

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

ПАХОЛКО СЕРГІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.983.34

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВИРОБІВ В ПРОЦЕСАХ
ВІДБОРТУВАННЯ

Спеціальність 05.03.05 - процеси та машини обробки тиском

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор

Калюжний Володимир Леонідович, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», професор кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор

Мороз Микола Миколайович, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, завідувач кафедри транспортних технологій

кандидат технічних наук, доцент

Левченко Володимир Миколайович, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри обробки металів тиском

Захист відбудеться “13” червня 2016 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.01 Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", за адресою 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37, корп. №1, ауд. №166.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

03056, м. Київ, проспект Перемоги 37.

Автореферат розісланий “13” травня 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор

Боронко О.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для сучасного машинобудування надзвичайно важливим є удосконалення існуючих та розробка нових технологій виготовлення деталей методами обробки металів тиском, які б забезпечували підвищення продуктивності виготовлення, економію металу та високу якість виробів. Велику кількість машинобудівних деталей виготовляють формоутворюючими процесами холодного листового штампування, зокрема процесами відборткування. Відборткування отворів в листових заготовках та профілях приводить до утворення горловини на плоских чи криволінійних поверхнях. Часто деталі, які отримані відборткуванням, утворюють роз'ємні та нероз'ємні з'єднання з іншими виробами.

При традиційному відборткуванні отворів у листових заготовках і профілях стінка горловини завжди потоншується та має викривлення. Для забезпечення надійності та довговічності з'єднань відборткованих деталей з іншими виробами та збільшення висоти горловини за рахунок потоншення стінки при відборткуванні, необхідно отримувати здеформовану частину з постійною товщиною стінки та без викривлення. Таку стінку після відборткування можна отримати із використанням попередньо зпрофільованої заготовки. Попереднє профілювання заготовки полягає в збільшенні товщини частини заготовки, яка в подальшому відбортковується.

В теперішній час технологія відборткування попередньо зпрофільованих листових заготовок проектується на основі експериментальних даних та виробничому досвіді. Для попереднього профілювання заготовок можна використовувати формоутворення порожнин холодним видавлюванням з подальшим пробиванням перемички. Однак, практично відсутні аналітичні залежності для визначення форми та розмірів профілю частини вихідної заготовки, яка в подальшому відбортковується з забезпеченням постійної товщини стінки горловини. Мало даних для розрахунків зусиль та питомих зусиль попереднього профілювання вихідних заготовок шляхом формоутворення порожнин холодним видавлюванням. Недостатньо вивчений вплив форми пуансонів, радіусу заокруглення матриці, відносної товщини заготовки на відборткування отворів у попередньо зпрофільованих заготовках.

Тому тема дисертаційної роботи, яка направлена на: розроблення способу відборткування отворів у попередньо зпрофільованих заготовках, який би забезпечував постійну товщину стінок; визначення конструктивних (геометричні розміри пуансону та матриці, величина зазору), технологічних (форма та розміри вихідної заготовки, відносна товщина заготовки, коефіцієнт відборткування, тип змащення) та фізико-механічних (діаграма пластичності, пружні властивості та діаграма істинних напружень матеріалу заготовки) параметрів, за допомогою яких можна забезпечити необхідну якість відборткованих заготовок, а саме – задану точність та розміри (що виключають потоншення стінки), зміцнення та ступінь використання ресурсу пластичності здеформованого металу; розроблення інженерних методик розрахунку параметрів попереднього профілювання заготовок та подальшого їх відборткування, є **актуальною**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язане з держбюджетними науково-дослідними роботами (НДР), які виконувалися і виконуються в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» на кафедрі механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів: НДР 0111U001581 тема № 2446п «Розробка конструкцій штампового оснащення для реалізації пластичної деформації в процесах холодного листового і об'ємного штампування і отримання виробів з підвищеною надійністю і довговічністю»; НДР 0113U001854 тема № 2646п «Підвищення продуктивності виготовлення та якості виробів в формоутворюючих процесах холодного листового штампування». В наведених роботах автор приймав участь як виконавець.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є визначення конструктивних, технологічних та фізико-механічних параметрів, за допомогою яких можна було б отримувати вироби без потоншення стінки з прогнозованою точністю і розмірами в процесах відборткування круглих отворів у попередньо зпрофільованих заготовках.

Для досягнення поставленої мети в роботі поставлені та вирішені наступні задачі:

1. На основі аналітичного огляду науково-технічної літератури та аналізу існуючих способів відборткування круглих отворів у листових заготовках, розробити спосіб відборткування, який забезпечує отримання zdeформованої частини з постійною товщиною стінки по довжині та без викривлення циліндричної частини.

2. Розробити методику теоретичних та експериментальних досліджень процесів профілювання заготовки та її подальшого відборткування для визначення параметрів, що впливають на дані процеси.

3. Методом спільного розв'язку наближених диференціальних рівнянь рівноваги з умовою пластичності отримати аналітичні залежності для інженерних розрахунків параметрів попереднього профілювання листових заготовок холодним видавлюванням конусним пуансоном та подальшого відборткування отворів у вказаних заготовках.

4. Розробити скінченно-елементні математичні моделі вісесиметричного відборткування отворів в традиційних та попередньо зпрофільованих заготовках, які враховують комплексний вплив конструктивних, технологічних та фізико-механічних факторів, що впливають на формоутворення виробів.

5. Розрахунковим шляхом визначити вплив геометрії пуансонів, радіусів заокруглення матриці та відносної товщини заготовки на величину зусилля деформування, розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті та напружено-деформований стан заготовок при відборткуванні отворів у попередньо зпрофільованій заготовці. Встановити якість виробів шляхом визначення кінцевої геометричної форми та розмірів відборткованих частин, зміцнення та ступінь використання ресурсу пластичності zdeформованого металу.

6. Провести експериментальні дослідження для підтвердження адекватності результатів розрахунків по отриманих аналітичних залежностях та розроблених скінченно-елементних моделях.

7. Розробити рекомендації по проектуванню технології і штампового оснащення для попереднього профілювання заготовок та подальшого їх відборткування, впровадити у виробництво технологічні процеси по відборткуванні отворів у попередньо зпрофільованих заготовках.

Об'єкт дослідження. Процеси відборткування круглих отворів у традиційній та попередньо зпрофільованій листовій заготовці.

Предмет дослідження. Конструктивні, технологічні та фізико-механічні параметри процесів відборткування, їх комплексний вплив на силові режими формозміни металу та якість виробів.

Методи досліджень. Чисельні експерименти проведені з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) та ліцензованого пакету програм DEFORM. Для створення інженерної методики визначення параметрів відборткування отворів у попередньо зпрофільованій заготовці використаний теоретичний метод спільного розв'язку наближених диференціальних рівнянь рівноваги з умовою пластичності. Експериментальні дослідження проводилися у виробничих і лабораторних умовах на універсальному пресовому обладнанні з використанням спеціально виготовленого оснащення.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукову новизну мають наступні результати роботи:

1. Вперше, за допомогою методу спільного розв'язку наближених диференціальних рівнянь рівноваги з умовою пластичності, проведено аналіз процесу вдавлення конусного пуансону в листову заготовку. З урахуванням тертя та зміцнення металу, отримані залежності для визначення напруженого стану в осередку деформації, питомих зусиль на пуансоні та зусилля вдавлення для розрахунків параметрів попереднього профілювання заготовки під подальше відборткування.

2. Вперше, з використанням методу спільного розв'язку наближених диференціальних рівнянь рівноваги та умови пластичності, отримані аналітичні залежності для визначення напружено-деформованого стану заготовки та зусилля деформування при відборткуванні круглих отворів конусним пуансоном у попередньо зпрофільованих листових заготовках.

3. Отримали подальший розвиток математичні моделі на основі МСЕ процесів відборткування круглих отворів у традиційній та попередньо зпрофільованій листовій заготовці в напрямку виявлення впливу конструктивних, технологічних та фізико-механічних факторів на форму і розміри zdeформованих заготовок, зміцнення та ступінь використання ресурсу пластичності zdeформованого металу.

