

Підвищення геометричної точності стінок фланців при відбортуванні отворів шляхом використання профільованої листової заготовки

В. В. Драгобецький¹ • О. В. Калюжний² • В. Л. Калюжний³

Received: 14 October 2024 / Revised: 20 November 2024 / Accepted: 4 December 2024

Анотація. Відбортування отворів з отриманням фланців у листових заготовках і профілях широко використовують при виготовленні деталей в багатьох галузях промисловості, зокрема в літакобудуванні і приладобудуванні. Суттєвими недоліками, які мають місце при відбортуванні отворів, є низька геометрична точність фланців по причині наявності значного потоншення стінки по довжині фланців та відхилення стінки фланцю від циліндричної поверхні отвору матриці для відбортування, що виникає завдяки пружній деформації після вилучення пуансону із zdeформованої заготовки. Для усунення таких недоліків використовують операції калібрування фланців за допомогою виконання додаткового потоншення циліндричної частини стінки фланцю. Додаткове потоншення також використовують для збільшення висоти відбортованих фланців. Застосування потоншення приводить до певних обмежень при з'єднанні відбортованих деталей з іншими виробами за допомогою різьби. Тому актуальними є дослідження, які направлені на підвищення геометричної точності фланців в напрямку зменшення потоншення та викривлення стінок фланців при відбортуванні. Одним із способів вирішення такої задачі полягає в застосуванні попередньо профільованої заготовки. Підвищення геометричної точності фланців при відбортуванні отворів у профільованій листовій заготовці із алюмінієвого сплаву Д16. Застосування попередньо профільованої листової заготовки, яка має найбільшу товщину профілю біля отвору з поступовим зменшенням товщини до вихідної на початку радіусу заокруглення матриці для відбортування, дозволить значно зменшити потоншення і викривлення стінки фланцю після відбортування отвору. За допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) проведено моделювання процесів профілювання заготовки видавлюванням з отриманням перемички та пробивання перемички, а також подальшого відбортування отворів плоским, конусним і сферичним пуансонами. Встановлено залежності зусиль відбортування і зусиль вилучення пуансонів із zdeформованих заготовок від переміщення пуансонів. Для сферичного пуансону, при якому має місце мінімальне зусилля відбортування, визначено розміри фланцю та порівняно з розмірами при відбортуванні традиційної заготовки. Виявлено напружений стан металу при максимальному зусилля відбортування профільованої заготовки сферичним пуансоном та кінцевий zdeформований стан після вилучення пуансону. Розроблено і виготовлено конструкцію штампку з комплектом деталей для виконання профілювання заготовки і відбортування. Проведено експериментальні дослідження, результати яких показали хорошу узгодженість з даними моделювання по зусиллях видавлювання і відбортування та розмірах отриманих фланців. Шляхом використання профільованої листової заготовки підвищено геометричну точність фланцю після відбортування отвору. Товщина стінки отриманого фланцю по довжині майже не відрізняється від товщини вихідної заготовки і суттєво зменшено відхилення стінки від циліндричної поверхні отвору матриці для відбортування.

Ключові слова: розсіяне руйнування композиційних матеріалів, феноменологічні моделі пошкодження, анізотропія механічних властивостей, критерії розсіяного руйнування.

Вступ

Визначення параметрів відбортування на основі виробничого досвіду достатньо добре описано в джерелах [1–3]. При відбортуванні отворів у листових заготовках відбувається значне потоншення стінок по довжині отриманих фланців та має місце викривлення торців стінок фланців від поверхонь матриць при вилу-

✉ В. Л. Калюжний
kwl_2011@ukr.net

¹ Національний технічний університет ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

² Академія навчання ІТ, Київ, Україна

³ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ченні пуансонів із zdeформованих заготовок. Підвищення геометричної точності фланців за рахунок зменшення різнотовщинності стінок фланців і усунення викривлення торців стінок при відбортуванні здійснюється шляхом використання профільованої листової заготовки [4]. Така заготовка має найбільшу товщину біля отвору з поступовим зменшенням до вихідної товщини на діаметрі, що дорівнює початку радіусу заокруглення матриці для відбортування. Профільовання листової заготовки можна виконати шляхом видавлювання при отриманні отвору для відбортування. При видавлюванні утворюється перемичка, яку видаляють подальшим пробиванням.

Актуальними можуть бути дослідження по підвищенню точності фланців при відбортуванні отворів у листових заготовках або профілях із алюмінієвого сплаву Д16, що широко використовуються в літакобудуванні. Таке підвищення приведе до зростання надійності і довговічності з'єднань відбортованих деталей з іншими виробами. Крім цього, пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією на стадії формоутворення отвору видавлюванням додатково приведе до збільшення показників міцності zdeформованого металу фланців в порівнянні з фланцями, які отримані в традиційних листових заготовках чи профілях.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

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 фланців. Результати моделювання порівняно з даними експериментів.

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

З використанням пружно-пластичної моделі МСЕ та експериментального аналізу було досліджено вплив притискання заготовки на процес відбортування 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 відбортування.

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

тування з розтягуванням та відбортування 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 zdeформований 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 обертого 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 виникнення 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.

На кафедрі ТВЛА КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблено спосіб відбортування отворів у профільованих заготовках, який забезпечує отримання фланців з постійною товщиною стінки по довжині [23].

З аналізу літературних джерел слідує, що для визначення параметрів відбортування отворів і встановлення розмірів фланців раціонально виконувати моделювання МСЕ з використанням пружно-пластичної моделі металу. В джерелах практично відсутні дані по відбортуванню отворів в профільованих заготовках із сплаву D16.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є підвищення геометричної точності фланців при відбортуванні отворів у профільованій листовій заготовці із алюмінієвого сплаву D16. Завданнями досліджень передбачено встановлення впливу форми пуансонів 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.

Матеріали та методи дослідження

Схему відбортування профільованої заготовки конусним пуансоном з позначеннями та форми пуансонів для дослідження приведено на рис. 1. На схемі (рис. 1 а) ліворуч від вісі симетрії показано положення заготовки і деформуючого інструменту перед відбортуванням, а праворуч – в процесі відбортування. Попередньо профільовану листову заготовку 1, яка має найбільшу товщину S_p біля отвору діаметром d та з лінійним зменшенням товщини до вихідної S_o на діаметрі D_p , розміщено в матриці 2 і зафіксовано притискачем 3. Деформування зусиллям P_o зі швидкістю переміщення V_o здійснюють конусним пуансоном 4. В результаті відбортування утворюється деталь з фланцем 5. Крім пуансону конусної форми, для дослідження використано пуансон з плоским торцем і сферичний пуансон. Половину плоского пуансону зображено на рис. 1 б, а сферичного – на рис. 1 в.

Профільована заготовка із сплаву D16 мала наступні розміри: діаметр $D_o = 120$ мм, товщину $S_o = 1,5$ мм, діаметр отвору $d = 22$ мм, висоту біля отвору $S_p = 2$ мм, діаметр профілю $D_p = 53$ мм. Розміри потовщення на заготовці забезпечували отримання після відбортування фланцю з товщиною стінки не менше 1,5 мм.

