

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ**

**МАЛІЙ ХРИСТИНА ВАСИЛІВНА**



**УДК 621.777.4:621.77.01**

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ СТРИЖНЕВИХ  
ДЕТАЛЕЙ З ФЛАНЦЕМ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ СПОСОБІВ  
РАДІАЛЬНО-ПОЗДОВЖНЬОГО ВИДАВЛЮВАННЯ**

**Спеціальність 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Краматорськ – 2017**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Донбаській державній машинобудівній академії (ДДМА, м. Краматорськ) Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Алієв Іграмотдін Серажутдінович**  
Донбаська державна машинобудівна академія (м. Краматорськ),  
завідувач кафедри «Обробка металів тиском».

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Матвійчук Віктор Андрійович,**  
Вінницький національний аграрний університет (м. Вінниця),  
завідувач кафедри «Електромеханічні системи, технології і  
автоматизація в АПК».

кандидат технічних наук, доцент  
**Левченко Володимир Миколайович,**  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут» (м. Харків), доцент кафедри  
«Обробка металів тиском».

Захист відбудеться «22» грудня 2017 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01 з захисту дисертацій Донбаської державної машинобудівної академії: 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна 72, ауд. 1319.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.

Автореферат розісланий «\_\_\_» листопада 2017 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 12.105.01



Ю.К. Доброносів

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток машинобудування в сучасних умовах нерозривно пов'язаний з вдосконаленням технологій формоутворення в заготівельному виробництві і підвищенням розмірної точності і якості заготовок. Це є також найважливішим резервом заощадження енергетичних, матеріальних та трудових ресурсів.

Рішення даного завдання вимагає використання нових наукоємних технологій обробки металів тиском, до яких відноситься і точне об'ємне штампування (ТОШ) видавлюванням, що дозволяють отримати заготовку максимально наближену до готового виробу за параметрами форми та розмірів.

Традиційний метод отримання штампуванням стрижневих деталей з фланцем – це висадка за кілька послідовних переходів та поєднання прямого видавлювання стрижня та висадки фланцю. Обмеження на переходах пов'язані з граничними навантаженнями на інструмент при прямому видавлюванні, що змушують зменшити ступінь деформації. Інші обмеження пов'язані з втратою стійкості заготовки, що висаджується, і небезпекою появи тріщин на периферії фланцю через вичерпання ресурсу пластичності. Альтернативним та досить перспективним способом може служити комбіноване видавлювання, здійснюване за схемами комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання. Процеси комбінованого видавлювання дозволяють значно зменшити силу, підвищити якість і експлуатаційні властивості виробів, досягти високої продуктивності праці. Даний процес може бути застосований для виготовлення виробів складної форми з розвиненими елементами типу фланець і стрижень за схемами радіально-прямого та радіально-зворотного видавлювання.

Незважаючи на переваги використання в технологічних циклах операцій, комбіноване видавлювання з декількома степенями свободи течії матеріалу вимагає точного вибору режимів деформування з урахуванням ступені деформації, геометрії робочого інструмента та умов тертя. Тому кожне нове застосування таких способів вимагає ретельних попередніх досліджень, які б полегшували проектування та використання комбінованого видавлювання на практиці. В іншому випадку налагодження і застосування технологій на виробництві потребує часу та супроводжується дефектоутворенням і вимагає додаткових операцій на виправлення, калібрування і доведення виробів за розмірами. Вирішення цих питань пов'язане з подальшим проведенням теоретичних та експериментальних досліджень для створення рекомендацій та методик проектування процесів комбінованого радіально-прямого та радіально-зворотного видавлювання.

У зв'язку з вищевикладеним тема дисертаційної роботи, яка присвячена удосконаленню процесів виготовлення стрижневих деталей з фланцем на основі застосування способів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами.** Тема дисертації відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки в Україні "Нові речовини і матеріали" (Закон України №2519-IV від 9 вересня 2010 року) і науковому напрямку «Розвиток ресурсозберігаючих процесів обробки тиском на основі створення нових технологічних способів і методик аналізу і закономірностей пластичного деформування» наукової школи ОМТ Донбаської державної

машинобудівної академії (ДДМА). Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР), передбачених планами Міністерства освіти і науки України на кафедрі ОМТ ДДМА (роботи 0115U003123, 0111U006174, 0113U000608), а також в рамках договірних науково-дослідних робіт з рядом підприємств (авторка брала участь у всіх темах як виконавець).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності процесів точного об'ємного штампування стрижневих деталей з фланцем на основі застосування способів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання і розробки рекомендацій з проектування процесів штампування, що забезпечують зниження трудоємності і енергоємності технологічного процесу.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені і вирішені такі основні завдання:

- провести аналіз існуючих способів отримання складнопрофільованих деталей та тенденцій удосконалення процесів видавлювання;
- розробити математичні моделі процесів радіально-прямого і радіально-зворотного видавлювання стрижневих деталей з фланцем, що дозволить встановити аналітичні залежності для розрахунку енергосилових параметрів і прогнозувати постадійне формоутворення заготовки;
- на основі теоретичного аналізу процесів визначити і встановити особливості напружено-деформованого стану та силового режиму, закономірності формоутворення стрижневих деталей з фланцем з урахуванням умов впливу геометричних параметрів видавлювання і схем деформування;
- на основі експериментальних досліджень комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання перевірити адекватність математичних моделей і припущень, прийнятих при теоретичному аналізі і оцінити деформівність деталей;
- розробити практичні рекомендації з проектування технологічних процесів комбінованого видавлювання і штампового оснащення для точного об'ємного штампування стрижневих деталей з фланцем.

**Об'єкт дослідження.** Процеси точного об'ємного штампування видавлюванням.

**Предмет дослідження.** Закономірності та режими формоутворення стрижневих деталей з фланцем при комбінованому радіально-поздовжньому видавлюванні.

**Методи дослідження.** В якості теоретичних методів дослідження використані енергетичний метод верхньої оцінки (балансу потужностей) і метод скінченних елементів (МСЕ), реалізований в спеціалізованому програмному комплексі QForm 2D. Експериментальні дослідження процесу проводилися з використанням методів фізичного моделювання і тензометрії для вимірювання технологічних сил, методу ділильних сіток для визначення деформованого стану заготовок. Для обробки масиву даних, отриманого математичним експериментом, використовувалися методи статистики.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше на основі методу скінченних елементів встановлено вплив параметрів стрижневих деталей з фланцем на послідовність формозміни заготовки та приріст розмірів деталі в різних напрямках з урахуванням схем деформування та умов тертя при вісесиметричному радіально-поздовжньому видавлюванні, що

дозволило підвищити точність прогнозування формоутворення деталей в процесах деформування з підвищеним ступенем свободи течії матеріалу;

- уточнені аналітичні залежності для розрахунку параметрів силового режиму та формоутворення стрижневих деталей з фланцем за схемами радіально-прямого та радіально-зворотного видавлювання, що відрізняються від існуючих врахуванням реальної конфігурації деталі за допомогою вісесиметричних кінематичних модулів з непаралельною течією металу;

- вперше на основі результатів аналізу напружено-деформованого стану методом скінчених елементів виявлені в осередку деформування небезпечні зони з інтенсивними зсувними деформаціями, для яких виконана оцінка витрати ресурсу пластичності, що дає змогу визначити граничні ступені деформації і технологічні можливості способу радіально-прямого видавлювання;

- отримали подальший розвиток закономірності формозміни заготовки за оцінкою її деформованого стану в процесах радіально-поздовжнього видавлювання деталей типу корпус з осьовим стрижнем і фланцем, що дозволили запропонувати спосіб покращення пропрацювання металу у корпусі за рахунок знакозмінної деформації, який забезпечує підвищення рівномірності розподілу ступеня деформування за перерізом деталі.

**Практичне значення отриманих результатів.** На основі розроблених залежностей і встановлених закономірностей силового і деформаційного режимів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання розроблені методики проектування технологічних процесів радіально-прямого та радіально-зворотного видавлювання стрижневих деталей з фланцем, що дозволяють підвищити продуктивність і точність одержуваної деталі за рахунок зменшення кількості технологічних переходів.

На основі математичних моделей розроблено програмне забезпечення, що дозволяє визначити приведений тиск і формозміну в процесах радіально-поздовжнього видавлювання з урахуванням геометрії процесу, схеми та умов деформування.

Запропоновано спосіб отримання деталей зі стрижнем з підвищеними показниками пропрацьованості застійної зони корпусу заготовки на основі регулювання кінематики руху інструменту і знакозмінної деформації. Новизна запропонованого способу підтверджена патентом України.

Запропоновано конструкції штампів для реалізації процесів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання з використанням роз'ємних матриць. Отримані технологічні рекомендації з комбінованого видавлювання передані для промислового освоєння на АТ «Мотор Січ». Результати теоретичних і експериментальних досліджень використовуються студентами спеціальності ОМТ при виконанні проектних та практичних робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Внесок авторки полягає в обґрунтуванні та вирішенні теоретичних завдань з визначення напружено-деформованого стану, формозміни і деформівності заготовки. При проведенні досліджень авторці належить вибір і розробка методик досліджень, проведення теоретичного аналізу процесів комбінованого видавлювання методом скінчених елементів та енергетичним методом, підготовка та проведення експериментів, аналіз і узагальнення отриманих результатів, розробка нових технологій і

практичних рекомендацій. Внесок здобувачки в роботах, опублікованих разом зі співавторами, представлений в анотаціях до списку опублікованих праць за темою дисертації.

