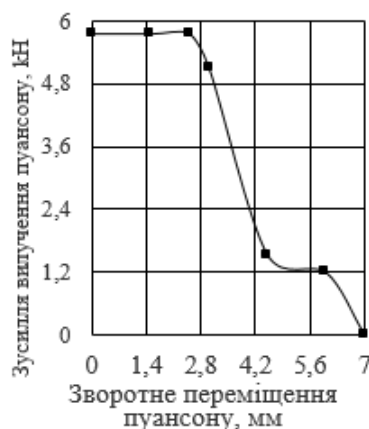


Рис. 7. Залежність зусилля вилучення пуансону з  $\alpha = 20^\circ$  із zdeформованої заготовки від його зворотного переміщення

Залежність зусилля вилучення пуансону з  $\alpha = 20^\circ$  із zdeформованої заготовки від його зворотного переміщення представлено на рис. 7. Найбільші значення зусилля вилучення виникають на початку зворотного переміщення пуансонів.

Форму і розміри фланцю після відбортування зображено на рис. 8. Показано розміри стінок в міліметрах, які отримано в програмі DEFORM, по середині на радіусі матриці і циліндричної частини, а також біля торця фланцю.

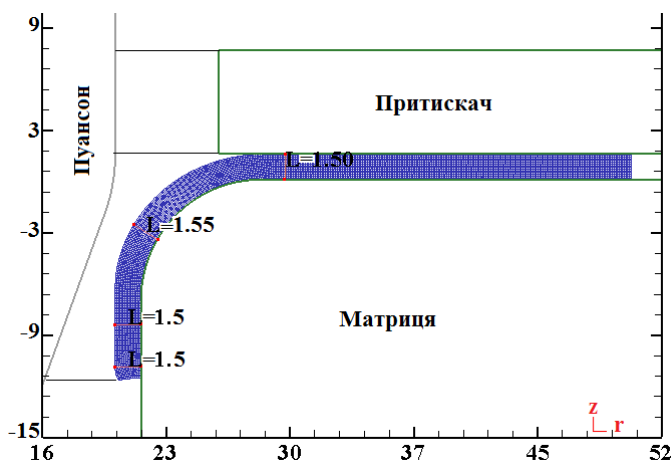


Рис. 8. Форма і розміри фланцю після відбортування

Тут і в подальшому тонкими лініями представлено деформуючий інструмент, а розміри по вісях  $r$  і  $z$  наведено в міліметрах. Використання профільованої заготовки приводить до суттєвого підвищення геометричної точності фланців в порівнянні з відбортуванням листової заготовки з постійною товщиною. В даному випадку відсутнє викривлення торця і фланці мають чітку циліндричну частину. Отриманий фланець має практично постійну товщину стінки по всій довжині, яка дорівнює товщині непрофільованої частини заготовки  $S_0 = 1,5$  мм. Тільки у стінці

на радіусі матриці спостерігається незначне потовщення стінки, яке виникає по причині зміни по лінійному закону товщини профілю вихідної заготовки і може бути усунене корегуванням профілю заготовки. При цьому відкриваються можливості значного збільшення висоти циліндричної частини фланцю шляхом виконання відбортування з потоншенням стінки.

Напружений стан при відбортуванні профільованої заготовки визначено при максимальному значенні зусилля відбортування. На рис. 9 представлено розподіли компонент напружень у здеформованій заготовці. Розподіл осьових напружень  $\sigma_z$  зображено на рис. 9, *a*. В зоні контакту з пуансоном і матрицею виникають стискаючі напруження у межах  $\sigma_z = -140 \dots -190$  МПа. Розтягувальні осьові напруження досягають максимальних величин  $\sigma_z = 150 \dots 200$  МПа в шарах металу біля радіусу заокруглення пуансону. У зонах контакту здеформованої заготовки з пуансоном і матрицею також виникають стискаючі радіальні напруження і досягають значень у межах  $\sigma_r = -130 \dots -170$  МПа (рис. 9, *б*). Розтягувальні напруження  $\sigma_r = 110 \dots 150$  МПа отримано у верхніх шарах металу стінки на радіусі заокруглення матриці. Стискаючі напруження  $\sigma_r$  характеризують питомі зусилля на пуансоні і матриці. По всьому об'єму фланця виникають розтягувальні тангенціальні напруження та досягають максимальних значень у межах  $\sigma_\theta = 150 \dots 200$  МПа в області торця фланцю (рис. 9, *в*). Розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$  наведено на рис. 9, *г*. Найбільші значення у межах  $\sigma_i = 180 \dots 200$  МПа отримано в області торця фланцю. Далі по фланцю ці напруження зменшуються до величин  $\sigma_i = 100 \dots 130$  МПа у стінці на радіусі матриці.