4. Вперше при відборткуванні отворів у попередньо зпрофільованих заготовках виявлений вплив геометричної форми пуансонів, відносної товщини заготовки на напружено-деформований стан в осередку деформації, зусилля відборткування, форму та розміри zdeформованих заготовок з урахуванням накопичених деформацій та напружень, які отримані в заготовці на стадії профілювання холодним видавленням.

Достовірність і обґрунтованість результатів дисертаційної роботи забезпечується строгим використанням сучасних положень теорії пластичності та

деформуємості матеріалів при холодній пластичній деформації; обґрунтуванням математичних моделей з використанням МСЕ; узгодженням одержаних у роботі розв'язків та оцінок із відомими з літератури та отриманими раніше експериментальними даними; прийнятною відповідністю результатів теоретичних досліджень та натурних випробувань при дослідженні процесів відборткування.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення мають наступні результати роботи:

1. Розроблено новий спосіб відборткування круглих отворів у попередньо зпрофільованій листовій заготовці, який забезпечує економію металу на стадії формоутворення отвору та отримання після відборткування zdeформованої частини заготовки з постійною товщиною і без викривлення.

2. Розроблені інженерні методики розрахунку параметрів попереднього профілювання листових заготовок холодним видавлюванням конусним пуансоном та параметрів відборткування отворів конусним пуансоном у зпрофільованій заготовці. Методики дозволяють на стадії проектування технології та штампового оснащення визначати параметри без доопрацювання їх трудомісткими з великою вартістю експериментальними роботами.

3. Встановлені конструктивні, технологічні та фізико-механічні параметри, які забезпечують після відборткування zdeформовану частину заготовки з постійною товщиною стінки та без викривлення циліндричної частини.

4. Розроблені рекомендації по профілюванню вихідних заготовок і подальшому відборткуванню та запропоновані технологічні процеси та конструкції штампового оснащення послідовної дії для профілювання вихідних заготовок та їх подальшого відборткування, що дало змогу поєднати процеси профілювання заготовки, пробивання перемички та відборткування. Результати роботи впроваджені в ТОВ “Пратт Уїтні Патон”, м. Київ.

5. Результати роботи використовуються в навчальному процесі НТУУ «КПІ» при виконанні бакалаврських і магістерських робіт студентами спеціальності «Обладнання та технології пластичного формування конструкцій машинобудування» та в лекційних курсах “Інтенсифікація листового штампування”, “Чисельні методи вирішення прикладних задач обробки металів тиском”, “Технологія холодного штампування та конструювання штамтів”.

Особистий внесок здобувача. У дисертації не використані ідеї співробітників, що сприяли виконанню роботи. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані в співавторстві, автором дисертації здійснені розробка скінченно-елементних математичних моделей процесу відборткування традиційних і зпрофільованих заготовок та розрахунки, виконаний теоретичний аналіз процесів попереднього профілювання заготовок та подальшого відборткування конусним пуансоном за допомогою спільного розв'язку наближених диференційних рівнянь рівноваги з умовою пластичності, проведений аналіз і узагальнення результатів теоретичних та експериментальних досліджень, розроблені технології та оснащення для відборткування та виконане впровадження результатів у виробництво.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації повідомлені і обговорені на Міжнародних науково-технічних конференціях: XIII міжнародній

науково-технічній конференції «Прогрессивная техника и технология-2012», Київ-Севастополь, 2012р; III міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», Київ, 2012р.; IV міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», Київ, 2013 р.; XIV міжнародній науково-технічній конференції «Прогрессивная техника, технология и инженерное образование», Київ-Севастополь, 2013р.; VI Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсозберігання і енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії», м. Харків, 2014.

Публікації. Матеріали дисертації опубліковано у 12 наукових працях, з них 5 статей в провідних фахових виданнях (з яких 1 входить до бази даних SCOPUS), 1 патент України на корисну модель та 6 тез доповідей.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів і висновків. Вона викладена на 171 сторінці, містить таблиць - 8, рисунків - 64, список літературних джерел з 126 найменувань, додатків - 1.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладено загальну характеристику роботи, обґрунтування актуальності теми дисертації, наведено мету та задачі дослідження, наукову новизну і практичні значення отриманих результатів.

У першому розділі викладено аналіз літературних джерел по способах відборткування отворів в листових заготовках та відмічено, що в основному для відборткування використовуються традиційні листові заготовки та мало використовуються попередньо зпрофільовані заготовки.

Значний внесок у вивчення процесів формоутворення деталей при традиційному відборткуванні зробили вітчизняні та зарубіжні вчені: О. Ю. Аверкієв, Ю. О. Аверкієв, Ю. М. Берлет, Г. Вольф, Н. Вонг, Г. Гофман, У. Джонсон, В. Л. Калюжний, Е. Костов, Л. Т. Кривда, В. Маріановіч, Б. М. Марьїн, В. А. Огородніков, В. Петзольд, Є. О. Попов, В. П. Романовський, В. І. Стеблюк, М. В. Сторожев, В. А. Тітов, О. Д. Томльонов, Х. Фенг, Н. Чіткара, С. Шлегау та ін.

За результатами проведеного аналізу існуючих теоретичних та експериментальних досліджень процесів відборткування круглих отворів в листових та зпрофільованих заготовках виявлено, що дослідження в основному направлені на встановлення силових режимів традиційного відборткування отворів та напружено-деформованого стану в zdeформованих заготовках. Практично відсутні дослідження по встановленню форми та розмірів вихідних зпрофільованих заготовок, які після відборткування забезпечують zdeформовану частину заготовки з постійною товщиною стінки.

Аналіз літературних джерел по моделюванню процесів відборткування отворів з використанням скінченно-елементних програм також показує, що дослідження направлені на виявлення зусиль відборткування та напружено-деформованого стану заготовки при відборткуванні та не вирішують проблеми визначення оптимальних і раціональних параметрів для отримання виробів необхідної форми і точності та

параметрів, які забезпечують отримання відбортаної частини з постійною товщиною стінки. Виходячи із наведеного, були сформульовані вищезазначені мета і задачі дослідження.

У другому розділі наведені методики, які використовувались для дослідження процесів відбортуння. Теоретичний аналіз попереднього профілювання вихідних заготовок, шляхом формоутворення порожнин видавлюванням та подальшого відбортуння отворів конусним пуансоном, проведено шляхом спільного розв'язку наближених диференційних рівнянь рівноваги з умовою пластичності (інженерний метод). Описані методики проведення чисельних експериментів, з використанням методу скінченних елементів, та експериментальних досліджень.

Теоретичні дослідження за допомогою інженерного методу необхідні для отримання аналітичних залежностей для визначення основних параметрів профілювання вихідних заготовок та подальшого відбортуння, таких як товщина профілю, напружено-деформований стан заготовки, зусилля деформування та розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті. Для профілювання заготовок основними параметрами є питомі зусилля та зусилля видавлювання. В рішенні необхідно врахувати основні фактори. Це тертя на контактуючих поверхнях та зміцнення матеріалу при формоутворенні профілю на вихідній заготовці. Для відбортуння отворів у зпрофільованій заготовці, крім аналітичних залежностей для встановлення напруженого стану та зусилля деформування, необхідні формули для визначення деформованого стану та форми і розмірів профілю заготовки, який забезпечить здеформовану частину з постійною товщиною стінки.

Використання скінченно-елементних моделей для чисельних розрахунків, з урахуванням комплексного впливу конструктивних, технологічних та фізико-механічних факторів, дозволить виявити силові режими, закономірності формоутворення, форму і розміри здеформованих заготовок та напружено-деформований стан в них, а також встановити ступінь використання ресурсу пластичності здеформованого металу для процесів відбортуння.

При проведенні чисельних досліджень, з використанням МСЕ, процесів формоутворення порожнин видавлюванням та подальшого відбортуння використана пружно-пластична модель металу другого порядку апроксимації із застосуванням теорії пластичності Прандтля-Рейса. Скінченний елемент, який розглядався, вважався вісесиметричним прямокутного перерізу. Скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану проводився з використанням малих переміщень для процесу вдавлення конусного пуансону в заготовку, та з використанням великих переміщень для процесу відбортуння. При відбортунні враховані накопичені деформації, які були отримані на стадії видавлювання.