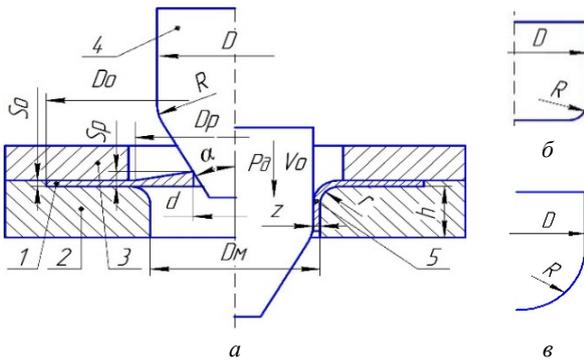


Рис. 1. Схема відборткування профільованої заготовки конусним пуансоном та форми пуансонів

Для порівняння результатів з відборткуванням традиційної заготовки використано листову заготовку з розмірами $D_o = 120$ мм, $S_o = 1,5$ мм і $d = 22$ мм.

Відборткування профільованої і традиційної заготовки виконано в матриці діаметром $D_m = 33$ мм, висою $h = 15$ мм і радіусом заокруглення $r = 5$ мм. Конусний пуансон мав розміри $D = 40$ мм, $R = 10$ мм і $\alpha = 20^\circ$ (кут $\alpha = 20^\circ$ забезпечує мінімальне зусилля відборткування), плоский – $D = 40$ мм і $R = 5$ мм, сферичний – $D = 40$ мм і $R = 20$ мм.

Розрахунковий аналіз процесів профілювання заготовки видавллюванням, пробивання перемички та відборткування проведено МСЕ з використанням програми DEFORM2D і пружно-пластичної моделі металу, що дозволило визначити зусилля вилучення пуансонів із zdeформованих заготовок та кінцеві розміри фланців з урахуванням пружної деформації. Тертя на контактуючих поверхнях абсолютно жорсткого деформуючого інструменту враховано по Кулону з коефіцієнтами тертя $\mu = 0,08$ при видавллюванні та $\mu = 0,15$ при відбортванні. Швидкість деформування складала $V_o = 2$ мм/сек.

Експериментальні дослідження по профілюванню заготовки видавллюванням проведено на гідравлічному пресі ДБ2432 зусиллям 1600 кН. Експерименти по відбортванню з реєстрацією зусилля від переміщення пуансону здійснено на випробувальній машині TIRA test 2300.

Результати дослідження

Спочатку наведено результати моделювання процесу профілювання заготовки видавллюванням. На рис. 2 показано в розрізі розрахункові схеми при видавллюванні профільованої заготовки з перемичкою та при пробиванні перемички з отриманням профільованої заготовки з отвором. Листову заготовку 1 діаметром $D_o = 120$ мм і товщиною $S_o = 1,5$ мм розміщено на плиті 2 і зафіксовано притискачем 3 (рис. 2 а). Притискач 3 має порожнину для отримання у заготовці профілю з необхідними розмірами S_p і D_p (див. рис. 1). Видавллювання здійснюють циліндричним пуансоном діаметром 22 мм з плоско-конусним торцем, який має плоску частину діаметром 11 мм, конусну частину з кутом при вершині 174° та радіус переходу конусної поверхні в циліндричну розміром 0,3 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 видавллювання встановлено на матриці 2 з отвором 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.

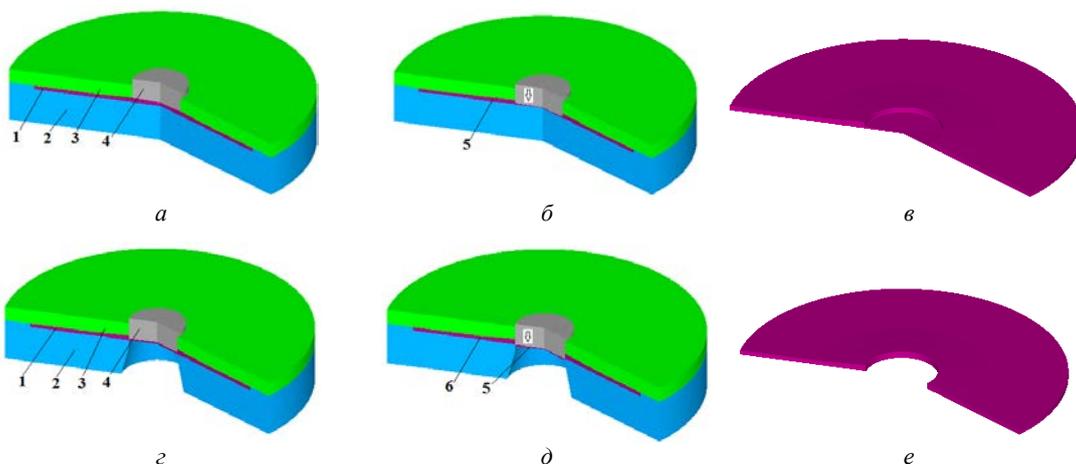


Рис. 2. Розрахункові схеми в розрізі при видавллюванні профільованої заготовки з перемичкою та при пробиванні перемички з отриманням профільованої заготовки з отвором: а – схема на початку видавллювання, б – схема в кінці видавллювання, в – профільована заготовка з перемичкою, г – схема на початку пробивання, 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 1350 кН в кінці процесу (рис. 3 а). Зменшити зусилля і питомі зусилля при видавлюванні та товщину перемички можна застосуванням процесу штампування обкочуванням. На рис. 3 б представлено залежність зусилля пробивання перемички від переміщення пуансону. Найбільше зусилля 12 кН отримано на проміжній стадії пробивання.

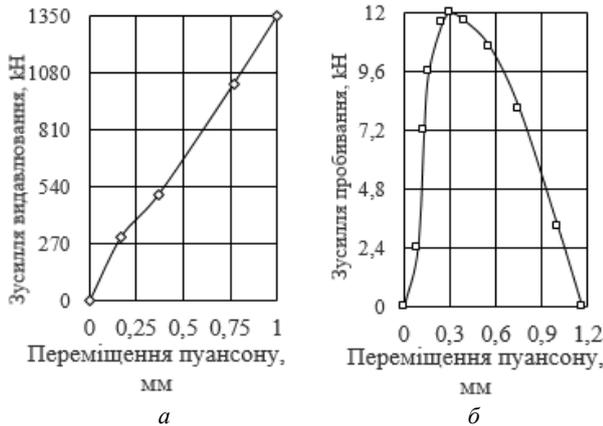


Рис. 3. Залежності зусилля видавлювання і зусилля пробивання перемички від переміщення пуансонів: а – зусилля видавлювання, б – зусилля пробивання

В основному при видавлюванні профілю і частково при пробиванні перемички відбувається пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією. На рис. 4 показано розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i у профільованій частині заготовки після пробивання перемички. Тут і в подальшому наведено половину заготовки, тонкими лініями зображено деформуєчий інструмент, а розміри по вісях r і z представлено в міліметрах. Біля отвору отримано значення у межах $\epsilon_i = 1,1 \dots 1,3$ і $\epsilon_i = 1,3 \dots 1,5$. По середині профілю має місце зона з $\epsilon_i = 0,19 \dots 0,38$. Далі ці деформації зменшуються до нульових величин в кінці профілю на діаметрі $D_p = 53$ мм. Для відновлення пластичності здеформованого металу потрібно перед відбортуванням проводити відпал профільованих заготовок після видавлювання.