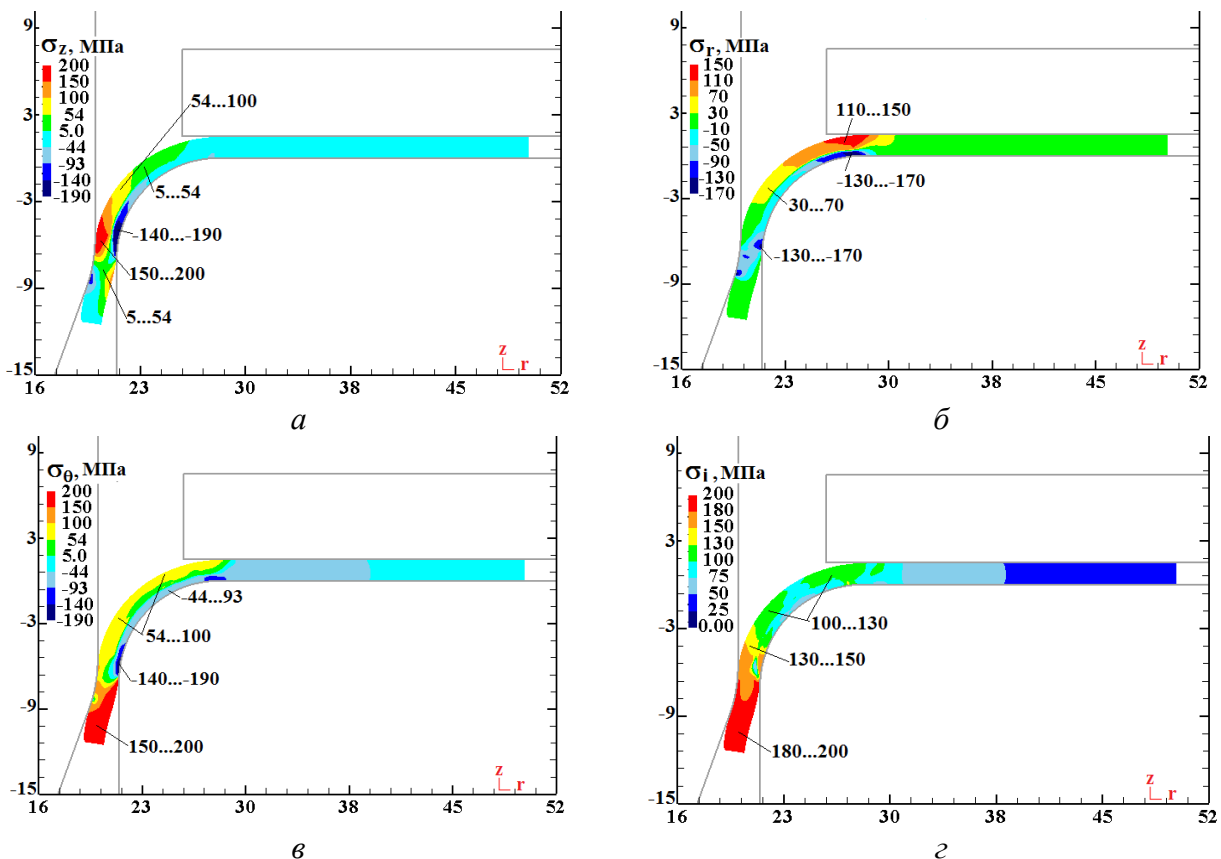


Рис. 9. Розподіли компонент напружень при максимальному зусиллі відбортування:  
*a* – розподіл  $\sigma_z$ , *б* –  $\sigma_r$ , *в* –  $\sigma_\theta$ , *г* –  $\sigma_i$