Метою проведення експериментальних досліджень була перевірка адекватності отриманих результатів при математичному моделюванні з використанням МСЕ та при використанні інженерного методу для процесів традиційного відбортуння та відбортуння попередньо зпрофільованих заготовок.

В третьому розділі проведений аналіз інженерним методом процесів профілювання листових заготовок шляхом формоутворення порожнин холодним

видавлюванням і пробиванням перемички та відборткування круглих отворів в попередньо зпрофільованих заготовках. Сутність відборткування отворів у попередньо зпрофільованій заготовці включає наступні операції (рис. 1): формоутворення порожнини видавлюванням конусним пуансоном (рис. 1а); пробивання перемички (рис. 1б); відборткування отвору (рис. 1в).

Для отримання аналітичних залежностей для розрахунку питомих зусиль та зусиль, які виникають при видавлюванні, проведений теоретичний аналіз процесу вдавлення конусного пуансону в листову заготовку за допомогою спільного розв'язку наближених диференціальних рівнянь рівноваги з умовою пластичності. Розрахункова схема формоутворення порожнини видавлюванням зображена на рис. 2. Заготовка 1 товщиною S_0 , яка встановлена на плиті 2 та зафіксована притискачем 3,

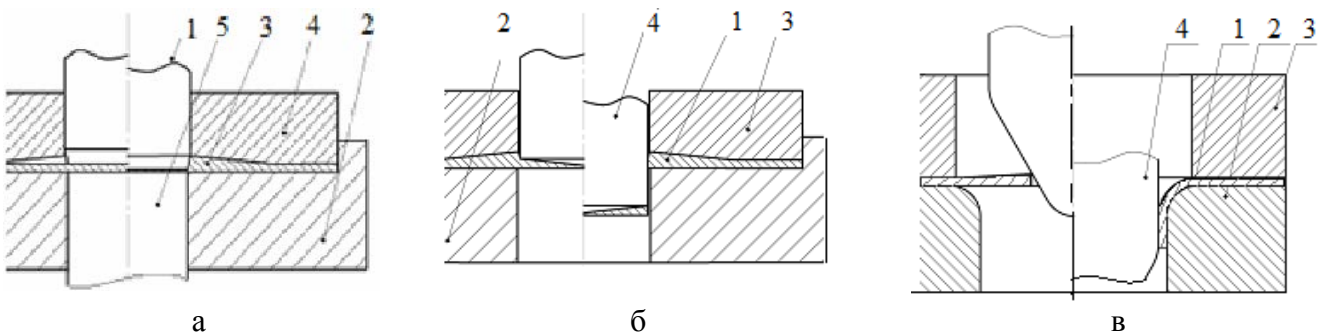


Рисунок 1. Попереднє профілювання видавлюванням (а), пробивання перемички (б) та відборткування заготовки (в): 1 – заготовка; 2 – матриця; 3 – притискач; 4 – пуансон; 5 – виштовхувач

деформується зусиллям P_d за допомогою пуансону 4 радіусом R_n і з конусним робочим торцем з кутом α . В заготовці виділено 4 об'єми. Для аналізу виділена додаткова вісь z' . Перший об'єм обмежений радіусами r_3 і r_e , другий об'єм – радіусами r_e і r . Пластична деформація має місце в 1 та 2 об'ємах. При видавлюванні утворюється перемичка висотою h .

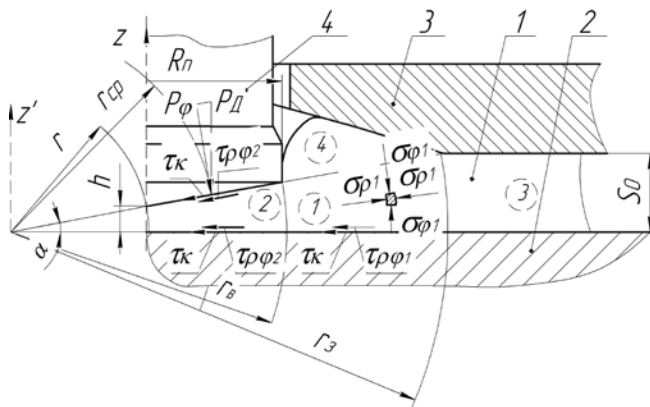


Рисунок 2. Розрахункова схема формоутворення порожнини холодним видавлюванням

Для 1 об'єму після розв'язку диференціальних рівнянь рівноваги з умовою пластичності без врахування дотичних напружень отримана формула для напруження $\sigma_{\rho 1} = -\sigma_s \ln(r_3 / \rho)$, яке при $\rho = r_e$ дорівнює $\sigma_{\rho 1}^{\max} = -\sigma_s \ln \frac{r_3}{r_e}$ та

використане для знаходження напружень в 2 об'ємі. Для 2 об'єму після розв'язку наближених рівнянь рівноваги з умовою пластичності отримано:

$$\sigma_{\rho 2} = -\sigma_s \left[\left(\ln \frac{r_3}{r_6} + 1 - \frac{\alpha}{2\mu} \right) \left(\frac{r_6}{\rho} \right)^{\frac{2\mu}{\alpha}} + \frac{\alpha}{2\mu} - 1 \right]; \quad \sigma_{\varphi 2} = -\sigma_s \left[\left(\ln \frac{r_3}{r_6} + 1 - \frac{\alpha}{2\mu} \right) \left(\frac{r_6}{\rho} \right)^{\frac{2\mu}{\alpha}} + \frac{\alpha}{2\mu} \right]$$

Тут μ - коефіцієнт тертя. По виразу для напруження $\sigma_{\varphi 2}$ знайдене зусилля видавлювання P_D :

$$P_D = 3,14 R_n^2 \sigma_s \left\{ \left(0,5 \ln \frac{S_o}{h + \alpha R_n} + \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{4\mu} \right) \left[\left(\frac{h + \alpha R_n}{h} \right)^{\frac{2\mu}{\alpha}} + 1 \right] + \frac{\alpha}{2\mu} \right\},$$

де σ_s - істинне напруження. Для врахування зміцнення при ступеневій апроксимації діаграми істинних напружень отриманий вираз для σ_s :

$$\sigma_s = \frac{\sigma_6}{1 - \psi_{ш}} \left(\frac{S_o - h - 0,5 R_n \alpha}{S_o \psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}}}, \text{ де } \sigma_6 - \text{ межа міцності, } \psi_{ш} - \text{ відносне потоншення,}$$

яке відповідає утворенню шийки на зразку при випробуванні на розтягування.

Розрахункова схема з позначеннями параметрів відборткування круглих отворів у попередньо зпрофільованій заготовці для аналізу інженерним методом зображена на рис. 3. Ліворуч від вісі симетрії наведене положення перед відборткуванням, праворуч - в процесі відборткування. Вихідна попередньо зпрофільована заготовка 1 встановлена на матриці 2 та зафіксована притискачем 3. Зусилля відборткування P_D прикладається за допомогою конусного пуансону 4. Допущення, які прийняті при визначенні параметрів відборткування: товщина стінки S мала в порівнянні з діаметром, тому згином заготовки на радіусі заокруглення матриці і зміною напружень по товщині стінки нехтуємо. В результаті отримуємо залежності для визначення напружень σ_ρ і σ_θ з урахуванням тертя:

$$\sigma_\rho = \beta \sigma_s (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \ln \frac{r}{R_6}; \quad \sigma_\theta = \beta \sigma_s \left[1 + (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \ln \frac{r}{R_6} \right],$$

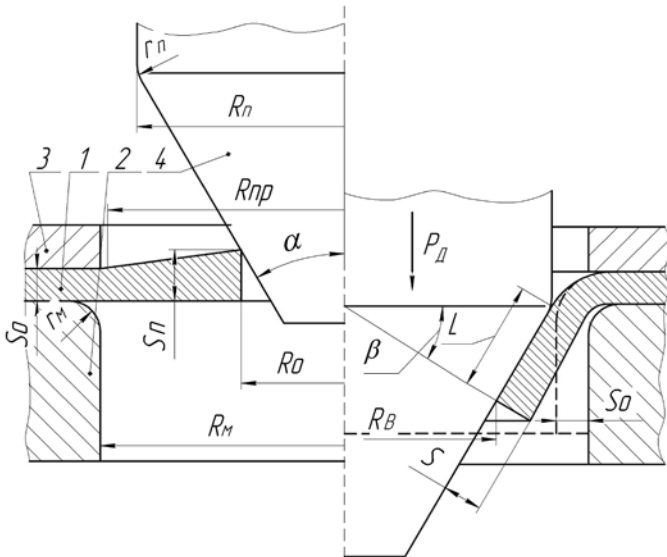


Рисунок 3. Розрахункова схема для аналізу відборткування зпрофільованої заготовки

