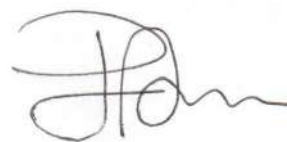


Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

АБХАРІ ПЕЙМАН



УДК 621.77.014: 621.7. 043: 621.777.4

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ І УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ
ТОЧНОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ НА ОСНОВІ
РЕГУЛЮВАННЯ КІНЕМАТИКИ ПЛАСТИЧНОГО ФОРМОЗМІНЕННЯ**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Краматорськ – 2019

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Алієв Іграмотдін Серажутдінович,
Донбаська державна машинобудівна академія,
завідувач кафедри «Обробка металів тиском».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, ст. наук. співробітник
Баглюк Геннадій Анатолійович,
Інститут проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича Національної академії наук
України (м. Київ), заступник директора з наукової
роботи;

доктор технічних наук, професор
Калюжний Володимир Леонідович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», (м. Київ), професор кафедри
«Механіка пластичності матеріалів та
ресурсозберігаючих процесів»

доктор технічних наук, професор
Кухар Володимир Валентинович,
Приазовський державний технічний університет
(м. Маріуполь), завідувач кафедри «Обробка
металів тиском».

Захист відбудеться «22» березня 2019 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01 Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус, ауд. 1319).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус).

Автореферат розісланий «15» лютого 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 12.105.01



Ю. К. Доброносів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з основних тенденцій розвитку сучасного машинобудування є розробка та впровадження нових наукових технологій, що підвищують якість виробів і знижують собівартість їх виготовлення. Від технологій заготівельного виробництва багато що залежить: як ресурсозбереження, так і отримання якісних виробів, а отже, і конкурентоспроможність кінцевої продукції.

Одним з важливих напрямків вирішення зазначених проблем металообробних галузей промисловості є освоєння технологічних процесів точного об'ємного штампування (ТОШ) складнопрофільованих деталей і заготовок із заданими експлуатаційними характеристиками. Процеси ТОШ демонструють стійку тенденцію до розширення області використання і зростання обсягів продукції, що випускається. Для вирішення таких проблемних питань і завдань ТОШ, як поліпшення якості і собівартості продукції, підвищення надійності інструменту і продуктивності обробки, розробляються нові технологічні способи, оснащення та обладнання для формоутворення деталей з меншими питомими і повними навантаженнями та меншим числом операцій. Серед таких способів можна виділити об'ємне штампування в закритих, роз'ємних і рухливих матрицях поперечного та комбінованого видавлювання, в яких передбачено ефективне управління формоутворенням деталей, напружено-деформованим станом (НДС) заготовки, силовим і деформаційним режимами процесів за допомогою регулювання кінематики пластичної формозміни і руху деформуючого інструменту.

Незважаючи на перспективність і ефективність, освоєння нових процесів ТОШ відстає від потреб виробництва. Реалізація нових способів штампування і розширення можливостей відомих способів вимагає пошуку оптимальних режимів обробки, оцінки впливу кінематичних параметрів на НДС заготовки, дефектоутворення і силовий режим, що включає як активні сили деформування, так і реактивні сили розкриття матриць.

Рішення даних проблемних завдань пов'язано з проведенням теоретичних і експериментальних досліджень і створенням математичних моделей процесів ТОШ з регулюванням кінематики течії металу, створенням нових способів деформування і розробкою на їх основі методик проектування процесів.

Зважаючи на викладене, науково-технічна проблема підвищення ефективності процесів ТОШ на основі розвитку наукової бази, математичних моделей і удосконалення процесів деформування з регулюванням кінематики формозміни є актуальною і сучасною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Новітні технології і ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості і агропромисловому комплексі». Робота виконана на кафедрі «Обробка металів тиском» (ОМТ) Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА) у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт відповідно до координаційних

планів Міністерства освіти і науки України (№ держ. реєстрації 0111U000174, 0115U004736 – виконавцем, і 0117U001164, де здобувач був відповідальним виконавцем), а також у рамках договірних науково-дослідних робіт з підприємствами.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – підвищення ефективності технологій точного об'ємного штампування на основі розвитку наукових основ і розробки технологічних способів деформування з регулюванням кінематики пластичної течії, які забезпечують підвищення продуктивності, якості виробів та економію ресурсів.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені та вирішені такі актуальні задачі:

- аналіз напрямків, методів і рішень практичних і теоретичних завдань для створення і реалізації ресурсозберігаючих технологій ТОШ;
- розробка чисельних математичних моделей для розрахунку силового режиму, формозміни і напружено-деформованого стану заготовки в процесах осесиметричної і плоскої деформації в умовах закритого штампування в рухомих матрицях;
- аналіз закономірностей зміни напружено-деформованого стану, силового і деформаційного режиму з регулюванням кінематики пластичної течії на основі математичних моделей в залежності від геометричних та кінематичних параметрів технологічних процесів комбінованого та бокового видавлювання;
- удосконалення процесів об'ємного штампування на основі урахування кінематики течії та перевірки адекватності математичних моделей і припущень, прийнятих при теоретичному аналізі процесу;
- розробка на основі проведених досліджень нових технічних і технологічних рішень, які розширюють можливості і підвищують конкурентоспроможність вивчених процесів для створення технологій виготовлення виробів методом точного об'ємного штампування на основі регулювання кінематики формозмінення заготовки;
- розробка на основі теоретичних та експериментальних досліджень технологічних режимів процесів ТОШ, систематизація технологічних рекомендацій, методик проектування для впровадження результатів досліджень в практику промислового виробництва та навчальний процес.

Об'єкт дослідження. Технологічні процеси точного об'ємного штампування.

Предмет дослідження. Закономірності силового і деформаційного режимів пластичного формозмінення, напружено-деформованого стану металевих заготовок, способи регулювання кінематики формозмінення.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження силового і напружено-деформованого стану заготовки в процесах точного об'ємного штампування виконано з використанням методу скінченних елементів і енергетичного методу балансу потужностей. Для експериментального дослідження характеру течії металу і формування пластичних зон осередків деформування використано

фізичне моделювання. Метод фізичного моделювання також застосовувався для вимірювання технологічних сил в поєднанні з методом математичного планування експерименту. Для оцінки точності отриманих результатів експериментальних досліджень використовувалися методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукову новизну дисертаційної роботи складають наступні її основні положення:

1. *Вперше* на основі енергетичного методу балансу потужностей та методу скінченних елементів розроблено комплекс математичних моделей процесів точного штампування заготовок в закритих і роз'ємних матрицях та деталей різної конфігурації і встановлені залежності силового режиму та технологічних і конструктивних особливостей процесу формоутворення, які відрізняються врахуванням сил розкриття роз'ємних матриць, напружено-деформованого стану заготовки, використання яких дозволяє визначити технологічні режими з урахуванням кінематичних та геометричних параметрів процесу.

2. *Вперше* на основі методу скінченних елементів виявлені умови появи дефекту типу прострілів в порожнистих деталях з профільованою поверхнею та побудовані граничні криві для зон бездефектного деформування з урахуванням схеми закритого штампування та параметрів процесу, що дозволило запропонувати спосіб двоперехідного комбінованого деформування з усуненням дефектів форми деталей.

3. *Отримали подальший розвиток* на основі методу скінченних елементів закономірності формоутворення деталей з фланцем в процесах об'ємного штампування видавлюванням, які, на відміну від існуючих, враховують вплив кінематики подачі металу в приймальну порожнину матриці, що забезпечує зниження нерівномірності деформацій і регулювання силового режиму процесу.

4. *Уточнені* особливості формозмінення заготовок в процесах видавлювання трубчатих деталей типу втулок з масивним фланцем, які, на відміну від існуючих, засновані на керуванні течією металу за рахунок узгодження швидкостей переміщення пуансона і рухомої матриці, що дозволило підвищити якість та розширити номенклатуру отримуваних деталей.

5. *Отримали подальший розвиток* закономірності зміни напружено-деформованого стану стрижневих деталей, що штампуються, способом радіального видавлювання; *суть новизни* полягає в тому, що враховує включення в процес формоутворення схем висадки на різних етапах видавлювання, що дозволило обґрунтувати та поширити технологічні можливості процесів штампування і шляхи спрощення конструкції штампного оснащення з роз'ємними матрицями.

6. *Вперше* теоретичним та фізичним моделюванням виявлені умови та механізм утворення дефектів типу утягнень в зоні дна порожнистих деталей з глухим отвором і встановлено фактори, які здійснюють найбільший вплив на кінематику течії металу та процес появи відхилень форми, що дозволило обґрунтувати і запропонувати новий спосіб бездефектного холодного видавлювання з формуванням тимчасових технологічних буртів в придонній зоні деталі.

Практична цінність отриманих результатів. Практичну цінність результатів виконаного дослідження становлять наступні розробки.

- розрахункові залежності, за допомогою яких вивчені та обґрунтовані режими нових процесів точного об'ємного штампування з урахуванням кінематичного впливу та геометрії інструменту;

- залежності з розрахунку основних технологічних параметрів різних способів видавлювання, які дозволяють раціоналізувати процеси закритого штампування і застосувати уніфіковані розрахункові схеми, що спрощує технологічну підготовку виробництва і вибір технологічних варіантів;

- визначено раціональні технологічні схеми формозміни заготовок, напружено-деформований стан заготовки і силові режими процесів, розроблені нові процеси точного об'ємного штампування;

- науково-обґрунтовані рекомендації і методики проектування технологічних процесів виготовлення осесиметричних і неосесиметричних виробів, штампи для виготовлення складнопрофільованих деталей.

Результати дисертаційної роботи у вигляді програмних продуктів, технічних рішень і практичних рекомендацій використані на ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ), ПАТ «Дружківський завод металевих виробів» (м. Дружківка), ТОВ «Укртехконтакт» (м. Бахмут). Окремі положення дисертації використовуються на кафедрі ОМТ ДДМА в рамках викладання ряду спеціальних дисциплін, а також при виконанні науково-дослідних робіт, курсових та дипломних проектів студентами спеціальності 136 «Металургія».

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати автором отримані самостійно. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані в співавторстві, автору належить розробка математичних моделей, алгоритмів і програмних засобів, участь в проведенні експериментів, аналіз та узагальнення результатів теоретичних, а також експериментальних досліджень, розробка практичних рекомендацій та участь у впровадженні їх в промислове виробництво процесів ТОШ. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора описаний додатково у коментарях до списку робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних, всеукраїнських та регіональних науково-технічних (НТК) та науково-практичних конференціях (НПК), в тому числі: XVI – XXI міжнародних НТК (МНТК) «Досягнення та проблеми розвитку технологій та машин обробки тиском» (м. Краматорськ, ДДМА, 2011 – 2018 pp.); VII – XIV МНТК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (м. Краматорськ, ДДМА, 2011 – 2016 pp.); V Всеукраїнська НТК молодих спеціалістів «Енергомашспецсталь – 2013» (м. Краматорськ, 2013 p); XVI – XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering», (Czestochowa, 2015 – 2017 pp); МНТК «Прогрессивные методы и технологическая оснастка процессов обработки металлов давлением» (Санкт Петербург, 2014 p); МНТК

«Современные технологии обработки давлением: моделирование, проектирование, производство», присвячена 70-річчю кафедри МТОМД МГТУ «МАНІ», (Москва, 2013 р); XI МНТК «Пластична деформація металів» (Дніпро, 2017); МНТК «Університетська наука - 2017» (м. Маріуполь, 2017 р); МНТК «Теоретичні і практичні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз» (м. Вінниця, 2011 р); Всеукраїнській НТК «Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки» (м. Вінниця, 2017 р); II МНТК «Машини та пластична деформація металів» (м. Запоріжжя, 2012 р); IX МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (Харків, 2017 р); I, II Всеукраїнській НТК «Сучасні технології промислового комплексу», (м. Херсон, 2015, 2016 рр.); IV – VIII МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», (м. Київ, 2013 – 2017 рр.); Всеукраїнській НТК «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту», (м. Кременчук, 2016 р.), на НТК професорсько-викладацького складу ДДМА (м. Краматорськ, 2011 – 2018 рр.); на розширених наукових семінарах ХНТУ (м. Херсон, 2017), НТУУ «ХПІ» (м. Харків, 2017 р.), НТУУ «КПІ» (м. Київ, 2018 р.), а також на щорічних наукових конференціях ДДМА (м. Краматорськ 2011 – 2018 рр.) та об'єднаному науковому семінарі кафедри ОМТ ДДМА (м. Краматорськ, 2018 р.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 70 роботах, в тому числі: 4 колективні монографії, 12 статей в фахових виданнях України, 12 – у зарубіжних виданнях (11 статей опубліковано в наукових журналах, внесених до міжнародних наукометричних баз даних), 9 статей опубліковано без співавторів, 29 робіт – в матеріалах міжнародних конференцій. На нові технічні рішення отримано 3 патенти України на корисну модель.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм роботи 648 сторінок, в тому числі 274 сторінки основного тексту, 317 рисунки та 42 таблиць, список використаних джерел з 312 найменувань та 7 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень та показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами. Сформульовано мету та задачі, що були вирішені, дані характеристики об'єкту та предмету, розглянуті методи теоретичного та експериментального досліджень. Показана наукова новизна, практична цінність, апробація та публікації отриманих результатів з зазначенням особистого внеску здобувача, а також загальна структура.

У першому розділі виконано аналіз стану питання в галузі технологій і обладнання процесів точного об'ємного штампування та встановлені досягнення і проблеми. Освоєння процесів штампування в роз'ємних матрицях стримується недостатністю рекомендацій з розрахунку силового режиму деформування, а особливо сил розкриття матриць. З'ясовано, що найбільшу ефективність мають процеси штампування видавлюванням в штампах з регулюванням кінематики руху інструменту, що розширюють номенклатуру отримуваних виробів та

поліпшують якість виробу. У результаті аналізу попередніх досліджень встановлено, що для розвитку технологічних процесів точного штампування видавлюванням у роз'ємних матрицях необхідне створення математичних моделей, які дозволяють визначати силовий режим деформування і розкриття з урахуванням кінематики руху інструмента та пластичного формозмінення заготовки, що забезпечують отримання якісних бездефектних деталей. На основі проведеного аналізу сформульовано мету та задачі роботи.

У другому розділі обґрунтовано та виконано вибір напрямку і методів дослідження процесів точного об'ємного штампування в роз'ємних матрицях для виготовлення осесиметричних та неосесиметричних виробів.

Для теоретичного аналізу використано енергетичний метод (ЕМ) та його різновидність - метод верхньої оцінки (МВО), що засновані на балансі потужностей зовнішніх і внутрішніх сил на кінематично можливих полях швидкостей (КМПШ), які дозволяють визначати активні і реактивні силові характеристики процесу. Дані методи добре адаптовані до сучасних ПЕОМ. Визначення напружено-деформованого стану заготовки та сил розкриття інструмента виконано методом скінченних елементів (МСЕ).

Для експериментальних досліджень спроектовано і виготовлено експериментальне оснащення, що дозволяє здійснювати видавлювання суцільних та порожнистих заготовок в роз'ємних матрицях з регулюванням кінематики пластичного формозмінення, вимірювати сили деформування та розкриття роз'ємних матриць. Зразки для деформування виготовлялись зі свинцевого сплаву С1 + 2%Sb, алюмінієвих сплавів (АД1, АД31, АМцМ), мідь (М1), і сталь 10. Побудова кривих зміцнення для кожного з матеріалів здійснювалася з 5 зразків діаметром 28 мм і висотою 50 мм, що осаджувались до висоти 15 мм (що відповідало ступеню деформації 70%). Через кожні 5 мм ходу проводилися виміри сили. Для розрахунків використовувалась степенева апроксимація кривих зміцнення: для свинця – $\sigma_s(\epsilon)=25,558 \epsilon^{0,189}$, для АД 1 – $\sigma_s(\epsilon)=138,42 \epsilon^{0,2182}$, для АД 31 – $\sigma_s(\epsilon)=191,51 \epsilon^{0,2029}$, для АМцМ – $\sigma_s(\epsilon)=188,4 \epsilon^{0,15}$, для міді М1 – $\sigma_s(\epsilon)=397,3 \epsilon^{0,2}$, для сталі 10 – $\sigma_s(\epsilon)=787,4 \epsilon^{0,22}$.

Експериментальні дослідження виконано на моделях з використанням методів електротензометрії та статистичної обробки даних із застосуванням ПЕОМ.

Третій розділ присвячений дослідженню процесу закритої осадки заготовок для операцій ТОШ.

Застосування операції осадки для калібрування є досить поширеним. З позиції впливу на точність висотних розмірів штампованих поковок, всі операції осадки діляться на дві групи: операції, в яких деформування вихідних заготовок виконується з дозуванням об'єму заготовки та без дозування.

Результати теоретичних досліджень ($\bar{S} = S/R_0$, $R_0 = 15\text{мм}$; $R = 18\text{мм}$) показують, що для процесу осадки (рис. 1, а) характерним є незаповнення кутів матриці. Процес закритого штампування складається з трьох основних стадій. Перша стадія I, в якій відбувається початкове стиснення і розпресування заготовки; друга стадія II - відбувається поступове збільшення навантаження і заповнення порожнини матриці. На третій стадії III навантаження різко зростає

на невеликому ході процесу, відбувається заповнення кутів порожнини матриці (рис. 1, б). Встановлено, що підвищенням сили на 30% в порівнянні зі звичайною осадкою вдається отримати калібрування заготовки по висоті до $0,3h$ з отриманням точного діаметру заготовки.

