

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



КАРТАМИШЕВ ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.777.4:621.77.01

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ
ПОРОЖНИСТИХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВІ СПОСОБІВ
ПОСЛІДОВНОГО КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ**

Спеціальність 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском

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

Краматорськ – 2021

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Алієва Лейла Іграмотдіновна
Донбаська державна машинобудівна академія (м. Краматорськ), професор кафедри «Комп'ютеризовані дизайн і моделювання процесів і машин».

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

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Левченко Володимир Миколайович,
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова
Національної академії наук України, (м. Харків), провідний інженер.

Захист відбудеться « 6 » травня 2021 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01 з захисту дисертацій Донбаської державної машинобудівної академії: 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, ауд. 1319.

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

Автореферат розісланий « 2 » квітня 2021 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 12.105.01



Ю.К. Доброносів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення ефективності виробництва у сучасному машинобудуванні нерозривно пов'язане з удосконаленням ресурсозберігаючих технологій первинного формоутворення заготовок деталей.

У номенклатурі штампованих заготовок значний обсяг займають порожнисті деталі з глухим отвором типу стаканів і гільз. Традиційним та поширеним способом виготовлення таких заготовок і деталей є поздовжнє (зворотне і пряме) видавлювання. Характерні для процесів поздовжнього видавлювання обмеження пов'язані з граничними навантаженнями на інструмент, що змушують ввести декілька послідовних переходів з меншими ступенями деформації. Інші обмеження пов'язані з втратою стійкості інструменту, особливо пуансонів для зворотного видавлювання, що вимагає введення додаткових операцій калібрування заготовок перед видавлюванням. Перспективними способами штампування порожнистих деталей можуть служити способи комбінованого видавлювання, які об'єднують традиційні схеми поздовжнього видавлювання з новими схемами поперечного (радіального і бокового) видавлювання. Процеси комбінованого видавлювання дозволяють значно зменшити енергосилові параметри деформування і час виготовлення, підвищити якість деталей і стійкість штампового інструменту. Технологія може бути застосована для виготовлення порожнистих виробів різної форми типу гільз, профільованих стаканів за схемами поперечно-поздовжнього послідовного, суміщеного та поетапного видавлювання.

Широке застосування комбінованого видавлювання, особливо при виробництві порожнистих деталей, обмежується недостатнім розвитком розрахункового апарату для проектування технологічних режимів деформування, а також недостатньою вивченістю напружено-деформованого стану (НДС) заготовок при деформуванні за новими способами послідовного комбінованого видавлювання.

Вирішення цих питань пов'язане з подальшим проведенням теоретичних та експериментальних досліджень для створення рекомендацій та методик проектування процесів послідовного комбінованого радіально-прямого та прямого видавлювання з роздачею. У зв'язку з вищевикладеним, тема дисертаційної роботи, яка присвячена удосконаленню процесів виготовлення порожнистих деталей на основі використання способів послідовного поперечно-поздовжнього видавлювання, є *актуальною*.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами. Тема дисертації відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки в Україні «Нові речовини і матеріали» (Закон України №2519-IV від 9 вересня 2010 року) і науковому напрямку «Розвиток ресурсозберігаючих процесів обробки тиском на основі створення нових технологічних способів і методик аналізу і закономірностей пластичного деформування» наукової школи ОМТ Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА). Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР), передбачених планами Міністерства освіти і науки України на кафедрі ОМТ ДДМА (роботи 0115U003123, 0117U001164, 0119U000242), а також в рамках договірних науково-дослідних робіт з рядом підприємств (автор брав участь у всіх темах як виконавець).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесів точного об'ємного штампування порожнистих деталей на основі застосування способів послідовного комбінованого видавлювання і розробки рекомендацій з проектування процесів штампування, що забезпечують зниження трудоемності і енергоемності технологічного процесу.