Використовуючи співвідношення Леві-Мізеса між напруженнями і припошеннями деформацій отримані формули для визначення зміни товщини заготовки S при відборткуванні та розрахунку розміру профілю вихідної заготовки S_n , який забезпечує товщину стінки після відборткування, що дорівнює товщині S_0 :

$$S = S_0 \left[2 \ln \frac{R_n}{r} + 1 + \frac{3 \ln \frac{r}{R_n}}{(1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \ln \frac{R_n}{R_0} + 2} \right]$$

$$S_n = S_0 \left(1 + 0,5 \ln \frac{R_n}{R_0} \right)$$

Також отриманий вираз для розрахунку зусилля відборткування попередньо зпрофільованої заготовки з урахуванням зміцнення:

$$P_d = \frac{1,73 R_n S_0 \sigma_{\theta}}{1 - \psi_{ш}} \left[\frac{R_n \cos^2 \alpha - R_0}{(R_n \cos^2 \alpha + R_0) \psi_{ш}} \right]^{1 - \psi_{ш}} (tg^2 \alpha + \sin^2 \alpha) \times$$

$$\times (1 + \mu / tg \alpha) \left[\frac{4}{2 - \sin^2 \alpha} - 1 - \frac{1,5 \sin^2 \alpha}{tg^2 \alpha + \mu \cdot tg \alpha + 2} \right] / \cos \alpha$$

В четвертому розділі приведені результати розрахунків математичного моделювання з використанням МСЕ та експериментальних досліджень по відборткуванню отворів у традиційних та попередньо зпрофільованих листових заготовках, та проведено їх порівняння.

На рис. 4 показано розрахункові схеми відборткування традиційної та попередньо зпрофільованої заготовки. Для моделювання використовували вісесиметричну заготовку діаметром D_3 товщиною S_0 з отвором після пробивання діаметром D_0 , і таку ж зпрофільовану заготовку з найбільшим розміром потовщеної частини $S_{пр}$ на діаметрі $D_{пр}$. Для зпрофільованої заготовки попередньо були змодельовані процеси видавлювання та пробивання перемички. Використовувався пуансон з радіусом R_p , який забезпечував необхідний зазор z для конкретного дослідження, та матриця з радіусом заокруглення r_m і діаметром отвору матриці D_m . Пуансон рухався вниз із швидкістю деформування $V=2$ мм/сек з переміщенням на кожному кроці навантаження $U_0=0,5$ мм. Математичні моделі процесу відборткування враховували ряд параметрів: геометричну форму робочого інструмента, тертя на контактуючих поверхнях, пружні властивості матеріалу, зміцнення здеформованого металу по діаграмі істинних напружень, розвантаження

після пластичної деформації та вірогідність руйнування при холодній формозмінні. Робочий інструмент рахувався абсолютно жорстким.

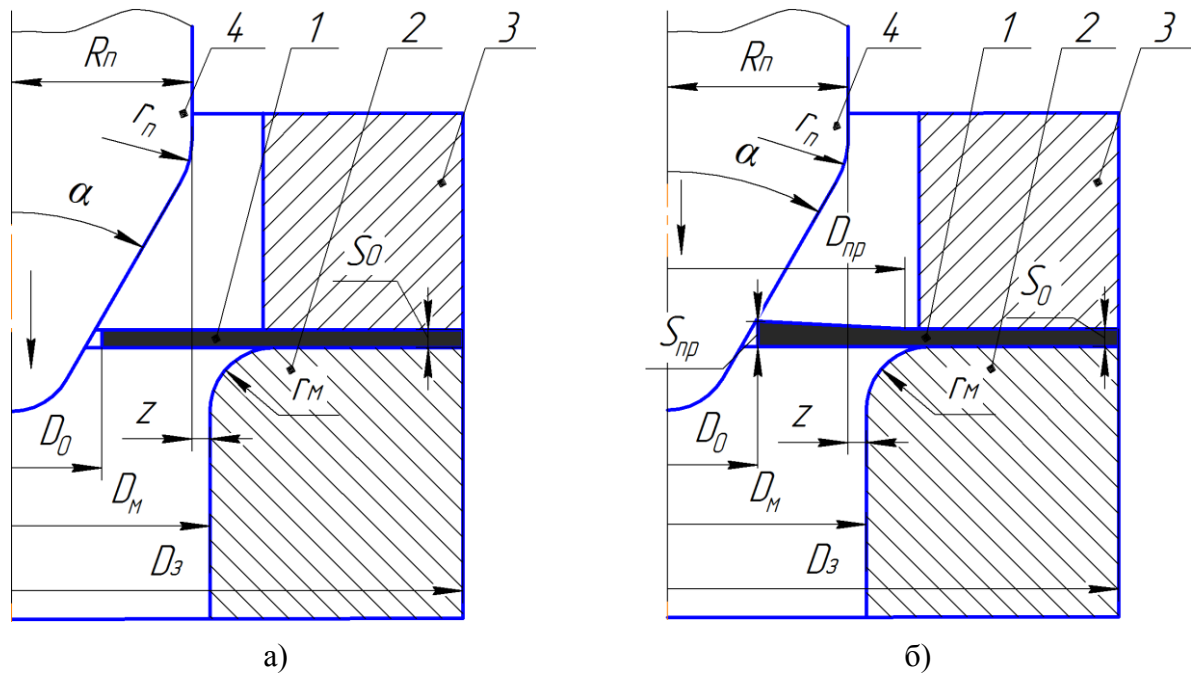
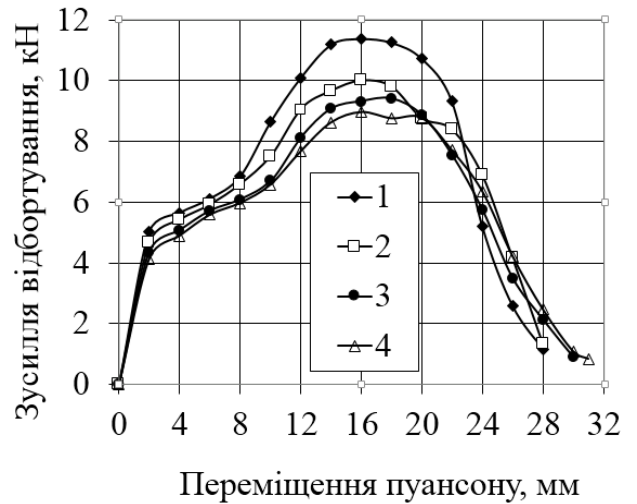


Рисунок 4. Розрахункові схеми процесу відборткування при математичному моделюванні:
а) традиційна заготовка; б) зпрофільована заготовка. 1 – вихідна заготовка, 2 – матриця, 3 – притискач, 4 – пуансон.

Для перевірки адекватності створених скінченно-елементних моделей спочатку було виконане моделювання традиційного відборткування отворів діаметром $D_0=43$ мм у заготовці діаметром $D_3=120$ мм та товщиною $S_0=1,5$ мм із сталі 08 з використанням пуансонів різної геометричної форми, матриць з різними радіусами заокруглення та заготовок з різною відносною товщиною. Використовувались плоскі пуансони радіусом $R_n=30$ мм з радіусами заокруглення $r_n=2, 4$ та 8 мм, конусні пуансони з радіусом циліндричної частини $R_n=30$ мм та кутами $\alpha=30^\circ, 45^\circ$ і 60° та сферичний пуансон з радіусом циліндричної частини $R_n=30$ мм і радіусом торця $r_c=30$ мм. Матриці мали радіуси заокруглень $r_m=3, 5, 7$ та 9 мм. Для дослідження різних величин відносної товщини заготовок використовувались заготовки із сталі 08 з товщиною $S_0=1$ та $1,5$ мм з попередньо утвореними в них отворами діаметром $D_0=7, 8$ та 9 мм. Залежності зусилля відборткування від переміщення пуансону при відборткуванні пуансонами різної геометричної форми та відборткуванні в матриці з різними радіусами заокруглення наведені на рис. 5.