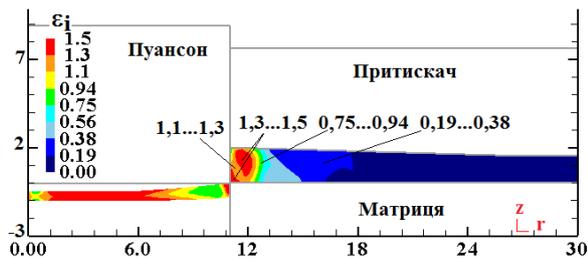


Рис. 4. Розподіл інтенсивності деформацій у профільованій заготовці з отвором

Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією частини заготовки, яка підлягає відбортуванню, дозволить підвищити механічні властивості фланців, що отримані при відбортуванні отворів.

Далі представлено результати моделювання процесів відбортування отворів у профільованій заготовці пуансонами різної форми. Проведено моделювання відбортування та вилучення пуансонів із здеформованих заготовок.

Розрахункові схеми в розрізі на прикладі відбортування конусним пуансоном та отриману деталь 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 деталі з фланцем 5 (рис. 5 б). Вилучення пуансону 4 відбувається при його зворотному переміщенні (рис. 5 в). На рис. 5 з зображено отриману деталь.

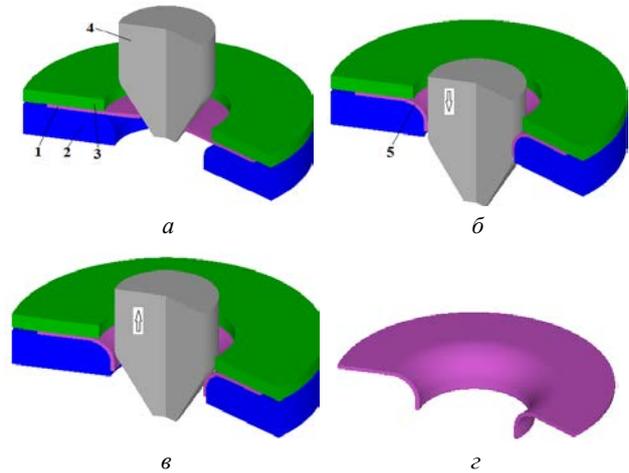


Рис. 5. Розрахункові схеми в розрізі при відбортуванні та отримана деталь: а – схема на початку відбортування, б – схема в кінці відбортування, в – схема після вилучення пуансону, з – отримана деталь

Залежності зусиль відбортування та зусиль вилучення від переміщення пуансонів різної форми представлено на рис. 6. Для розглянутих випадків відбортування максимальне зусилля відбортування має місце на проміжній стадії, а зусилля вилучення пуансонів із здеформованої заготовки – на початку цього процесу. Найбільше зусилля деформування $P_{\delta} = 25$ кН при переміщенні пуансону 9,3 мм та найменше зусилля вилучення пуансону із здеформованої заготовки $P_e = 2,4$ кН отримано при формуванні фланців із профільованої заготовки (ПЗ) плоским пуансоном (рис. 6 а). Для відбортуванні отворів у ПЗ конусним пуансоном максимальне зусилля досягає $P_{\delta} = 16,4$ кН при переміщенні пуансону 32 мм, а зусилля вилучення – $P_e = 5,6$ кН (рис. 6 б). Зменшення зусилля відбортування складо 35 %. Найменше зусилля відбортування $P_{\delta} = 14,4$ кН

при переміщенні пуансону 16 мм отримано для сферичного пуансону (рис. 6 в). Зниження такого зусилля склало 43 % в порівнянні з плоским пуансоном і 12 % в порівнянні з конусним пуансоном. При цьому зусилля вилучення досягає $P_e = 4,5$ кН. Таким чином, раціональною формою пуансону з точки зору отримання мінімального зусилля відбортування отворів у профільованій заготовці є сферичний пуансон.

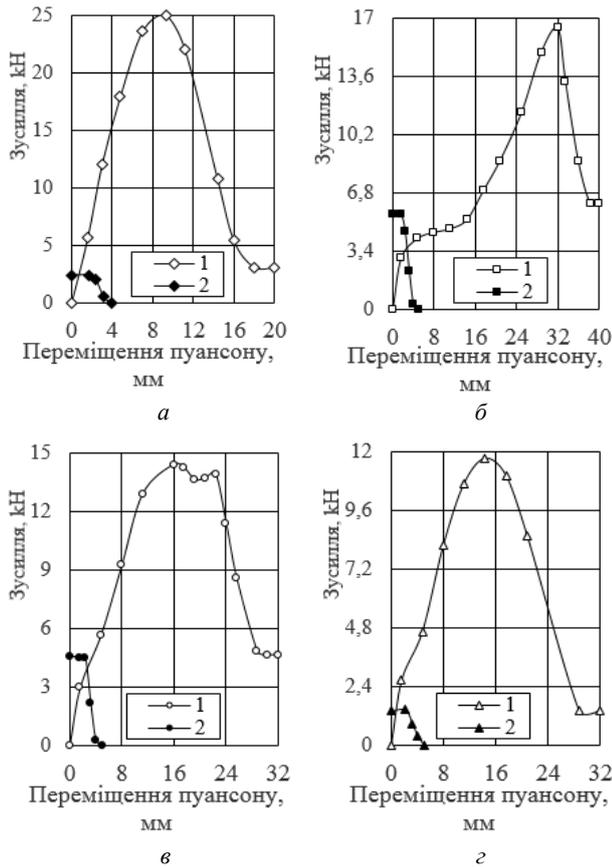


Рис. 6. Залежності зусиль відбортування від переміщення пуансонів (1) та залежності зусиль вилучення від зворотного переміщення пуансонів (2): а – при відбортуванні ПЗ плоским пуансоном, б – при відбортуванні ПЗ конусним пуансоном, в – при відбортуванні ПЗ сферичним пуансоном, г – при відбортуванні ТЗ сферичним пуансоном

Для такого пуансону на рис. 6 г зображено графіки зусиль відбортування і вилучення при формуворенні фланців у традиційній листовій заготовці (ТЗ), яка має постійну товщину. Максимальні значення зусиль склали відповідно $P_d = 11,7$ кН та $P_e = 1,45$ кН. Зменшення зусилля відбортування, в порівнянні з ПЗ, досягає 19 %.