Розподіли кінцевих компонент деформацій у фланці показано на рис. 10. Значний об'єм по фланцю займають стискаючі осьові деформації з досягненням значень у межах  $\varepsilon_z = -0,29 \dots -0,35$  в області торця фланцю (рис. 10, *a*). В шарах металу біля радіусу матриці отримано невеликі розтягувальні деформації величиною  $\varepsilon_z = 0,044 \dots 0,1$ . Подібний вигляд розподілу і значення у циліндричній частині фланцю мають стискаючі радіальні деформації  $\varepsilon_r$  (рис. 10, *б*). Розтягувальні деформації у межах  $\varepsilon_r = 0,087 \dots 0,15$  виникають у верхніх шарах

металу стінки на радіусі матриці. По всьому об'єму фланцю отримано розтягувальні тангенціальні деформації  $\varepsilon_\theta$ , які досягають максимальних значень у межах  $\varepsilon_\theta = 0,52 \dots 0,6$  в області торця фланцю (рис. 10, в). Аналогічний з  $\varepsilon_\theta$  вигляд розподілу, але дещо більші величини отримано для інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  (рис. 10, г).

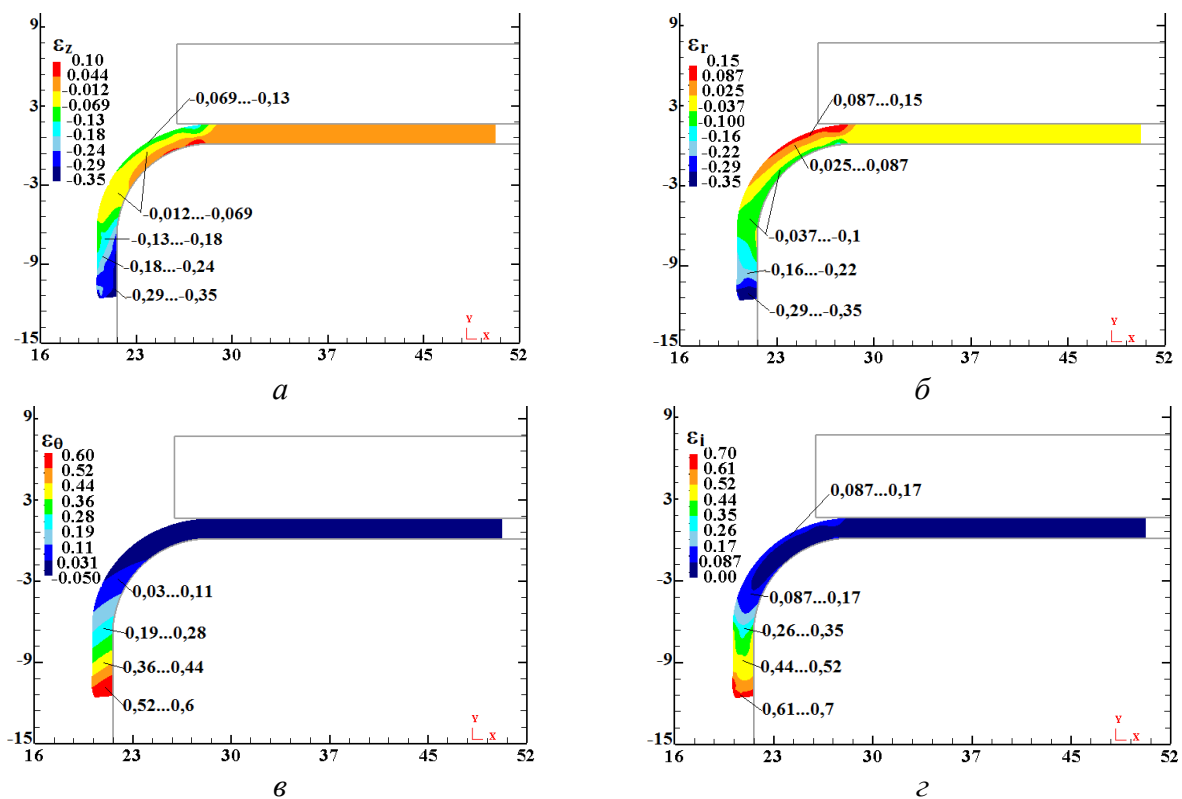


Рис. 10. Розподіли компонент деформацій у фланці: а –  $\varepsilon_z$ ; б –  $\varepsilon_r$ ; в –  $\varepsilon_\theta$ ; г –  $\varepsilon_i$