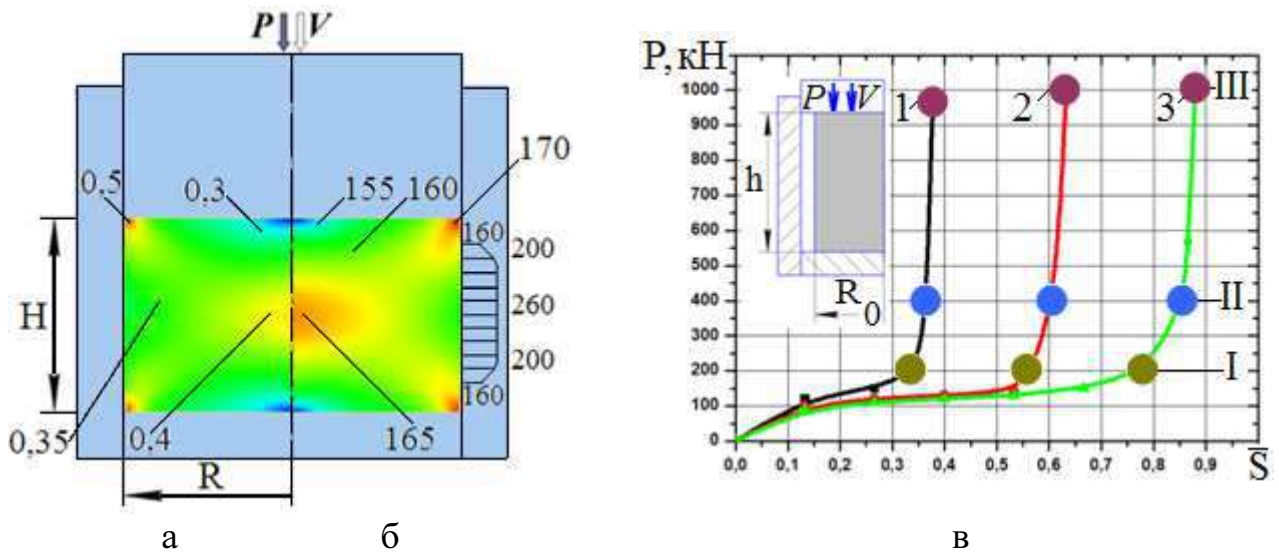


Рис. 1 – Розподіл деформацій (а), напружень σ_n , МПа (б) при $h/2R_0=1,0$ $H/2R=0,575$ та графік залежності сили деформування (в) від відносного ходу процесу (S/R_0) при $h/2R_0 = 0,6$ (1), $h/2R_0 = 1,0$ (2), $h/2R_0 = 1,4$ (3) та $\mu = 0,3$; I – момент контакту заготовки зі стінкою матриці, розпресовка заготовки; II – заповнення порожнини матриці; III – момент заповнення кутів матриці (кінець процесу), матеріал АМцМ

Незаповнення кутів матриці є характерним як для одностороннього, так і для двостороннього прикладення сил деформування до заготовки. При збільшенні відносних розмірів $S/R_0 = 0,38 \dots 0,87$ та $h/2R_0 = 0,6 \dots 1,4$ протяжність застійної зони під пуансоном збільшується, що погіршує переміщення матеріалу в кути матриці. МСЕ-моделювання умов заповнення кутів матриці при закритій осадці показало, що кут біля верхнього пуансону (a_1) заповнюється помітно швидше, ніж кут (a_2) у нижнього протипуансону (рис. 2). Це можна пояснити тим, що верхній кут знаходиться біля рухомого інструменту, що сприяє зниженню опору течії металу в заданому напрямку. Зменшення застійної зони за рахунок рухомої матриці сприятливо впливає на заповнення кутів порожнини матриці (b_1 , b_2 , рис. 3). Отримані графічні залежності дозволяють прогнозувати формоутворення заготовки і за допомогою кінематичного впливу на інструмент варіювати умови заповнення робочої порожнини матриці.

Проведені дослідження дозволили встановити, що одним з керуючих факторів заповнення кутів матриці є використання заготовки, що має порожнину на торці заготовки висотою (y) та застосування нижньої частини матриці з наявністю фасок (f) та радіусів заокруглення (r) (рис. 4).

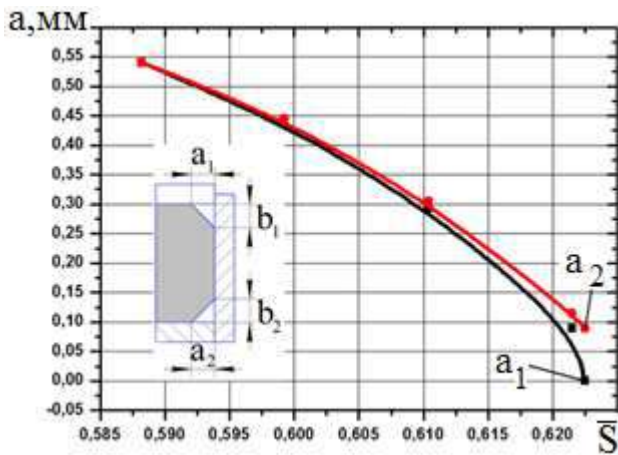


Рис. 2 – Графік залежності заповнення кута біля пуансону від відносного ходу осадки: $h/2R_0 = 1,0$; $S/R_0 = 0,62$; $\mu = 0,08$

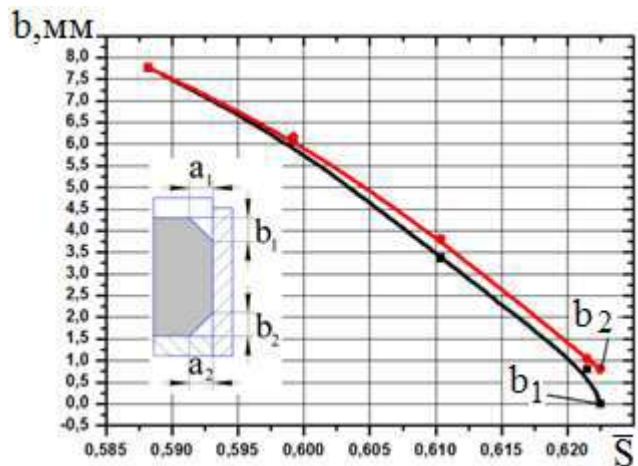
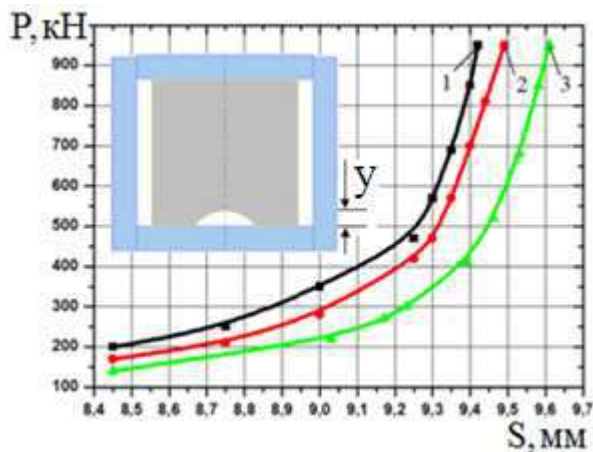
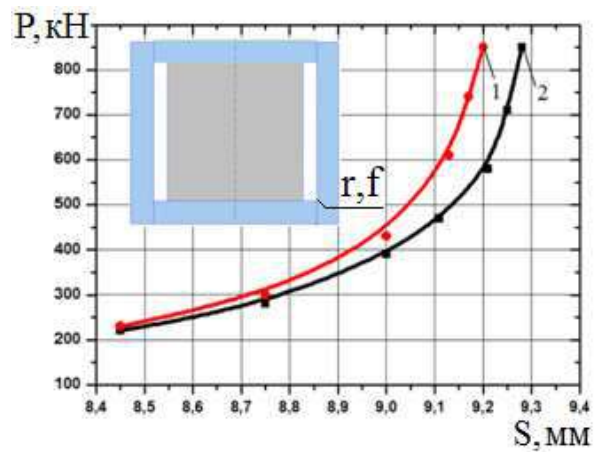


Рис. 3 – Графік залежності заповнення кута порожнини матриці від відносного ходу осадки: $h/2R_0 = 1,0$; $S/R_0 = 0,62$; $\mu = 0,08$



а



б

Рис. 4 – Графіки залежності сили деформування від ходу процесу: 1 – $y/R_0=0$; 2 – $y/R_0=0,1$; 3 – $y/R_0=0,2$ (а), 1 – $f/R_0=0,15$; 2 – $r/R_0=0,15$ (б), $h/2R_0 = 1,0$; матеріал АМцМ

Наявність порожнини в заготовці при закритій осадці зменшує негативний вплив застійної зони під рухомим пуансоном. При порівнянні сили деформування для різних видів заготовки встановлено, що зі збільшенням висоти (y) значення сили зростають (рис. 4, а). Це пов'язано з необхідністю проведення процесу закритої осадки з більшими значеннями ходу, що призводить до більшого зміцнення матеріалу та вичерпання ресурсу пластичності. Проте при збільшенні значення (y) спостерігається підвищення течії матеріалу у нижню кругову порожнину. За наявності порожнин в заготовці з двох сторін сила процесу деформування не збільшується. Встановлені особливості переміщення матеріалу в кругові порожнини, що формуються стінкою матриці та пуансоном, показують, що заповнення нижніх кутів є найбільш складним через відсутність рухомого інструменту, як у випадку верхніх кутів, де переміщенню металу сприяє рухомий пуансон. Застосування конструкцій матриць з фасками (f) та радіусами

заокруглення (r) дозволяють отримувати вироби, в яких повністю оформлені всі елементи деталі (рис. 4, б).

Застосування компенсаторів, крім запобігання заклинювання штампів, дозволяє також впливати на заповнюваність кутів нижньої кругової порожнини (рис. 5, а). Аналіз показав, що при співвідношенні висоти компенсатора до радіусу деталі $h_1/R_0 \leq 0,10$ спостерігається ідеальне заповнення кутів, прилеглих до стінки матриці та зниження сили видавлювання (рис. 5, б). При більших значеннях h_1/R_0 починається витіснення металу у компенсатор, і дефект у вигляді незаповнення кутів нікуди не зникає.

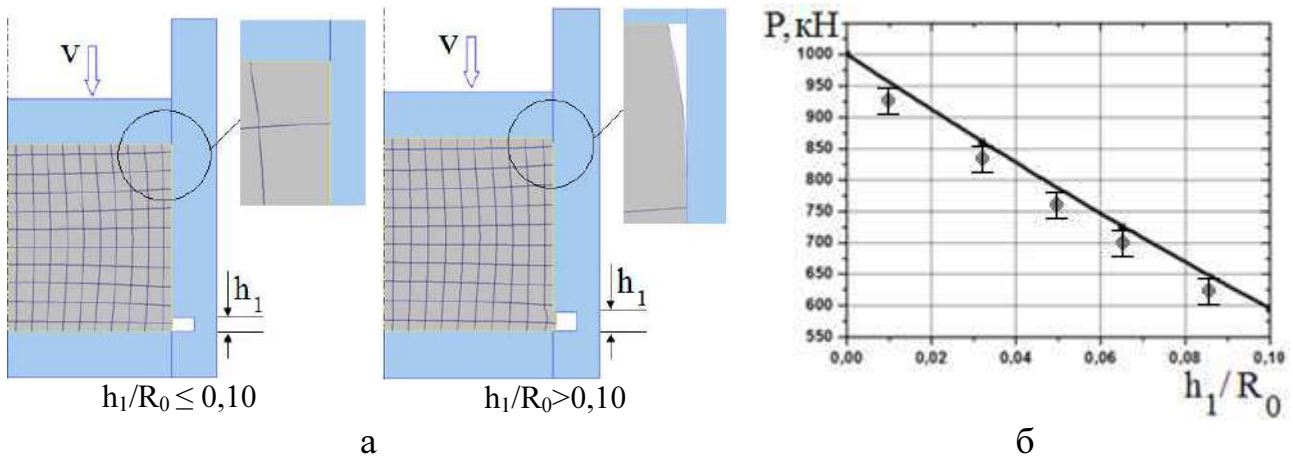


Рис. 5 – Вплив компенсаторів на заповнення кругової порожнини біля стінок матриці (а) та графік залежності сили видавлювання від величини компенсатора (б): $h/2R_0 = 1,0$; матеріал АМцМ

Доповненням традиційному способу є калібрування заготовки з застосуванням способу радіального видавлювання (рис. 6). Після формування відносно низького фланцю за рахунок радіального видавлювання металу та рухомої півматриці з'являється можливість формувати відносно високі заготовки.

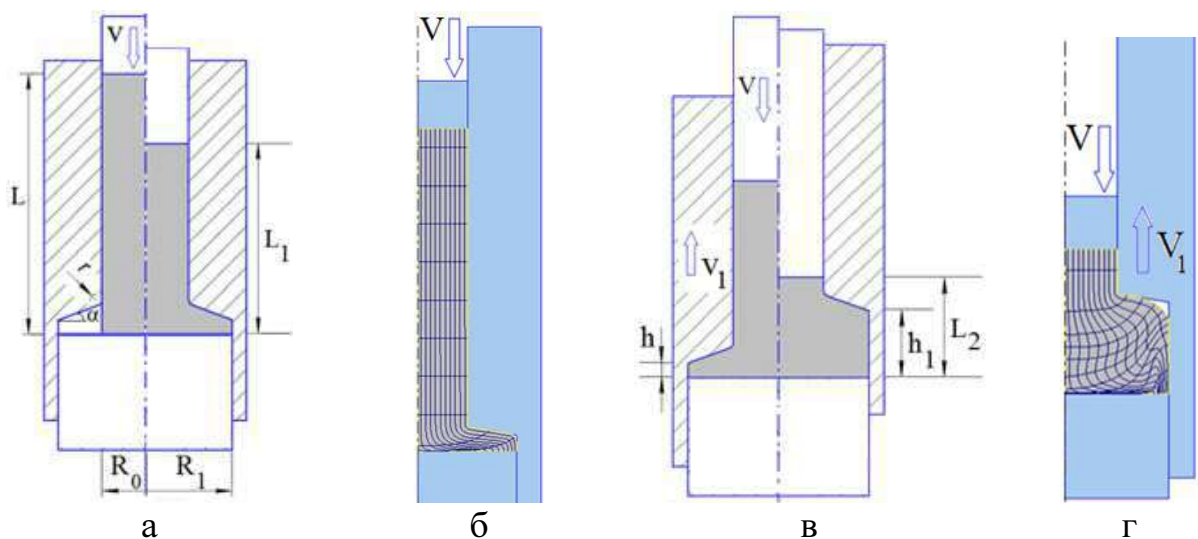


Рис. 6 – Схема закритої осадки в рухомих матрицях (а, в) та викривлення ділильної сітки при закритій осадці в рухомих матрицях (б, г): $R_1/R_0 = 2$, $h/R_0 = 0,35$; $h_1/R_0 = 1,35$; $r/R_0 = 0,135$; $\alpha = 20^\circ$, $V_1/V = 0,35$; матеріал АМцМ

Четвертий розділ присвячений теоретичному та експериментальному дослідженню процесу закритого радіального видавлювання осесиметричних виробів. Процес закритого радіального видавлювання відрізняється багато-варіантністю, обумовленою можливістю активного управління подачею металу в приймальну порожнину за допомогою регулювання кінематики пластичного формозмінення. При теоретичному аналізі процесів видавлювання виникає необхідність визначення сил розкриття матриць та особливостей кінематичного впливу інструменту на заготовку як при односторонній, так і при двосторонній подачі металу заготовки в осередок деформування. Рівень сил розкриття визначає надійність роботи штампів з роз'ємними матрицями. Чим вище технологічна сила розкриття матриць, тим надійнішими повинні бути затискні вузли штампів і тим вище ймовірність їх заклинювання, що викликана високими навантаженнями на самі механізми затиску.

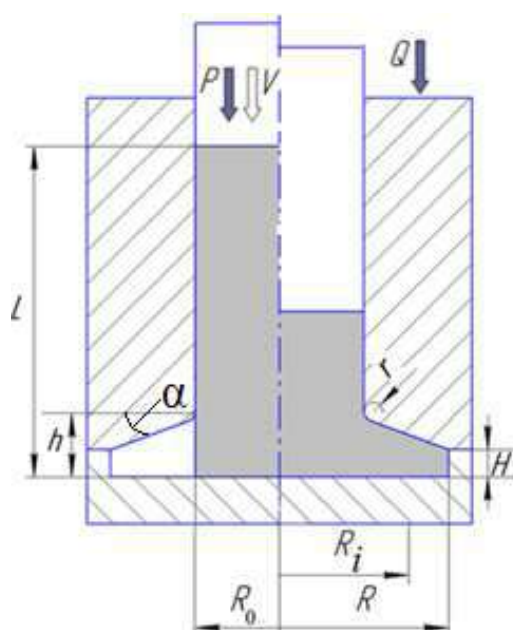


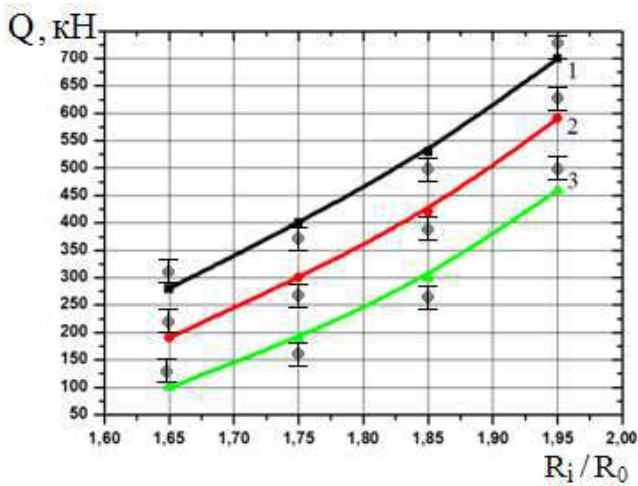
Рис. 7 – Схема процесу закритого радіального видавлювання конічного фланця на кінці стрижня

Отримання фланця на кінці стрижня в закритих матрицях (рис. 7) супроводжуються великими навантаженнями на робочий інструмент та незаповненням кутів приймальної порожнини. З метою аналізу сили розкриття матриць проведено МСЕ-моделювання з різною геометрією матриць. Осередок деформування по висоті обмежується висотою приймальної порожнини під фланець, а найбільша інтенсивність деформацій зосереджена в нижній частині фланця.