В подальшому представлено результати моделювання та їх порівняння для пуансону сферичної форми.

Форму і розміри фланців після вилучення пуансонів зображено на рис. 7. Показано розміри стінок (L) в міліметрах, які отримано в програмі DEFORM, по се-

редині на радіусі матриці і циліндричної частини та біля торця фланцю, а також наведено максимальне відхилення торця від циліндричної поверхні отвору матриці. Використання ПЗ з вищенаведеними розмірами приводить до суттєвого підвищення геометричної точності фланців в порівнянні з відбортуванням ТЗ. Отриманий фланець має практично постійну товщину стінки по всій довжині і майже дорівнює товщині непрофільованої частини заготовки $S_0 = 1,5$ мм (рис. 7 а). 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 цього профілю. В даному випадку відхилення торця склало $L = 0,12$ мм на невеликій висоті і фланці мають чітку циліндричну частину. При цьому відкриваються можливості значного збільшення висоти фланцю шляхом виконання відбортування з потоншенням стінки та виконати з'єднання відбортованих деталей з іншими виробами за допомогою різьби. На рис. 7 б наведено розміри фланцю після відбортування ТЗ. На радіусі матриці стінка потоншується до з $S_0 = 1,5$ мм до $L = 1,45$ мм. Після радіусу у стінці отримано $L = 1,22$ мм, а біля торця товщина зменшилася з 1,5 до $L = 1,09$ мм.

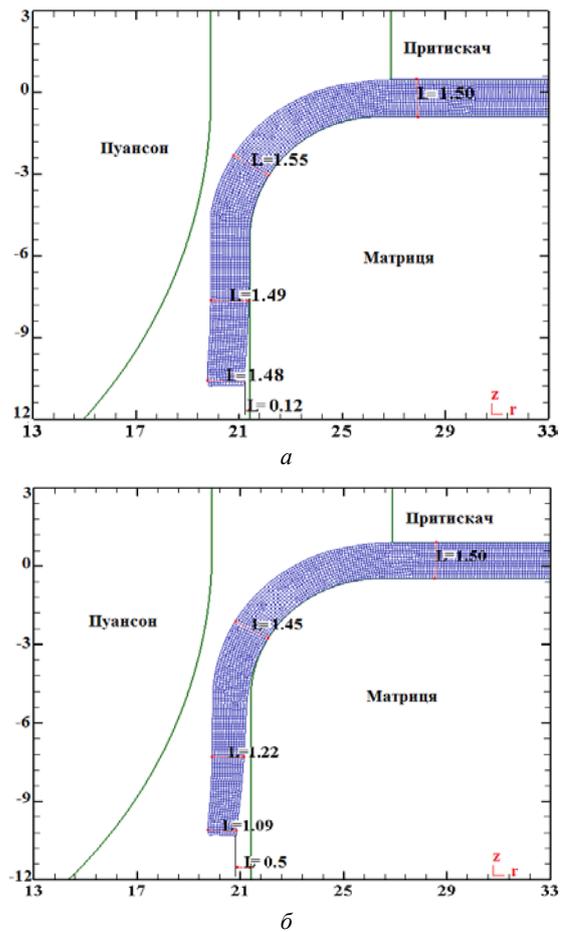


Рис. 7. Форма і розміри (L) в міліметрах фланців: а – після відбортування ПЗ, б – після відбортування ТЗ

При цьому стінка фланцю після радіусу матриці практично повністю відходить від поверхні матриці з максимальним відхиленням $L = 0,5$ мм та має викривлення біля торцю.

Напружений стан при відбортуванні профільованої заготовки визначено при максимальному значенні зусилля відбортування. На рис. 8 представлено розподіли компонент напружень у zdeформованій заготовці. Розподіл осьових напружень σ_z зображено на рис. 8 а. В зонах контакту з пуансоном і матрицею виникають стискаючі напруження у межах $\sigma_z = -280 \dots -350$ МПа. По таких напруженнях можна оцінити питомі зусилля на пуансоні і матриці, які в даному випадку мають найбільше значення 350 МПа. Розтягувальні осьові напруження досягають максимальних величин у межах $\sigma_z = 130 \dots 200$ МПа в шарах металу по середині zdeформованої заготовки. Також у зонах контакту заготовки з пуансоном і матрицею виникають стискаючі радіальні напруження і досягають значень у межах $\sigma_r = -310 \dots -400$ МПа (рис. 8 б). Розтягувальні напруження $\sigma_r = 210 \dots 300$ МПа отримано у верхніх шарах металу стінки на радіусі заокруглення матриці. По всьому об'єму zdeформованої заготовки виникають розтягувальні тангенціальні напруження та досягають максимальних значень у межах $\sigma_\theta = 340 \dots 400$ МПа в області торця заготовки (рис. 8 в). Очевидно ці напруження можуть бути причиною виникнення тріщин в зоні торця при відбортуванні профільованої заготов-

ки. Розподіл інтенсивності напружень σ_i наведено на рис. 8 г. Найбільші значення у межах $\sigma_i = 330 \dots 380$ МПа отримано в області торця фланцю zdeформованої заготовки. Далі по фланцю ці напруження зменшуються до величин $\sigma_i = 240 \dots 280$ МПа у стінці на радіусі матриці.

Розподіли кінцевих компонент деформацій у фланці після відбортування профільованої заготовки показано на рис. 9. Значний об'єм по фланцю займають стискаючі осьові деформації ε_z з досягненням значень у межах $\varepsilon_z = -0,29 \dots -0,35$ в області торця фланцю (рис. 9 а). По висоті стінки ці деформації зменшуються по абсолютній величині до значень $\varepsilon_z = -0,06 \dots -0,11$ на початку радіусу заокруглення стінки. В шарах металу біля радіусу матриці отримано невеликі розтягувальні деформації величиною $\varepsilon_z = 0,06 \dots 0,12$. Подібний вигляд розподілу і значення у циліндричній частині фланцю мають стискаючі радіальні деформації ε_r (рис. 9 б). Розтягувальні радіальні деформації у межах $\varepsilon_r = 0,14 \dots 0,21$ виникають у верхніх шарах металу стінки на радіусі матриці. По всьому об'єму фланцю отримано розтягувальні тангенціальні деформації ε_θ , які досягають максимальних значень у межах $\varepsilon_\theta = 0,56 \dots 0,65$ в області торця фланцю (рис. 9 в). По висоті циліндричної частини фланцю ці деформації зменшуються до величин $\varepsilon_\theta = 0,087 \dots 0,18$ на початку радіусу заокруглення стінки.