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

- провести аналіз існуючих способів отримання порожнистих деталей та тенденцій удосконалення процесів точного об'ємного штампування видавлюванням;
- розробити математичні моделі процесів послідовного поперечно-прямого видавлювання порожнистих деталей, що дозволить встановити залежності для розрахунку енергосилових параметрів і поетапний розвиток напружено-деформованого стану заготовки;
- на основі теоретичного аналізу процесів визначити і встановити особливості напружено-деформованого стану (НДС) та силового режиму, закономірності формоутворення порожнистих деталей з урахуванням схем деформування, умов контактної тертя і геометричних параметрів деталей;
- на основі експериментальних досліджень процесів видавлювання перевірити адекватність математичних моделей і оцінити можливості способів послідовного комбінованого видавлювання;
- розробити технологічні рекомендації з проектування процесів і оснащення для послідовного комбінованого видавлювання з роздачею порожнистих деталей.

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

Предмет дослідження. Закономірності та технологічні режими формоутворення порожнистих деталей при послідовному комбінованому видавлюванні.

Методи дослідження. В якості теоретичних методів дослідження використані енергетичний метод у варіантах верхньої оцінки і балансу потужностей і метод скінченних елементів (МСЕ), реалізований в спеціалізованих програмних комплексах Deform і QForm 2D. Експериментальні дослідження процесу проводилися з використанням методів фізичного моделювання і тензометрії для вимірювання технологічних сил, методів сіток і вимірювання твердості для визначення напружено-деформованого стану заготовок. Для обробки результатів експериментального дослідження силових параметрів процесів видавлювання використовувалися методи статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

- отримали подальший розвиток на основі енергетичного методу верхньої оцінки моделі штампування порожнистих деталей при плоскому і осесиметричному послідовному поперечно-поздовжньому видавлюванні і встановлені закономірності впливу схем деформування та умов тертя, що дозволило підвищити точність прогнозування зусиль формоутворення деталей з плоскими і конічними фланцями і прогнозувати граничні можливості з точки зору навантаження на інструмент;

- уточнені аналітичні залежності для розрахунку параметрів силового режиму та формоутворення порожнистих деталей з глухим отвором за способом прямого послідовного комбінованого видавлювання з роздачею, які *відрізняються від існуючих* врахуванням реальної конфігурації осередку деформації за допомогою пропонованого осесиметричного трикутного кінематичного модулю з криволінійною стороною;

- вперше на основі результатів аналізу методом скінченних елементів поетапного протікання процесу комбінованого прямого видавлювання з роздачею і оцінки напружено-деформованого стану заготовки побудовані шляхи деформування і виявлені небезпечні жорсткі зони з додатними показниками напруженого стану в осередку деформування, що дає змогу визначити граничні ступені деформації і технологічні можливості способу;

- отримали подальший розвиток знання про закономірності формування осередку деформації з розділенням потоків металу при формозміні заготовки в процесі деформування з роздачею, що дозволило встановити можливість комбінування схем послідовного і суміщеного видавлювання в одному процесі та забезпечити розширення номенклатури деталей за рахунок складних порожнистих виробів типу стакану з фланцем в придонній частині.

Практичне значення отриманих результатів. На основі встановлених закономірностей силового і деформаційного режимів послідовного комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання розроблені розрахункові залежності для силових параметрів і методики проектування технологічних процесів послідовного прямого з роздачею та поперечно-прямого видавлювання порожнистих деталей.

Досліджені можливості нових способів отримання порожнистих деталей зі складним зовнішнім профілем і з усуненням дефектів типу утягнень на основі послідовного керування кінематикою інструменту для комбінованого видавлювання. Новизна способу комбінованого видавлювання порожнистої деталі підтверджена патентом України.

Запропоновані технологічні рекомендації з комбінованого видавлювання передані для промислового освоєння на ПрАТ НКМЗ і ПрАТ ДЗМВ і розроблені конструкції штампів для реалізації процесів комбінованого поперечно-поздовжнього видавлювання з використанням роз'ємних матриць. Результати теоретичних і експериментальних досліджень використовуються студентами спеціальності «Металургія» при виконанні проектних та практичних робіт.