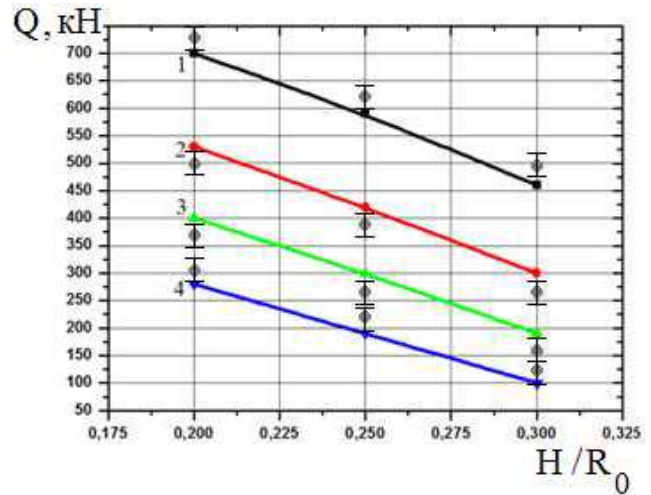
На початковій стадії процесу, коли заготовка має найбільшу висоту і площу контакту, сили тертя заготовки призводять до того, що тиск розкриття матриці виходить від'ємним, тобто сила Q направлена в напрямку руху пуансону. Після того, як починається

заповнення поперечної порожнини, спостерігається різке зростання тиску Q на півматрицю. Це пов'язано зі збільшенням значення стискаючих окружних напружень («прагнення» фланця збільшитися по висоті), зі збільшенням площі контакту металу з торцем матриці, а також зі зміцненням металу в осередку деформації.

При аналізі впливу на силовий режим відносних величин R_i/R_0 та H/R_0 встановлено, що сила розкриття зі збільшенням відносної величини R_i/R_0 збільшується, а при збільшенні відносної величини H/R_0 – сила розкриття зменшується (рис. 8). Основними факторами, що впливають на силу розкриття, є зміна напруженого стану при радіальному видавлюванні та збільшення контактної поверхні тертя з верхньою півматрицею.



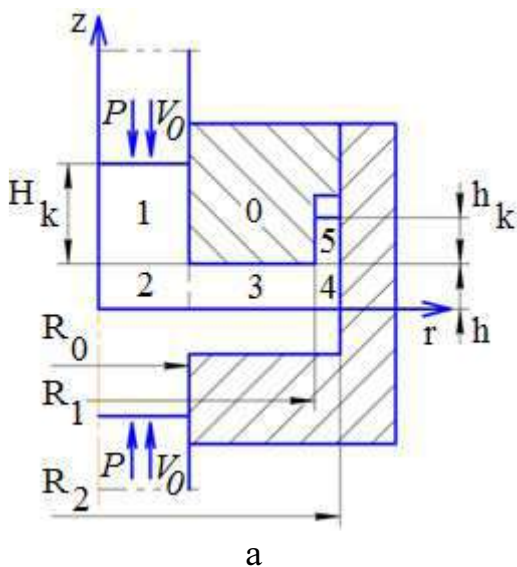
а



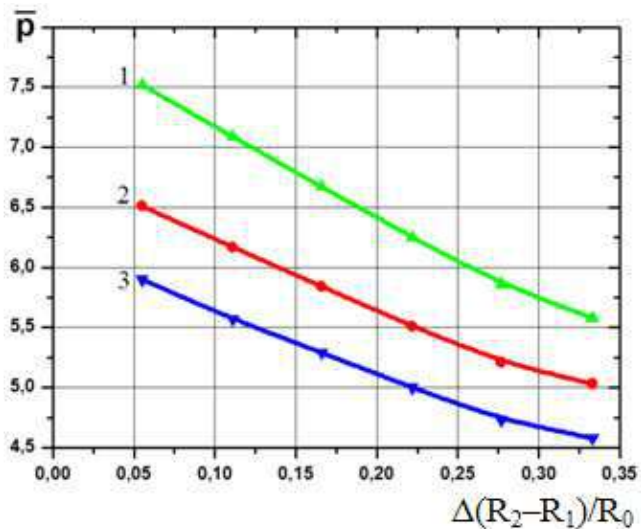
б

Рис. 8 – Графік залежності сили розкриття півматриці (а) від відносної величини R_i/R_0 при $h/R_0=0,65$: 1 – $H/R_0=0,2$, $\alpha=25^\circ$; 2 – $H/R_0=0,25$, $\alpha=22^\circ$; 3 – $H/R_0=0,3$, $\alpha=19^\circ$ та сили розкриття півматриці (б) від відносної величини H/R_0 при $h/R_0=0,65$: 1 – $R_i/R_0=1,95$; 2 – $R_i/R_0=1,85$; 3 – $R_i/R_0=1,75$; 4 – $R_i/R_0=1,65$; матеріал АДЗ1 ($R/R_0=2,0$; $r/R_0=0,1$; $R_0=18\text{мм}$)

Розташування компенсатора в верхній півматриці дещо спрощує конструкції зажимних механізмів, особливо при двосторонній подачі. Оцінка силових характеристик та особливостей формоутворення при радіальному видавлюванні з компенсатором циліндричної форми дана на основі енергетичного методу балансу потужностей (рис. 9, а). Аналіз впливу розміру компенсатора на силові параметри видавлювання показаний на рис. 9, б.



а



б

Рис. 9 – Схема розбивки осередку деформування на кінематичні модулі (а) та графік залежності приведенного тиску видавлювання від відносного розміру компенсатора (б): 1 – $h_k/h=0,5$; 2 – $h_k/h=1,0$; 3 – $h_k/h=1,5$

У момент зіткнення фланців з вертикальною стінкою радіальної порожнини матриці починається інтенсивне зростання сили видавлювання через остаточне заповнення гравюри. На протязі всього процесу найбільша сила

спостерігається для одностороннього радіального видавлювання фланця в середній частині заготовки, а найменша сила – для двостороннього закритого радіального видавлювання фланця в середній частині заготовки. Зі зменшенням величини параметра незаповнення «а» (рис. 10) відбувається збільшення сили розкриття матриці. Найбільша сила розкриття на всьому процесі заповнення спостерігається для процесу одностороннього закритого радіального видавлювання фланця в середині заготовки, а найменша – для процесу двостороннього радіального видавлювання фланця в середній частині заготовки ($R/R_0=2,0$; $r/R_0=0,1$; $h/R_0=0,65$; $R_0=18\text{мм}$).

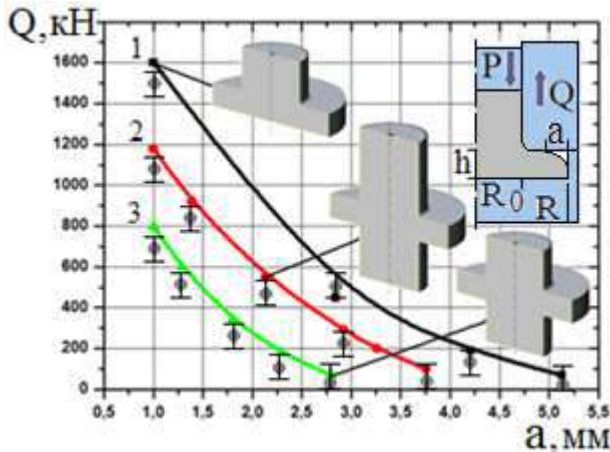


Рис. 10 – Графік залежності сили розкриття матриці від параметра незаповнення «а» для різних схем закритого радіального видавлювання: 1, 2 – при односторонній подачі; 3 – при двосторонній подачі, матеріал АД1

Проведені дослідження показали, що отримання точних фланців можливе за рахунок використання операції підсадки (висадки фланця). Послідовне видавлювання з двосторонньою подачею при радіальному видавлюванні дозволяє отримувати досить великі фланці з рівномірним розподілом інтенсивності деформацій за перерізом. Встановлено, що операцією підсадки при односторонній подачі металу заготовки отримання рівного фланцю можна досягти при висотному ступені деформації $\varepsilon_{\text{п}} = 30\%$ (рис. 11, а), а при двосторонній подачі – $\varepsilon_{\text{п}} = 20\%$ (рис. 11, б). При послідовному двосторонньому

радіальному видавлюванню спостерігається нечітке оформлення фланця, хоча в цілому ступінь заповнення порожнини вище.

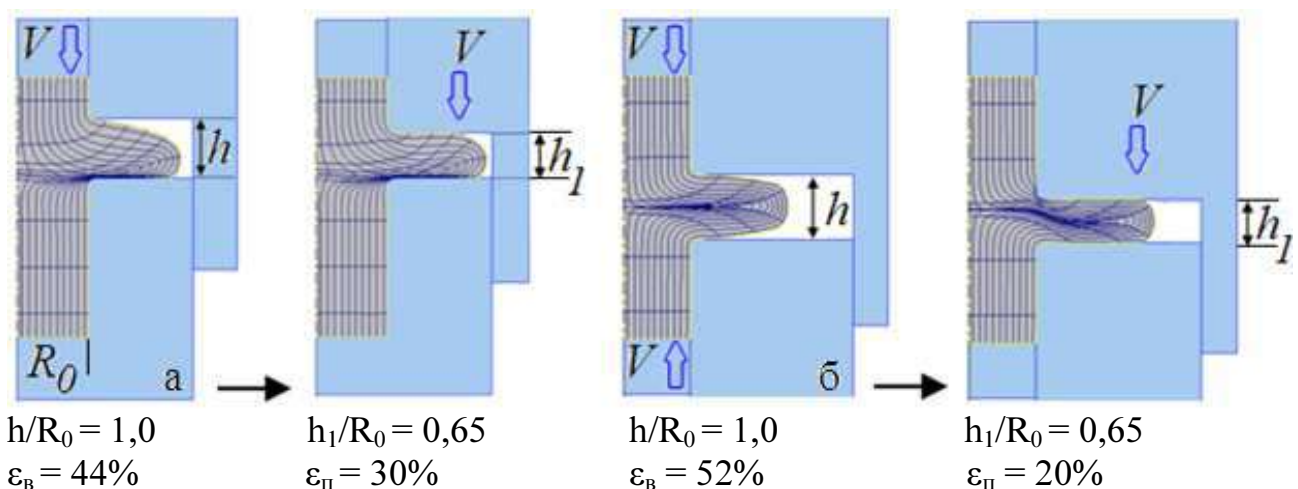


Рис. 11 – Застосування операції підсадки фланця при односторонній (а) та двосторонній (б) подачах при радіальному видавлюванні, матеріал АМцМ

Встановлено, що регулюванням кінематики руху інструменту, у тому числі і операції підсадження, можна досягти формоутворення рівного фланцю без дефектів. Рекомендовані ступені деформації на кожному етапі деформування за схемою послідовного двостороннього радіального видавлювання наведені на рис. 12. Операція підсадки також ефективна і при отриманні фланцю на кінці стрижня.

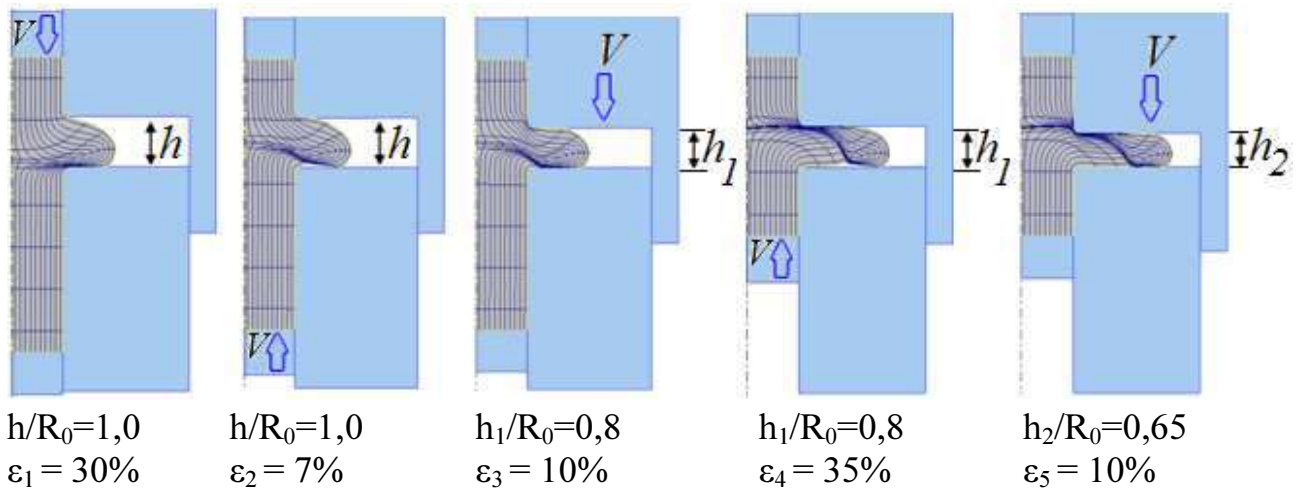
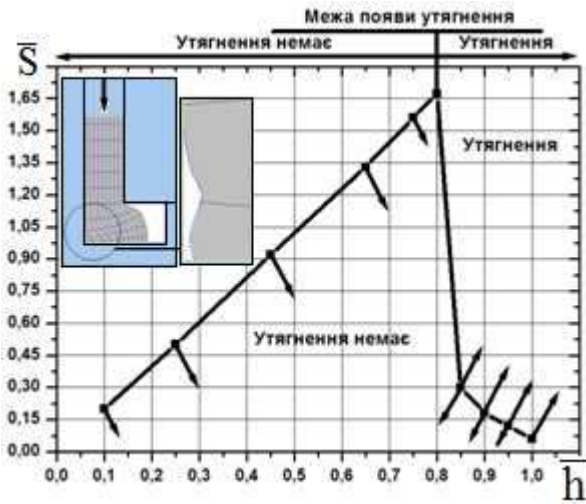


Рис. 12 – Схема послідовного двостороннього радіального видавлювання фланцю, матеріал АМцМ

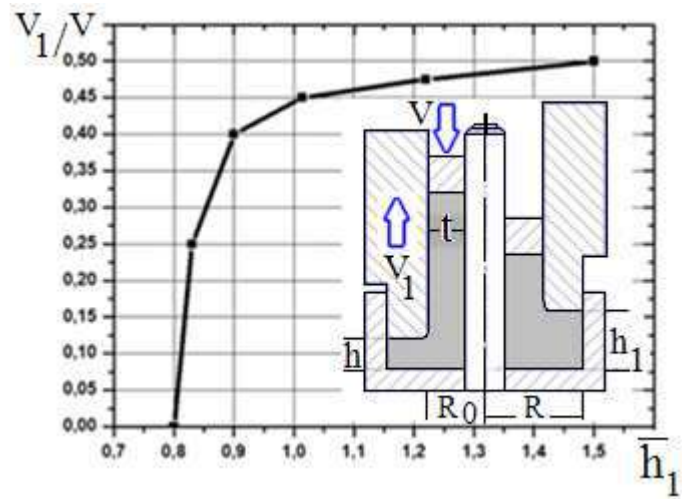
Проблемою при виготовленні порожнистих деталей з фланцем є утворення дефекту у вигляді утягнення в процесі радіального видавлювання. Дефекти з'являються на внутрішній поверхні трубчастої заготовки при значеннях висоти приймальної порожнини, що перевищують товщину стінки заготовки. За результатами досліджень, при $\bar{h} = h/t$, $\bar{S} = S/t$, побудовано діаграми для визначення геометричних розмірів процесу радіального видавлювання, при яких не буде відбуватися утворення утяжки (рис. 13, а, в, д). Регулювання кінематики руху інструменту дозволяє отримувати товсті фланці без утворення дефекту. На основі скінченно-елементного моделювання отримані діаграми залежності швидкості руху півматриці від відносних висот фланцю (рис. 13, б, г, е), що дозволяють обрати співвідношення швидкості пуансону та верхньої півматриці для отримання бездефектного виробу ($\bar{h}_1 = h_1/t$; R₀ = 27мм; R = 45мм; t = 18мм).

Використання схеми радіального видавлювання фланця з редукуванням (рис. 14, а) дозволяє знизити силу розкриття на величину, рівну силі редукування (патент 116545). На основі результатів моделювання проведено аналіз силового режиму. Отримані графіки залежності зміни сили видавлювання і розкриття матриці по ходу деформування від основних геометричних характеристик схеми. Встановлено, що при збільшенні кута конусу в отворі верхньої матриці зі збільшенням ходу процесу сила деформування зростає, а сила розкриття матриці – зменшується (рис. 14, б).

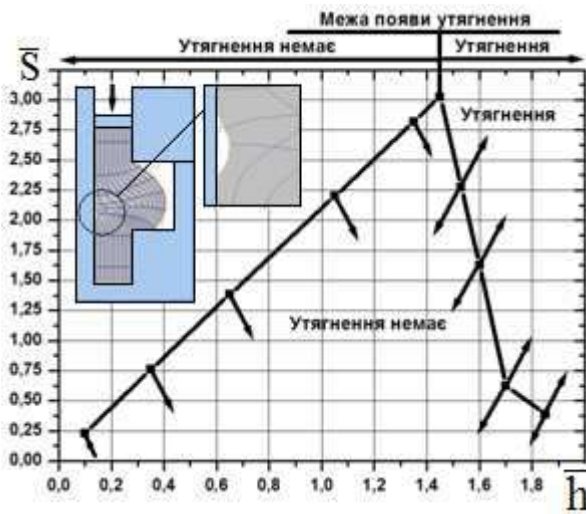
При впровадженні технологічних процесів холодного об'ємного штампування найбільш істотним фактором, що обмежує застосування цих процесів, є низька стійкість інструменту внаслідок високих питомих навантажень.