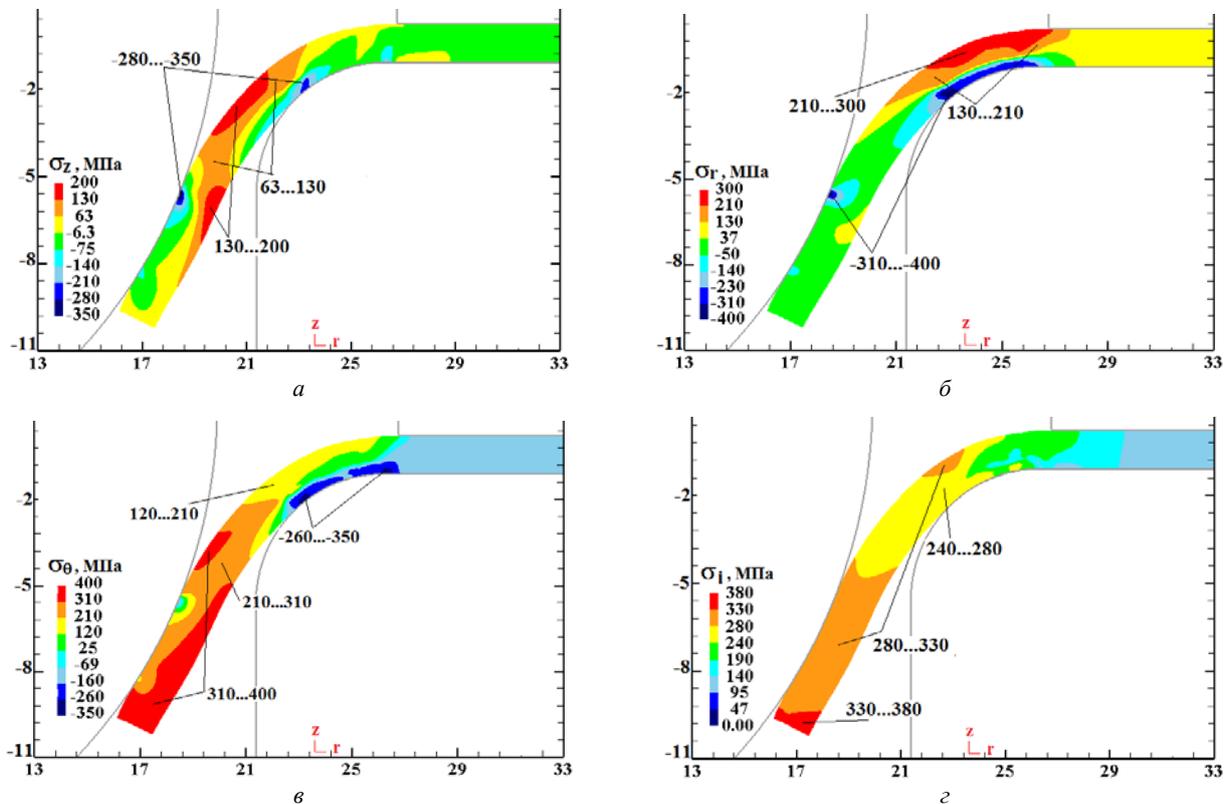


Рис. 8. Розподіли компонент напружень у zdeформованій профільованій заготовці при максимальному зусиллі відбортування: а – розподіл σ_z , б – розподіл σ_r , в – розподіл σ_θ , г – розподіл σ_i

Пропрацювання структури металу фланцю холодною пластичною деформацією можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ε_i , який представлено на рис. 9 г. Вигляд розподілу аналогічний з деформацією ε_0 , але величини для інтенсивності деформацій відрізняються в більшу сторону. В зоні торцю фланця отримано значення у межах $\varepsilon_i = 0,61 \dots 0,7$ з подальшим

поступовим зменшенням до $\varepsilon_i = 0,17 \dots 0,26$ на початку радіусу заокруглення стінки та до $\varepsilon_i = 0,09 \dots 0,17$ в самому радіусі заокруглення. З урахуванням формування відповідної макроструктури при отриманні профілю на заготовці видавлюванням після відбортуння фланцю слід очікувати підвищені механічні властивості у здеформованому металі.

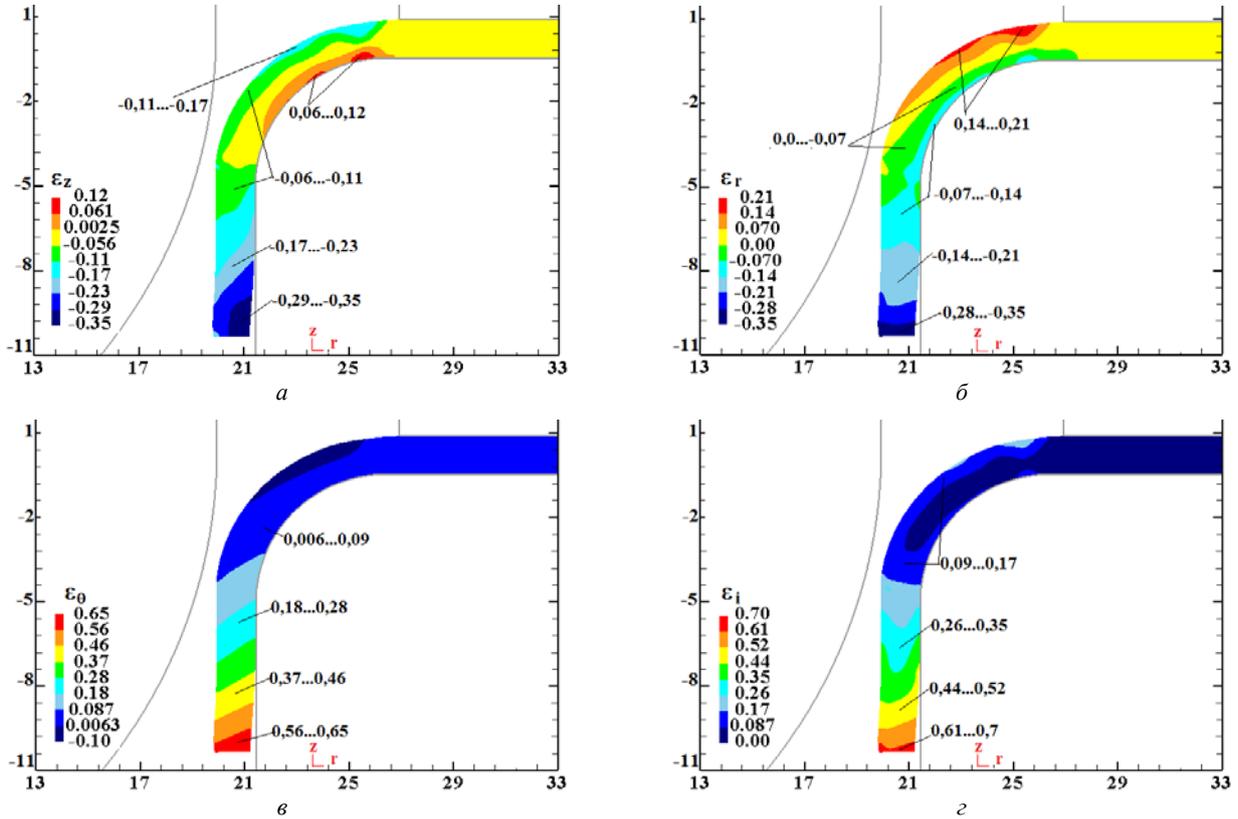


Рис. 9. Розподіл компонент деформацій у фланці: а – розподіл ε_z , б – розподіл ε_r , г – розподіл ε_θ , з – розподіл ε_i