Особистий внесок здобувача. Внесок автора полягає в обґрунтуванні та вирішенні теоретичних завдань з визначення силового режиму процесів, напружено-деформованого стану і формозміни заготовок за допомогою скінчено-елементних і енергетичних моделей процесів видавлювання. Автору належить вибір і розробка методик досліджень, проведення теоретичного аналізу процесів послідовного видавлювання методом скінченних елементів та енергетичним методом верхньої оцінки, підготовка та проведення експериментальних досліджень, обробка і узагальнення отриманих результатів, розробка процесів видавлювання і технологічних рекомендацій. Внесок

здобувача в роботах, опублікованих разом зі співавторами, представлений в анотаціях до списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація роботи. Основні результати дисертації доповідалися на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК): XIX – XXIII МНТК «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском», м. Краматорськ, 2016 – 2020 рр.; XIV, XVII МНТК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», м. Краматорськ, 2016, 2019 рр.; XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering», Czestochowa, 2017; VIII – X МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії», м. Харків, 2016 – 2018 рр.; VIII, IX, XI МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», м. Київ – Херсон, 2016, 2018, 2020 рр.; XVII МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», м. Одеса – Київ, 2016 р.; II, IV, VI МНТК «Сучасні технології промислового комплексу», м. Херсон, 2016, 2018, 2020 рр.; МНТК «Університетська наука», м. Маріуполь: ПГТУ, 2017–2020 рр.; VI МНТК «Перспективні технології і обладнання у ливарному виробництві», м. Краматорськ, 2017; Всеукраїнська НТК «Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки», Вінниця: ВНТУ, 2017; МНТК «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», Краматорськ, 2018 р., а також на щорічних наукових конференціях ДДМА (2016 – 2020 рр.) і об'єднаному науковому семінарі з ОМТ ДДМА (2020 р.).

Публікації. Матеріали і основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 23 роботах, з них 1 стаття в зарубіжному виданні колективної монографії, 2 статті в виданнях, що включені до наукометричної бази Scopus, 7 статей в 7 фахових збірниках, 12 робіт – у збірниках за матеріалами НТК. Отримано 1 патент України на корисну модель.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 294 сторінках машинописного тексту, складається з анотації із переліком праць, вступу, 5 розділів, списку використаних джерел (загалом 265 джерел), загальних висновків та 8 додатків. Об'єм основного тексту дисертації складає 156 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 137 рисунками та 10 таблицями.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі розглянуто сучасний стан і тенденції розвитку технологій точного об'ємного штампування (ТОШ) видавлюванням. Використання ТОШ забезпечує ресурсозбереження, екологічність і

конкурентоспроможність виробництва, за рахунок отримання заготовок максимально наближеної форми до кінцевої деталі. Аналіз показав, що постійне удосконалення конструкцій машин і приладів, застосування нових матеріалів для виготовлення деталей потребують розвитку технологій формоутворення.

У виробництві поширені порожнисті деталі, які представляють собою гільзи (стакан, чаша) або корпуси з глухим отвором. Для виготовлення таких виробів традиційно застосовані прості схеми поздовжнього (зворотного та прямого) видавлювання, для яких характерні більші енерговитрати і кількості переходів та підвищення різностінності деталей. Комбінування традиційних схем поздовжнього видавлювання з новими способами поперечного видавлювання при виготовленні деталей складних конфігурацій відкриває нові можливості для інтенсифікації процесів штампування.

Проаналізовано результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів формоутворення деталей, виконаних в Україні та за кордоном. Результати досліджень описують напружено-деформований стан, силовий режим та деформовність заготовки в простих схемах ТОШ, що не в повній мірі розкривають можливості процесів видавлювання, особливо за новими способами комбінованого поперечно-поздовжнього видавлювання.

В результаті аналізу попередніх розробок і досліджень також встановлено, що для успішного освоєння технологій комбінованого видавлювання деталей необхідне створення математичних моделей, що дозволяють визначити силовий режим деформування з урахуванням впливу способу формозміни, а також прогнозувати формоутворення і напружений стан деталі на послідовних стадіях обробки за новими технологічними схемами.