**Апробація роботи.** Основні результати дисертації доповідалися на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК): XVI – XIX МНТК «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском», м. Краматорськ, 2013 – 2016 рр.; МНТК «Прогресивні методи і технологічне оснащення процесів обробки металів тиском», м. Санкт – Петербург, 2014 р.; XI, XIII МНТК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», м. Краматорськ, 2014, 2016 рр.; XVI International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering», Czestochowa, 2015; VII – VIII МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії», м. Харків, 2015 – 2016 рр.; IV МНТК «Актуальні задачі сучасних технологій», м. Тернопіль, 2015 р.; VI – VII МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», м. Київ – Херсон, 2015 – 2016 рр.; XVII МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», м. Одеса – Київ, 2016 р.; Всеукраїнська науково-практична конференція «Сучасні технології промислового комплексу», м. Херсон, 2015 р.; Всеукраїнська НТК «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту», м. Кременчук, 2016 р., а також на щорічних наукових конференціях ДДМА (2013 – 2016 рр.) і об'єднаному науковому семінарі з ОМТ ДДМА (2017 р.).

**Публікації.** Матеріали і основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 26 роботах, з них 1 стаття в зарубіжному виданні колективної монографії, 1 стаття в зарубіжному виданні, що включене до наукометричних баз, 8 статей в 8 фахових збірниках (з яких 4 статі у виданнях, що входять до наукометричних баз), 11 робіт – у збірниках за матеріалами НТК. Отримано 1 патент України на корисну модель.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 244 сторінках машинописного тексту, складається з анотації із переліком праць, вступу, 6 розділів з опціональним формуванням списку використаних джерел (загалом 185 джерел), загальних висновків та 6 додатків. Об'єм основного тексту дисертації складає 113 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 22 таблицями та 109 рисунками на 73 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність теми, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами і темами. Сформульовано мету і задачі дослідження, надано характеристику об'єкта, предмета та методів дослідження. Відзначено особистий внесок здобувачки, показані наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, а також їх апробація.

У **першому розділі** розглянуто сучасний стан розвитку технологій точного об'ємного штампування видавлюванням. Наразі використання точного об'ємного штампування забезпечує ресурсозбереження, що містить в собі економію трудовитрат, металу, електроенергії; підвищення якості отримуваних

виробів, що залежить від точності заготовок, що використовуються, оптимальних технологічних режимів і точності налаштування обладнання; конкурентоспроможність, яка полягає в отриманні виробів максимально наближеної форми до кінцевої деталі; екологічність технологій і зниження собівартості продукції. Аналіз показав, що безперервне змінення конструкцій машин і обладнання, застосування нових матеріалів для виготовлення деталей потребують удосконалення технологій обробки тиском, в тому числі і холодного об'ємного штампування (ХОШ).

На даному етапі у виробництві широко поширені деталі, які за конструктивним виконанням представляють собою корпус з фланцем та осьовим стрижнем. Застосування простих схем поздовжнього та поперечного видавлювання для виготовлення складнопрофільованих виробів потребують більшої кількості переходів та оснащення і мають менш сприятливу схему напруженого стану. Крім того, в випадках застосування декількох штампувальних переходів отримана деталь втрачає свою точність та потребує додаткових заходів для її обробки. В умовах сучасної конкуренції отримання таких деталей і заготовок для них раціонально застосовувати способи комбінованого радіально-прямого і радіально-зворотного видавлювання.

На сьогоднішній день результати досліджень ТОШ, що виконані в наукових школах ВНЗ України, таких як НТУУ «КПІ», НТУ «ХПІ», ВНТУ, НМетАУ, ДДМА, а також зарубіжних ВНЗ (Штутгарський університет, ТУ Дрездена, БалтГТУ, МГТУ ім. Баумана, ДонГТУ та ін.), показали доцільність застосування процесів видавлювання при виготовленні складнопрофільованих виробів. Результати досліджень описують напружено-деформований стан, силовий режим та деформівність заготовки в простих схемах видавлювання, що не в повній мірі розкривають можливості процесу, або не враховують можливі варіації складових частин потрібної деталі.

Використання теоретичних методів розрахунку, заснованих на рішенні плоских задач енергетичним методом і методом скінчених елементів, дозволяють визначати силові режими процесів і напружено-деформований стан заготовки. Однак, певні особливості переміщення матеріалу при радіально-поздовжньому видавлюванні обмежують його використання на практиці. Аналіз показав, що, не дивлячись на наявність рішень щодо визначення силового режиму і НДС заготовки в процесах видавлювання деталей складної конфігурації, залишається актуальним питання уточнення цих рішень відносно процесів радіально-прямого та радіально-зворотного деформування. Також потрібна оцінка ступеня вичерпання ресурсу пластичності і закономірностей формоутворення при видавлюванні стрижневих деталей з фланцем.

На підставі аналітичного огляду поставлені мета і завдання дослідження.

**У другому розділі** обґрунтовано вибір методів теоретичного та експериментального досліджень штампування стрижневих деталей з фланцем.

Теоретичний аналіз виконувався на основі методу скінчених елементів з використанням програмного продукту QForm 2D та енергетичного методу балансу потужностей на основі модульного підходу в побудові та описі кінематично можливих полів швидкостей (КМПШ). Для обробки даних, отриманих скінчено-елементним моделюванням, використано метод планування експерименту і

регресійний аналіз. Для оцінки вичерпання ресурсу пластичності на основі феноменологічної теорії деформівності використано критерій Огороднікова В. А.

Для експериментальних досліджень розроблене і виготовлене універсальне експериментальне оснащення для випробувальних машин МС-500 та МС-2000, що дозволяє здійснювати комбіноване радіально-пряме та радіально-зворотне видавлювання з різними геометричними параметрами інструменту. Зразки діаметрами 28,2 мм, 36 мм і 45 мм виготовлялися з матеріалів: свинцю С1 + 2%Sb, алюмінієвих сплавів АД1 і АД31. В якості мастила для алюмінієвого сплаву використовувався баранячий жир, для свинцю – мінеральне масло. Експериментальні дослідження процесів штампування проводилися з використанням методу фізичного моделювання для вимірювання технологічних сил і методу ділільних сіток для визначення деформованого стану заготовок. Для обробки отриманих результатів експериментальних досліджень використовувалися методи математичної статистики.

У третьому розділі представлені результати теоретичних досліджень комбінованого радіально-прямого видавлювання стрижневих деталей з фланцем. Теоретичний аналіз радіально-прямого видавлювання енергетичним методом балансу потужностей (ЕМ) з використанням кінематичних модулів з непаралельною течією (КМПШ), що описують перехідні кромки інструментів, дозволив оцінити силові характеристики процесу з урахуванням реальної геометрії деталі. На основі використаних КМПШ отримано аналітичні залежності приведенного тиску деформування  $\bar{p} = p / \sigma_s = f(\bar{R}_0, \bar{R}, \bar{R}_k, \bar{R}_1, \bar{h}, \alpha, \beta)$  в залежності від відносних параметрів процесу:  $\bar{R}_0$  – радіусу заготовки,  $\bar{R}$  – радіусу стрижня  $R$ ,  $\bar{R}_k$  – межі розподілу течії матеріалу  $R_k$ ,  $\bar{R}_1$  – радіусу фланця  $R_1$ ,  $\bar{h}$  – висоти фланцю  $h$ ,  $\alpha, \beta$  – кутів скосу на фасках інструментів (рис. 1, а).