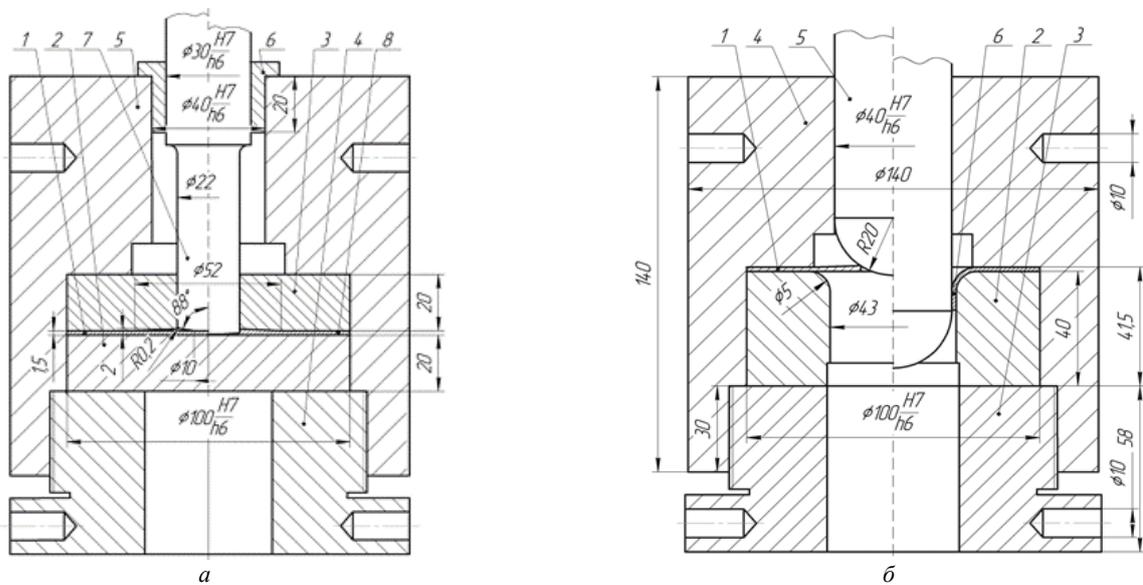


Рис. 10. Схеми штампу при видавлюванні профілю та при відбортунні отвору сферичним пуансоном: а – схема при видавлюванні, б – схема при відбортунні

На основі результатів моделювання було спроектовано і виготовлено конструкцію штампу для виконання виготовлення профільованої заготовки та проведення відбортування отворів у профільованій і традиційній заготовках. Схеми штампу з розмірами деформуючого інструменту при видавлюванні та відбортуванні показано на рис. 10. Ліворуч від вісі симетрії приведено вихідний стан, праворуч – в процесі деформування. Схему цього штампу при видавлюванні профілю на заготовці зображено на рис. 10 *a*. Заготовку 1 розміщено на плиті 2. На плиті 2 встановлено притискач 3 з конічною порожниною для формоутворення профілю на заготовці 1. Пливу 2, заготовку 1 і притискач 3 зафіксовано на нижній плиті 4 за допомогою контейнеру 5 з використанням різьби. В отвір контейнеру 5 встановлено кільце 6 для направлення пуансону 7 при видавлюванні. При переміщенні пуансону 7 метал заповнює порожнину на притискачі 3 і отримують профільовану заготовку 8. На рис. 10 *b* представлено схему штампа при відбортуванні отвору у профільованій заготовці сферичним пуансоном. Заготовку 1 встановлено на матриці 2 і зафіксовано на нижній плиті 3 за допомогою контейнеру 4 з використанням різьби. Відбортування здійснюють пуансоном 5 та отримують деталь з фланцем 6.

Фотографії контейнеру і нижньої плити штампу показано на рис. 11. Для складання і розбирання штампу контейнер (рис. 11 *a*) і нижня плита (рис. 11 *b*) мають технологічні отвори на бокових поверхнях.



Рис. 11. Фотографії контейнеру (*a*) і нижньої плити (*b*)

На рис. 12 зображено фотографії деталей штампу для виконання профілювання заготовки згідно опису (див. рис. 10 *a*). Фотографії деталей для здійснення відбортування згідно опису (див. рис. 10 *b*) та штампу на випробувальній машині TIRA test 2300 приведено на рис. 13.

Профільовану заготовку з перемичкою після видавлювання, профільовану заготовку з отвором та деталь після відбортування зображено на рис. 14. На рис. 14 *a* наведено профільовану заготовку з перемичкою після профілювання видавлюванням, а на рис. 14 *b* показано цю заготовку з отвором. Деталь з фланцем після відбортування представлено на рис. 14 *в*.

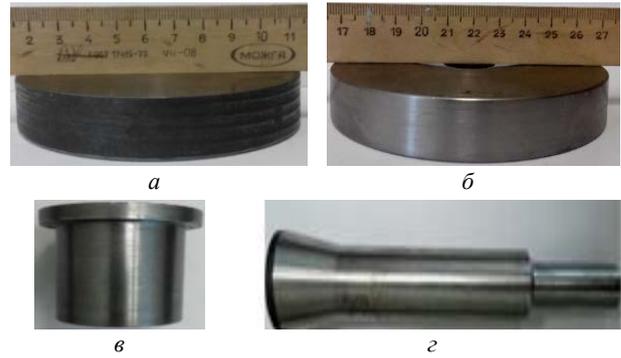


Рис. 12. Фотографії деталей штампу для виконання профілювання заготовки: *a* – плита 2, *b* – притискач 3, *в* – кільце 6, *г* – пуансон 7

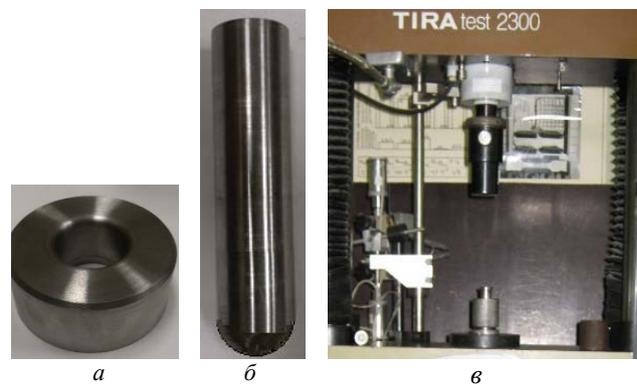


Рис. 13. Фотографії деталей для відбортування та самого штампу: *a* – матриця 2, *b* – пуансон 5, *в* – штамп на випробувальній машині TIRA test 2300

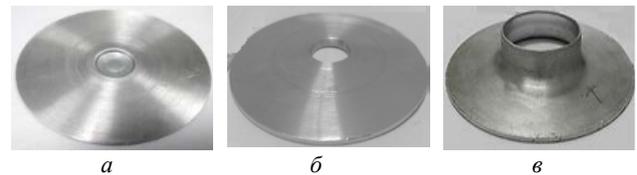


Рис. 14. Профільована заготовка з перемичкою (*a*), профільована заготовка з отвором (*b*) деталь з фланцем після відбортування (*в*)

Для зусиль видавлювання профілю і відбортування отворів у профільованій заготовці сферичним пуансоном проведено порівняння результатів експериментальних досліджень і даних моделювання з використанням MCE (рис. 15). Для зусилля видавлювання дані експерименту приведено по зусиллю, яке визначено по манометру пресу (рис. 15 *a*). Графік зусилля відбортування отримано на випробувальній машині TIRA test 2300 (рис. 15 *b*). Розбіжність експериментальних і даних моделювання складає 4,5...6 % для видавлювання і відбортування.