На основі результатів моделювання було спроектовано і виготовлено експериментальний штамп для виконання відбортування і виготовлення профільованої заготовки. Схеми штампу з розмірами деформуючого інструменту при відбортуванні і видавлюванні показано на рис 11. Ліворуч від вісі симетрії приведено вихідний стан, праворуч – в процесі деформування. На рис. 11, а представлено схему при відбортуванні. Профільовану заготовку 1 встановлено на матриці 2, яку розміщено на плиті 3. Заготовку 1 фіксують до матриці 2 за допомогою контейнеру 4, що кріпиться на плиті 3 з використанням різьби. Відбортування здійснюють пуансоном 5 і отримують деталь з фланцем 6.

Схему цього штампу при видавлюванні профілю на заготовці зображено на рис. 11, б. Заготовку 1 розміщено на плиті 2. На плиті 2 встановлено притискач 3 з конічною порожниною для формоутворення профілю на заготовці. Пливу 2, заготовку 1 і притискач 3 фіксують на плиті 4 контейнером 5. В отвір контейнеру 5 встановлено кільце 6 для направлення пуансону 7 при видавлюванні. При переміщенні пуансону 7, який має направлення по контейнеру 5 отримують профільовану заготовку 8.

Фотографії деталей штампу для відбортування згідно опису креслення (див. рис. 11, а) представлено на рис. 12. Експериментальний штамп для відбортування встановлювали на випробувальній машині TIRA test 2300, яка дозволяла реєструвати залежність зусилля відбортування від переміщення пуансону. В якості змащення використовували ВНИИП 232.



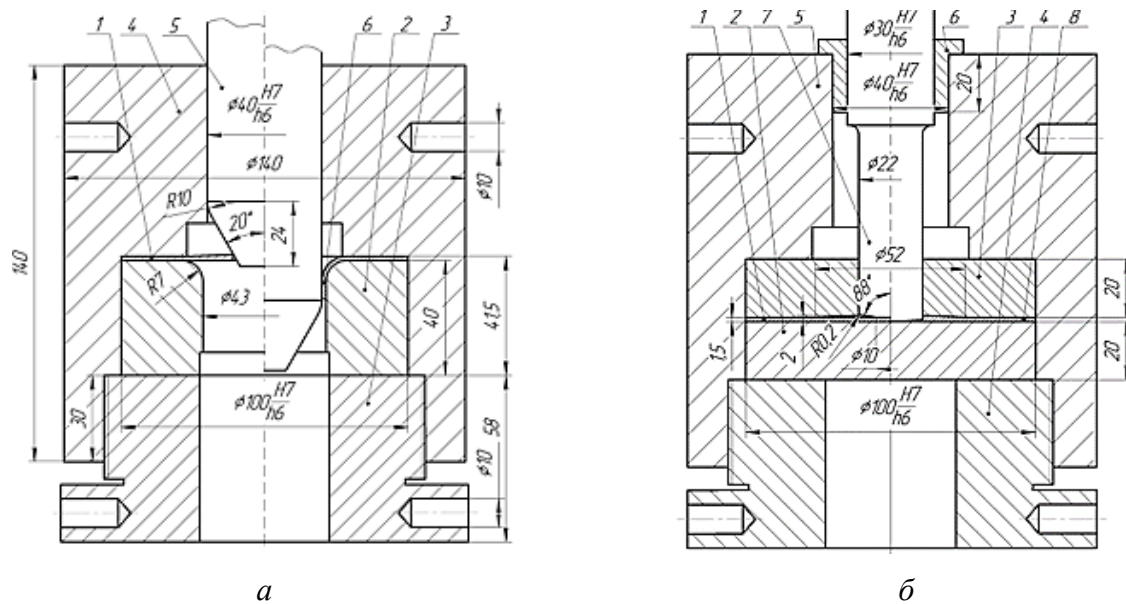


Рис. 11. Схеми штампу при відбортуванні (а) та при видавлюванні (б)