На підставі аналітичного огляду поставлені мета і завдання дослідження.

У другому розділі обґрунтовано вибір напрямків досліджень, методів теоретичного та експериментального досліджень процесів видавлювання.

Способи комбінованого видавлювання підрозділяються на три групи: способи суміщеного, послідовного і поетапного комбінованого видавлювання. Послідовне комбіноване видавлювання має дві різновиди: з роздачею (рис. 1) і з обтисненням.

Для теоретичного аналізу задач осесиметричного і плоского деформування обрано енергетичний метод верхньої оцінки (ЕМ), заснований на балансі потужностей зовнішніх і внутрішніх сил на кінематично можливих швидкостях переміщень (КМШП). Метод скінченних елементів (Deform, QForm 2D), використаний для отримання інформації про напружено-деформований стан (НДС) заготовки, необхідний для оцінки ступеня опрацювання металу та використаного ресурсу пластичності в процесах комбінованого деформування та видавлювання.

Для експериментальних досліджень розроблене і виготовлене універсальне експериментальне оснащення для випробувальних машин МС-500 та МС-2000, що дозволяє здійснювати комбіноване радіально-пряме та радіально-зворотне видавлювання з різними геометричними параметрами інструменту. Зразки діаметрами 28,2 мм, 36 мм і 45 мм виготовлялися з матеріалів: свинцю С1 + 2%Sb, алюмінієвих сплавів АД1 і АД31, міді М1, латуні

Л63. В якості мастила для алюмінієвого сплаву використовувався тваринний жир, для свинцю – мінеральне масло. Експериментальні дослідження процесів штампування проводилися з використанням методу фізичного моделювання для вимірювання технологічних сил і методу ділильних сіток для визначення деформованого стану заготовок. Для обробки отриманих результатів експериментальних досліджень використовувалися методи математичної статистики.

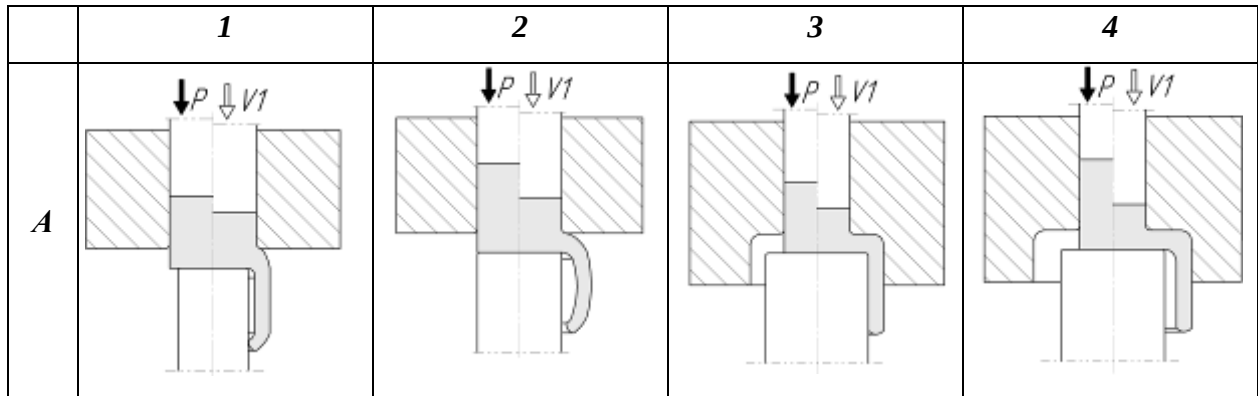


Рис. 1 – Способи послідовного поперечно-прямого видавлювання

У третьому розділі представлені результати теоретичних досліджень комбінованого прямого видавлювання з роздачею порожнистих деталей. Теоретичний аналіз процесу виконано енергетичним методом верхньої оцінки (ЕМ) з використанням кінематичних модулів, які точно описують форму осередка деформації (ОД), деталі і інструментів, що дозволило оцінити силові характеристики процесу з урахуванням реальної геометрії. Рішення, необхідне і для аналізу комбінованого видавлювання деталей з відростками, виконано з використанням плоского розривного поля швидкостей і графіка швидкостей. Осередок деформації складений з центральної зони 1 поперечного видавлювання металу в зазор висотою h , зони розвороту 2 і зони 3 видавлювання металу в прямому (кутовому) напрямку з швидкістю W (рис. 2).