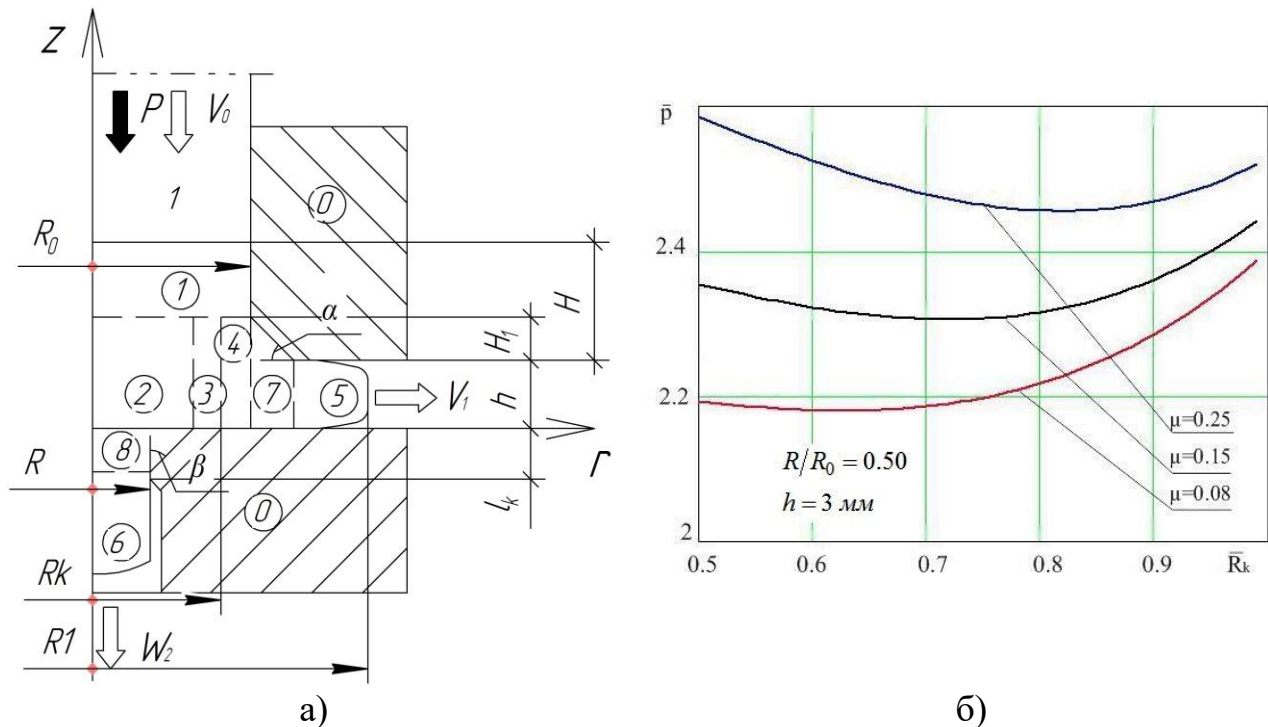


Рисунок 1 – Розрахункова схема радіально-прямого видавлювання (а) та графік залежності приведенного тиску видавлювання від параметру мінімізації  $\bar{R}_k$  (б)



Характерною особливістю процесу є межа розподілу течії матеріалу, що описується параметром  $R_k$ . Мінімізація цього параметру для різних перехресних геометричних значень показала, що відносне значення межі розподілу течії  $\bar{R}_k \approx 0,6..0,64$  при терті  $\mu = 0,08..0,1$  (рис. 1, б). Збільшення коефіцієнту тертя призводить до зсуву межі розподілу течії матеріалу в бік радіального видавлювання, що призводить до зростання  $\bar{R}_k \approx 0,8$  при терті  $\mu = 0,25$ .

Збільшення відносної висоти фланця в межах  $\bar{h} = 0,21..0,55$  характеризується зниженням приведенного тиску, що пояснюється зменшенням осередку деформації в радіальному напрямку течії матеріалу, збільшенням впливу окружних розтягуючих напружень, а також зменшенням контактної поверхні тертя між фланцем і матрицями (викривлення форми фланця, дефект у вигляді «чобота»). Зменшення приведенного тиску при збільшенні відносного радіуса стрижня  $\bar{R} = 0,36..0,64$  пов'язане зі зменшенням поверхні зрізу при прямому видавлюванні стрижня.

Теоретичний аналіз на основі методу скінчених елементів (МСЕ) проводився з урахуванням граничних умов для вісесиметричної задачі в наступному вигляді: зміцнення алюмінієвого матеріалу АД31 описано кривою зміцнення  $\sigma_s = 191,55 \cdot e^{0,202}$  МПа; щільність матеріалів  $2800 \text{ кг/м}^3$ ; швидкість деформування  $0,25 \text{ с}^{-1}$ , модуль Юнга  $71000 \text{ МПа}$ ; коефіцієнт Пуассона  $0,3$ ; коефіцієнт тертя  $\mu = 0,16$ ; швидкість переміщення інструменту  $1 \text{ мм/с}$ ; інструмент абсолютно жорсткий.

Застосування планування експерименту та регресійного аналізу у спеціалізованому продукті MathCad дозволило опрацювати масив даних, отриманих при моделюванні МСЕ. На основі отриманого рівняння регресії (1), що дозволяє обчислити приведенний тиск видавлювання та прорахувати приріст відносних об'ємів елементів заготовки, що видавлюються, побудовані графічні залежності (рис. 2):

$$Y(\bar{h}, \bar{R}, \bar{r}) = b_0 + b_1 \cdot \bar{h} + b_2 \cdot \bar{R} + b_3 \cdot \bar{r} + b_4 \cdot \bar{h} \cdot \bar{R} + b_5 \cdot \bar{h} \cdot \bar{r} + b_6 \cdot \bar{R} \cdot \bar{r} + b_7 \cdot \bar{h}^2 + b_8 \cdot \bar{R}^2 + b_9 \cdot \bar{r}^2 \quad (1)$$

де  $b_i$  – коефіцієнти рівняння регресії (табл. 1).

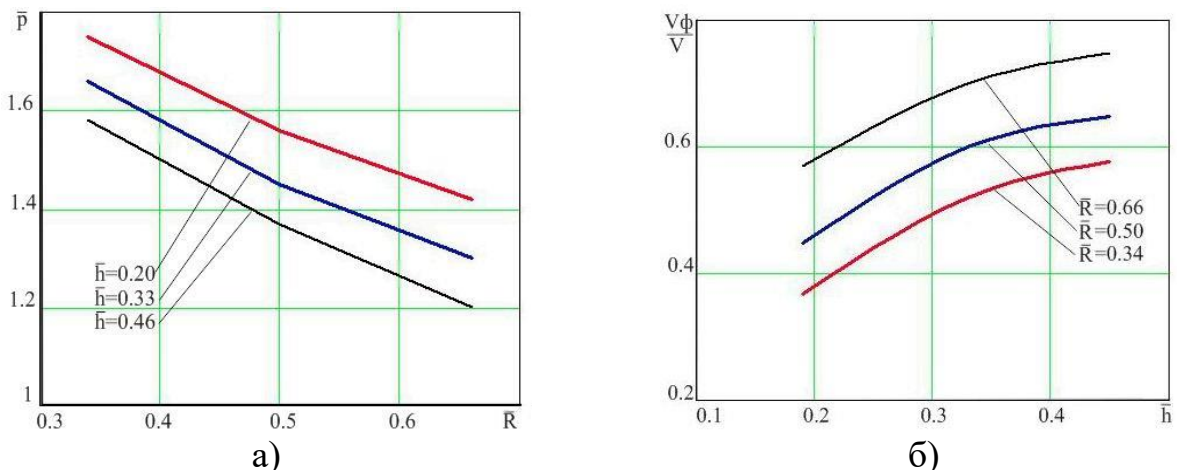


Рисунок 2 – Графіки залежності приведенного тиску від радіусу стрижня  $\bar{R}$  (а) та приросту об'ємних частин заготовки (б) при  $\mu = 0,08$

Таблиця 1 – Коефіцієнти рівняння регресії радіально-прямого видавлювання

$Y$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$
$\bar{p}$	1.2	-0.79	1.95	-1.19	0.04	0.27	0.22	0.01	0.06	0.74
$V_\phi/V_\Sigma$	0.501	-0.652	-0.980	-0.190	0.020	0.001	0.0001	0.0002	0.017	0.0001

Як і при аналізі ЕМ, характер зміни кривих приведенного тиску видавлювання від відносної висоти фланця  $\bar{h}$  та відносного радіуса стрижня  $\bar{R}$  зберігається. Зі збільшенням відносного радіуса заокруглення матриці  $\bar{r}$  приведений тиск падає. Це пов'язано з появою плавної течії матеріалу та відсутністю концентраторів напружень.

За результатами аналізу приросту лінійних розмірів заготовки і об'ємних її частин побудовані графіки формозміни напівфабрикату з співвідношенням початкових розмірів  $H_0/D_0=1,5$  (рис. 3, а). При порівнянні результатів розрахунку ЕМ та МСЕ похибка не перевищує 12% (рис. 3, б).

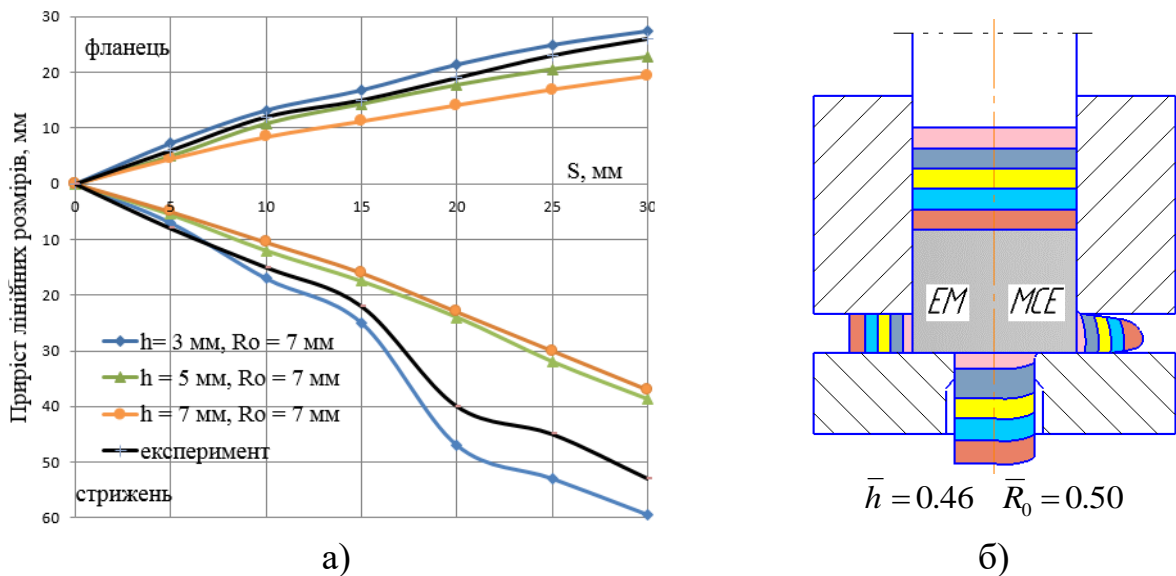


Рисунок 3 – Приріст лінійних розмірів (а) та порівняння приросту лінійних розмірів (б) при радіально-прямому видавлюванні