матриця 2

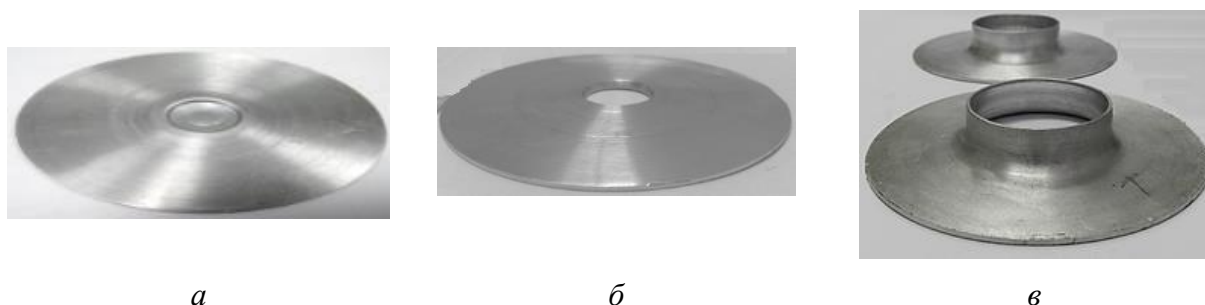
нижня плита 3

контейнер 4

пуансон 5

Рис. 12. Фотографії деталей штампу для виконання відбортування отвору

Профільовану заготовку з перемичкою після видавлювання і з отвором після пробивання перемички та деталі після відбортування зображено на рис. 13.



а

б

в

Рис. 13. Профільовані заготовки з перемичкою (а) і отвором (б) та деталі після відбортування (в)

Для зусиль видавлювання профілю і відбортування отворів проведено порівняння результатів експериментальних досліджень і даних моделювання з використанням МСЕ (рис. 14). Розбіжність експериментальних і даних моделювання складає 5...7 % для видавлювання і відбортування.

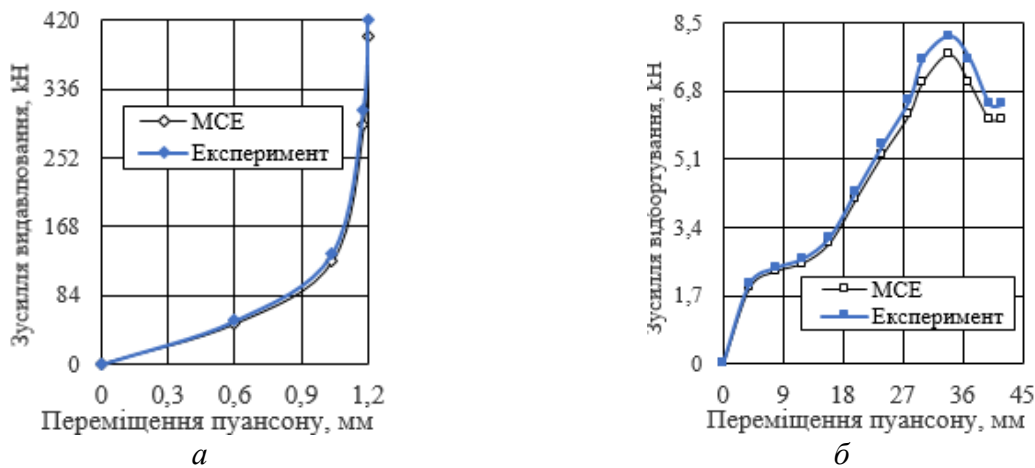


Рис. 14. Порівняння експериментальних результатів і даних моделювання по зусиллях видавлювання (а) та відбортування (б)

Для порівняння даних моделювання і експериментів по товщині стінки фланцю отримані деталі були розрізані по середині та проведено заміри товщини стінки на радіусі заокруглення, циліндричної частини і в зоні торця. Результати вимірювання товщини показано на рис. 15. Фланець після відбортування профільованої заготовки має практично однакову товщину стінки по всій довжині, викривлення відсутнє. Порівняння з результатом моделювання (див. рис. 8) показує незначне відхилення товщини на радіусі заокруглення.