а



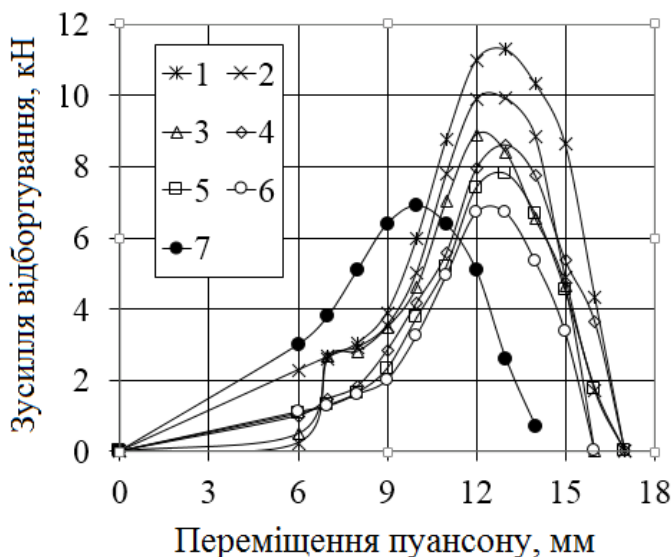
б

Рисунок 5. Залежність зусилля відборткування від переміщення пуансону: а – при відборткуванні пуансонами різної геометричної форми (1 – $r_c=30$ мм, 2 – $r=2$ мм, 3 – $r=4$ мм, 4 – $r=8$ мм, 5 – $\alpha=30^\circ$, 6 – $\alpha=45^\circ$, 7 – $\alpha=60^\circ$); б – при відборткуванні в матриці з різними радіусами заокруглення (1 – $R_m=3$ мм, 2 – $R_m=5$ мм, 3 – $R_m=7$ мм, 4 – $R_m=9$ мм)

На рис. 5а приведені залежності зусилля від переміщення пуансону при відборткуванні пуансонами різної геометричної форми. Найменша величина зусилля має місце при відборткуванні сферичним пуансоном. Зі збільшенням радіусу заокруглення матриці зусилля відборткування зменшується (рис. 5б). Розрахункові дані підтверджуються відомими експериментальними даними Ю. О. Аверкієва.

Розрахункові та експериментальні значення зусилля в залежності від відносної товщини заготовки наведені на рис. 6.

Для підтвердження відповідності результатів математичного моделювання з використанням МСЕ експериментальним даним, проводили порівняння по граничному коефіцієнту відборткування $K_{\text{від}}=d/D$ (d – діаметр попередньо отриманого отвору, D – діаметр відборткованої частини виробу) даних чисельних розрахунків з даними експериментів Попова Є.О. Встановлено, що максимальна похибка становить 12%. Порівняльні графіки показані на рис. 7.



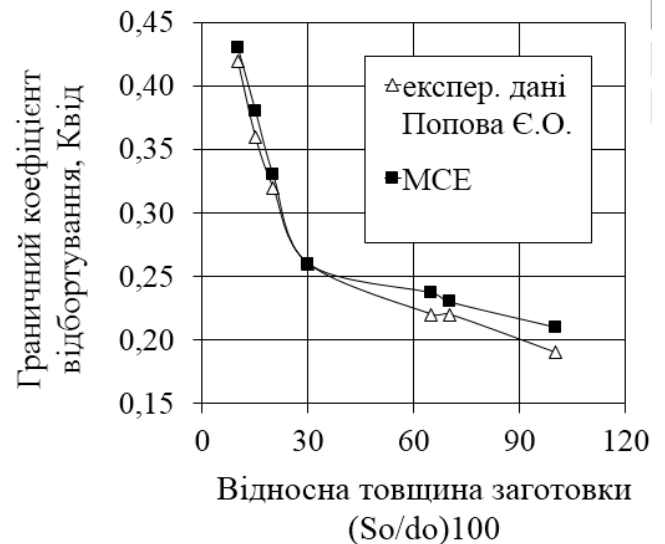


Рисунок 6. Залежність зусилля відборткування від відносної товщини заготовки S_o/d_o : 1-21,4; 2-18,7; 3-16,6; 4-14,2; 5-12,5; 6-11,1 та 7-12,5 (експ.)

Рисунок 7. Значення граничного коефіцієнта відборткування в залежності від відносної товщини заготовки

Попереднє профілювання заготовок проводилося за допомогою видавлювання та пробивання перемички. Розрахунки з використанням MCE виконувалися для заготовок із алюмінію А0, міді М2 та сталі 08 з розмірами вихідної товщини $S_o=1,5$ мм, діаметром заготовки $D_3=100$ мм з попередньо пробитим отвором радіусом $R_0=10$ мм. Висота потовщеної частини $S_p=2,2$ мм на діаметрі $D_{пр}=80$ мм. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону при формоутворенні порожнин показано на рис. 8. На рисунку також наведена експериментальна залежність зусилля для формоутворення порожнини видавлюванням в заготовках із алюмінію А0. За допомогою моделювання були визначені питомі зусилля на притискачі при максимальному зусиллі видавлювання для різних матеріалів. Розподіл питомих зусиль на притискачі показано на рис. 9.

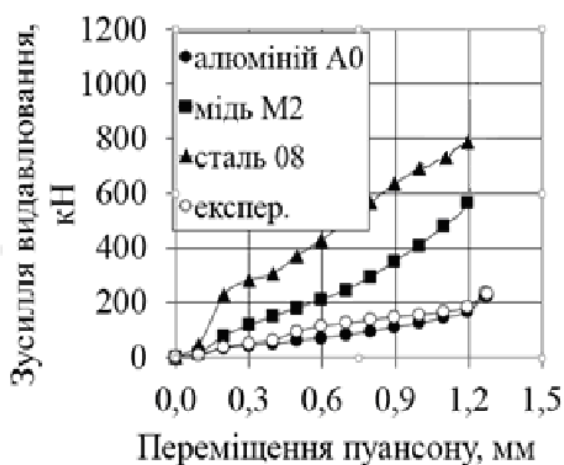


Рисунок 8. Залежності зусилля формоутворення порожнин видавлюванням від переміщення пуансону

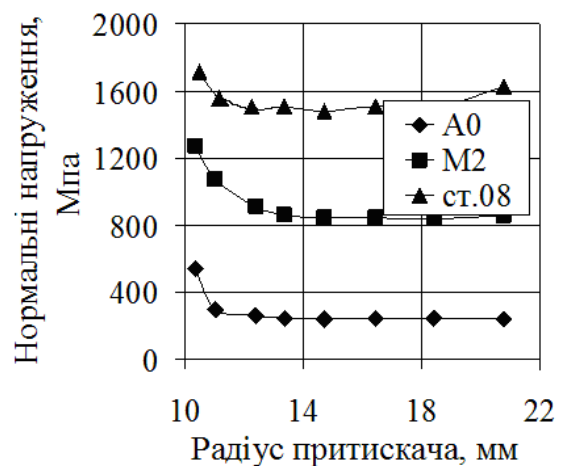


Рисунок 9. Розподіл питомих зусиль на притискачі

Графік залежності зусилля пробивання перемички від переміщення пуансону показано на рис. 10.

Отримані розрахункові графіки зусилля відбортуння попередньо зпрофільованих заготовок, в залежності від геометричної форми пуансону та марки матеріалу, показані на рис. 11а та 11б відповідно. Також на рис. 11б показана величина зусилля відбортуння алюмінієвої заготовки під час проведення експерименту.