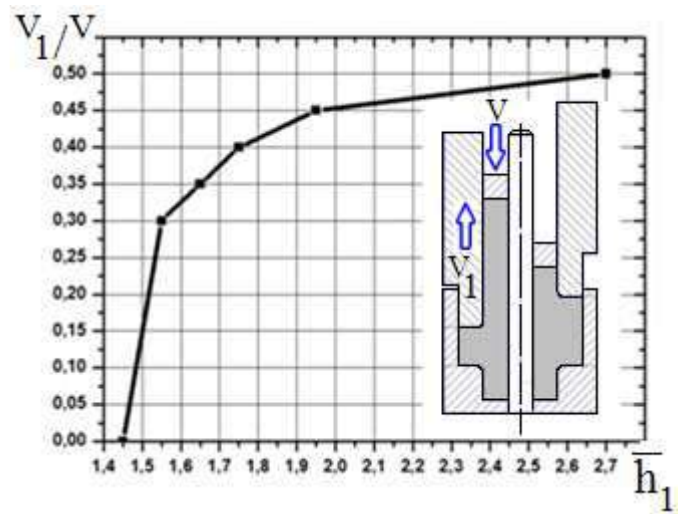
а



б



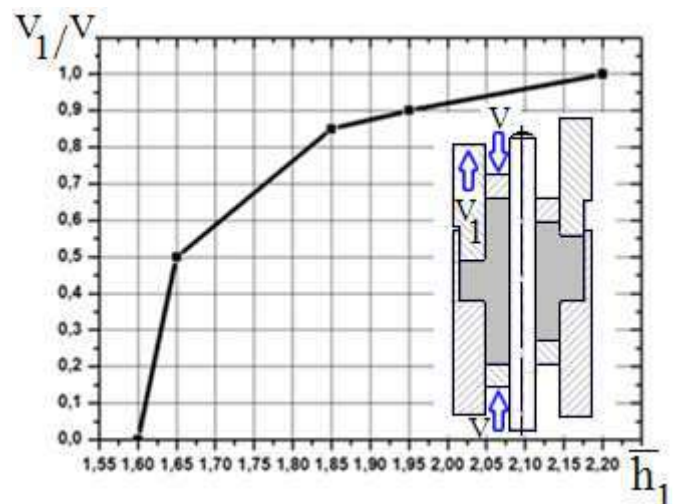
в



г

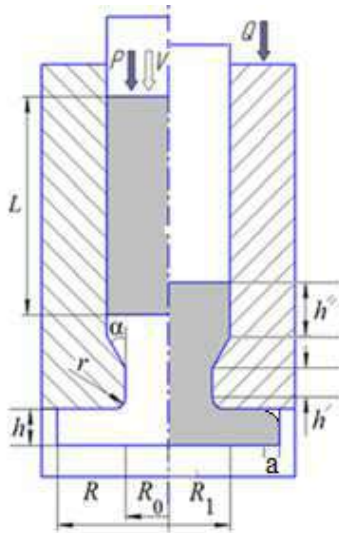


д

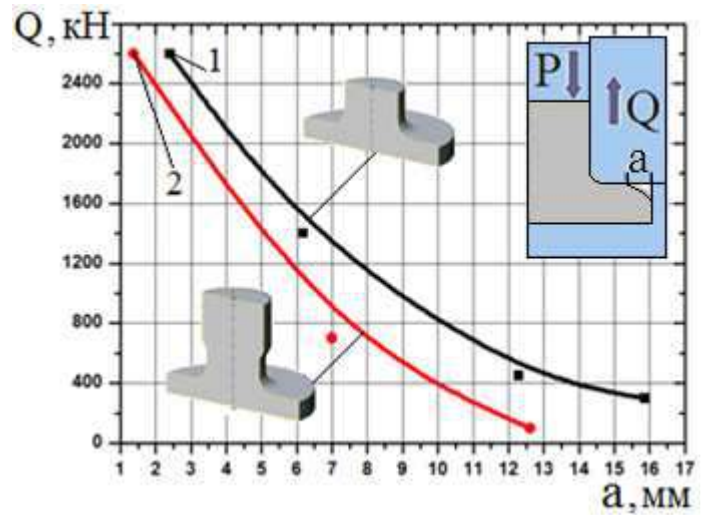


е

Рис. 13 – Діаграма залежності появи утягнення від відносного ходу деформуючого пуансона і відносної висоти фланця та діаграма залежності швидкості руху матриці від різних відносних висот фланцю: для процесу закритого радіального видавлювання фланця на кінці заготовки (а, б); для процесу закритого радіального видавлювання фланця з односторонньою подачею (в, г); для процесу закритого радіального видавлювання фланця з двосторонньою подачею (д, е), матеріал АМцМ



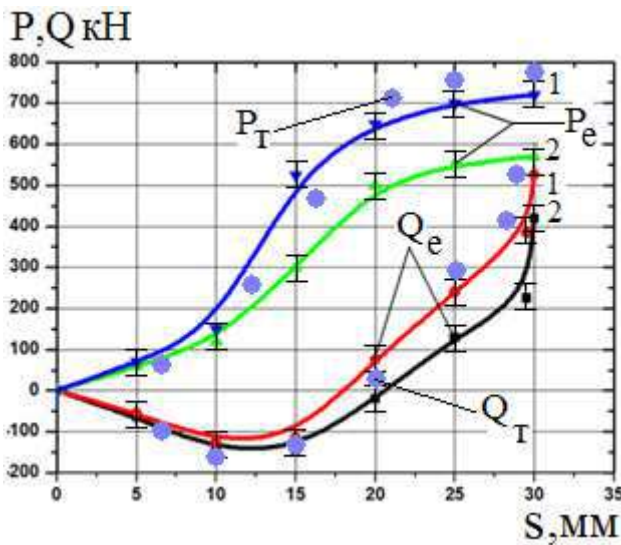
а



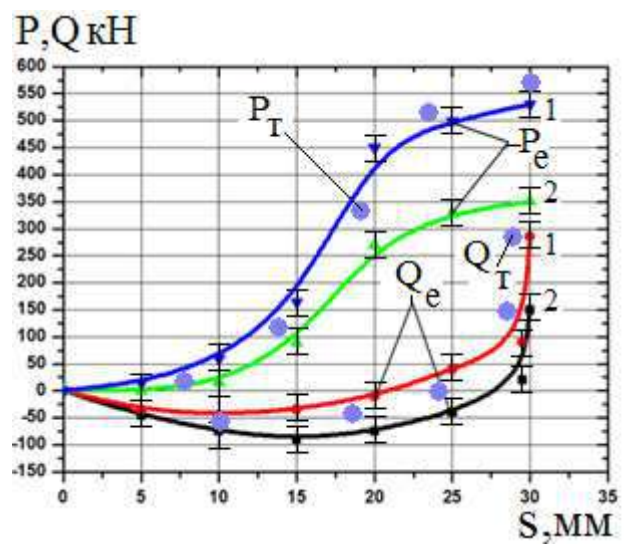
б

Рис. 14 – Схема процесу закритого радіального видавлювання фланця з редукуванням (а) та значення сили розкриття матриці (б) від величини заповнення кута «а» при $h/R_0=0,65$ і $r/R_0=0,5$: 1 – без редукування ($\alpha=0^\circ$) і 2 – з редукуванням ($\alpha=60^\circ$), матеріал АМцМ ($R_1/R_0 = 1,2$; $R_0 = 18\text{мм}$, $R = 45\text{мм}$)

На рис. 15 представлені результати досліджень процесу радіального видавлювання з односторонньою і двосторонньою подачею металу в радіальну порожнину. Теоретичне моделювання підтверджує якісно та кількісно силовий режим видавлювання та розкриття півматриць.



а



б

Рис. 15 – Сила видавлювання і сила розкриття півматриці з односторонньою (а) і двосторонньою подачею металу в радіальну порожнину (б): 1 – Сталь 10, 2 – Мідь М1 при $h/R_0=0,3$; P_T , Q_T – теоретичні дані; P_e , Q_e – експериментальні дані

Як видно з графіків, сила деформування на пуансоні по ходу повзуна преса безперервно зростає, причому найбільш інтенсивно в початковій стадії. Характер зміни сили розкриття матриць носить більш складний вид. При односторонній подачі для верхньої матриці, а при двосторонній подачі – для обох матриць, характерне наростання сили в напрямку зближення матриць під дією сил тертя заготовки об стінку матриці, а потім спостерігається зростання

сил у протилежну сторону. Після припинення дії деформуючої сили на пуансоні спостерігається стрибок сил розкриття матриць, який може бути пояснений пружною дією деформованої заготовки та інструменту. Причому величина стрибка в основному залежить від пружних властивостей матеріалу заготовки та висоти поперечної порожнини.

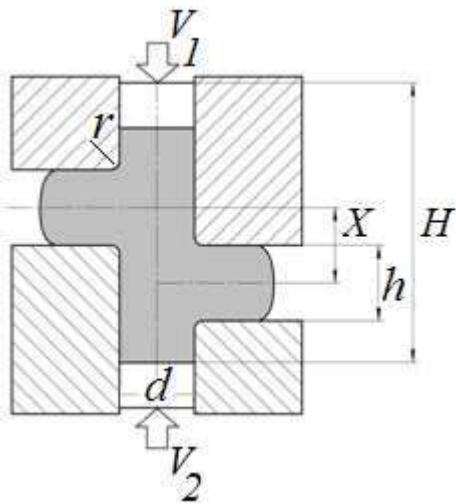
П'ятий розділ присвячений дослідженню процесів бокового видавлювання. Одним з перспективних напрямів розвитку точного об'ємного штампування є отримання деталей з відростками різної конфігурації поперечного перерізу. Застосування бокового видавлювання для отримання відростків на заготовці розширює номенклатуру виробів. Застосування кінематичних варіантів деформування дозволяє формувати відростки, що симетрично та несиметрично розташовані один відносно одного, а також відростки («пера»), що розташовані під кутом відносно до осі заготовки. На основі МСЕ отримано характер зміни силових параметрів, проаналізовано особливості напружено-деформованого стану та формозміни заготовки.

Значний вплив на силові параметри процесу при боковому видавлюванні відростків в роз'ємних матрицях здійснює різне зміщення осей відростків відносно один одного X (рис. 16, а). При збільшенні параметра X , сила процесу зростає фактично лінійно, до значення $X/2R_0 = 1,0$. Стаціонарний характер розподілу сили пояснюється утворенням двох незалежних осередків деформування, з яких метал тече в бокові відростки. При $X/2R_0 \geq 2,0$ між осередками деформації знаходиться застійна зона, розмір якої ніяк не впливає на силу процесу. Збільшення значення X дозволяє отримувати ще більш складні деталі, з відростками на різних рівнях, на одному і тому ж обладнанні. Проте, при збільшенні значення $X/2R_0 \geq 2,0$ осередок деформації істотно звужується і стає фактично поверхнею ковзання для металу, що переміщується в боковий відросток. При цьому на границях контакту металу з інструментом з'являється зона дуже інтенсивної деформації, в той час як при інших значеннях параметру $X/2R_0$ цього не спостерігалось.

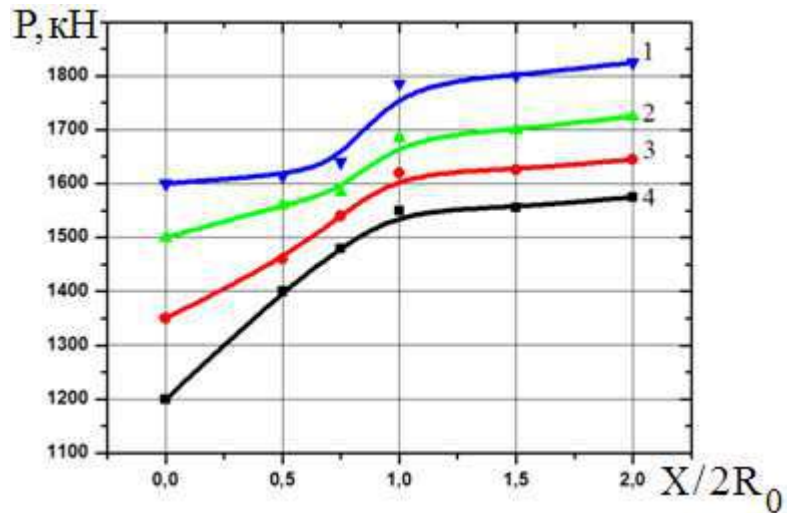
На формоутворення відростків, їх довжину (рис. 16, б), значний вплив здійснює вид кінематики деформування. При застосуванні двосторонньої подачі, коли відношення швидкостей верхнього і нижнього пуансону $V_2/V_1 = 1,0$ переміщення матеріалу у відростки є рівномірним.

При виготовленні деталей з відростками, які знаходяться на одній осі симетрії, з різною формою поперечного перерізу відростку та однаковою площею поперечного перерізу, встановлено, що різниця сили видавлювання становить 6..10 % при видавлюванні відростка з квадратним поперечним перерізом. Це пояснюється тим, що при видавлюванні відростків прямокутного перерізу контактна площа тертя більша від площі контакту при отриманні відростку круглого перерізу.

Застосування двосторонньої подачі при боковому видавлюванні дозволило визначити, що сила розкриття матриць має більш лінійний характер, ніж при односторонньому видавлюванні. Оскільки заповнення порожнини матриці відбувається рівномірно, то характер зростання є монотонним. Тиск поступово зростає зі збільшенням зони контакту заготовки з порожниною матриці.



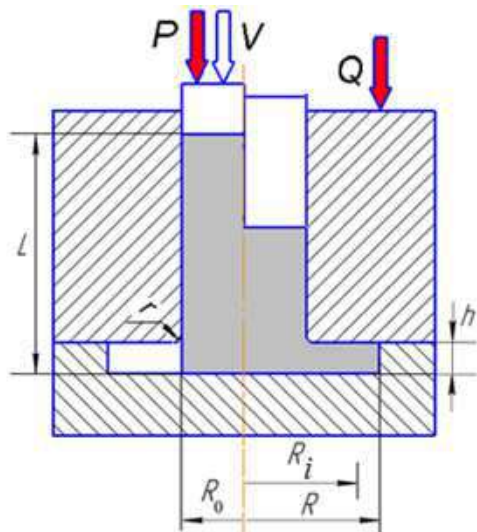
а



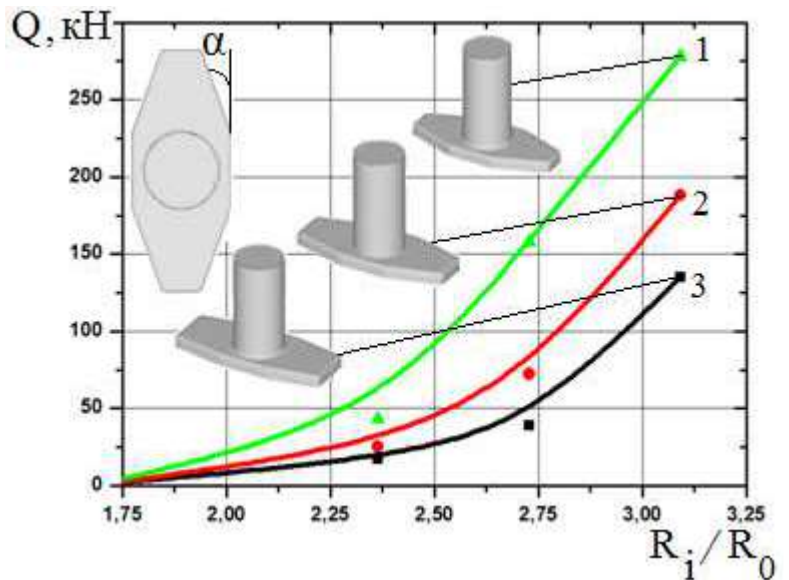
б

Рис. 16 – Схема бокового видавлювання (а) та графік залежності сили видавлювання від значення $X/2R_0$ при $V_2/V_1=0,25$ (1), $V_2/V_1=0,56$ (2), $V_2/V_1=0,75$ (3), $V_2/V_1=1,0$ (4), матеріал АД31 ($d=2R_0$, $h/2R_0=1,0$; $r/2R_0=0,1$; $R_0=14\text{мм}$)

Отримання фасонних відростків на кінці стрижня (рис. 17, а) супроводжуються високими силами розкриття матриці. Зміна конфігурації фланцю призводить до збільшення сили видавлювання внаслідок збільшення осередку деформування та контактної тертя з інструментом. Проте зміна кута утворення фланцю (α) в меншу сторону сприяє зменшенню сили розкриття матриці (рис. 17, б).



а

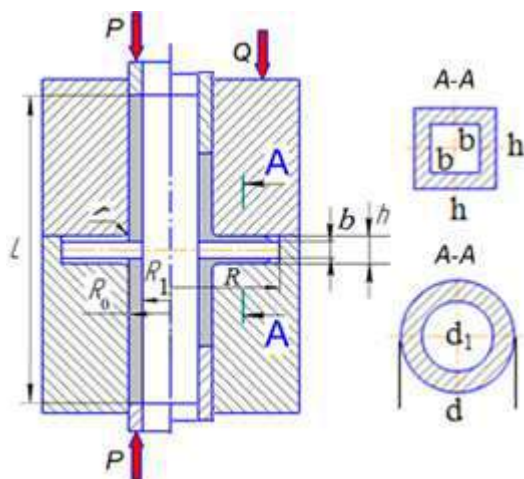


б

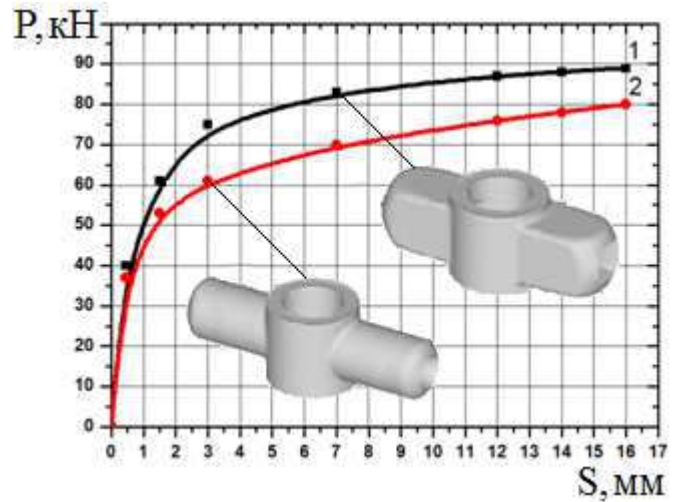
Рис. 17 – Схема процесу бокового видавлювання фасонного відростку на кінці стрижня (а) в роз'ємних матрицях та графік залежності сили розкриття матриці (б) від R_i/R_0 , $h/R_0 = 0,5$: 1 – $\alpha = 20^\circ$; 2 – $\alpha = 15^\circ$; 3 – $\alpha = 10^\circ$, матеріал АМцМ ($r/R_0=0,135$; $R/R_0=2$, $R_0=15\text{мм}$)

МСЕ-моделювання видавлювання порожнистого відростка на оправці круглого і квадратного перерізу (рис. 18, а) показало, що застосування

двосторонньої подачі сприяє рівномірному розподілу напружено-деформованого стану у відростку та підвищує якість формоутворення елемента. Максимальні значення логарифмічного ступеню деформації зосереджені на перехідних кромках інструменту і зменшуються зі збільшенням радіусу закруглення матриць, що сприятливо впливають на зменшення концентрацій напружень у місцях розвороту течії металу.