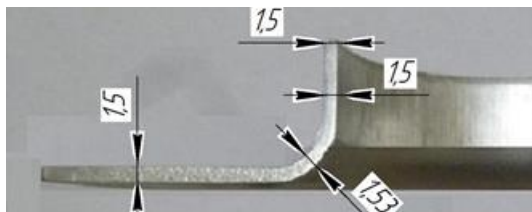


Рис. 15. Експериментальних дані по товщині стінки фланцю

## ВИСНОВКИ

З використанням методу скінченних елементів і програми DEFORM проведено моделювання процесів відбортування отворів у профільованій листовій заготовці із алюмінію AL-3003 COLD конусними пуансонами з різними кутами. Застосовано пружно-пластичну модель металу, яка дозволила провести аналіз процесів відбортування, вилучення пуансонів із zdeформованих заготовок та встановити кінцеві форму і розміри фланцю.

Встановлено вплив кута конусу  $\alpha = 10, 15, 20, 25, 30$  і  $40^\circ$  на залежності зусиль відбортування від переміщення пуансонів. Мінімальне зусилля відбортування забезпечує пуансон з кутом  $\alpha = 20^\circ$ .

Використання профільованої заготовки дозволило усунути недоліки, які характерні для відбортування отворів у традиційній заготовці. Профілювання заготовки здійснено шляхом формоутворення отвору видавлюванням з подальшим пробиванням перемички. Така заготовка має найбільшу товщину біля отвору з лінійним зменшенням товщини до вихідної на початку радіусу матриці. Застосування профільованої заготовки забезпечило при відбортуванні отримання фланцю з постійною товщиною стінки по всій довжині, яка дорівнює вихідній товщині заготовки.

Для відбортування отвору пуансоном з  $\alpha = 20^\circ$  встановлено розподіли компонент напружень при максимальному значенні зусилля відбортування та розподіли компонент кінцевих деформацій у фланці.

Використання профільованої заготовки дає можливість суттєвого збільшення висоти циліндричної частини фланців шляхом подальшого виконання відбортування з потоншення стінки. Отримані фланці мають підвищені механічні властивості завдяки додатковому пропрацюванню структури металу холодною пластичною деформацією на стадії формоутворення отвору видавлюванням.

По результатах моделювання спроектовано і виготовлено штамп з комплектом інструменту для отримання видавлюванням профілю на заготовці та здійснення відбортування. Результати проведених експериментів показали хорошу узгодженість результатів моделювання по зусиллях видавлювання і відбортування та по товщині стінки отриманого фланцю.