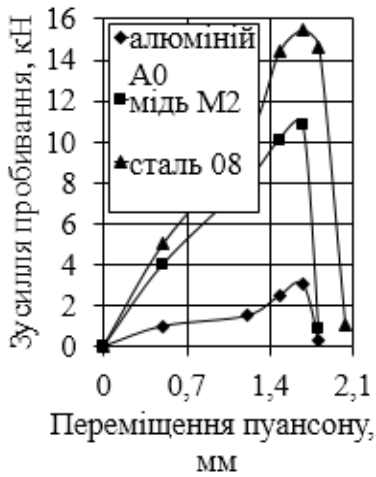
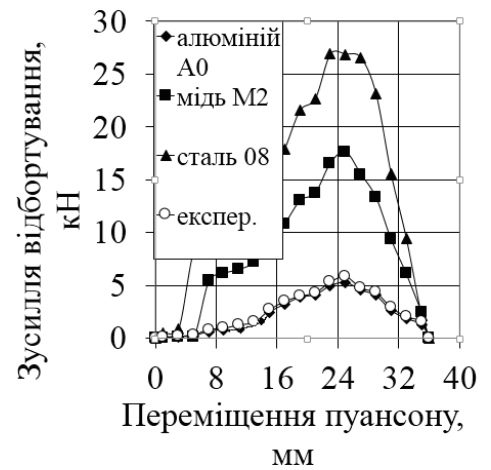


Рисунок 10. Залежність зусилля пробивання перемички від переміщення пуансону



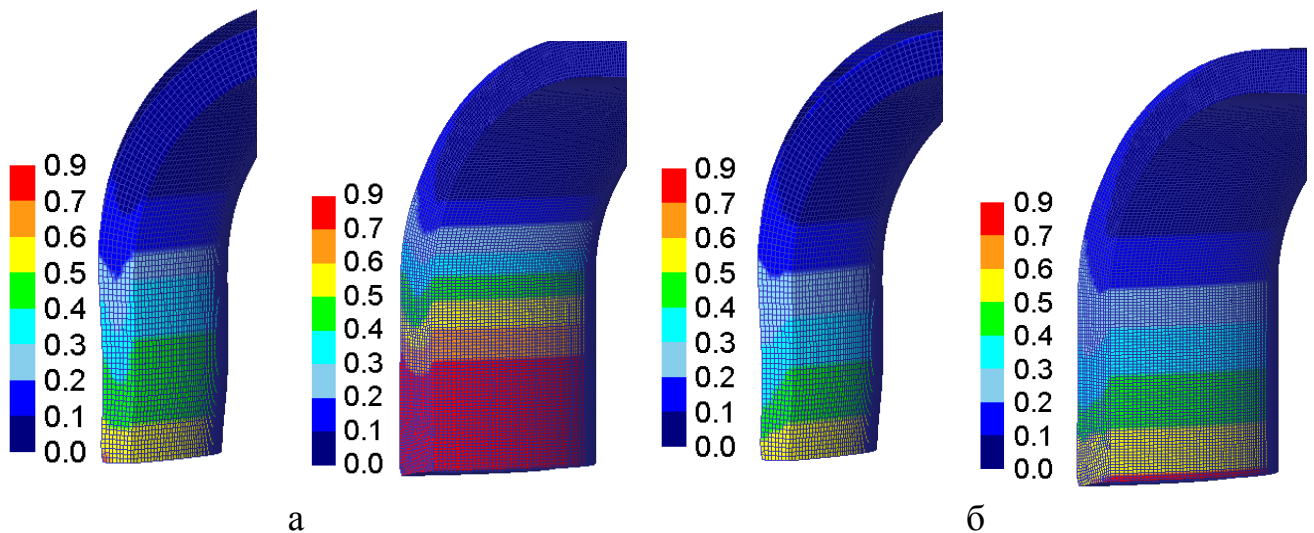
а

Рисунок 11. Залежність зусилля відбортуння заготовок від переміщення пуансону: а) відбортуння пуансонами різної геометричної форми (1 - $r=5\text{мм}$, 2 - $r=7\text{мм}$, 3 - $r=10\text{мм}$, 4 - $\alpha=30^\circ$, 5 - $\alpha=45^\circ$, 6 - $\alpha=60^\circ$, 7 - $r_c=30\text{мм}$); б) відбортуння заготовок з різних матеріалів конусним пуансоном з кутом $\alpha=60^\circ$



б

На рис. 12 показано приклади розподілів інтенсивності деформацій ε_i (а) та ступеню використання ресурсу пластичності ψ (б) в здеформованій частині після відбортуння традиційної та попередньо зпрофільованої заготовок із алюмінію.



а

б

Рисунок 12. Розподіл інтенсивності деформацій (а) та ступеня використання ресурсу пластичності (б) після відбортуння отворів у традиційній та зпрофільованій заготовках

Для попередньо зпрофільованих заготовок зі сталі 08 були проведені чисельні дослідження процесу відбортуння з потоншенням. Для цього, при вихідній товщині заготовки $S_0=1,5\text{ мм}$, використовували зазор між пуансоном та матрицею з розмірами 1, 1,25 та 1,5 мм. При цьому були отримані стінки з наступною висотою

– 18,4, 15,8 та 14,4 мм відповідно. Одержані графіки залежності зусилля відборткування від переміщення пуансону приведені на рис. 13.

Графічне зображення розмірів кінцевої геометрії після відборткування традиційних та зпрофільованих заготовок показано на рис. 14. На рисунку наведені відбортвані вироби, які отримані за допомогою математичного моделювання з використанням МСЕ та після експериментальних досліджень.

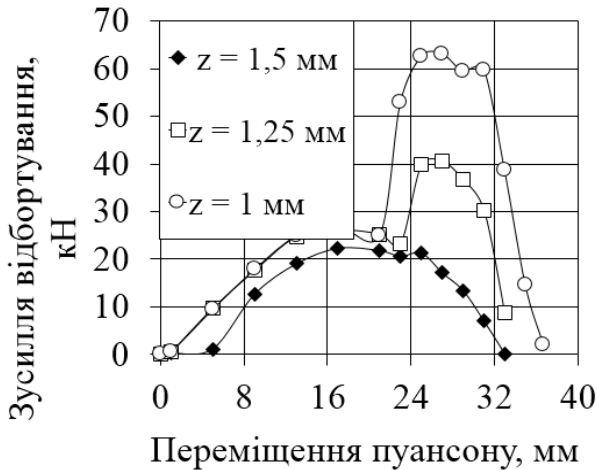


Рисунок 13. Вплив зазору на зусилля при відборткуванні з потоншенням для різних величин зазору

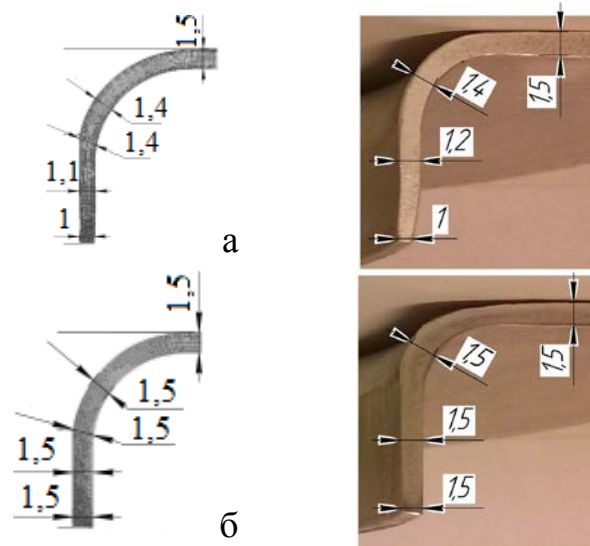


Рисунок 14. Кінцева геометрія відбортваних заготовок: а) традиційна; б) зпрофільована

В п'ятому розділі наведені аналітичні залежності для визначення діаметру попередньо отриманої порожнини видавлюванням під пробивання перемички та подальше відборткування круглого отвору і показано вплив даної величини на висоту відбортваної стінки, яку також можна вирахувати за допомогою одержаних формул. Додатково наведені аналітичні залежності для визначення параметрів профілювання заготовки. За допомогою даних залежностей, можна визначити об'єм, який необхідно набрати, для того, щоб забезпечити рівну товщину відбортваної стінки, а також визначити висоту перемички, яка залишається після видавлювання. Завдяки даним по висоті перемички, ми можемо підібрати необхідне штампове оснащення для її пробивки. Крім того, завдяки профілюванню, відбувається економія металу, який видавлюється з області, яка піде у відходи у вигляді пробитої перемички, в область, що потоншується при відборткуванні.