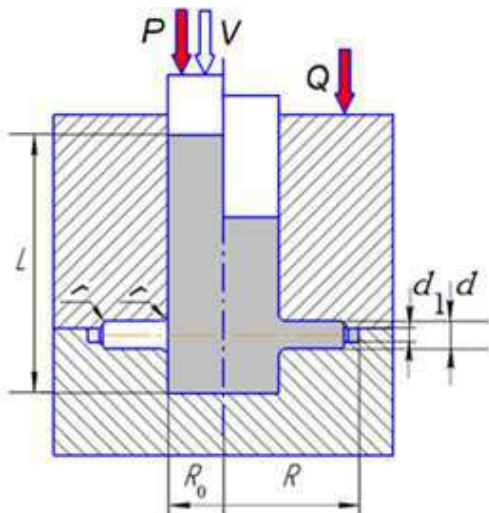
а



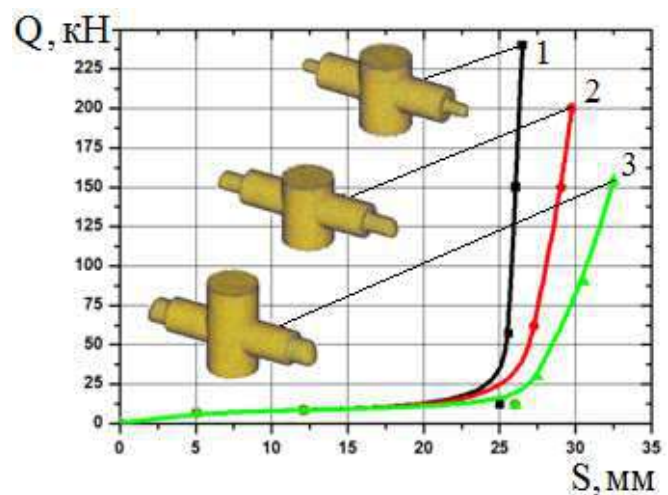
б

Рис. 18 – Схема бокового видавлювання порожнистих відростків круглого та квадратного перерізів (а), і графік залежності сили видавлювання від ходу процесу $R_1/R_0=0,65$: 1 – $d/d_1 = 2,0$; 2 – $h/b = 2,0$; матеріал АМцМ ($r/R_0=0,135$; $R/R_0=2,35$; $R_0=15$ мм; $d_1=b=10$ мм)

Аналогічний розподіл деформацій спостерігається і при отриманні відростків зі змінним поздовжнім перерізом (рис. 19). Збільшення перепаду розмірів призводить до зростання як сили видавлювання, так і сили розкриття матриць (рис. 19, б).



а



б

Рис. 19 – Схема процесу бокового видавлювання ступінчастого відростка зі змінним поздовжнім перерізом (а) та графік залежності сили розкриття матриці (б) від ходу процесу $d/R_0=1,5$; 1 – $d_1/R_0=0,5$; 2 – $d_1/R_0=0,75$; 3 – $d_1/R_0=1,0$; матеріал АМцМ, $r/R_0=0,135$; $R/R_0=2,35$; $R_0=15$ мм

Отримання деталей з «перами» характеризується декількома стадіями зворотного видавлювання. Метал на початковій стадії тече одночасно в бокові відростки, в прямому і зворотному напрямках, утворюючи внутрішню порожнину «стакану».

При утворенні внутрішньої порожнини деталі метал тече в поперечному напрямку. Накопичений ступінь деформації є найбільшим в місцях переходу від циліндричної частини в область поперечних відростків, а також на площині самого пера. Максимальна деформація виникає в період заповнення поперечних порожнин. Силовий режим процесу видавлювання (рис. 20) на початковій стадії штампування описується різким зростанням сили деформування. В момент формування бокового відростка («пера») процес протікає з практично невеликою силою. Різке збільшення сили в кінці видавлювання супроводжується остаточним заповненням порожнин матриці. Збільшення кількості елементів, що видавлюються, від 1-го відростка до 6-ти знижує силові характеристики до 22% через збільшення ступенів свободи витікання металу.

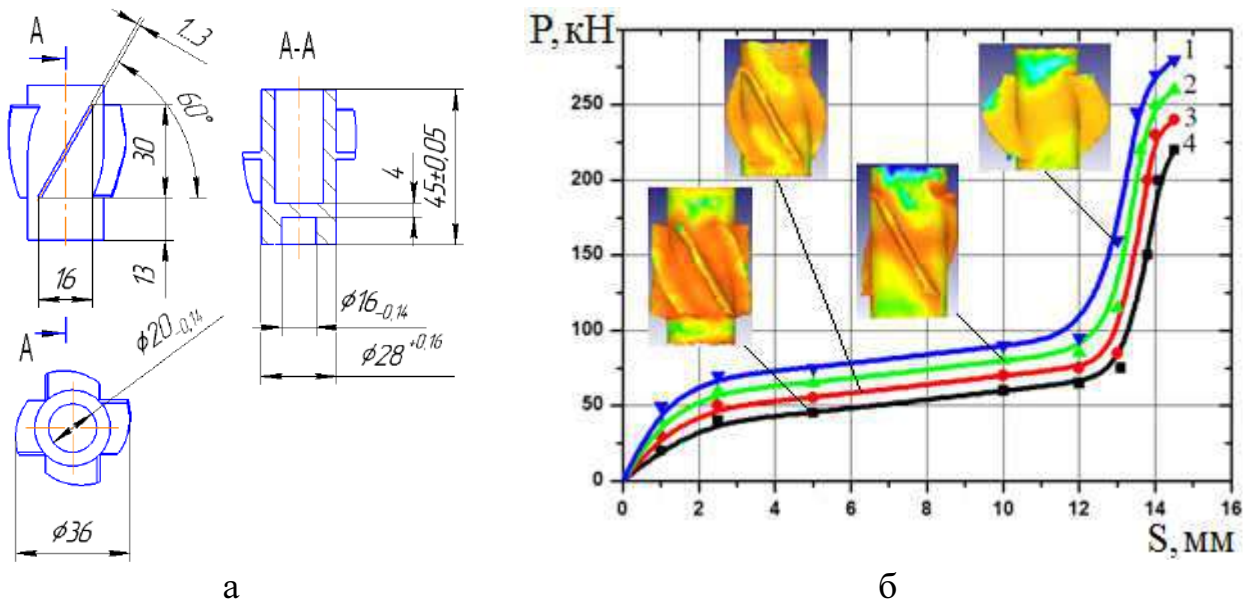
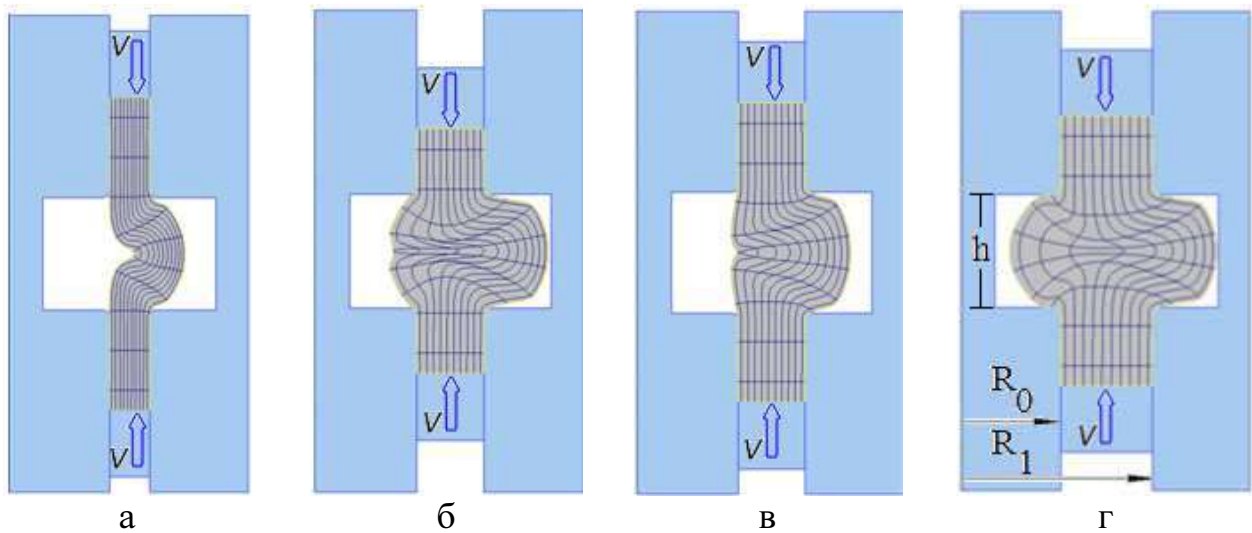


Рис. 20 – Графік залежності сили видавлювання від ходу процесу: 1 – 1 пера; 2 – 3 пера; 3 – 4 пера; 4 – 6 пер; матеріал АД1

Шостий розділ присвячений дослідженню регулювання кінематики формозмінення в процесах суміщеного та комбінованого деформування.

При деформуванні трубчастих заготовок радіальним видавлюванням зі спрямованою течією металу до осі і від осі симетрії досягається формоутворення фланців на внутрішній і зовнішній поверхнях деталі. При відносно тонкій стінці (t) заготовки з формуванням відносно товстих фланців (h) спостерігається дефект у вигляді утягнення на внутрішньому фланці (рис. 21). Причинами утворення такого дефекту є втрата стійкості заготовки в осередку деформування та вплив радіальних розтягуючих напружень. Набір математичних моделей дозволив встановити, що для бездефектного деформування за схемою суміщеного видавлювання варто дотримуватися наступних співвідношень $h/t \leq 1,6$.

Застосування маловивченого процесу закритого радіально-прямого видавлювання дозволяє отримати пустотілі вироби з поперечними розмірами, що перевищують розміри заготовки, а також складнопрофільовані стакани зі змінною і постійною товщиною стінки вздовж висоти.



$R_1/R_0=0,7; h/t=2,8$ $R_1/R_0=0,6; h/t=1,7$ $R_1/R_0=0,6; h/t=1,8$ $R_1/R_0=0,5; h/t=1,2$
 Рис. 21 – Утворенням дефекту (а – в) та формування бездефектних (г) фланців за схемою суміщеного видавлювання $t = R_1 - R_0$; $R_1 = 7,5 \text{ мм}$; матеріал АМцМ

Початкова стадія процесу послідовного радіально-прямого видавлювання порожнистих деталей характеризується радіальною течією матеріалу заготовки, для якого характерні окружні напруження розтягнення, які сприяють зниженню пластичності металу і появі тріщин на кромці фланця. Граничний ступінь деформації при видавлюванні фланців залежить від пластичних властивостей матеріалу заготовки і геометричних параметрів процесу. Встановлено, що при досягненні логарифмічного ступеня деформації $\epsilon = 0,70..0,85$ настає вичерпання ресурсу пластичності у фланцевій зоні деталі, що формується, радіальним видавлюванням. Для підвищення граничного ступеню деформації при видавлюванні фланців необхідно застосовувати схеми, що включають комбінування радіального видавлювання і висадки, схеми з знакозмінними деформаціями або схеми, що підвищують гідростатичний тиск в області фланця.

Найбільша точність розмірів і форми видавлених деталей досягається застосуванням процесів закритого суміщеного радіального видавлювання. Недоліком цього процесу є значне зростання сили деформування і дефектоутворення на стадії формування стінки. Серед дефектів, які найчастіше зустрічаються в процесах комбінованого видавлювання, є дефект у вигляді незаповнення порожнини матриці та дефект типу прострілу. Утворення дефекту у вигляді прострілу при видавлюванні деталей за схемою радіально-зворотного видавлювання спостерігається при отриманні відносно товстого фланцю. Результати моделювання показали, що регулювання кінематики руху матриці при отриманні відносно товстих фланців дозволяє отримувати деталі, які мають заповнений контур (рис. 22).

При формуванні різновтовщинних фланців дефект у порожнини деталі спостерігається на внутрішній частині стінок. На основі проведеного моделювання надано рекомендації по дефектоутворенню у вигляді діаграми, що дає можливість прогнозувати появу дефекту з урахуванням геометричних параметрів деталі та схеми деформування (рис. 23). Для усунення дефектів типу прострілів запропоновано спосіб регулювання руху півматриці на заключній стадії видавлювання (патент 122023).

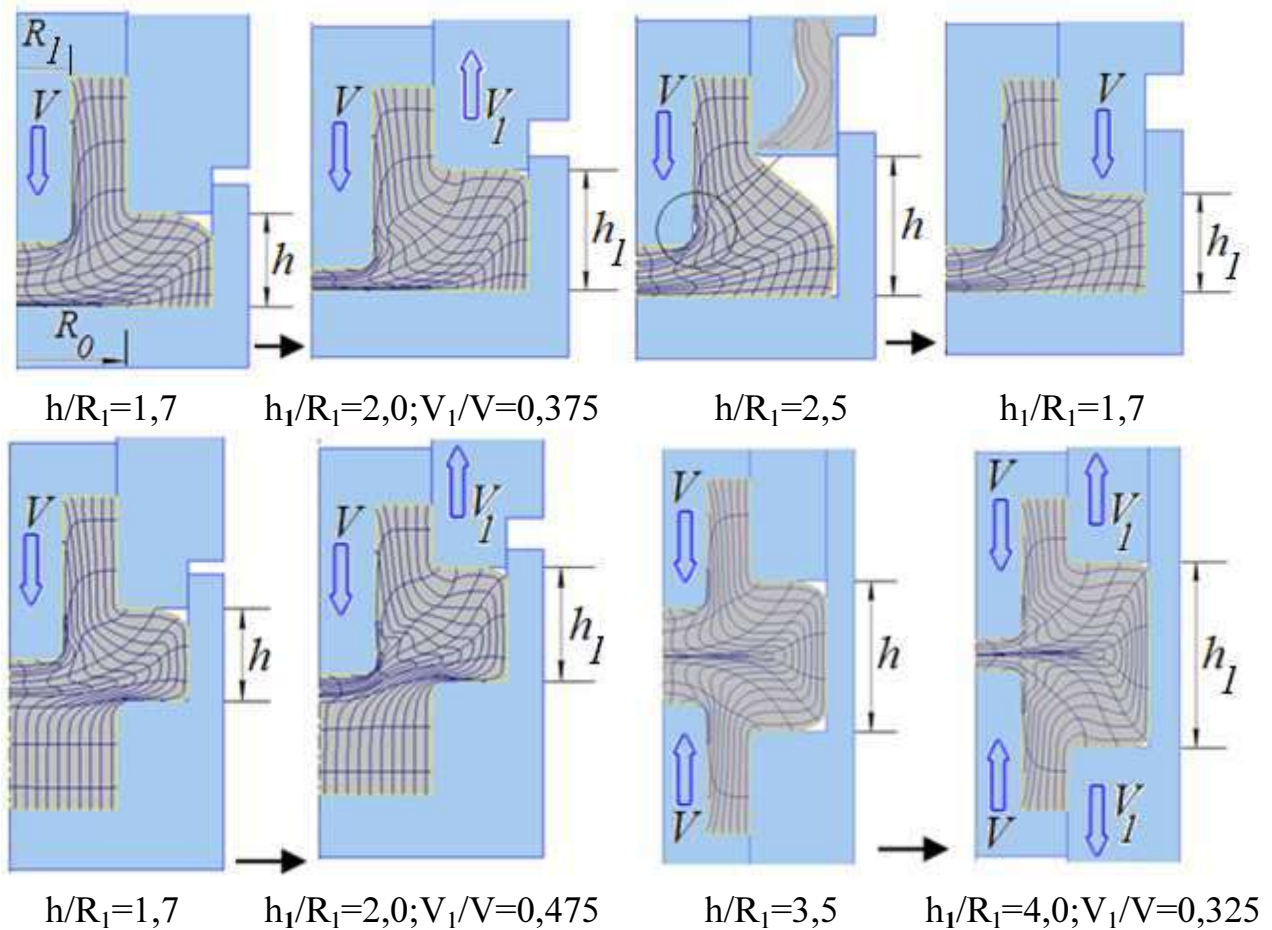
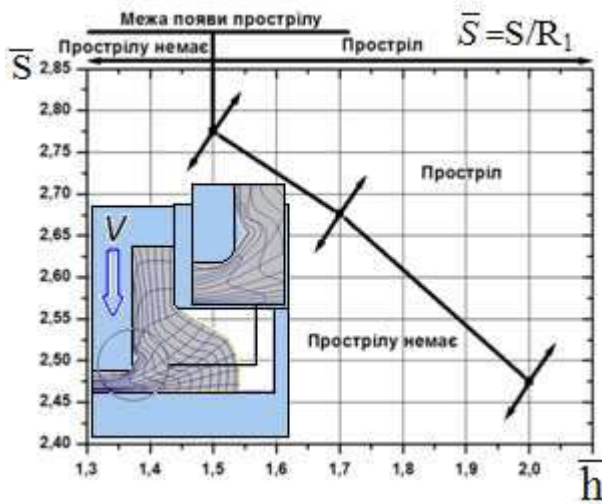


Рис. 22 – Схеми регулювання кінематики руху інструменту для бездефектного радіально-поздовжнього видавлювання, матеріал АМцМ, $R_0 = 18\text{мм}$, $R_1 = 9\text{мм}$

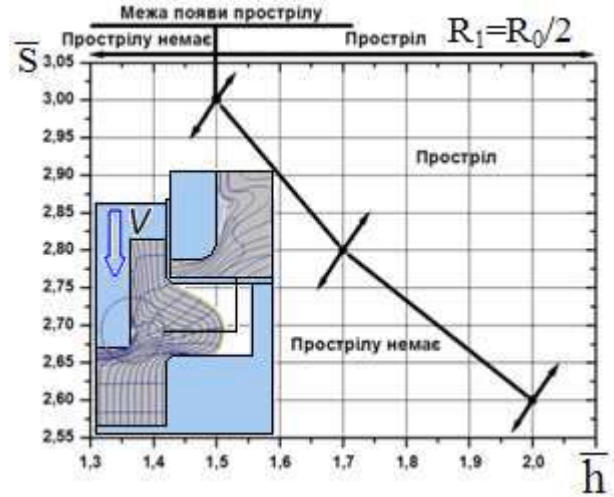
На основі методу скінченних елементів проаналізовано формозміну заготовки в процесі комбінованого видавлювання пустотілих деталей з перемінною товщиною стінки (рис. 24).