На основі результатів моделювання радіально-прямого видавлювання МСЕ проаналізовано напружено-деформований стан і розвиток сили деформування. Розподіл напружень в тілі заготовки показав, що існує область, яка розташована між кромками двох матриць і в якій зосереджені максимальні значення зсувних деформацій. Крім того, найбільший ступінь деформації зосереджений біля крамок інструменту, а найбільші напруження – у зоні фланця. Компоненти тензора головних напружень використовувалися для розрахунку параметрів Лоде-Надаї  $\mu_\sigma$  і показника напружено-деформованого стану  $\eta$ . Проведений аналіз напружено-деформованого стану дозволив дати оцінку використання ресурсу пластичності  $\psi$ , який визначається

$$\psi = \int_0^{e_u} \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} < 1.$$
 Поверхня граничних деформацій для матеріалу АД1 задавалася у вигляді  $e_p(\eta, \mu_\sigma) = 1,1 \cdot \exp(0,42 \cdot \mu_\sigma - 0,51 \cdot \eta)$ . Для розрахунку

використаного ресурсу пластичності в скінчено-елементній моделі, задавалося поле точок, які трасуються (по висоті заготовки 20 точок, по діаметру заготовки 50 точок). Кривими, що відображують небезпечні області заготовки з точки зору можливого руйнування, є лінія, що проходить на периферії фланцю, та лінія максимальних зсувних деформацій, що розташована між кромками матриць. Проведена оцінка витрат ресурсу пластичності показала, що найбільш небезпечною зоною з точки зору руйнування є зона максимальних зсувних деформацій (рис. 4, а), при досягненні в процесі деформування значення граничного ступеня деформації  $\epsilon_{\max} = 0,94$  відбувається відділення фланця (рис. 4, б). За рахунок використання більшого радіусу закруглення зменшується накопичення пошкоджень в місці зміни поперечного перерізу, що знижує вірогідність відділення фланця від тіла заготовки.

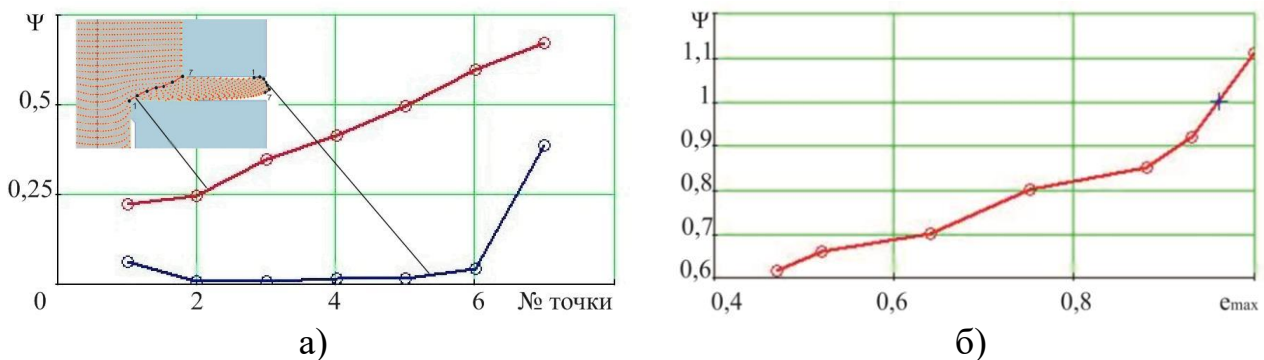


Рисунок 4 – Розподіл ступеня вичерпання ресурсу пластичності (а) визначення максимального ступеня деформації (б)

У четвертому розділі на основі енергетичного балансу потужностей розглянуто схему радіально-зворотного видавлювання з роз'єднаним осередком деформації (рис. 5, а) та отримано чисельні залежності для розрахунку енергосилових характеристик  $\bar{p} = p / \sigma_s = f(\bar{R}_0, \bar{R}, \bar{R}_1, \bar{h}, \bar{h}_1, \bar{t}, \lambda)$  з урахуванням параметру  $\lambda$  – коефіцієнту, що враховує рівність потужностей на границі розподілу осередків деформування, та  $\bar{t}$  – відносної висоти жорсткої зони.

Мінімізація величини приведенного тиску за вказаними вище параметрами не дала позитивного результату (виродження комбінованого процесу в процес з одним ступенем свободи течії матеріалу, що відповідало гранично можливим значення  $\lambda$ ), тому оптимальне значення кінематичного параметра  $\lambda$  знайдено з рівності потужностей на межі розподілу двох осередків деформування. Використовуючи отримане таким чином оптимальне значення  $\lambda$ , можна отримати величину приведенного тиску як функцію  $\bar{p} = \bar{p}(\bar{t})$  геометричного параметра  $\bar{t}$ . Окремо досліджено вплив різних співвідношень геометричних параметрів процесу деформування на величину  $\lambda$ .

Зменшення висоти жорсткої зони, при різних комбінаціях геометричних розмірів заготовки призводить до незначного, практично лінійного, зростання швидкості руху жорсткої зони, яка і описується коефіцієнтом  $\lambda$ . При цьому характер цієї залежності  $\lambda = \lambda(\bar{t})$  зберігається і при зміні умов тертя.

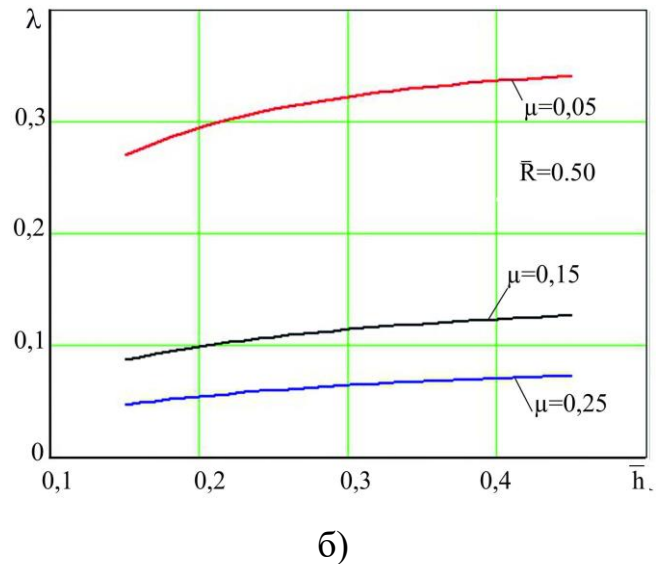
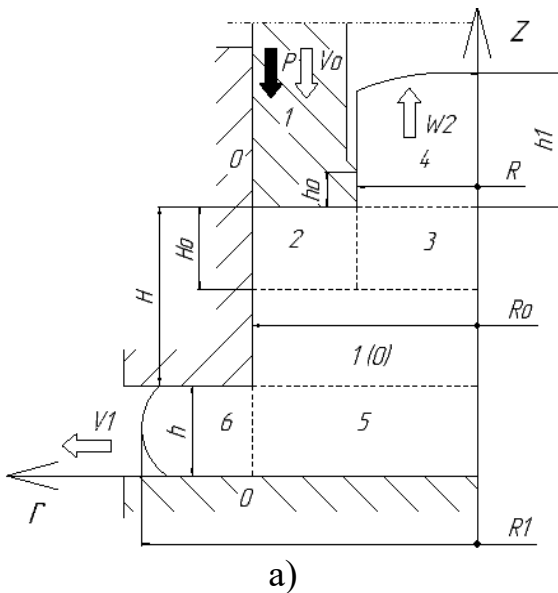


Рисунок 5 – Схема радіально-зворотного видавлювання (а) та графік залежності параметру  $\lambda$  від відносної висоти фланця  $\bar{h}$  (б)

Аналіз впливу геометричних параметрів процесу на величину  $\lambda$  показав, що збільшення відносного радіуса стрижня  $\bar{R}$  призводить до зниження швидкості руху жорсткої зони, а збільшення відносної висоти фланцю  $\bar{h}$  при збереженні інших параметрів процесу тягне за собою збільшення коефіцієнту  $\lambda$ , що відповідає більш інтенсивному затіканню металу в радіальному напрямку в порівнянні з переміщенням металу в осевий стрижень (рис. 5, б). Дана тенденція зберігається протягом всього процесу аж до вичерпання жорсткої зони. Відзначимо також, що збільшення коефіцієнта тертя має важливий вплив на значення параметра  $\lambda$ , а саме тягне за собою його істотне зниження. Подібний вплив умов тертя зберігається при різних геометричних параметрах процесу по всій його довжині.