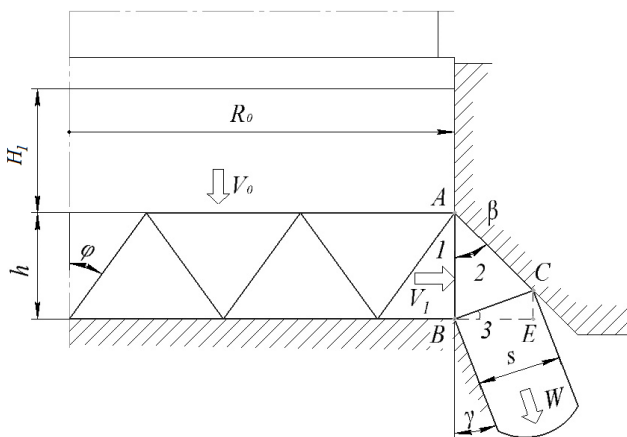


Рис. 2 – Розривні поля швидкостей для процесу комбінованого прямого видавлювання з роздачею

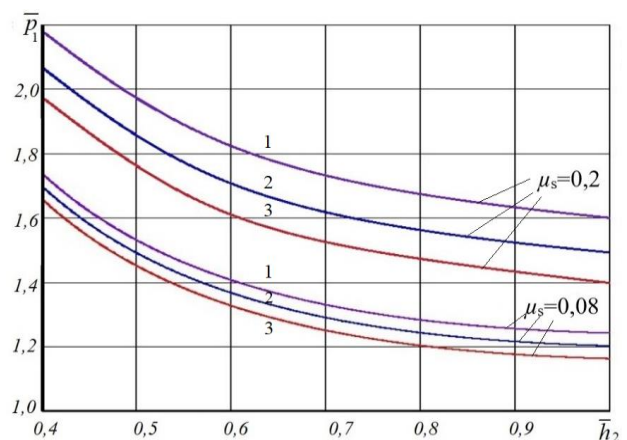


Рис.3 – Графік приведенного тиску поперечного видавлювання: 1– $\bar{H}_1=1,0$; 2– $\bar{H}_1=1,5$; 3– $\bar{H}_1=2,0$

Отримано аналітичні залежності приведенного тиску деформування $\bar{p} = p / 2k$ в залежності від параметрів процесу: R_0 – радіусу заготовки; $\bar{h}$ ($\bar{h}_2$) – відносної висоти осередку деформації, $\bar{H}_1$ – відносної довжини контактної поверхні; γ, β – кутів скосу на фасках інструментів (рис. 2).

Для зони 2 (трикутного модулю ABC) приведений тиск дорівнює:

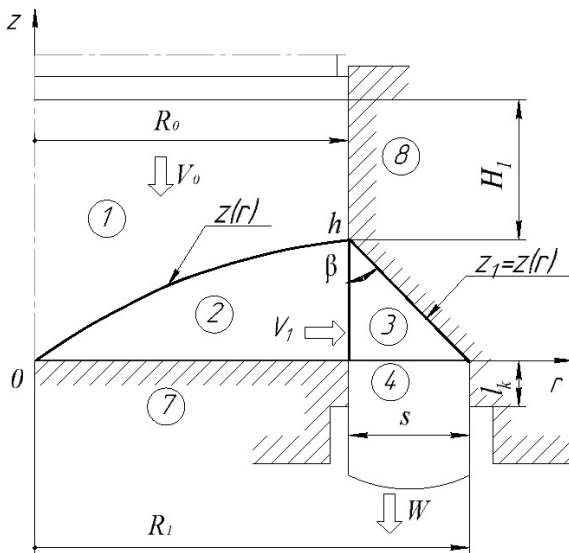
$$\bar{p}_2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{h}{s} + \frac{s}{h} \right) \frac{1}{\cos \gamma} - 2 \operatorname{tg} \gamma + \frac{2\mu_s}{\cos \gamma} \left(\frac{h}{s} + \frac{s}{h} - 2 \sin \gamma \right) \right] \quad (1)$$