Для отримання деталей з різною товщиною стінки розроблено різні схеми кінематичного впливу на заготовку (рис. 24). Особливістю такого процесу є утворення дефекту у вигляді прострілу на внутрішній поверхні деталі. Основними геометричними параметрами, що впливають на формоутворення деталі є значення зазору між торцем пуансону та торцем матриці та зазору між внутрішньою поверхнею матриці та пуансоном. Розрахунок методом скінченних елементів проводився при трьох різних положеннях зазору між торцем пуансону та розширеною ділянкою матриці. Варіювання параметрами дозволяє отримати деталі різної конфігурації, що розширює номенклатуру виробів.

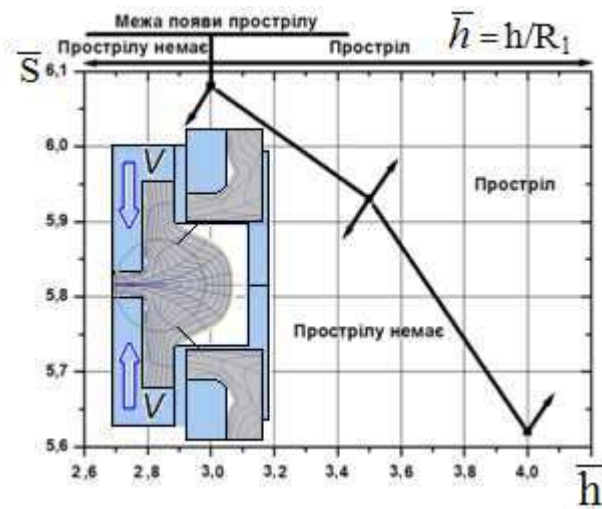
При отриманні порожнистих виробів поліпшення якості деталей типу «стакан» можливе за рахунок усунення утягнення біля дна стакану (рис. 25, а). Для усунення утягнення застосовується радіально-зворотне видавлювання металу з технологічною порожниною – кільцевим виступом (рис. 25, б, в). Формування кільцевого виступу певного об'єму дозволяє створити локальний набір металу і впливати на утворення утягнення тим, що в області виступу накопичується об'єм металу, достатній для заповнення утягнення у заключній



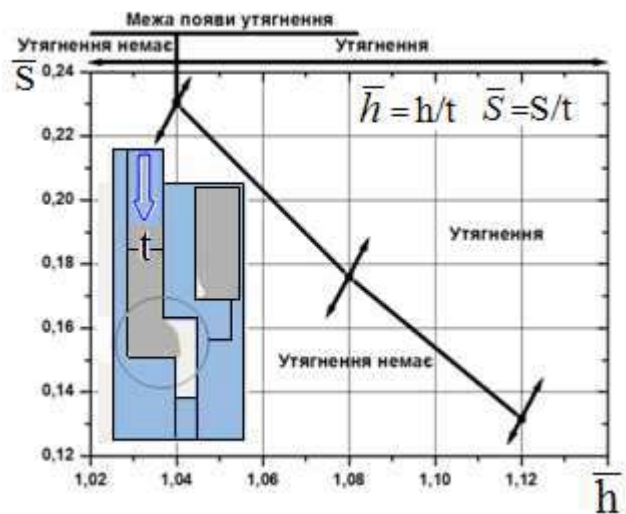
а



б

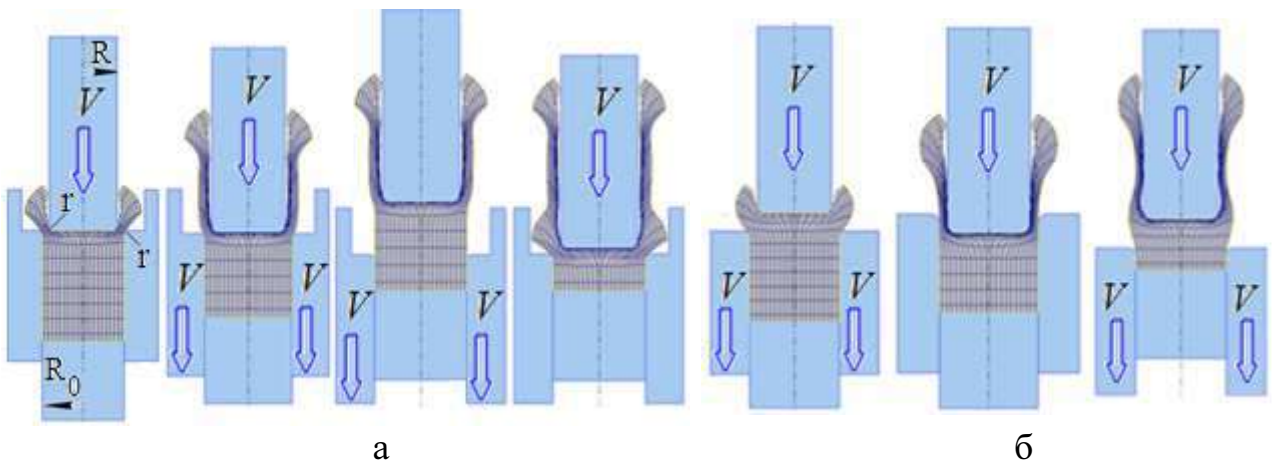


в

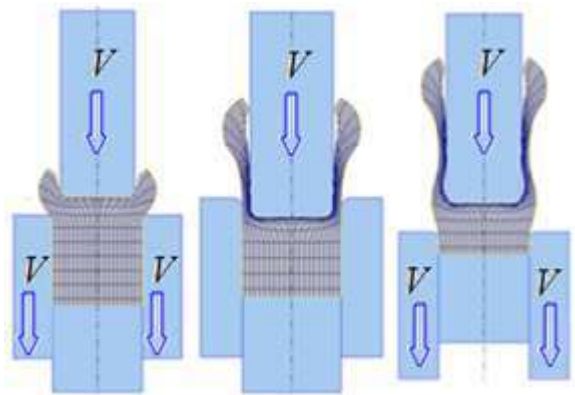


г

Рис. 23 – Діаграми залежності появи дефектів при зміні відносної висоти h : а, б – комбіноване видавлювання з односторонньою подачею; в – комбіноване видавлювання з двосторонньою подачею; г – радіально-пряме видавлювання, матеріал АМцМ, $R_0 = 18\text{мм}$, $R_1 = 9\text{мм}$, $t = 25\text{мм}$



а



б

Рис. 24 – Схеми кінематичного впливу при видавлюванні деталей зі змінною товщиною стінки, при отриманні ($R_0 - R = 3\text{мм}$) (а) та ($R_0 - R = 6\text{мм}$) (б) потовщення на стінці стакану, матеріал АДЗ1, $R_0 = 18\text{мм}$, $r/R_0 = 0,15$

стадії процесу, коли переміщуються периферійні шари металу прискорено вгору. Внаслідок створення такого технологічного виступу з об'ємом, достатнім для компенсації кутового незаповнення контуру (утягнення), усувається відхилення форми у вигляді утягнення.

Технологічна порожнина може бути виконана як на горизонтальній площині, так і у вертикальній, і описується значеннями X та Y відповідно (патент 117796). Варіювання розмірів порожнини X_1 та Y_1 показало, що усунення утягнення за рахунок горизонтальної порожнини можливе при значеннях $X_1/t = 0,2$ та $Y_1/L_1 \leq 2,5$ (рис. 25, б). При усуненні дефекту за рахунок вертикальної порожнини значення – $Y_2/L_1 = 0,5$ та $X_2/t \geq 1,0$ (рис. 25, в).

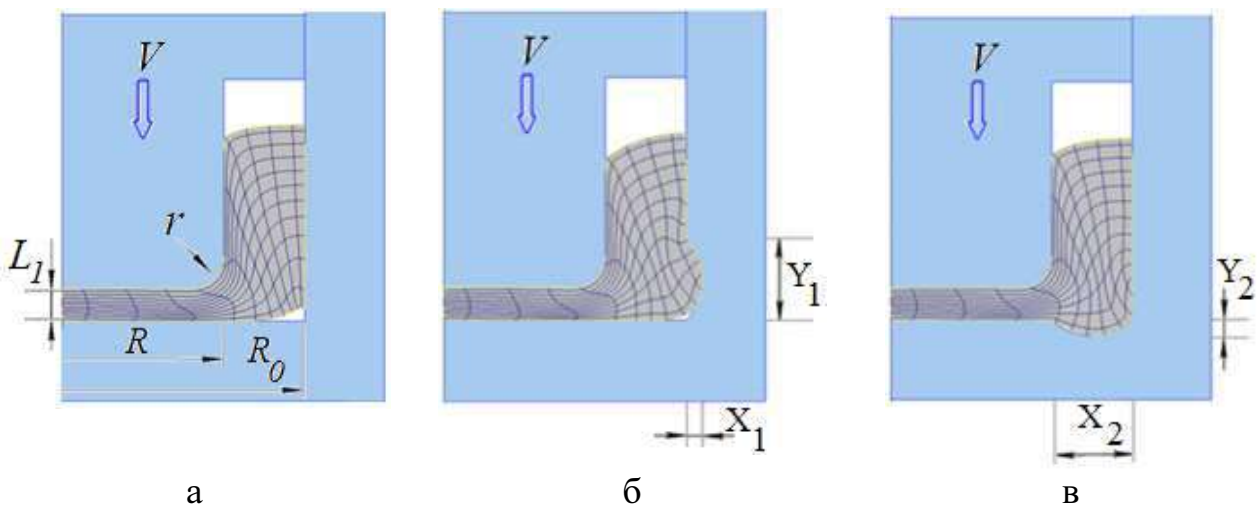


Рис. 25 – Радіально-зворотнє видавлювання з технологічною порожниною: матеріал АМцМ, $t = R_0 - R$; $R/R_0 = 0,65$; $r/R_0 = 0,15$; $R_0 = 15\text{мм}$; $L_1 = 2\text{мм}$

Розширення номенклатури отримуваних виробів можливе за рахунок виготовлення деталей з внутрішнім та зовнішнім фланцями та штамповок з декількома буртами та фланцями за схемами суміщеного та комбінованого видавлювання. Отримання відносно товстих фланців супроводжується утворенням зажиму при формуванні внутрішнього фланцю доцентровим видавлюванням. В свою чергу, формування складнопрофільованих виробів (рис. 26) на етапі формування перехідних елементів також показує можливість дефектоутворення.

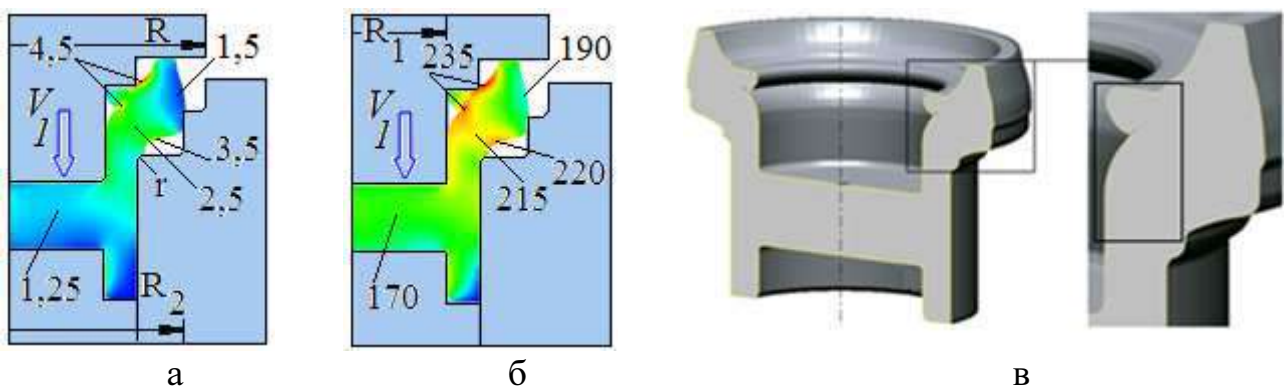


Рис. 26 – Розподіл деформацій (а) та напружень (б) при дефектоутворенні в комбінованому видавлюванні складнопрофільованих деталей (в), матеріал АД31

Результати досліджень показали, що кінематичний вплив нижньої матриці на заготовку з відносною швидкістю V_1/V дозволяє уникнути формування зажиму та рекомендувати швидкості руху матриці, при яких буде спостерігатися бездефектне формоутворення деталі (рис. 27).

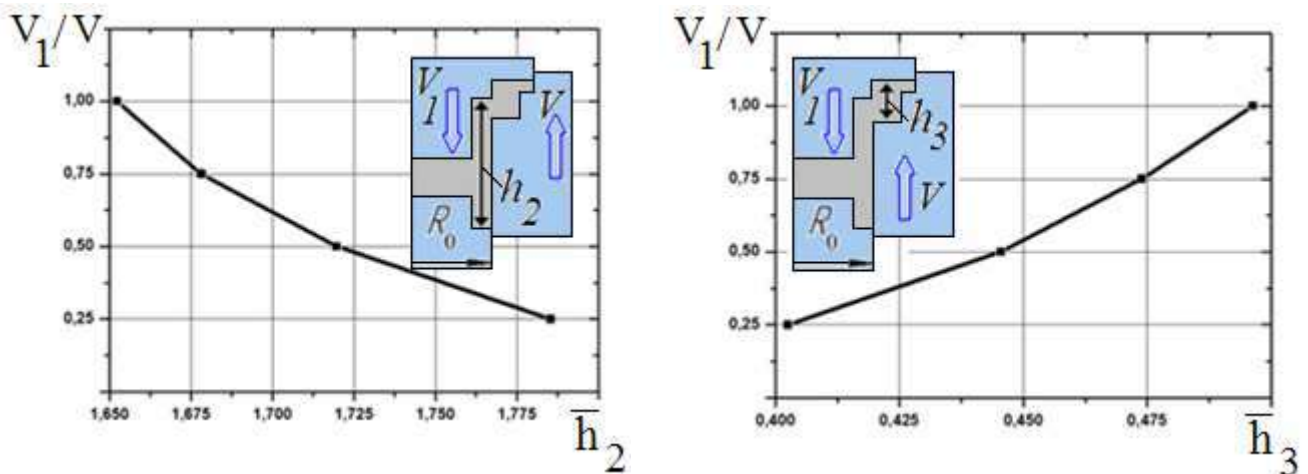


Рис. 27 – Графіки залежності швидкості руху нижньої півматриці від геометричних параметрів деталі ($R_0 = 20\text{мм}$; $R/R_0 = 1,55$; $R_2/R_0 = 1,375$; $R_1/R_0 = 0,75$; $r/R_0 = 0,1$; $\bar{h}_2 = h_2/R_0$, $\bar{h}_3 = h_3/R_0$.)

У цьому розділі узагальнені особливості розробки технологічного процесу та методики проектування процесів штампування. Розглянуто етапи проектування технологічних процесів об'ємного бездефектного штампування на основі регулювання кінематики процесів формоутворення та запропоновано технологічні рекомендації з проектування процесів закритої осадки, бокового, комбінованого та суміщеного видавлювання.

На основі уточнених та отриманих закономірностей силового та деформаційного режимів запропонована методика проектування процесів точного об'ємного штампування в закритих матрицях. Надані технологічні рекомендації з проектування процесів закритого радіального видавлювання фасонних фланців, бокового видавлювання відростків різної конфігурації поперечного перерізу та різного розташування відносно осі заготовки, що забезпечують отримання деталей без утворення дефектів, дозволяють обрати необхідні співвідношення геометричних параметрів і рекомендувати силовий режим та навантаження, які будуть діяти на інструмент. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано ряд способів, що розширюють технологічні можливості об'ємного штампування та дозволяють отримувати більш якісні вироби. Способи ТОШ захищені патентами України. Запропоновано ряд типів штампового оснащення, що включають в себе використання зажимних пристроїв для усунення розкриття матриць. Розроблені ресурсозберігаючі технології і креслення штампів передані та впроваджені на ряді підприємств. Економічна ефективність розробок підтверджена документально і полягає у зниженні металоємності і трудомісткості виробництва, розширенні номенклатури деталей, підвищенні якості деталей і надійності технологічного оснащення. Частка економічного ефекту складає 837 500 грн.

Результати досліджень та розроблені на їх основі методи розрахунків, лабораторні установки та програми використовуються також в наукових дослідженнях і навчальному процесі кафедри ОМТ ДДМА.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема підвищення ефективності процесів точного об'ємного штампування на базі розвитку наукових основ, і удосконалення процесів деформування за рахунок регулювання кінематики формозмінення.

1. На підставі літературного аналізу встановлено проблеми і шляхи розвитку процесів точного об'ємного штампування. Визначено основні напрями удосконалення даної галузі обробки тиском, які полягають у створенні нових способів деформування, які базуються на регулюванні кінематики руху інструменту та течії металу заготовки, що дозволяють розширити номенклатуру отримуваних виробів та підвищення їх якості.