Приведений тиск  $\bar{p} = \bar{p}(t)$  зі зменшенням висоти жорсткої зони (тобто по ходу процесу) зменшується, що пов'язано з поступовим вичерпанням жорсткої зони і відповідно зменшенням її впливу на пластичні зони процесу. Подібний характер зберігається на протязі всього процесу деформування.

Результати аналізу МСЕ радіально-зворотного видавлювання дали змогу проаналізувати зміну напружено-деформованого стану (НДС) в ході процесу. В тілі заготовки виявлено декілька характерних зон: осьова, малодеформована зона; зона високих ступенів деформацій поблизу перехідної кромки пуансона; зона розвороту металу в фланець; фланець; центральна – застійна зона.

Кожна з цих зон має свої особливості деформованого стану, які змінюються по ходу процесу. Так для застійної зони під пуансоном характерне її зменшення в ході процесу. На її розмір і розташування значно впливає тертя на стінках матриці. На першому етапі процесу центр зразка практично не деформується і є буфером (проміжною жорсткою зоною) між осередками течії металу в осевому і радіальному напрямку. Зона розвороту металу у фланець представляє собою складний осередок деформації, в якому поєднується розворот і осадка нижніх, прилеглих до дна, шарів металу. При різних розмірах висоти фланця

і умовах тертя на опорній поверхні величина і протяжність даної зони може бути різною. При відносній висоті фланця  $\bar{h} > 0.3$  зона витягується вздовж осі симетрії, а при збільшенні коефіцієнта тертя – її довжина зменшується. При збільшенні радіуса переходу від стрижня до фланця осередок течії металу в радіальному напрямку збільшується. Умови тертя на опорній поверхні значно впливають на вигин краю фланця – дефект форми фланця. При збільшенні тертя вигин фланця менший, але при цьому погіршуються умови деформування в центральній зоні деталі, відбувається локалізація осередку течії металу у фланець.

Плануванням експерименту на основі отриманого рівняння регресії (2) оцінено зміну приведенного тиску в залежності від геометричних параметрів процесу (рис. 6, а), приведений тиск розкриття напівматриць (рис. 6, б).

$$Y(\bar{h}, \mu, \bar{R}) = b_0 + b_1 \cdot \bar{h} + b_2 \cdot \mu + b_3 \cdot \bar{R} + b_4 \cdot \bar{h} \cdot \mu + b_5 \cdot \bar{h} \cdot \bar{R} + b_6 \cdot \mu \cdot \bar{R} + b_7 \cdot \bar{h}^2 + b_8 \cdot \mu^2 + b_9 \cdot \bar{R}^2 \quad (2)$$

де  $b_i$  – коефіцієнти рівняння регресії (табл. 2)

Таблиця 2 – Коефіцієнти регресії радіально-зворотного видавлювання

$Y$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$
$\bar{p}$	2.18	-3.68	-0.16	8.18	0.004	2.4	0.001	0.4	0.03	-2
$\bar{V}_{отр}$	0,4	-0,13	0,03	0,4	-0,003	-0,019	0,003	0,14	-0,14	0,03

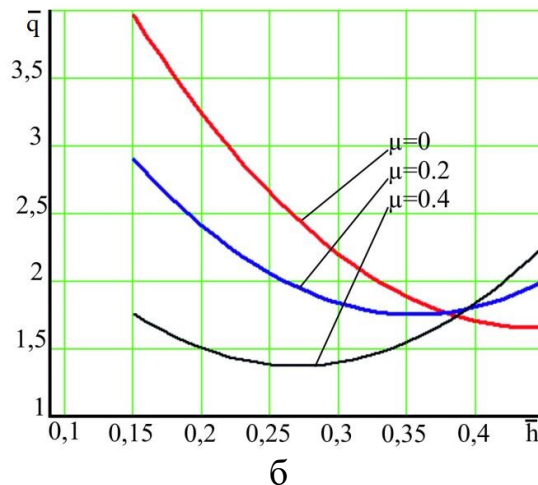
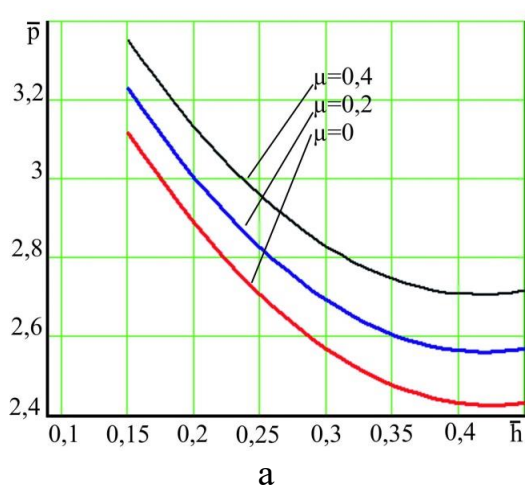


Рисунок 6 – Графіки залежності приведенного тиску видавлювання (а) і розкриття напівматриці (б) від відносної висоти фланця  $\bar{h}$

У випадках, коли відношення висоти фланця до радіусу стрижня  $h/R > 0.6$ , на початкових стадіях видавлювання спостерігається прошивка заготовки, тобто висота стрижня не змінюється. На подальших етапах видавлювання спостерігається затягування частини металу зі стрижня в осередок деформації і висота одержуваного виробу зменшується відносно вихідного розміру (рис. 7, а). Зменшення коефіцієнта тертя сприяє затягуванню металу. При збільшенні радіуса стрижня спостерігається збільшення течії матеріалу в зворотному напрямку. При дотриманні умови видавлювання  $h/R \leq 0.6$  спостерігається переміщення матеріалу в двох напрямках.

При порівнянні приросту лінійних розмірів (рис. 7, б), на основі розрахунків енергетичного методу балансу потужностей і методу скінчених елементів спостерігається відхилення в межах 10–12%.

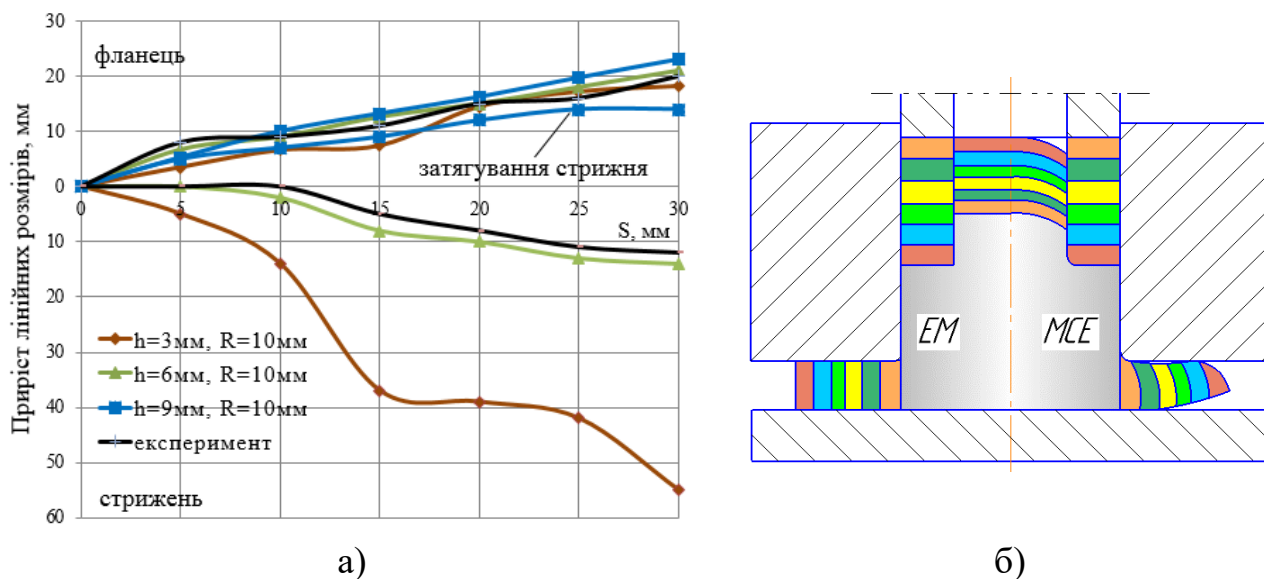


Рисунок 7 – Приріст (а) та порівняння приросту лінійних розмірів заготовки (б) при радіально-зворотному видавлюванні

У п'ятому розділі наведено результати експериментально-аналітичних і експериментальних досліджень формозміни і силового режиму деформування стрижневих деталей з фланцем. Перевірка адекватності розроблених математичних моделей проводилась на основі порівняння силового режиму процесів комбінованого видавлювання.

Для дослідження комбінованого видавлювання були використані зразки діаметрами 28,2 мм і 45 мм. Варіювання висоти фланця проводилося в межах  $h = 4..10$  мм і діаметра стрижня –  $D = 10..28$  мм. Результати вимірювань (рис. 8) в порівнянні з теоретичними розрахунками на 8–12% більші.