При куті $\gamma = 0$

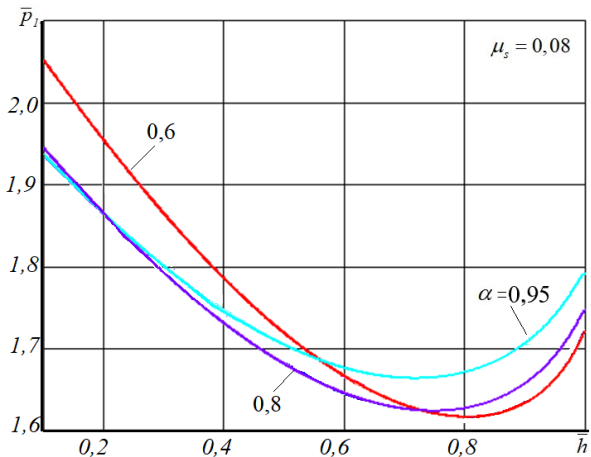
$$\bar{p}_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{h}{s} + \frac{s}{h} + 2\mu_s \left(\frac{h}{s} + \frac{s}{h} \right) \right] \quad (1a)$$

Аналіз характеру впливу параметрів процесу на силовий режим поперечного видавлювання (рис. 3) показав, що зі зменшенням відносної висоти $\bar{h} = h / R_0$ внаслідок зростання ступеню деформування зростає і величина тиску деформування. Параметр γ впливає незначно: з ростом γ тиск видавлювання зменшується, але повільно. Так, при зміні кута з 25° до 5° тиск росте в середньому на 6 %. Кут β (і параметр s/h) є більш вагомим параметром і при $\gamma = 0$ його оптимальна величина має значення, близьке до 45° .

Для осесиметричного процесу комбінованого видавлювання в ході досліджень пропонується новий трикутний модуль з похилою криволінійною границею 2 (рис. 4, а), поле швидкостей в якому враховує наявність в модулі і осевої, і радіальної компонент швидкостей переміщень.



а)



б)

Рис. 4 – Розрахункова схема комбінованого прямого видавлювання з роздачею (а) і залежність приведенного тиску деформування модулю 2 (б)

Для трикутного модулю 2 раціональне значення параметру α , яке визначає форму криволінійної межі і залежить від відносної висоти ОД $\bar{h}$, знаходиться в інтервалі 0,7 – 0,9 (рис. 4, б). У порівнянні з рішенням енергетичним методом з

осесиметричним модулем прямокутної форми, трикутний модуль демонструє суттєво (до 22%) нижчі розрахункові дані для тисків деформування.

Для зони 3 розвороту металу під кутом β – трикутного модулю з прямолінійними границями, застосовано відомі залежності для кінематично можливого поля швидкостей (КМПШ) з лінеаризацією інтенсивності швидкості деформації, яка була проведена після аналізу співвідношень компонент поля швидкостей и встановлення незначних величин швидкості зсувної деформації $\dot{\gamma}_i$. В трикутному модулі розвороту 3 параметром оптимізації служить кут β . Мінімальне значення тиску деформування спостерігається за однакової кількості площ входу і виходу із модулю 3, чому відповідають величини $\beta = 32^\circ\text{--}36^\circ$. Зі збільшенням висоти ОД оптимальне значення параметру β зменшується, і це характерно як для модулю окремо (рис. 5, а), так і для процесу комбінованого прямого видавлювання з роздачею в цілому (рис. 5, б).