### 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. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. Москва: Машиностроение, 1985-1987. Т. 4: Листовая штамповка / под ред. А.Д. Матвеева. 544 с.
3. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка / под общ. ред. Л.И. Рудмана. Москва: Машиностроение, 1988. 496 с.
4. Калужний О.В., Калужний В.Л. Интенсифікація 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. Vol. 117. Issues 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 fineblanked-hole flanging process (FB-hole flanging process) using finite element method (FEM). *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 192-193, 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. Vol. 211. Issue 4, pp. 619-626. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.018>.
8. Kacem A., Krichen A., Manach P.Y. Occurrence and effect of ironing in the hole-flanging process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211, Issue 10, pp. 1606-1613. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.04.017>.
9. Thipprakmas S., Phanitwong W. Finite element analysis of flange-forming direction in the hole flanging process. *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 61, pp. 609-620. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3721-8>.
10. Lin Q., Dong W., Wang Z., Hirasawa K. A new hole-flanging method for thick plate by upsetting process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014. Vol. 24, Issue 7, pp. 2387-2392. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63361-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63361-6).
11. Dewang Y., Hora M.S., Panthi S.K. Finite Element Analysis of Non-axisymmetric Stretch Flanging Process for Prediction of Location of Failure. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 5, pp. 2054-2062. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.539>.
12. 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. Vol. 234, pp. 228-242. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.03.027>.
13. Dewang Y., Purohit R., Tenguria N. A study on sheet metal hole-flanging process. *Materialstoday Proceedings*. 2017. Vol. 4, Issue 4, Part D, pp. 5421-5428. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.05.053>.
14. Morales-Palma D., Borrego M., Martínez-Donaire A., Centeno G., Vallellano C. (2018). Optimization of hole-flanging by single point incremental forming in two stages. *Materials*, 11(10), 2029. <https://doi.org/10.3390/ma11102029>.
15. Laugwitz M., Voswinkel H., Hirt G., Bambach M. Development of tooling concepts to increase geometrical accuracy in high speed incremental hole flanging. *International Journal of Material Forming*. 2018. Vol. 11, pp. 471-477. <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1356-5>.
16. Martínez-Donaire A.J., Borrego M., Morales-Palma D., Centeno G., Vallellano C. Analysis of the influence of stress triaxiality on formability of hole-flanging by single-stage SPIF. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 151, pp. 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.006>.
17. Besong L.I., Buhl J., Bambach M. Investigations on hole-flanging by paddle forming and a comparison with single point incremental. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 164, 105143. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci>.
18. Liu Y., Shu Y., Chen H., Zhang Z. Deformation characteristics analysis of the fine blanking-extrusion flanging process. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 50, pp. 129-133. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.024>.
19. J. Zejda V., Peterkova E., Cisarova M. Influence of initial hole preparation on properties and limits in hole flanging. *MM Science Journal*. 2020. [https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020\\_12\\_2020065](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020_12_2020065).
20. Besong, L.I., Buhl, J., Bambach, M. Increasing formability in hole-flanging through the use of punch rotation based on temperature and strain rate dependent forming limit curves. *International Journal of Material Forming*. 2022. Vol. 15 (37). <https://doi.org/10.1007/s12289-022-01684-6>.
21. Seyyedi S. E., Gorji H., Bakhshi-Jooybari M., Mirnia M. J. Comparison between conventional press-working and incremental forming in hole-flanging of AA6061-T6 sheets using a ductile fracture model *International Journal of Solids and Structures*. 2023. Vol. 270. 112225. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023>.
22. 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. Vol. 119, 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: Directory: In 4 volumes; Vol. 4. Sheet stamping Ed. advice: E.I. Semenov (chairman) and others / Ed. hell. A. D. Matveeva;. Moscow: Mechanical Engineering. 1985-1987. 544 p. (in Russian).
3. Die designer's handbook: Sheet stamping (1988). Ed. hell. L. I. Rudmana. Moscow: Mechanical Engineering, 496 pp. (in Russian).
4. Kaliuzhnyi A.V., Kaliuzhnyi 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. Vol. 117. Issues 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 fineblanked-hole flanging process (FB-hole flanging process) using finite element method (FEM). *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 192-193, 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. Vol. 211. Issue 4, pp. 619-626. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.018>.
8. Kacem A., Krichen A., Manach P.Y. Occurrence and effect of ironing in the hole-flanging process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211, Issue 10, pp. 1606-1613. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.04.017>.
9. Thipprakmas S., Phanitwong W. Finite element analysis of flange-forming direction in the hole flanging process. *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 61, pp. 609-620. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3721-8>.
10. Lin Q., Dong W., Wang Z., Hirasawa K. A new hole-flanging method for thick plate by upsetting process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014. Vol. 24, Issue 7, pp. 2387-2392. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63361-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63361-6).
11. Dewang Y., Hora M.S., Panthi S.K. Finite Element Analysis of Non-axisymmetric Stretch Flanging Process for Prediction of Location of Failure. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 5, pp. 2054-2062. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.539>.
12. 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. Vol. 234, pp. 228-242. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.03.027>.
13. Dewang Y., Purohit R., Tenguria N. A study on sheet metal hole-flanging process. *Materialstoday Proceedings*. 2017. Vol. 4, Issue 4, Part D, pp. 5421-5428. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.05.053>
14. Morales-Palma D., Borrego M., Martínez-Donaire A., Centeno G., Vallellano C. (2018). Optimization of hole-flanging by single point incremental forming in two stages. *Materials*, 11(10), 2029. <https://doi.org/10.3390/ma11102029>.
15. Laugwitz M., Voswinckel H., Hirt G., Bambach M. Development of tooling concepts to increase geometrical accuracy in high speed incremental hole flanging. *International Journal of Material Forming*. 2018. Vol. 11, pp. 471-477. <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1356-5>.
16. Martínez-Donaire A.J., Borrego M., Morales-Palma D., Centeno G., Vallellano C. Analysis of the influence of stress triaxiality on formability of hole-flanging by single-stage SPIF. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 151, pp. 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.006>.
17. Besong L.I., Buhl J., Bambach M. Investigations on hole-flanging by paddle forming and a comparison with single point incremental. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 164, 105143. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci>.
18. Liu Y., Shu Y., Chen H., Zhang Z. Deformation characteristics analysis of the fine blanking-extrusion flanging process. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 50, pp. 129-133. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.024>.
19. Rihacek J. Zejda V., Peterkova E., Cisarova M. Influence of initial hole preparation on properties and limits in hole flanging. *MM Science Journal*. 2020. [https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020\\_12\\_2020065](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020_12_2020065).
20. Besong, L.I., Buhl, J., Bambach, M. Increasing formability in hole-flanging through the use of punch rotation based on temperature and strain rate dependent forming limit curves. *International Journal of Material Forming*. 2022. Vol. 15 (37). <https://doi.org/10.1007/s12289-022-01684-6>.
21. Seyyedi S. E., Gorji H., Bakhshi-Jooybari M., Mirnia M. J. Comparison between conventional press-working and incremental forming in hole-flanging of AA6061-T6 sheets using a ductile fracture model *International Journal of Solids and Structures*. 2023. Vol. 270. 112225. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023>.
22. 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. Vol. 119, pp. 790-805. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.107>.