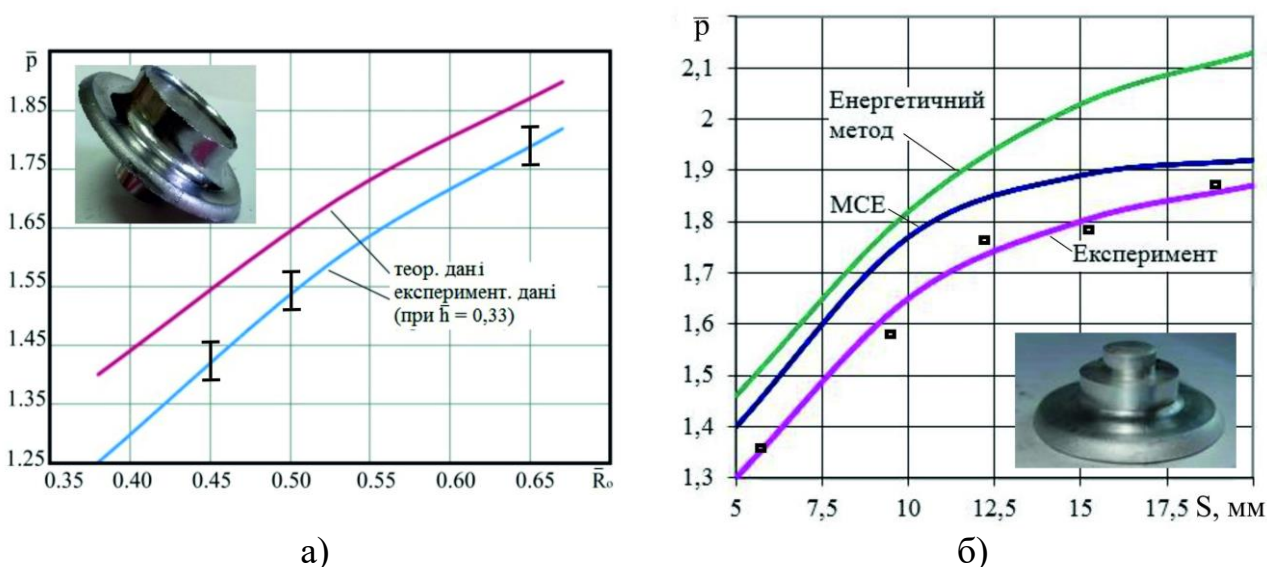


Рисунок 8 – Графік порівняння результатів розрахунку силових параметрів для радіально-прямого (а) та радіально-зворотного (б) видавлювання

Результати експериментальних досліджень на основі ділильних сіток процесів комбінованого видавлювання підтверджують якісно і кількісно теоретичні оцінки (МСЕ) розподілу параметрів деформованого стану в осередку деформації (рис. 9). Порівняння розподілу ступеня деформації за перерізом заготовок показує якісну відповідність.

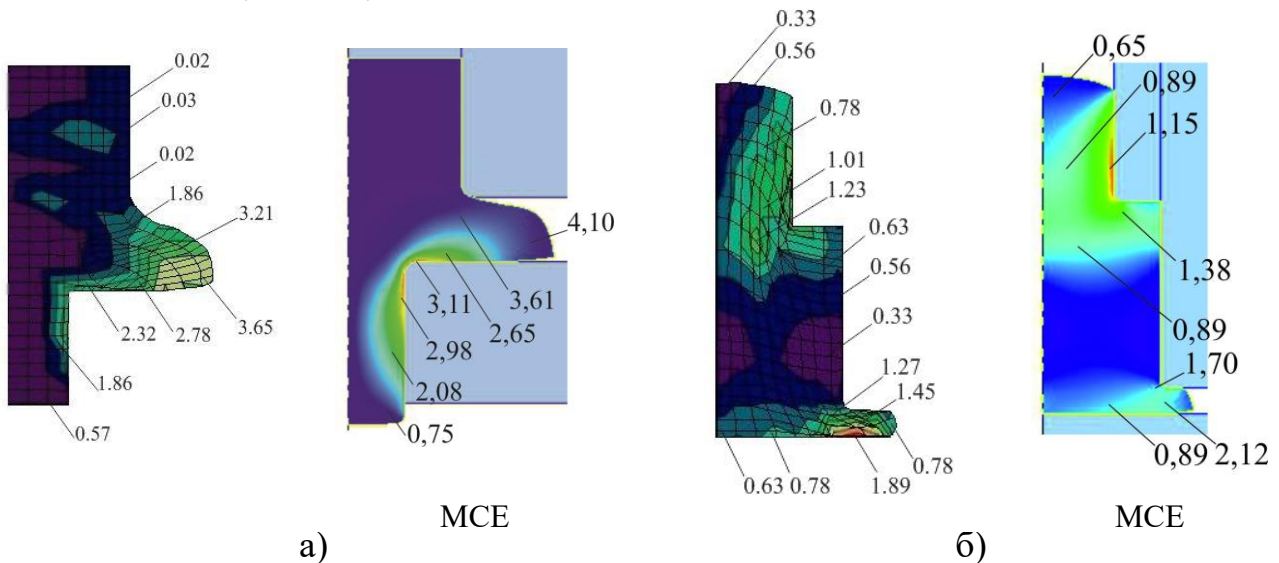


Рисунок 9 – Поля розподілу інтенсивності деформацій для радіально-прямого (а) та радіально-зворотного (б) видавлювання

Прийняте допущення про наявність межі розподілу течії матеріалу в радіально-прямому видавлюванні підтвердилося. Отримане експериментальне значення  $\bar{R}_k \approx 0.62..0.63$ . Аналіз радіально-зворотного видавлювання на основі проведеного експерименту підтвердив наявність в тілі заготовки декількох зон та характер їх зміни в ході деформування.

Визначено дефекти, що виникають при комбінованому видавлюванні, до яких відносяться складки, утяжини і простріли, та заходи щодо їх усунення, зокрема зміну кінематики руху та умов тертя.

**У шостому розділі** на основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблена методика проектування технологічного процесу комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання. Розроблено рекомендації щодо вибору схем штампування з різними варіантами розташування фланцю та стрижня відносно корпусу деталі і один відносно одного, призначення технологічних параметрів і програмне забезпечення для розрахунку приведенного тиску комбінованого видавлювання. Отримали подальший розвиток технології штампування деталей з фланцем і стрижнем, які полягають в отриманні деталі за один формоутворювальний перехід. Запропоновано спосіб видавлювання, що дозволяє опрацювати корпус деталі в два етапи за рахунок зворотно-поступальної течії металу. На спосіб отримано патент України.

Запропоновані конструкції штампного оснащення для здійснення про-процесу комбінованого радіально-прямого та радіально-зворотного видавлювання стрижневих деталей з фланцем. Розроблені і передані для промислового освоєння технологічні рекомендації для виготовлення деталей з фланцем і стрижнем на АТ «Мотор Січ». Результати досліджень використовуються в навчальному процесі в розрахункових та проектних роботах студентів та магістрів спеціальності ОМТ.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена актуальним науково-технічним завданням з розширення можливостей холодного об'ємного штампування за рахунок застосування комбінованого деформування видавлюванням. Робота спрямована на підвищення ефективності комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання, яке пов'язане зі зменшенням енергосилових параметрів, підвищенням якості продукції, розширенням номенклатури виробів за рахунок більш складної конфігурації форми деталі.

1. Аналіз стану питання дослідження і застосування у виробництві процесів отримання стрижневих деталей з фланцем показав перспективність технологій ХОШ, при цьому процеси за комбінованими схемами видавлювання можуть дозволити отримання складнопрофільованих виробів за один технологічний перехід без втрати точності. Однак недоліком щодо їх застосування є недостатня вивченість, особливо щодо схем радіально-поздовжнього видавлювання.

2. Отримано залежності енергосилових параметрів для вісесиметричної задачі радіально-прямого видавлювання від геометрії процесу на основі енергетичного методу верхньої оцінки (балансу потужностей) з застосуванням, як прямолінійних, так і модулів з непаралельною течією. Застосування ускладнених модулів з непаралельною течією дозволило більш точно оцінити поетапну формозміну і навантаження при радіально-прямому видавлюванні. Зміна відносної висоти фланцю  $\bar{h}$  від 0.21 до 0.51, при інших рівних параметрах деталі, призводить до зменшення приведенного тиску від 3.0 до 2.45; зміна відносного радіусу стрижня  $\bar{R} = 0.34..0.66$  – зниження приведенного тиску від 2.4 до 2.1.

3. Розроблено розрахункові схеми процесу радіально-прямого видавлювання з приєднаним осередком деформування з визначенням критерію мінімізації у вигляді положення межі розділу течії металу  $\bar{R}_k$ . Виявлено, що основними факторами, які впливають на положення межі розділу течії матеріалу, є тертя і відносні розміри приймаючих порожнин матриці. Встановлено, що  $\bar{R}_k \approx 0.62$  при характерному терті для холодного видавлювання  $\mu = 0.08$ , і зростає до  $\bar{R}_k \approx 0.8$  при коефіцієнті тертя  $\mu = 0.25$ .