Також наведені практичні рекомендації по проектуванню технології та конструкцій штампового оснащення для відборткування отворів у зпрофільованих заготовках. Враховуючи можливості нового способу профілювання заготовок та їх подальшого відборткування, запропонована технологія, яка передбачає суміщення процесів пробивання перемички та відборткування.

В дисертації отримані нові теоретичні і практичні розробки, які направлені на вирішення актуальної науково-технічної задачі підвищення якості виробів в процесах відборткування круглих отворів, а також створення інженерних методик визначення технологічних параметрів формоутворення виробів процесами відборткування для забезпечення отримання постійної товщини стінки здеформованих частин.

1. Розроблено новий спосіб відборткування, який забезпечує отримання здеформованої частини з постійною товщиною по довжині та без викривлення циліндричної частини. Спосіб включає попереднє профілювання заготовки шляхом формоутворення порожнин холодним видавлюванням з подальшим пробиванням перемички та відборткування. Однією з переваг даного способу є економія металу на стадії отримання отвору під відборткування.

2. Методом спільного розв'язку наближених диференційних рівнянь рівноваги з умовою пластичності вирішена задача попереднього профілювання листових заготовок холодним видавлюванням конусним пуансоном з урахуванням тертя та зміцнення металу. Отримані аналітичні залежності для визначення напружень в осередку деформацій, питомих зусиль на пуансоні та зусилля видавлювання. Проведені експериментальні дослідження по профілюванню листових заготовок з алюмінію А0 підтвердили результати розрахунків по зусиллю видавлювання та зміцненню здеформованого металу. Відмінність результатів відповідно склала 7 та 9 %.

3. Методом спільного розв'язку наближених диференційних рівнянь рівноваги з умовою пластичності вирішена задача відборткування отворів конусним пуансоном у попередньо зпрофільованій заготовці. Отримані аналітичні залежності для визначення напружень та деформацій у здеформованій заготовці, зусилля відборткування та розмірів профілю вихідної заготовки для забезпечення постійної товщини отриманого виробу.

4. Для перевірки відповідності результатів по створених скінченно-елементних моделях, проведений аналіз значень чисельних розрахунків та експериментальних даних для традиційного відборткування отворів у листових заготовках із сталі 08 конусним пуансоном з різним кутом конусу, плоским та сферичним пуансоном в матрицях з різним радіусом заокруглення. Розрахунком з використанням МСЕ встановлено та експериментально підтверджено, що використання плоского пуансону приводить до найбільшого зусилля відборткування, збільшення радіусу заокруглення плоского пуансону з 2 до 8 мм приводить до зменшення зусилля на 46%, зміна кута конусного пуансону з 30 ° до 60° приводить до зростання зусилля відборткування на 15%, збільшення радіусу заокруглення матриці з 3 до 9 мм знижує зусилля на 21%. Встановлено кінцеві форми та розміри здеформованих заготовок з урахуванням потоншення та викривлення стінки.

5. З використанням МСЕ вивчено вплив відносної товщини заготовки на процес традиційного відборткування круглих отворів в листових заготовках зі сталі 08. Встановлено, що збільшення значення відносної товщини заготовки $(S_0/d_0)100$ з 8,8 до 100 приводить до зменшення коефіцієнту відборткування на 49%.

Експериментально встановлено, що збільшення відносної товщини заготовки з 12,5 до 21,4 приводить до збільшення зусилля відборткування на 61%.

6. Створені скінченно-елементні моделі процесів попереднього профілювання заготовок холодним видавлюванням із алюмінію А0, міді М2 та сталі 08. Встановлені залежності зусилля профілювання від переміщення пуансону, залежності зусилля на притискачі від переміщення пуансону, кінцеві форма та розміри заготовок, розподіл питомих зусиль на пуансоні, величини зміцнення та ступеню використання ресурсу пластичності здеформованого металу.

7. Розроблені скінченно-елементні моделі відборткування отворів у попередньо зпрофільованих заготовках із алюмінію А0, міді М2 та сталі 08, та проведено розрахунковий аналіз по впливу геометричної форми пуансону, радіусу заокруглення матриці та зазору (при відборткуванні з потоншенням) на силові режими та кінцеву геометричну форму виробів.

8. На основі аналізу проведених досліджень було встановлено, що збільшення радіусу заокруглення пуансону з 5 мм до 10 мм призводить до зменшення зусилля відборткування на 17 %; збільшення кута конусного пуансона з 30° до 60° призводить до збільшення зусилля на 25%. При відборткуванні з потоншенням, при вихідній товщині заготовки 1,5 мм, зусилля відборткування при зменшенні зазору від 1,5 до 1 мм збільшується на 60 %, при збільшенні радіусу заокруглення матриці з 5 до 10 мм, зусилля зменшується на 7 %.

9. Розроблені рекомендації по профілюванню вихідних заготовок холодним видавлюванням конусним пуансоном, по відборткуванню отворів у зпрофільованих заготовках та по проектуванню штампового оснащення для профілювання та відборткування зпрофільованих заготовок. Розроблені конструкції штампового оснащення.

10. Результати досліджень впроваджені в ТОВ «Пратт Уїтні Патон», м. Київ, та використовуються в начальному процесі з дисциплін: “Інтенсифікація листового штампування”, “Чисельні методи вирішення прикладних задач обробки металів тиском”, “Технологія холодного штампування та конструювання штамів”. Крім того, методика і напрацьовані результати використовуються при підготовці курсових і дипломних проектів, курсових і магістерських робіт по спеціальності «Обладнання та технології пластичного формування конструкцій машинобудування».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Калюжний О. В. Розрахунково-експериментальний аналіз впливу відносної товщини заготовки на силові режими та якість виробів при відборткуванні / О. В. Калюжний, С. А. Пахолко // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. – Донбаська державна машинобудівна академія. – Краматорськ, 2011 р. - №3 (28). – С. 177-183. *(Здобувачем розроблені скінченно-елементні моделі процесу відборткування заготовок з різної відотною товщиною та проведено аналіз результатів розрахунків)*

2. Калюжний О. В. Аналіз силових режимів та якості виробів при відбортунні пуансонами різної геометричної форми / О. В. Калюжний, С. А. Пахолко // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». – Київ, 2011 р. – № 63. – С. 123 – 127. *(Здобувачем розроблені скінченно-елементні моделі процесів відбортуння з використанням пуансонів різної геометричної форми та проаналізовано їх вплив на силові режими процесу)*

3. Калюжний В. Л. Виключення потоншення і викривлення торця стінки при відбортунні отворів / В. Л. Калюжний, С. А. Пахолко, І. П. Куликов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків, 2011 р. – № 46. – С. 41 – 48. *(Здобувачем запропонована форма деформуючого інструменту, яка виключає потоншення стінки)*

4. Калюжний О. В. Силові режими та формозміна металу при відбортунні отворів у попередньо зпрофільованій заготовці в матрицях з різним радіусом заокруглення // О. В. Калюжний, С. А. Пахолко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків, 2014 р. – 52 – 59. *(Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання)*

5. Калюжний А. В. Повышение качества изделий в процессах отбортовки круглых отверстий в листовых заготовках / А. В. Калюжний, С. А. Пахолко // Журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность». – Днепропетровск, 2014 г. - №5. – С. 22 – 25. (SCOPUS). *(Здобувачем описано спосіб попереднього профілювання заготовок та їх подальшого відбортуння, який забезпечує отримання стінки постійної товщини без викривлення)*

6. Патент на корисну модель 69344 Україна, МПК 21D 26/02. Спосіб відбортуння отворів / Калюжний О. В., Пахолко С. А., Куліков І. П. – Заявл. 18.10.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. №8/2012. *(Здобувачем запропонована схема відбортуння попередньо зпрофільованих заготовок)*

7. Калюжний В. Л. Порівняльний аналіз відбортуння прямокутного отвору в традиційній та зпрофільованій заготовках / В. Л. Калюжний, С. А. Пахолко, О. В. Холявік // Тези доповідей XIII міжнародної науково-технічної конференції «Прогрессивная техника и технология-2012». – Київ-Севастополь, 2012р. – С. 107-108. *(Здобувачем розроблені скінченно-елементні моделі процесів відбортуння прямокутних отворів в традиційній та зпрофільованій заготовках та проведено їх порівняльний аналіз)*