2. Для процесів закритої осадки встановлено умови формозмінення заготовки, зміну силових характеристик процесів видавлювання та сил розкриття матриць. Результати досліджень показують, що для процесу осадки характерним є нерівномірне заповнення кутів матриці. Нижні кути матриці, що прилягають до нерухомого інструменту, заповнюються значно повільніше. Застосування компенсатору зі значенням висоти компенсатора до радіусу деталі $h_1/R_0 \leq 0,10$ дозволяє підвищити якість формоутворення заготовки. Надано рекомендації з вибору геометричних параметрів процесу та показано доцільність застосування фасонної заготовки. Доповненням традиційному способу є калібрування з застосуванням радіального видавлювання. Після формування відносно низького фланцю за рахунок радіальної течії металу та рухомої півматриці з'являється можливість формувати відносно високі заготовки. Встановлено, що значення кута скосу інструменту складає $\alpha = 20^\circ$, а швидкість руху матриці $V_1/V=0,35$.

3. Для процесів радіального видавлювання порожнистих деталей, за якими можна отримувати фланці на різному рівні заготовки та різної фасонної форми, встановлені особливості формоутворення та механізм утворення дефектів у вигляді утягнення та відхилення форми фланця. Основними факторами, які впливають на процес появи утягнення є відносна висота фланця $\bar{h}$ та кут скосу на матриці α . Встановлено, що при $\bar{h} \leq 0,8$ та $\alpha \leq 35^\circ$ утягнення не спостерігається. В якості рекомендацій з прогнозування дефектоутворення розроблені діаграми появи утягнення від відносного ходу деформуючого пуансону $\bar{S}$ від відносної висоти фланця $\bar{h}$ та кута скосу інструменту α . Застосування фасок та заокруглень на інструменті збільшує силу розкриття матриць до 20%. На основі енергетичного методу балансу потужностей дана оцінка силових характеристик та особливостей формоутворення заготовки при радіальному видавлюванні з компенсатором циліндричної форми.

4. Деформація з двосторонньою подачею при радіальному видавлюванні дозволяє отримувати досить великі фланці з рівномірним розподілом

інтенсивності деформацій за перерізом. Рекомендовані ступені деформування для такого процесу $\epsilon_1 \approx 35\%$. Отримання точних бездефектних фланців можливе за рахунок використання операції підсадження, що реалізується тим же інструментом за рахунок рухомої півматриці. На основі проведених досліджень встановлені умови деформування заготовки з урахуванням операції підсадки фланцю.

5. Удосконалення закритого радіального видавлювання з метою зниження сил деформування та розкриття матриць можливе за рахунок додавання операції редукування, що дозволяє зменшити силу розкриття на величину, рівну силі редукування. Збільшення кута матриці в місці редукування з 15° до 45° дозволяє знизити силу деформування на $8..10\%$, а силу розкриття матриці – на $10..12\%$.

6. На основі енергетичного балансу потужностей та методу верхньої оцінки отримані аналітичні залежності для визначення сили деформування для схем бокового видавлювання відростків різної конфігурації з одно- та двосторонньою подачами. Встановлено, що при формуванні відростків однієї форми односторонньою та двосторонньою подачами зниження сили при двосторонній подачі металу становить $15 - 20\%$. Скінченно-елементний аналіз процесу отримання бокового відростку типу «пера» дозволив встановити стадії формоутворення та особливості напружено-деформованого стану деталі. Встановлено, що інтенсивність деформацій в осередку деформування в середньому на 30% нижче при видавлюванні з заокругленням на матриці, ніж при видавлюванні з гострою перехідною кромкою; збільшення товщини «пера» сприяє зменшенню сили деформування. При порівнянні експериментальних та теоретичних даних відхилення теоретичних розрахунків не перевищувало 12% .

7. Удосконалення способів бокового видавлювання дозволило розширити номенклатуру отриманих виробів з відростками, що симетрично та несиметрично розташовані один відносно одного, відростками («перами») під кутом відносно до осі заготовки за рахунок розробки нових та удосконалення існуючих схем деформування заготовки з кінематикою регулювання руху інструменту. На силовий режим процесу отримання відростків на різній висоті заготовки значно впливає кінематична схема деформування та зміщення осей відростків відносно один одного X (варіювання розміру X в межах від $(0..2)d$). Для отримання рівних за довжиною відростків рекомендовано застосовувати двосторонню подачу металу з дотриманням відношення швидкостей верхнього і нижнього пуансону $V_2/V_1=1$. При збільшенні параметра X , сила процесу зростає фактично лінійно до значення $X/2R_0=1,0$. Подальше збільшення значень до $X/2R_0 \geq 2,0$ значно впливає на напружено-деформований стан заготовки. В таких умовах в тілі заготовки з'являється зона інтенсивної деформації, що розташована в місці розвороту металу у відростки і може стати місцем відділення частини заготовки (відростка) від деталі.

8. Для процесу суміщеного радіального видавлювання деталей з фланцем встановлено особливості силового режиму з застосуванням енергетичного методу балансу потужностей та методу верхньої оцінки. Методом скінченних елементів з залученням планування експерименту визначені аналітичні залежності для

визначення силових характеристик та особливостей напружено-деформованого стану, що дало змогу визначити значення вичерпання ресурсу пластичності. Встановлено, що при досягненні логарифмічного ступеня деформації $\epsilon=0,70..0,85$ настає вичерпання ресурсу пластичності у фланцевій зоні деталі, що формується, радіальним видавлюванням. Встановлені умови дефектоутворення та рекомендації для їх усунення у вигляді діаграм. Набір математичних моделей дозволив встановити, що для бездефектного деформування за схемою суміщеного видавлювання слід дотримуватися співвідношень висоти фланцю до товщини стінки $h/t \leq 1,6$.

9. При ТОШ пустотілих деталей для усунення утягнення біля дна стакану рекомендовано виконувати горизонтальні або вертикальні технологічні бурти висотами X_i та Y_i відповідно. За результатами аналізу методом скінченних елементів побудовані діаграми з визначення геометричних параметрів для бездефектного формоутворення для процесів комбінованого та суміщеного видавлювання складнопрофільованих виробів. Усунення утягнення за рахунок горизонтального бурта відбувається при співвідношеннях розміру горизонтальної порожнини до товщини стінки $X_1/t = 0,2$ та розміру вертикальної порожнини до товщини дна $Y_1/L_1 \leq 2,5$; за рахунок вертикального бурта – при $Y_2/L_1 = 0,5$, $X_2/t \geq 1,0$.

10. Розроблено технологічні рекомендації і методики з проектування процесів видавлювання пустотілих та суцільних деталей на основі створеної бази розрахункових моделей. Впровадження розробок дозволило підвищити техніко-економічні показники процесів точного об'ємного штампування деталей. Запропоновано нові способи, які захищені трьома патентами. Методики і результати теоретичних та експериментальних досліджень використовуються в навчальному процесі і в науково-дослідних роботах академії.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Алиев И. С. Моделирование процесса штамповки в закрытых штампах методом конечных элементов / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Пластическая деформация металлов: научное издание. – Монография – Днепропетровск, 2014. – Том 1. – С. 192–196.

2. Investigation of defect in combined precision extrusion process with multiple ram / I. Aliiev, L. Aliieva, P. Abhari, K. Goncharuk // XVI International scientific conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. – Series : Monographs. – Czestochowa, 2015. – №48. – P. 90–93.

3. Abhari Payman. Investigation of load on the tools in precision radial extrusion process with multiple ram /Payman Abhari // XVII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering» :Series: Monographs. – Nr 56. – Czestochowa, 2016 – P. 330–333.

4. Abhari Payman. Investigation of fracture moment in radial extrusion process by finite element method / Payman Abhari // XVIII International scientific conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics. – Series: Monographs. – Częstochowa, 2017. – Nr 68. – С. 97–101.

5. Abhari Payman. Numerical simulation of cold forging process to investigate folding defect in enclosed dies/ Payman Abhari // International Journal of Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №2 (80). – p. 71–77. – ISSN 2521-1943, <http://journal.mmi.kpi.ua/author/submission/109198>, DOI:<http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.96079>.

6. Abhari Payman. Finite Element Simulation of Flashless Radial Extrusion Process / Payman Abhari, Igramotdin Aliiev // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, Volume 14, Issue 4 Ver. III (Jul. – Aug. 2017), PP 79-83, [http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/pages/14\(4\)Version-3.html](http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/pages/14(4)Version-3.html), DOI: 10.9790/1684-1404037983.

7. Abhari Payman. The study of folding defects during the radial-forward extrusion in the enclosed dies/ Payman Abhari // International Journal of Science and Research (IJSR). – July 2017. – Volume 6. – Issue 7. – p. 1746–1749. – ISSN: 2319-7064, <https://www.ijsr.net/archive/v6i7/ART20175702.pdf>, DOI: 10.21275/ART20175702.

8. Abhari Payman. Application of Numerical Simulation to Investigate Material Flow in Hollow Radial Extrusion/ Payman Abhari // International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology (IJSRSET). – July-August-2017. – Volume 3. – Issue 5. – p. 556–560. – ISSN 2394-4099. – <http://ijsrset.com/archive.php?v=6&i=18&pyear=2017>, DOI : 10.32628/IJSRSET1734145.

9. Abhari Payman. The investigation of lateral extrusion process using finite element simulation / Payman Abhari // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET). – August 2017. – Volume 5. – Issue VIII. – p. 1703–1707. – ISSN 2321-9653. <http://ijraset.com/archive-detail.php?AID=60>, DOI: 10.22214/ijraset.2017.8242.

10. Abhari Payman. Computer-aided simulation to investigate material flow in combined-radial extrusion / Payman Abhari // International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT). February 2018. – Volume 4. – Issue 2.– p. 24–28.– ISSN: 2454-6135.– DOI: 10.7324/IJERAT.2018.3187, Doiurl <http://dx.doi.org/10.7324/IJERAT.2018.3187>, <https://ijerat.com/index.php/admin/archiveissue?issueid=410>.

11. Прогнозирование дефектообразования при комбинированном выдавливании в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, И. С. Алиев, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – Вып. 10. – Ч. 1. – С. 63–67.

12. Алиева Л. И. Силовые режимы радиального выдавливания деталей с высоким фланцем / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, П. Абхари // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 4. – С. 24–26.

13. Напряженно-деформированное состояние поковок в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, О. А. Жукова, Г. П. Клименко // Вестник Карагандинского государственного индустриального университета. – Темиртау, 2014. – №1 (4). – С. 9–12.
14. Косенко М. В. Выдавливание полых конических деталей / М. В. Косенко, П. Абхари // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць ДДМА. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С.350-352.
15. Совершенствование технологии деформирования осесимметричных поковок / О. Е. Марков, Л. Н. Соколов, С. В. Янчук, П. Абхари // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : зб. наук. праць ДДМА. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – С. 295–298.
16. Алиев И. С. Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала. Сообщение 2 / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2006. – №3 (5)– С.97-102.
17. Алиев И. С., Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала Сообщение 3 / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2008. – № 1(11). – С. 7–12.
18. Алиева Л. И. Анализ заполнения полости штампа в процессе радиального выдавливания / Л. И. Алиева, П. Абхари, Е. Н. Бондарева // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування». – Київ, 2011. – № 63. – С. 285–288.
19. Прогнозирование дефектообразования в процессе радиального выдавливания / Л. И. Алиева, И. С. Алиев, П. Б. Абхари, О. В. Патык // Вісник національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. праць. – Харків, 2011. – № 47. – С. 140–145.
20. Алиева Л. И. Анализ напряженного состояния при радиальном выдавливании методом измерения твердости / Л. И. Алиева, П. Абхари, Е. Н. Бондарева // Обработка материалов давлением: сб. научн. труд. – Краматорск: ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 30–33.
21. Абхари П. Б. Формоизменение трубчатой заготовки в процессе раздачи / П. Б. Абхари, О. В. Патык // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 26–30.
22. Алиев И. С. Исследование формоизменения силового режима процесса бокового выдавливания методом конечных элементов / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, О. А. Жукова // Вісник НТУ «ХПІ» : зб. наук. пр. Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – Харків, 2013. – № 42 (1015). – С. 7–13.
23. Алиева Л. И. Определение величины утяжины в процессе радиально-продольного выдавливания в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Вісник НТУ «ХПІ» : зб. наук. праць. Серія : Інноваційні технологій та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків, 2014. – № 44 (1087). – С. 3–7.

24. Абхари П. Б. Теоретический анализ процесса выдавливания деталей с фланцем в закрытых матрицах / П. Б. Абхари // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон, 2017. – № 2 (61). – С. 11–18.

25. Моделирование процесса закрытого радиального выдавливания фланца с редуцированием / П. Б. Абхари, Р. И. Сивак, Л. В. Таган, К. В. Малий // Обработка материалов давлением : сб. научн. труд. – Краматорск : ДГМА, 2017. – № 2 (45). – С. 17–21.

26. Пат. 116545 Україна, В 21 J 5/00. Спосіб виготовлення деталей з фланцем / П. Абхарі, Л. І. Алієва, Р. І. Сивак, А. А. Єрємін, заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201612441; заявл. 06.12.2016; опубл. 25.05.2017. Бюл. №10. – 5 С.

27. Пат. 117796 Україна, МПК В21К 21/00, В21С 23/20, В21J 5/00. Спосіб отримання порожнистих виробів з тонким дном / Алієва Л. І., Абхарі П., Гончарук Х. В., Таган Л. В.; власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201700272; заявл. 10.01.2017; опубл. 10.07.2017. – Бюл. № 13. – 4 С.

28. Пат. 122023 Україна, МПК В21К 21/08. Спосіб отримання порожнистих виробів з фланцем / Абхарі П., Алієва Л. І., Таган Л. В., Картамишев Д. О.; власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201706444; заявл. 23.06.2017; опубл. 26.12.2017. – Бюл. № 24. – 5 С.

29. Алиева Л.И. Радиальное выдавливание втулок с фланцем / Л. И. Алиева, П. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – С. 6.

30. Абхари П. Конечно-элементный анализ напряженного состояния при радиальном выдавливании / П. Абхари, Е. Н. Бондарева // Теоретичні і практичні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – С. 173–174.

31. Абхари П. Исследование формоизменения в процессах радиального выдавливания / П. Абхари, Л. И. Алиева // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – С. 6.

32. Алиев И. С. Кинематические варианты бокового выдавливания деталей с отрезками / И. С. Алиев, О. А. Жукова, П. Б. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – С. 9.

33. Алиев И. С. Особенности штамповки в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. В. Цыганенко // Машины та пластична деформація металів. Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції. – Запоріжжя, 2012. – С. 70–71.

34. Абхари П. Б. Моделирование закрытой штамповки поковок типа «крестовин» методом конечных элементов / П. Б. Абхари, О. А. Жукова, О. В. Патык // Всеукраинская научно-техническая конференция молодых специалистов «Энергомашспецсталь 2013». – Краматорск. – С. 22.

35. Алиев И. С. Боковое выдавливание деталей с отроостками / И. С. Алиев, О. А. Жукова, П. Б. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ : ДДМА, 2013 – С. 16.

36. Abhari P. Modeling simulation for fleshless precision forging process with finite element method / P. Abhari, O. A. Zhykova // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ : НТУУ «КПІ», 2013.– С. 98.

37. Абхари П. Б. Моделирование процесса бокового выдавливания деталей с наклонными отроостками в форме наклонных перьев / П. Б. Абхари, О. А. Жукова // Современные технологии обработки материалов давлением: моделирование, проектирование, производство. Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением» им. И. А. Норицина. – Москва, 2013. – С. 251–252.

38. Алиев И. С. Моделирование процесса штамповки в закрытых штампах методом конечных элементов / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Пластическая деформация металлов. Материалы X Международной научно-технической конференции. – Днепропетровск : Национальная металлургическая академия Украины, 2014 – С. 25.

39. Алієв І. С. Дослідження силового режиму в процесі видавлювання деталей з бічними відроостками в роз'ємних матрицях / І. С. Алієв, П. Б. Абхари, О. А. Жукова // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 115-річчю підготовки спеціалістів в області ОМТ. – Київ: НТТУ «КПІ», 2014 – С. 10–12.

40. Алиев И. С. Штампы с разъемными матрицами для закрытой штамповки / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. Материалы VI Международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию кафедры «Обработка металлов давлением» – Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. – С. 4.

41. Абхари П. Б. Моделирование комбинированного выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари, К. В. Гончарук, Л. К. Парашенко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – С. 9–10.

42. Алиев И. С. Моделирование кинематических вариантов бокового выдавливания деталей с отроостками / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – С. 12–13.

43. 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 Международной научно-технической конференции. – СПб : Балт. гос. техн. ун-т, 2014. – С. 28–32.

44. Алиев И. С. Боковое выдавливание отрошков в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2015. – С. 8–9.

45. Алиев И. С. Моделирование процесса бокового выдавливания отростка в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Сучасні технології промислового комплексу. Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Херсон : Херсонський національний технічний університет, 2015. – Випуск 2. – С. 7.

46. Алиев И. С. Дефектообразование при штамповке в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 85-річчю створення кафедри обробки металів тиском в НТУУ «КПІ», 2015 – С. 10–15.

47. Алиев И. С. Моделирование двустороннего бокового выдавливания с различными скоростями рабочего инструмента / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Энергосбережение. Экология. Новые технологии. Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции. – Старый Оскол «МИСиС», 2015. – С. 153–159.

48. Абхари П. Б. Напряженно-деформированное состояние осесимметричных заготовок при штамповке в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ–Херсон, 2016. – С. 64–67.

49. Абхари П. Б. Исследование деформированного состояния деталей с фланцем в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – С. 8–9.

50. Абхари П. Б. Усилия раскрытия полуматриц при радиальном выдавливании фланцев на оправке / П. Б. Абхари // Сучасні технології промислового комплексу-2016. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. – Херсон, 2016. – С. 125–127.