**Kaliuzhnyi O., Kaliuzhnyi V., Chuchin O. Influence of the cone punch angle on the flanging of holes in a profiled sheet billet**

In this article, the influence of the cone punch angle on the processes of axisymmetric flanging of holes in a profiled aluminum sheet billet AL-3003 COLD was studied using the finite element method and DEFORM software. The profiled billet was obtained by forming a hole by extrusion with punching of a bridge and has a maximum thickness near the hole with a subsequent linear decrease in thickness to the original one at the radius of the die. The use of a profiled billet results in a flange with a constant wall thickness along the length equal to the thickness of the original billet. An elastic-plastic model of metal was used for modeling. The dependence of the forces of flanging and punching on their displacement was determined. A punch with an angle at the top of the cone of 40° provides the minimum flanging force. For such a punch, the distributions of stress components in the deformed workpiece at the maximum flanging force and the distributions of the final deformation components in the flange are determined. The shape and dimensions of the flange after flanging and punch removal are shown. Based on the modeling data, a stamp with a set of tools for conducting experimental studies on the manufacture of a profiled billet and flanging was designed and manufactured. The experimental results showed good agreement with the modeling data in terms of extrusion forces, flanging and flange dimensions. At the same time, the flange has an advantage in strength due to the improvement of the macrostructure when the hole is formed by extrusion. The possibility of a significant increase in the height of the cylindrical part was obtained due to the subsequent implementation of stretching with thinning.

**Keywords:** profiled billet, flanging, finite element method, forces, stresses, deformations, flange shape and dimensions.

**Калюжний Олександр Володимирович** – канд. техн. наук, доц., ТОВ «Академія навчання ІТ»

**Kaliuzhnyi Alexander** – PhD, Associate Professor, IT Education Academy

E-mail: [alexandr.kaliuzhnyi@itea.ua](mailto:alexandr.kaliuzhnyi@itea.ua)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4526-6473>

**Калюжний Володимир Леонідович** – д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ»

**Kaliuzhnyi Volodymyr** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, NTUU "KPI"

E-mail: [kwl\\_2011@ukr.net](mailto:kwl_2011@ukr.net)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4904-8879>

**Чучин Олег Володимирович** – канд. техн. наук, ст. викладач, ДДМА

**Chuchin Oleg** – PhD, Senior Lecturer of DSEA

E-mail: [ovch2111@gmail.com](mailto:ovch2111@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9728-9925>

ТОВ «Академія навчання ІТ», Київ  
"IT Training Academy" LLC, 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

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.

DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.

Стаття надійшла до редакції 10.07.24 р.