4. На основі енергетичного методу верхньої оцінки (балансу потужностей) для способу радіально-зворотного видавлювання прийнята схема з роз'єднаним осередком деформування та проведена мінімізація процесу з урахуванням параметру  $\lambda$  – коефіцієнту, що враховує рівність потужностей на межі розподілу осередків деформування, та  $\bar{t}$  – відносної висоти жорсткої зони. Визначено зміну значень параметру  $\lambda$  від різних комбінацій геометричних параметрів процесу та від умов тертя. Збільшення відносного радіусу стрижня  $\bar{R}$  від 0.25 до 0.75 призводить до зниження швидкості руху жорсткої зони і  $\lambda$  змінюється від 0.42 до 0.22, а збільшення відносної висоти фланцю  $\bar{h}$  від 0.25 до 0.45, при збереженні інших параметрів процесу, зумовлює збільшення коефіцієнту  $\lambda$  від 0.38 до 0.45. З'ясовано, що для радіально-зворотного видавлювання із співвідношенням висоти фланцю до радіусу стрижня  $h/R \geq 0.6$  формування стрижня відбувається за рахунок прошивки



заготовки, і кінцева висота напівфабрикату залишається незмінною, а в деяких випадках і зменшується.

5. Методами енергетичного балансу потужностей та скінчених елементів для вісесиметричного деформування встановлено залежності для визначення поетапного приросту геометричних розмірів та об'ємів елементів напівфабрикату з врахуванням впливу геометричних параметрів інструмента, умов тертя та схем видавлювання, які дозволили прогнозувати можливість отримання стрижневих деталей з фланцем із заданими параметрами альтернативними способами радіально-прямого і радіально-зворотного видавлювання.

6. Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану заготовки при комбінованому радіально-прямому видавлюванні дозволило виявити в осередку деформування небезпечні зони з інтенсивними зсувними деформаціями. Оцінка витрати ресурсу пластичності показала, що при досягненні в процесі деформування значення граничного ступеня деформації  $\epsilon_{\max} = 0,94$  виникає небезпека відділення фланцю. Для радіально-зворотного видавлювання стрижневих деталей з фланцем підтверджено наявність проміжної зони, яка слабо деформується, що говорить про правомірність використання отриманих розрахункових моделей з роз'єднаним осередком деформації і відповідних теоретичних припущень.

7. Експериментальне дослідження показало правомірність використання кожної з розроблених схем комбінованого деформування, що дозволяє якісно прогнозувати силовий режим і формоутворення заготовки в процесі комбінованого деформування. Теоретичні розрахунки енергосилових показників більші за експериментальні дані на 10–12%. Експериментальний аналіз деформованого стану на основі методу ділильних сіток підтвердив особливості розташування зон деформування при аналізі процесу радіально-поздовжнього видавлювання.

8. За результатами теоретичних і експериментальних досліджень напружено-деформованого стану за схемами радіально-поздовжнього видавлювання встановлені закономірності розподілу параметрів напружено-деформованого стану та виділені зони з низьким ступенем деформації. Визначено, що корпус деталі лишається непропрацьованим, що обумовлює неоднорідність механічних властивостей виробів. Запропоновано спосіб, який за рахунок знакозмінної деформації забезпечує підвищення рівномірності розподілу ступеня деформування за перерізом деталі.

9. Розроблено технологічні рекомендації для проектування процесів і штамів комбінованого радіально-прямого і радіально-зворотного видавлювання стрижневих деталей з фланцем на основі створеної бази розрахункових схем і програмних продуктів, що забезпечує зниження витрат і часу на конструкторсько-технологічну підготовку виробництва. Методичні матеріали, рекомендації з проектування штампового оснащення і технологічного процесу штампування порожнистих деталей з фланцями передані для освоєння на підприємство АТ «Мотор Січ». Результати теоретичних і експериментальних досліджень і відповідні програми використовуються студентами спеціальності ОМТ при виконанні проектних та практичних робіт.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Investigation of defect in combined precision extrusion process with multiple ram / I. Aliiev, L. Aliieva, P. Abhari, K. Goncharuk<sup>1</sup> // XVI International scientific conference. New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. – Series: Monographs. – №48. – Czestochowa, 2015. –Р. 90–93.
2. Силовой режим радиального выдавливания внутреннего фланца / Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, Я. Г. Жбанков, К. В. Гончарук // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр. – Луганськ: СНУ, 2013. – № 1 (14). – С. 88–98.
3. Компьютерное моделирование силового режима при комбинированном выдавливании стержневых деталей / Л. И. Алиева, Г. П. Клименко, С. В. Мартынов, К. В. Гончарук // Научный вестник ДГМА: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2013. – № 2 (12Е). – С. 44–51. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/%E2%84%962\(12%D0%95\)\\_2013/%E2%84%962\(12%D0%95\)\\_2013/article/9.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962(12%D0%95)_2013/%E2%84%962(12%D0%95)_2013/article/9.pdf)
4. Прогнозирования дефектообразования при комбинированном выдавливании в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, И. С. Алиев, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Часть 1. – Тула: ТулГУ, 2014. – С. 63–68.
5. Анализ влияния размера очага деформации на параметры комбинированного выдавливания / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук, А. В. Шкира, П. В. Гнездилов // Научный Вестник ДГМА: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2014. – № 1 (13Е). – С. 4–9. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvdgma\\_2014\\_1\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvdgma_2014_1_3)
6. Алиева Л. И. Деформируемость металла в процессе трехстороннего комбинированного выдавливания / Л. И. Алиева, А.В. Шкира, К. В. Гончарук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 43 (1086). – С. 3–7.
7. Оценка технологической деформируемости при штамповке деталей с фланцем / Л. И. Алиева, И. А. Деревенько, С. В. Мартынов, К. В. Гончарук // Научный Вестник ДГМА: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2014. – № 2 (14Е). – С. 4–8. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvdgma\\_2014\\_2\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvdgma_2014_2_3)
8. Алиева Л. И. Определение величины утяжины в процессе радиально-продольного выдавливания в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. пр. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 44 (1087). – С. 3–7.
9. Експериментальне дослідження деформованого стану комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання / Л. І. Алієва, Є. М. Солодун, Х. В. Гончарук, О. В. Шкіра // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон, 2015. – № 4 (55). – С. 82–87.
10. Алиева Л. И. Энергетический анализ процесса комбинированного выдавливания стержневых деталей с фланцем / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук,

---

<sup>1</sup> Гончарук Х.В. вважати Малій Х.В. у зв'язку з одруженням і зміною прізвища

А. В. Шкира// Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 35–40.

11. Исследование напряженно-деформированного состояния и формоизменения при комбинированном радиально-прямом выдавливании / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук, В. Т. Лебедь, Л. В. Таган // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2016. – № 2 (20Е). – С. 27–34. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvdgma\\_2016\\_2\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvdgma_2016_2_7)

12. Алиева Л. И. Формоизменение стержневых деталей с фланцем при радиально-прямом выдавливании / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук, А. В. Шкира / Вісник національно технічного університету «ХПІ» : зб. наук. праць – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 31 (1203). – С. 5–10.

13. Алиева Л. И. Силовые параметры комбинированного выдавливания стержневых деталей с фланцем / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 1 (40). – С. 18–22.

14. Пат. 107950 Україна, МПК В 21 J 5/12, В 21 К 21/00. Спосіб виготовлення порожнистих виробів типу стакану / Алієва Л. І., Гончарук Х. В., Шкіра О. В., Сивак Р. І.; заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u 2015 13100; заявл. 30.12.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

15. Оценка ресурса пластичности при комбинированном радиально-продольном выдавливании / Л. И. Алиева, И. А. Деревенько, К. В. Гончарук, А. В. Шкира // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XII МНТК 23–24 вересня 2014 року. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – С. 17–18.

16. Алиева Л. И. Определение энергосиловых параметров совмещенного радиального выдавливания в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением. Материалы МНТК. – Санкт -Петербург: Балт. гос. техн. ун-т., 2014. – С. 28–32.

17. Алиева Л. И. Холодное выдавливание прецизионных деталей сложной формы / Л. И. Алиева, А. В. Шкира, К. В. Гончарук // Сучасні технології промислового комплексу. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції. Випуск 2. – Херсон: ХНТУ, 2015. – С. 33–34.

18. Алиева Л. И. Анализ напряженно-деформированного состояния при комбинированном выдавливании / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук, Е. М. Солодун / Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. Материалы VII МНТК 18–20 ноября 2015. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. – С. 3–5.

19. Алієва Л. І. Експериментальне дослідження силового режиму комбінованого видавлювання / Л. І. Алієва, Х. В. Гончарук, О. В. Шкіра // Актуальні задачі сучасних технологій. Матеріали IV МНТК молодих учених та студентів 25–26 листопада 2015. – Тернопіль: ТНТУ, 2015. – Том 1. – С. 87–88.

20. Aliieva L. I. Analysis of forming semi-finished goods in the combined precipitation conical ring / L. I. Aliieva, L. V. Tahan, K. V. Goncharuk // Теоретичні

та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VI МНТК 14–18 грудня 2015 р. – Київ: КПІ, 2015. – С. 53.

21. Гончарук Х. В. Експериментальне дослідження процесу радіально-поздовжнього деформування / Х. В. Гончарук, С. В. Ковалевский, М. Ю. Корденко // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VII МНТК » 30 травня–3 червня 2016 року. – Київ–Херсон, 2016. – С. 56–57.