51. Абхари П. Б. Прогнозирование возникновения дефекта утяжины в процессе радиального выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Кременчук, 2016. – С. 32–34.

52. Абхари П.Б. Моделирование процесса закрытой осадки методом конечных элементов / П. Б. Абхари // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. Материалы VIII Международной научно-технической конференции. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2016 – С. 3–5.

53. Алієв І. С. Удосконалення технологічного оснащення процесів штамповки у роз'ємних та рухливих матрицях / І. С. Алієв, П. Б. Абхари // Пластична деформація металів. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Дніпро : Національна металургійна академія України, 2017. – С. 43–44.

54. Абхари П. Б. Исследование силового режима процесса точной объемной штамповки несимметричных изделий в закрытых матрицах / П. Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ–Херсон, 2017. – С. 87–88.

55. Абхари П. Б. Конечно-элементное моделирование процесса штамповки осесимметричных деталей / П. Б. Абхари / Университетская наука-2017. Материалы Международной научно-технической конференции. – Том 1. – Мариуполь ПГТУ, 2017. – С. 192–194.

56. Абхари П. Б. Выдавливание деталей с боковыми отростками / П. Б. Абхари // Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки. Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції: збірник тез доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – С. 14–15.

57. Способы управления формообразованием деталей при выдавливании / Алиева Л. И., Абхари П. Б., Ибрагимов А. И., Корденко М. В. // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХПИ», 2017. – С. 8–10.

Додатково наукові результати дисертації відображені в роботах:

58. Марков О.Е. Особенности комбинированнойковки прокатных валов с осадкой слитка на плите с отверстием / О.Е. Марков, П. Абхари, С.В. Янчук // Розвиток методів розрахунку, удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском: наук.-практ. конф. – Краматорськ, ДДМА, 2007. – С. 70. – ISBN 5-77-63-1585-9.

59. Исследование энергосиловых параметров в процессе бокового выдавливания в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина, В. Т. Лебедь // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 1 (40). – С. 13–17.

60. Алиев И. С. Технологические процессы штамповки радиальным выдавливанием в закрытых штампах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 166–172.

61. Разработка штампов для выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари, Л. И. Алиева, И. С. Алиев, А. А. Ерёмина // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 223–321.
62. Абхари П. Б. Силовой режим процесса радиального выдавливания фланца на оправке в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – № 2 (38). – С. 11–16.
63. Марков О.Е. Компьютерное моделирование процессовковки / О.Е. Марков, П. Абхари // Энергомашспецсталь: I наук.-техн. конф. молодых вчених та спеціалістів ОАО „Енергомашспецсталь-2007”. – Краматорськ, 2007. – С. 27–29.
64. Марков О.Е. Моделирование процессаковки валов из слитков / О.Е. Марков, П. Абхари // IX Всеукр. наук.-практ. конф. «Технологія-2006». – Северодонецьк, 2006. – С. 15–16.
65. Марков О.Е. Моделирование процессовковки МКЭ / О.Е. Марков, П. Абхари // „Азовмаш 2006”: I міжнар. наук.-техн. конф. – Маріуполь, 2006. – С. 57–58.
66. Алиев И. С. Моделирование формоизменения в процессе бокового выдавливания / О. А. Жукова, П. Б. Абхари, И. С. Алиев // Матеріали загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Секція «Машинобудування». Підсекція «Механіка пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів». – Київ : НТТУ «КПІ», 2014. – С. 64–66.
67. Абхари П. Б. Кинематические варианты в закрытой штамповке деталей с фланцем / П. Б. Абхари, А. А. Еремина, А. С. Кучма // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – С. 11.
68. Дефектообразование в процессах холодного выдавливания / Л. И. Алиева, Я.Г. Жбанков, Н.С. Грудкина, П.Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ–Херсон, 2016. – С. 148–152.
69. Алиев И. С. Формоизменение полых деталей с фланцем в процессе холодного выдавливания / И. С. Алиев, П. Б. Абхари // Университетская наука-2017. Материалы Международной научно-технической конференции. – Мариуполь ПГТУ, 2017. –Том 1. – С. 190–191.
70. Абхари П. Б. Исследование формоизменения заготовки в процессе осадки профилированным инструментом / Абхари П. Б., Самоглядов А. Д. // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – С. 5–6.

Особистий внесок здобувача в роботах, що опубліковані у співавторстві:

[1] – розробка кінематичної схеми руху деформуючого інструменту; [6, 34] – розробка та аналіз розрахункових скінченно-елементних моделей процесів; [21] – виявлення основних факторів, що впливають на деформування трубчатих заготовки; [2, 68] – встановлення дефектів при видавлюванні; [11] – побудова діаграм для усунення дефектів; [23, 46] – надання рекомендацій з усунення дефектів при видавлюванні; [31] – побудова діаграм прогнозування утворення утягнення при радіальному видавлюванні на оправці; [13, 57] – дослідження закономірностей формоутворення заготовки методом скінченних елементів; [39] – отримання уточнених залежностей для визначення силового режиму деформування в залежності від розташування відростків деталі; [38, 66, 69] – аналіз регулювання формозмінення заготовок на основі варіювання геометрією інструменту; [26, 59] – фізичне обґрунтування результатів дослідження; [12, 18, 22] – аналіз особливостей силового режиму; [27] – теоретичне підтвердження запропонованої ідеї отримання порожнистих деталей з тонким дном; [33, 37] – пропонування шляхів підвищення точності виробів при видавлюванні в роз'ємних матрицях; [14] – аналіз впливу форми заготовки на заповнення порожнини матриці при видавлюванні конічних стаканів; [15] – систематизація способів отримання осесиметричних поковок; [16 – 17] – розробка методик і оснащення для експериментального підтвердження можливості одержання порожнистих деталей радіально-прямим видавлюванням; [20] – експериментальне дослідження та підтвердження результатів моделювання; [25, 28] – запропонування нових ідей видавлювання; [29, 30] – узагальнення процесів радіального видавлювання; [32, 35] – розробка кінематичних варіантів деформування заготовок боковим видавлюванням; [42, 44, 47] – аналіз НДС осередків деформування при боковому видавлюванні; [36, 41, 45] – аналіз та узагальнення результатів моделювання; [40, 61] – удосконалення конструкцій штампів; [53] – розробка нових схем деформування; [58, 63] – розробка скінченно-елементних моделей пластичного деформування; [43, 64, 65] – встановлення особливостей НДС заготовки; [60, 67] – систематизація процесів видавлювання в закритих штампах; [70] – запропонування профільованого інструменту для процесу осадки.

АНОТАЦІЯ

Абхарі П. Розвиток наукових основ і удосконалення процесів точного об'ємного штампування на основі регулювання кінематики пластичного формозмінення. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05-процеси та машини обробки тиском. – Донбаська державна машинобудівна академія, Міністерство освіти і науки України, Краматорськ, 2019.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення ефективності процесів точного об'ємного штампування на базі розвитку наукових основ і удосконалення технологічних режимів та методів регулювання кінематики пластичного формозмінення.

На підставі проведеного літературного аналізу встановлено шляхи і проблеми розвитку процесів точного об'ємного штампування. Визначено основні напрями удосконалення області обробки тиском, які полягають у створенні і освоєнні нових способів деформування, заснованих на регулюванні кінематики формозміни і руху інструменту та спрямованих на розширення номенклатури одержуваних виробів і підвищення їх якості.

Для процесів закритої осадки на основі методу скінченних елементів встановлено умови формоутворення, залежності силових характеристик деформування і розкриття матриць. Результати досліджень показали, що для процесу осадки характерним відхиленням форми є незаповнення кутів матриці. Для підвищення точності заготовок дані рекомендації з вибору силових і геометричних параметрів процесу і регулювання кінематики руху інструменту.

Для отримання фланців фасонної форми на різному рівні заготовки за схемами радіального видавлювання встановлені особливості формозміни заготовки і механізм утворення дефектів у вигляді утягнення. Встановлено вплив геометричних параметрів процесу на сили розкриття матриці. Методом скінченних елементів отримані діаграми залежності швидкості руху півматриці від розмірів деталі, що дозволяє отримувати бездефектні вироби. На основі енергетичного методу балансу потужностей дана оцінка силових характеристик і особливостей формоутворення при радіальному видавлюванні з компенсатором циліндричної форми. Запропоновано спосіб радіального видавлювання з редукуванням, який дозволяє знизити силу розкриття роз'ємної матриці.

Показана ефективність застосування операції підсадки фланцю, яка реалізується в тому ж штампі за рахунок рухомої півматриці. Отримання товстих фланців можливо поетапним деформуванням з двосторонньою подачею. Для реалізації процесів на виробництві розроблені схеми регулювання кінематики руху інструменту.

Способом бокового видавлювання з одно- і двосторонньою подачею металу встановлені закономірності формоутворення відростків різної конфігурації. Встановлено особливості силового режиму деформування і розкриття матриць, напружено-деформованого стану заготовки та формоутворення деталі з урахуванням кінематики руху півматриці.

Комбінованим видавлюванням складнопрофільованих деталей встановлені умови виникнення дефектів типу утягнення, зажиму та прострілу. Дано рекомендації у вигляді діаграм залежності появи дефектів і швидкості руху матриці від відносних параметрів заготовки з одно- і двосторонньою подачею металу в осередок деформування.

На основі результатів теоретичного і експериментального досліджень і створеної бази розрахункових моделей процесів деформування з регулюванням кінематики формозмінення розроблено технологічні рекомендації та методики з проектування процесів видавлювання порожнистих і суцільних деталей. Запропоновано нові способи деформування, які захищені патентами.

Ключові слова: точне об'ємне штампування, кінематика формозміни, силовий режим, сила розкриття, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, дефектоутворення.

АННОТАЦИЯ

Абхари П. Развитие научных основ и совершенствование процессов точной объемной штамповки на основе регулирования кинематики пластического формоизменения. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.05 процессы и машины обработки давлением. – Донбасская государственная машиностроительная академия, Министерство образования и науки Украины, Краматорск, 2019.

Диссертация направлена на решение важной научно-технической проблемы повышения эффективности процессов точной объемной штамповки на базе развития научных основ и совершенствования технологических режимов и способов регулирования кинематики пластического формоизменения.

На основании проведенного литературного анализа установлены пути и проблемы развития процессов точной объемной штамповки. Определены основные направления совершенствования в области обработки давлением, которые состоят в создании и освоении новых способов деформирования, основанных на регулировании кинематики формоизменения и движения инструмента и направленных на расширение номенклатуры получаемых изделий и повышение их качества.

Для процессов закрытой осадки на основе метода конечных элементов установлены условия формообразования, зависимости силовых характеристик деформирования и раскрытия матриц. Результаты исследований показали, что для процесса осадки характерным отклонением формы является незаполнение углов матрицы. Для повышения точности заготовок даны рекомендации по выбору силовых и геометрических параметров процесса и регулированию кинематики движения инструмента.

Для получения фланцев фасонной формы на разном уровне заготовки по схемам радиального выдавливания установлены особенности формоизменения заготовки и механизм образования дефектов в виде утяжин. Установлено влияние геометрических параметров процесса на силы раскрытия матрицы. Методом конечных элементов получены диаграммы зависимости скорости движения полуматриц от размеров детали, что позволяет получать бездефектные изделия. На основе энергетического метода баланса мощностей дана оценка силовых характеристик и особенностей формообразования при радиальном выдавливании с компенсатором цилиндрической формы. Предложен способ радиального выдавливания с редуцированием, который позволяет снизить силу раскрытия разъемной матрицы.

Показана эффективность применения операции подсадки фланца, которая реализуется в том же штампе за счет подвижной полуматрицы. Получение толстых фланцев возможно поэтапным деформированием с двусторонней подачей. Для реализации процессов на производстве разработаны схемы регулирования кинематики движения инструмента.

Способом бокового выдавливания с одно- и двусторонней подачей металла установлены закономерности формообразования отростков различной

конфигурации. Установлены особенности силового режима деформирования и раскрытия матриц, напряженно-деформированного состояния заготовки и формообразования детали с учетом кинематики движения полуматриц.

Комбинированным выдавливанием сложнопрофилированных деталей установлены условия возникновения дефектов типа утяжины, зажима и прострела. Даны рекомендации в виде диаграмм зависимости появления дефектов и скорости движения матрицы от относительных параметров заготовки при деформировании с одно- и двусторонней подачей металла в очаг деформации.

На основе результатов теоретического и экспериментального исследований и созданной базы расчетных моделей процессов деформирования с регулированием кинематики формоизменения разработаны технологические рекомендации и методики по проектированию процессов выдавливания пустотелых и сплошных деталей. Предложены новые способы деформирования, которые защищены патентами.

Ключевые слова: точная объемная штамповка, кинематика формоизменения, силовой режим, сила раскрытия, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, дефектообразование.

ABSTRACT

Abhari P. Development of scientific foundations and improvement of precision forging processes based on kinematics control of plastic deformation. - Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the Doctoral degree of Technical Science in specialty 05.03.05 Processes and Machines of Plastic Working. – Donbass State Engineering Academy, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kramatorsk, 2019.

The growth of the metal forming industry has increased. This increase is due to development of new and more advanced equipments, presses and materials. Product quality, cost and time to market are three overriding issues in metal forming industry. Due to this, the use of finite element method based on computer aided design and engineering techniques for process simulation has been increasing each year. Recently, the numerical simulation techniques using the rigid-plastic finite element method (FEM) have been successfully applied to investigate the forming characteristics of various metal forming processes. The finite element software is used a direct iteration and Newton-Raphson methods to solve the nonlinear equations.

Metal forming can be classified into cold, warm, and hot forging. In the metal forming processes, extrusion process is one of the most important processing methods in the manufacturing industry for producing different parts with various shapes such as flanges, branches and other geometric forms. In recent years, there has been a greater need for enclosed cold forging technology to provide precision parts with various shapes. Extrusion process with room temperature is type of cold forging process. Near net shape quality, excellent surface finished and improved mechanical properties are the most important advantages by using cold forging process. During the simulations by commercial software for plastic deformation as QForm2D/3D and Deform2D/3D, it is seemed that the tubular billet is rigid-plastic body and various

tool parts are all rigid bodies. The cylindrical solid or tubular billet is located in the die cavity and is squeezed by multiple rams. The billet is compressed with one or two opposite rams movement and the billet material fills the die cavity.

By this process can be produced axisymmetric and non-axisymmetric parts. There are principal types of extrusion process such as forward, backward, radial, lateral and combined. Defects occurring as folding defect during metal forming processes sometimes are caused. Control material flow is very important and necessary during extrusion processes by kinematical mechanism to predict and avoid defects.

The dissertation is aimed for solving important scientific and technical problems in improve efficiency of precision forging processes based on development of scientific foundations, technological regimes and kinematics control method of plastic deformation.

Based on definition of literary analysis, aims and problems in development of precision forging processes are considered. Principal aims in development of metal forming fields that consist of making and developing new methods in kinematics control, plastic deformations, die tools movement, expanding range of parts and improving parts quality are defined. For enclosed upsetting based on finite element method, conditions of shaping form, changes of power mode parameters in forming characteristics and force of matrix disclosures are determined. Investigation results are shown that for enclosed upsetting characteristic shape deviations are unfilling in corner of matrix part. To improve the accuracy of billets, recommendations for choice of power mode, geometric parameters, kinematics control and die tool movements in enclosed upsetting are considered.

To get flanges in various levels of billets with different of shaping form in schemes of radial extrusion process, various forming, deformation and mechanism of defect formation such as folding defect are defined. The material flow behavior and the influence of various factors involved in radial extrusion processes with mandrel were explored. Forming characteristics such as deformation patterns (gridlines distortion), distributions of effective strain and stress in two different schemes of radial extrusion process with mandrel, viz, single-ended and double-ended during the forming process with different forming parameters, and also to predict and avoid folding defect in theses processes have been investigated. In order to avoid folding defect and to make new material flow and to create a hollow parts without folding defect has been used a movable upper die in die schemes. Influence of process geometry parameters in force of matrix disclosures is determined.

By using finite element method, as determined graphics that show relationships movement velocities in matrix with parts dimension to make parts without folding defect. Based on upper bound method, power mode characteristics and shaping forms in radial extrusion process with compensator that located perpendicular in radial direction of metal flow are considered. New method of radial extrusion process with reduction variant to reduce force in matrix disclosures is determined. The punch force–stroke and upper die velocity with relative flange height in single-ended and double-ended processes are shown. The upsetting operation by using matrix movement is very effective to get ideal flanges in dies mechanism. To make thick flanges with ideal deformation state using step by step double-ended process with

movement matrix is better than other process such as single-ended and to implement process in the manufacturing industries for producing different parts with various shapes such as flanges, branches and other geometric forms are used schemes of kinematics control by using die tools movement. Simulation results are shown that the formability of the double-ended forming is better than that of the single-ended forming in terms of strain-stress distributions and forming load.

Based on finite element method, lateral extrusion processes such as die scheme of single-ended and double-ended with different branch shapes are simulated. Power mode characteristics, force of matrix disclosures, distributions of effective strain and stress and deformation patterns (gridlines distortion) with kinematics control and die tool movements are defined.

Theoretical and experimental analyses of combined extrusion processes, to make complex parts without defects such as lap, suction, collapse, cold shut and etc. are considered. It is very necessary accurate boundary conditions in combined extrusion processes to make precision parts. Recommendations to predict and avoid defect in the form of diagrams as velocity of die tool movements vs. relationship of billet parameters in single-ended and double-ended combined extrusion processes in material flow are determined.

Based on results of theoretical and experimental investigations, technological recommendations, methodologies, methods, techniques and using a database of calculated models in design and simulation of extrusion processes with hollow and solid parts by using kinematics control and die tool movements. New variants of material flow that are published as patents are offered.

Key words: precision forging process, kinematics of shaping form, power mode, force of matrix disclosures, finite element method, stress-strain state, defect formation.

Підп. до друку 01.02.2019. Формат 60 x 84/16. Ум. друк. арк. 2,32.
Обл.вид. арк. 1,82. Тираж 130 пр. Зам. № 11.

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