8. Калюжний В. Л. Відбортуння прямокутних отворів із забезпеченням стінки постійної товщини / В. Л. Калюжний, С. А. Пахолко // Тези доповідей III міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти». – НТУУ «КПІ», ММІ. – Київ, 2012р. – С. 31. *(Здобувачем проведені дослідження по профілюванню прямокутного отвору для подальшого відбортуння з отриманням стінки постійної товщини)*

9. Пахолко С. А. Штапове оснащення для відбортуння круглих отворів у зпрофільованих заготовках / С. А. Пахолко, Є. Ю. Чувільов // Тези доповідей IV міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти». – НТУУ «КПІ», ММІ. – Київ,

2013р. – С. 65 – 66. *(Здобувачем спроектований штамп для відборткування зпрофільованих заготовок)*

10. Калюжний О. В. Розрахунково-експериментальний аналіз відборткування круглих отворів у традиційній і зпрофільованій заготовці із алюмінію / О. В. Калюжний, С. А. Пахолко // Тезиси докладов XIV международная научно-техническая конференция «Прогрессивная техника, технология и инженерное образование». – Киев – Севастополь, 2013г. – С. 83 – 84. *(Здобувачем розроблені скінченно-елементні моделі та проведено порівняльний аналіз відборткування традиційних та зпрофільованих заготовок з алюмінію)*

11. Калюжний О. В. Експериментальні дослідження відборткування круглих отворів в традиційній та попередньо зпрофільованій листових заготовках / О. В. Калюжний, С. А. Пахолко // Тези доповідей XV міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта». – Київ, 2014р. – С. 94 – 95. *(Здобувачем описані експериментальні дослідження процесів відборткування традиційних та попередньо зпрофільованих заготовок)*

12. Калюжний О. В. Аналіз інженерним методом процесу формоутворення отворів у листових заготовках холодним видавлюванням конічним пуансоном / О. В. Калюжний, С. А. Пахолко, І.П. Куліков // Тези доповідей V міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти». – Київ, 2014 р. – С. 63 – 64. *(Здобувачем проведені експериментальні дослідження)*

АНОТАЦІЇ

Пахолко С. А. – Забезпечення якості виробів в процесах відборткування. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – процеси і машини обробки тиском. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2016 р.

Дисертація присвячена забезпеченню якості відборткованих горловин шляхом визначення конструктивних, технологічних та фізико-механічних параметрів, що забезпечують отримання відборткованої стінки рівної товщини без викривлення циліндричної частини.

Розроблено новий спосіб відборткування круглих отворів, який передбачає попереднє профілювання листових заготовок шляхом утворення порожнини видавлюванням і пробивання перемички. Створені математичні моделі, з використанням методу скінченних елементів, процесів відборткування круглих отворів в традиційних та попередньо зпрофільованих заготовках, проведено порівняльний аналіз процесів. Визначені раціональні силові режими та параметри відборткування, що забезпечують отримання рівної по товщині відборткованої стінки без викривлення. Отримані аналітичні залежності для аналізу процесів профілювання заготовок та їх подальшого відборткування за допомогою інженерного методу.

Проведені експериментальні та теоретичні дослідження підтвердили можливість та актуальність розвитку математичного моделювання для визначення розмірів і форми вихідних заготовок та напружено-деформованого стану при відбортюванні круглих отворів. Порівняльний аналіз отриманих результатів по силових параметрах та формозміні металу підтвердив відповідність результатів чисельних розрахунків значенням експериментальних досліджень. Похибка становила не більше 15 %, а в деяких випадках не перевищувала 1-2 %.

Результати наукових досліджень використовуються в навчальному процесі в НТУУ «КПІ» та були впроваджені в ТОВ «Пратт Уїтні Патон» (м. Київ).

Ключові слова: відбортювання, профілювання, розміри і форма заготовки, традиційна заготовка, попередньо зпрофільована заготовка, метод скінченних елементів, математичне моделювання.

Pakholko S. A. – Quality providing of products in the flanging process. Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical science, specialty 05.03.05 – process and machines for pressure treatment. – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2016.

The dissertation is devoted for providing quality of flange by definition constructive, technological and physical and mechanical parameters that provide flanging wall equal thickness without curvature.

The new method, which provides profiling of workpiece by extrusion and punching of lintel, was designed. The finite element method was used for creative the mathematical models of flanging process of round holes in the traditional and preformed workpieces, the comparative analysis was conducted. The optimal power modes and parameters of flanging process, which provide flat flanging wall without curvature, were identified. The engineering method was used for developing of analytical method for analysis of profiling process of workpieces and of flanging process.

The experimental and theoretical researches confirmed that methods which determining the size and shape of initial workpiece in flanging process of round holes are actual and have opportunity for development. The comparative analysis of parameters of efforts and forming of the metal confirmed that results of mathematical models which were created are adequate and the results were received by experimental and theoretical researches have a high conformity. The error does not exceed 15 %.

The results of scientific researches are using in educational process in NTUU “KPI” and have been embed in LLC “Pratt & Witney Paton” (Kyiv).

Keywords: flanging, profiling, size and shape of the workpiece, traditional workpiece, preformed workpiece, finite element method, mathematical modeling.

Пахолко С. А. – Обеспечение качества изделий в процессах отбортки. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – процессы и машины обработки давлением. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, 2016 г.

Диссертация посвящена обеспечению качества отбортованных горловин путем определения конструктивных, технологических и физико-механических параметров, которые обеспечивают получение отбортованной стенки ровной толщины без искривления цилиндрической части.

Разработан новый способ отбортовки круглых отверстий в листовых заготовках, который предусматривает предварительное профилирование заготовок путем выдавливания коническим пуансоном круглой полости в центре листовой заготовки и пробивки перемычки, которая образуется в нижней части после выдавливания. Заготовка профилируется с заданными параметрами, которые исключают разностенность и искривление стенки после отбортовки. На данный способ получен патент Украины.

С использованием метода конечных элементов, созданы математические модели процесса отбортовки традиционных и предварительно спрофилированных заготовок. Расчетным путем установлено влияние геометрической формы пуансона, радиуса закругления матрицы, относительной толщины заготовки, зазора между пуансоном и матрицей, и коэффициента отбортовки на усилие деформирования, распределение удельных усилий на деформирующем инструменте и напряженно-деформированное состояние. Определены оптимальные силовые режимы для каждой математической модели отбортовки, а также параметры процесса, которые обеспечивают получение ровной по толщине отбортованной стенки без искривления.

Созданы математические модели процесса отбортовки предварительно спрофилированных заготовок для отбортовки с утонением. Приведены результаты расчетов, которые обеспечивают получение максимальной высоты отбортованной стенки.

Получены аналитические зависимости для анализа процессов профилирования и отбортовки заготовок с помощью инженерного метода, путем совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности. При профилировании заготовки анализ проводился для процесса вдавливания конусного пуансона в листовую заготовку. С учетом трения и упрочнения получены зависимости для определения нормальных напряжений на пуансоне и усилия выдавливания. Получены аналитические зависимости для определения напряженно-деформированного состояния заготовки и усилия деформирования при отбортовке круглых отверстий конусным пуансоном в предварительно спрофилированных заготовках.

Проведены экспериментальные исследования по отбортовке традиционных и предварительно спрофилированных заготовок. Эксперименты проводились на лабораторном оборудовании. Сравнительный анализ экспериментальных данных с данными, полученными при моделировании, подтвердил возможность и актуальность развития методов определения размеров и формы исходных заготовок при отбортовке круглых отверстий. Погрешность результатов, полученных при математическом моделировании, не превышала 15 % в сравнении с экспериментальными значениями.

Экспериментально подтверждено, что использование предварительно спрофилированных заготовок с заданными параметрами обеспечивает получение отбортованной стенки ровно толщины без искривления.

Результаты научных исследований используются в учебном процессе в НТУУ «КПИ» и были внедрены в ООО «Пратт Уитни Патон» (г. Киев).

Ключевые слова: отбортовка, профилирование, размеры и форма заготовки, традиционная заготовка, предварительно спрофилированная заготовка, метод конечных элементов, математическое моделирование.