22. Гончарук К. В. Сравнительный анализ результатов исследований радиально-продольного выдавливания / К. В. Гончарук, М. Ю. Корденко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIV МНТК 31 травня–3 червня 2016 року. – Краматорськ: ДДМА, 2016. – С. 21.

23. Гончарук Х. В. Дослідження використання ресурсу пластичності при комбінованому радіально-прямому видавлюванні / Х. В. Гончарук // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта. Матеріали XVII МНТК 21–24 червня 2016 р. – Одеса-Київ, 2016. – С. 95–96.

24. Алиева Л. И. Снижение неравномерности деформирования заготовок при холодном выдавливании / Л. И. Алиева, Л. В. Таган, К. В. Гончарук // Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції 9–11 листопада 2016 р. – Кременчук: КрНУ, 2016. – С. 30–32.

25. Алиева Л. И. Альтернативные способы штамповки стержневых деталей с фланцем / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук, Е. М. Солодун // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. Матеріали VIII МНТК 23–25 ноября 2016. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2016. – С. 5–8.

26. Анализ энергосиловых параметров процесса комбинированной осадки / К. В. Гончарук, Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина, Л. В. Таган, А. В. Шкира // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIII МНТК 2–4 червня 2015 року. – Краматорськ: ДДМА, 2015. – С. 24–25.

### **Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві:**

[1–4, 6] – аналіз напружено-деформованого стану та силових параметрів процесу комбінованого видавлювання на основі комп'ютерного моделювання; [8, 13, 14, 20] – обробка статистичних даних; [10, 26] – отримання і аналіз кінематично можливих полів швидкостей; [5, 24] – розробка математичних моделей та аналіз впливу геометричних параметрів процесу; [7, 16, 18, 19, 22] – теоретичний аналіз силових параметрів процесу комбінованого видавлювання; [9, 12, 15, 21] – експериментальне дослідження формоутворення процесу комбінованого видавлювання; [14] – аналіз прототипів та описання способу; [17, 25] – узагальнення результатів літературного огляду.

## АНОТАЦІЯ

**Малій Х.В. Удосконалення процесів виготовлення стрижневих деталей з фланцем на основі застосування способів радіально-поздовжнього видавлювання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – «Процеси та машини обробки тиском». – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності процесів точного об'ємного штампування стрижневих деталей з фланцем на основі застосування способів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання, а також розробки рекомендацій з проектування процесу штампування, що забезпечують зниження трудоемності і енергоємності технологічного процесу.

На основі проведеного літературного аналізу визначено, що процеси точного об'ємного штампування є резервом заощадження енергетичних, матеріальних та трудових ресурсів. Аналіз існуючих схем штампування стрижневих деталей з фланцем показав, що основні обмеження на переходах пов'язані з граничними навантаженнями на інструмент, втратою стійкості заготовки і небезпекою появи тріщин на периферії фланцю через вичерпання ресурсу пластичності деформованого металу заготовки.

Отримані математичні моделі на основі енергетичного балансу потужностей надали подальший розвиток визначенню силового режиму деформування та формоутворення для радіально-поздовжнього видавлювання з урахуванням течії матеріалу. Застосування ускладнених модулів з непаралельною течією дозволило більш точно оцінити поетапну формозміну і навантаження при комбінованому деформуванні. Для способу радіально-прямого видавлювання з приєднаним осередком деформування визначено критерій мінімізації у вигляді положення межі розділу течії металу, та проаналізовано вплив геометричних параметрів деталі на нього. Для радіально-зворотного видавлювання вирішена задача, що враховує положення та швидкість жорсткої зони. За швидкістю жорсткої зони проведено мінімізацію процесу. Рекомендовані співвідношення розмірів деталі при яких відбувається формоутворення за двома напрямками переміщення металу.

Методом скінченних елементів встановлено залежності параметрів формозміни стрижневих деталей з фланцем, що дозволяють прогнозувати приріст розмірів в залежності від геометричних параметрів деталі та умов тертя при комбінованому радіально-поздовжньому видавлюванні. Теоретичне дослідження напружено-деформованого стану заготовки при комбінованому радіально-прямому видавлюванні дозволило виявити в осередку деформування небезпечні зони з інтенсивними зсувними деформаціями та дати оцінку витрати ресурсу пластичності, що дало змогу визначити граничні деформації і технологічні можливості процесу радіально-прямого видавлювання. Для радіально-зворотного видавлювання стрижневих деталей з фланцем підтверджено наявність проміжної зони, яка слабо деформується, що говорить про правомірність використання отриманих розрахункових моделей з роз'єднаним осередком деформації і відповідних теоретичних припущень.

Експериментальне дослідження показало правомірність використання кожної з розроблених схем, що дозволяє якісно прогнозувати силовий режим і формоутворення заготовки в процесі комбінованого деформування. Аналіз деформованого стану на основі методу ділільних сіток експериментально підтвердив особливості розташування зон деформування при радіально-поздовжньому видавлюванні.

За результатами теоретичних і експериментальних досліджень напружено-деформованого стану за схемами радіально-поздовжнього видавлювання визначено особливості пропрацювання конфігураційних частин деталі, що обумовлюють неоднорідність механічних властивостей виробів. Запропоновано спосіб, який за рахунок знакозмінної деформації в стрижневій частині деталі забезпечує підвищення рівномірності розподілу ступеня деформування за перерізом.

На основі експериментальних та теоретичних досліджень запропоновано конструкції штампів для реалізації процесів радіально-поздовжнього видавлювання з використанням роз'ємних матриць. Встановлено межі застосування та обмеження у використанні схем комбінованого деформування.

**Ключові слова:** точне об'ємне штампування, стрижневі деталі з фланцем, комбіноване радіально-поздовжнє видавлювання, формоутворення, приведений тиск, напружено-деформований стан, дефекти, деформівність, силовий режим, оснащення.

## АННОТАЦИЯ

**Малий К.В. Совершенствование процессов изготовления стержневых деталей с фланцем на основе применения способов радиально-продольного выдавливания. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – «Процессы и машины обработки давлением». – Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, 2017.

Диссертационная работа посвящена повышению эффективности процессов точной объемной штамповки стержневых деталей с фланцем на основе применения способов комбинированного радиально-продольного выдавливания, а также разработке рекомендаций по проектированию процесса штамповки, которые обеспечивают снижение трудоемкости и энергоемкости технологического процесса.

На основе энергетического баланса мощностей получено дальнейшее развитие определения силового режима деформирования для радиально-прямого и радиально-обратного выдавливания. По результатам исследования методом конечных элементов установлены зависимости параметров формоизменения стержневых деталей с фланцем, позволяющие прогнозировать прирост размеров в зависимости от геометрических параметров процесса и условий трения. Исследование напряженно-деформированного состояния позволили определить опасные зоны в теле заготовки, которые обусловлены интенсивными сдвиговыми деформациями, и дать рекомендации по повышению проработанности структуры.

Результаты теоретического анализа подтверждены физическим моделированием. Разработан и апробирован новый способ получения стержневых

деталей с фланцем, который обеспечивает повышенную равномерность распределения степени деформации.

На основе экспериментальных и теоретических исследований предложено конструкции штампов для реализации процессов комбинированного радиально-продольного выдавливания с использованием разъемных матриц.

**Ключевые слова:** точная объемная штамповка, стержневые детали с фланцем, комбинированное радиально-продольное выдавливание, формообразование, приведенное давление, напряженно-деформированное состояние, дефекты, деформируемость, силовой режим, оснастка.

## ABSTRACT

**Malii K. Improving of manufacturing process for rod parts with flange based on the application of combined radial-longitudinal extrusion. — Qualification scientific work as a manuscript.**

Dissertation for the Candidate's degree in Engineering, specialty 05.03.05 – Processes and Machines of plastic working. Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk. 2017.

The dissertation is devoted to increase in efficiency of precision process to make rod parts with flange based on the application of combined radial-longitudinal extrusion and also the development of recommendations to design extrusion process, which reduce labor and energy intensities in technological process.

Based on the upper bound method, further development to determine power mode of deformation for radial-forward and radial-backward extrusion is obtained. The finite element method is used to determine the dependence of the forming parameters to make rod parts with flange, which allow predicting the increase in dimensions depending on the geometric parameters of the process and friction conditions. The investigation of stress-strain state allowed to identify critical zone in workpiece, which are caused by intensive shear deformations, and to give recommendations to improve structure development.

The results of the theoretical analysis are confirmed by physical simulation. A new method to make rod parts with flange that provides increased uniformity of strain distribution was developed and approved.

On the basis of experimental and theoretical investigations, dies design for the realization of combined radial-longitudinal extrusion processes with the use of multiple rams are proposed.

**Key words:** precision forging, rod parts with flange, combined radial-longitudinal extrusion, relative pressure, stress-strain state, defects, deformability, power mode, tool.

Підп. до друку 10.11.2017. Формат 60 x 84/16. Ум. друк. арк. 1,1.  
Обл.вид. арк. 0,9. Тираж 120 пр. Зам. № 65.

Видавець і виготівник  
Донбаська державна машинобудівна академія  
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК №1633 від 24.12.2003