Для порівняння результатів моделювання і експериментальних даних по товщині стінки фланців після відбортування профільованої і традиційної заготовок отримані деталі були розрізані по середині та про-

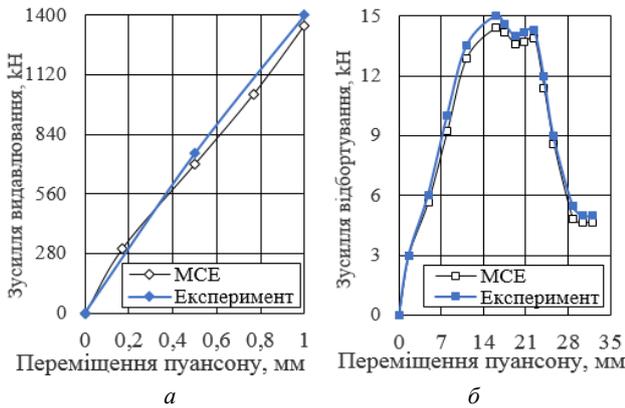


Рис. 15. Порівняння експериментальних результатів і даних моделювання МСЕ по зусиллях видавлювання та відборткування: *a* – по зусиллях видавлювання, *б* – по зусиллях відборткування

ведено заміри товщини стінки на радіусі заокруглення, циліндричної частини і в зоні торця. Результати вимірювання товщини в міліметрах показано на рис. 16. Фланець після відборткування профільованої заготовки (рис. 16 *a*) має практично однакову товщину стінки по всій довжині, яка майже не відрізняється від товщини вихідної заготовки ($S_0 = 1,5$ мм). Порівняння з результатом моделювання (див. рис. 7 *a*) показує незначне відхилення величини товщини на радіусі заокруглення. Після відборткування традиційної заготовки (рис. 16 *б*) фланець має різну товщину на радіусі заокруглення (1,4 мм), по середині циліндричної частини (1,2 мм) та в зоні торцю (1,0 мм). При цьому викривлення торцю склало 0,45 мм. Наведені значення добре узгоджуються з результатами моделювання (див. рис. 7 *б*).

Таким чином результати експериментів підтвердили дані моделювання по зусиллях і розмірах фланців після відборткування.

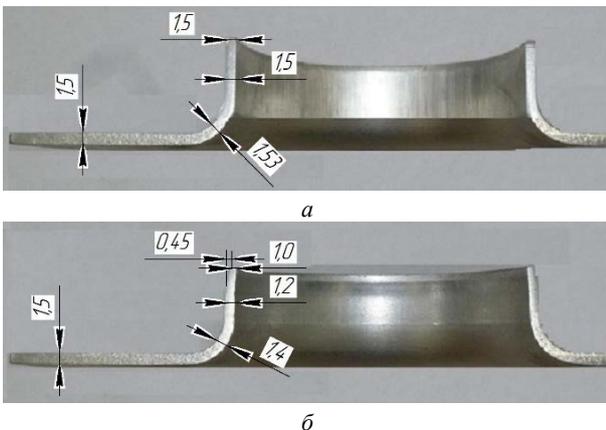


Рис. 16. Експериментальні розміри товщини стінки по довжині фланців після відборткування: *a* – профільованої заготовки, *б* – традиційної заготовки

Висновки

1. З використанням методу скінченних елементів і програми DEFORM проведено моделювання процесів відборткування отворів у профільованій листовій заготовці із сплаву Д16 плоским, конусним та сферичним пуансонами. Застосовано пружно-пластичну модель металу, яка дозволила провести аналіз процесів відборткування, вилучення пуансонів із zdeформованих заготовок та встановити кінцеві форму і розміри фланців після відборткування.

2. 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 радіусі, що відповідає початку заокруглення матриці для відборткування.

3. Встановлено вплив форми пуансонів на залежності зусиль відборткування профільованої заготовки і вилучення від переміщення пуансонів. Мінімальне зусилля відборткування забезпечує сферичний пуансон. Для сферичного пуансону проведено моделювання відборткування отвору в традиційній заготовці з визначенням зусилля, яке на 19 % менше від такого зусилля для профільованої заготовки.

4. Виявлено кінцеві розміри фланців після відборткування профільованої і традиційної заготовок. Використання профільованої заготовки дозволило отримати фланець з постійною товщиною стінки по довжині та незначним відхиленням стінки від отвору матриці, що суттєво підвищило геометричну точність фланцю.

5. Для відборткування профільованої заготовки сферичним пуансоном встановлено розподіли компонент напружень при максимальному значенні зусилля відборткування та розподіли компонент кінцевих деформацій у фланці після вилучення пуансону.

6. Використання профільованої заготовки дає можливість суттєвого збільшення висоти циліндричної частини фланців шляхом подальшого виконання відборткування з потоншення стінки. У отриманому фланці слід очікувати підвищені механічні властивості завдяки додатковому пропрацюванню структури металу холодною пластичною деформацією на стадії формоутворення отвору видавлюванням.

7. По результатах моделювання спроектовано і виготовлено штамп з комплектом інструменту для отримання видавлюванням профілю на заготовці та здійснення відборткування. Результати проведених експериментів показали хорошу узгодженість з результатами моделювання по зусиллях видавлювання і відборткування та по товщині стінки отриманих фланців після відборткування профільованої та традиційної заготовок.

References

- [1] V. P. Romanovsky, *Handbook of Cold Forming*, Leningrad: Mechanical Engineering. 1979.
- [2] E. I. Semenov Eds., *Forging and stamping*, In 4 vol., Vol. 4. “Sheet stamping,” A. D. Matveeva Ed., Moscow: Mechanical Engineering. 1985–1987.
- [3] L. I. Rudmana Ed., *Die designer’s handbook: Sheet stamping*, Moscow: Mechanical Engineering. 1988.
- [4] A. V. Kaliuzhnyi and V. L. Kaliuzhnyi, *Intensification of form-building processes of cold sheet stamping*. Kyiv: Sik Group Ukraine LLC. 2015.
- [5] Y. Huang and K. Chien, “Influence of the punch profile on the limitation of formability in the hole-flanging process”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 117, Issues 1–2, pp. 43–51, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01060-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01060-3).
- [6] S. Thipprakmas, M. Jin. and M. Murakawa, “Study on flanged shapes in fineblanked-hole flanging process (FB-hole flanging process) using finite element method (FEM),” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 192–193, pp. 128–133, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.040>.
- [7] A. Krichen, A. Kacem, M. Hbaieb, “Blank-holding effect on the hole-flanging process of sheet aluminum alloy,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211. Issue 4, pp. 619–626, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.018>.
- [8] A. Kacem, A. Krichen and P. Y. Manach, “Occurrence and effect of ironing in the hole-flanging process,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, Issue 10, pp. 1606–1613, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.04.017>.
- [9] S. Thipprakmas and W. Phanitwong, “Finite element analysis of flange-forming direction in the hole flanging process”, *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 61, pp. 609–620, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3721-8>.
- [10] Q. Lin, W. Dong, Z. Wang and K. Hirasawa, “A new hole-flanging method for thick plate by upsetting process,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. Vol. 24, Issue 7, pp. 2387–2392, 2014, doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63361-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63361-6).
- [11] Y. Dewang, M. S. Hora and S. K. Panthi, “Finite Element Analysis of Non-axisymmetric Stretch Flanging Process for Prediction of Location of Failure”, *Procedia Materials Science*, Vol. 5, pp. 2054–2062, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.539>.
- [12] H. Soussi, N. Masmoudi and A. Krichen, “Analysis of geometrical parameters and occurrence of defects in the hole-flanging process on thin sheet metal,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 234, pp. 228–242, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.03.027>.
- [13] Y. Dewang, R. Purohit and N. Tenguria, “A study on sheet metal hole-flanging process,” *Materialstoday Proceedings*, Vol. 4, Issue 4, Part D, pp. 5421–5428, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.05.053>.
- [14] D. Morales-Palma, M. Borrego, A. Martínez-Donaire, G. Centeno, C. Vallellano, “Optimization of hole-flanging by single point incremental forming in two stages”, *Materials*, 11(10), 2029, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11102029>.
- [15] M. Laugwitz, H. Voswinckel, G. Hirt and M. Bambach, “Development of tooling concepts to increase geometrical accuracy in high speed incremental hole flanging,” *International Journal of Material Forming*, Vol. 11, pp. 471–477, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1356-5>.
- [16] A. J. Martínez-Donaire, M. Borrego, D. Morales-Palma, G. Centeno, C. Vallellano, “Analysis of the influence of stress triaxiality on formability of hole-flanging by single-stage SPIF”, *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 151, pp. 76–84, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.006>.
- [17] L. I. Besong, J. Buhl and M. Bambach, “Investigations on hole-flanging by paddle forming and a comparison with single point incremental”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 164, 105143, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci>.
- [18] Y. Liu, Y. Shu, H. Chen and Z. Zhang, “Deformation characteristics analysis of the fine blanking-extrusion flanging process”, *Procedia Manufacturing*, Vol. 50, pp. 129–133, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.024>.
- [19] J. Rihacek, V. Zejda, E. Peterkova and M. Cisarova, “Influence of initial hole preparation on properties and limits in hole flanging,” *MM Science Journal*, 2020, doi: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020_12_2020065.
- [20] L. I. Besong, J. Buhl and M. Bambach, “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*, Vol. 15 (37), 2022, <https://doi.org/10.1007/s12289-022-01684-6>.
- [21] S. E. Seyyedi, H. Gorji, M. Bakhshi-Jooybari and M. J. Mirnia, “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*. Vol. 270. 112225, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023>.
- [22] H. Wang, Z. Yan, A. Xiao, Z. Yu, X. Chen and X. Cui, “Improvement of flanging accuracy with small spring back and service performance of AA7075 using high-speed forming,” *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 119, pp. 790–805, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.107>.
- [23] A. V. Kaliuzhnyi, S. A. Pakholko, I. P. Kulikov and V. L. Kaliuzhnyi, Pat. 69344 Ukraine. Method of selecting holes. April 25, 2012.

Increasing the geometric accuracy of flange walls when flanging holes by using profiled sheet metal workpieces

V. V. Dragobetskyi¹ • O. V. Kaliuzhnyi² • V. L. Kaliuzhnyi³

¹ Mykhailo Ostrohradskyi National Technical University, Kremenchuk, Ukraine

² IT education academy, Kyiv, Ukraine

³ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract. Flanging of holes to produce flanges in sheet metal blanks and profiles is widely used in the manufacture of parts in many industries, including aircraft and instrumentation. Significant disadvantages of flanging holes are the low geometric accuracy of the flanges obtained due to the presence of significant wall thinning along the length of the flanges and the deviation of the flange wall from the cylindrical surface of the hole of the flanging die. The wall deviation occurs due to elastic deformation after the punch is removed from the deformed workpiece. To eliminate such deficiencies, flange calibration operations are used by performing additional thinning of the cylindrical part of the flange wall. Additional thinning is also used to increase the height of the flanges to be flanged. The use of thinning leads to certain limitations when connecting the flanged parts to other products using threads. Therefore, research aimed at improving the geometric accuracy of flanges in the direction of reducing wall thinning along the length and reducing wall curvature during flanging is relevant. One way to solve this problem is to use a pre-profiled workpiece.

To increase the geometric accuracy of the walls of the resulting flanges after flanging the holes by using a pre-profiled sheet blank. The use of a pre-profiled sheet workpiece with the largest profile thickness near the hole with a gradual decrease in thickness to the original thickness at the beginning of the rounding radius of the flanging die will significantly reduce the thinning and curvature of the flange wall after flanging the hole. Using the finite element method (FEM), the processes of profiling the workpiece by extrusion to obtain a bridge and punching the bridge, as well as the subsequent flanging of holes with flat, conical and spherical punches were modeled. The dependence of the flanging forces and the forces for removing the punches from the deformed workpieces on the displacement of the punches was determined. For a spherical punch with a minimum flanging force, the dimensions of the flange were determined and compared with those of a traditional workpiece. The stress state of the metal at the maximum flanging force of a profiled workpiece with a spherical punch and the final deformed state after the punch is removed were determined. The design of the punch with a set of parts for profiling and flanging was developed and manufactured. Experimental studies were conducted, the results of which showed good agreement with the modeling data on the forces of extrusion and flanging and the dimensions of the resulting flanges. By using a profiled workpiece made of aluminum alloy D16, the geometric accuracy of the flanges obtained after flanging the hole was increased. The wall thickness of the resulting flange in length is almost the same as the thickness of the original workpiece and the deviation of the wall from the cylindrical surface of the hole of the flanging die is significantly reduced.

Keywords: orbital stamping, rolling stamping, energy-force parameters, technological process, work balance method, modeling, finite element method.