На основі використаних КМПШ отримано аналітичні залежності приведенного тиску комбінованого видавлювання від відносних (до радіусу заготовки R_0) параметрів порожнистої деталі: $\bar{p} = p / \sigma_s = f(\bar{R}_0, \bar{R}_1, \bar{h}, \alpha, \beta)$ (див. рис. 5, б).

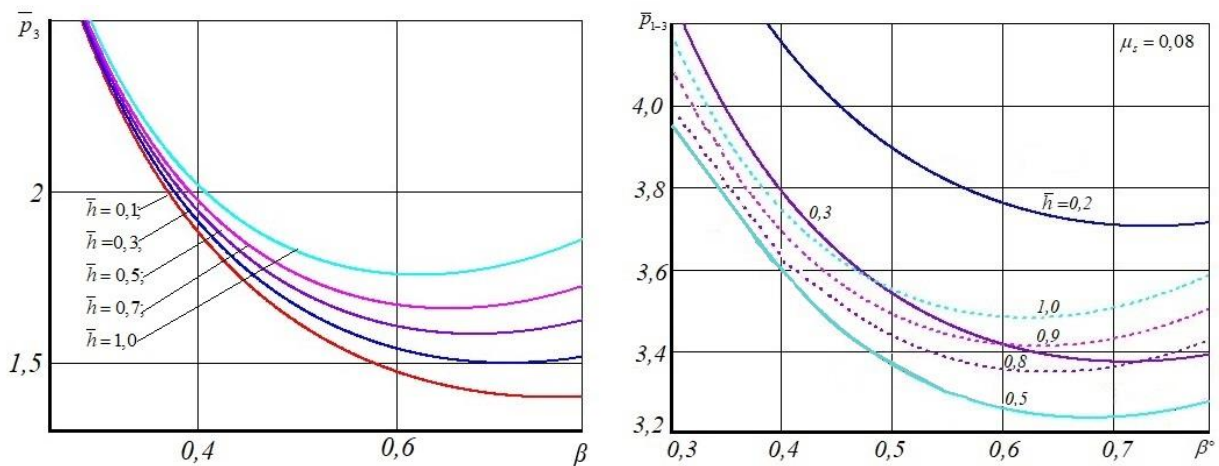


Рис. 5 – Графіки залежності приведених тисків деформування модулю 3 (а) і прямого видавлювання з роздачею (б) від параметрів процесу при $\alpha = 0,9$

Слід відмітити, що вплив на силові параметри висоти h неоднозначний, оскільки з ростом h тиск деформування металу в модулі 2 зменшується, а в модулі 3 – навпаки, збільшується. Для процесу, де модулі в зборі, це означає наявність величин h , при яких деформування потребує мінімальних тисків. Вплив умов тертя на силовий режим процесу звичайний, збільшення коефіцієнта тертя супроводжується зростанням силових параметрів. Доля витрат на тертя може скласти до 30% від загального балансу сил деформування. В процесах деформування в холодному стані при раціональному змащуванні, як показали експерименти з вимірювання сил тертя, значення коефіцієнтів тертя не перевищує 0,08 – 0,1.

Результати аналізу МСЕ послідовного прямого видавлювання з роздачею деталі з порожниною 40 мм і товщиною стінки 6 мм з латунної (Л63) заготовки

діаметром 40 мм дали змогу проаналізувати зміну напружено-деформованого стану (НДС) в ході процесу (рис. 6).

Зоною високих ступенів деформацій є перехідна ділянка розвороту поблизу кромки пуансону. В стінці стакану найбільш деформовані шари металу розташовані з внутрішньої сторони. Різниця в ступенях деформації зовнішніх і внутрішніх шарів в стінці досягає до 3,0, при тому з розвитком процесу ця різниця повільно збільшується. Зі зменшенням кута матриці β ступінь деформації металу зростає з одночасним зниженням нерівномірності його розподілу. При порівнянні з альтернативним способом зворотного видавлювання встановлено зниження нерівномірності розподілу деформацій у прямого видавлюванні з роздачею, однак переваги є незначними (3,0 замість 3,27).

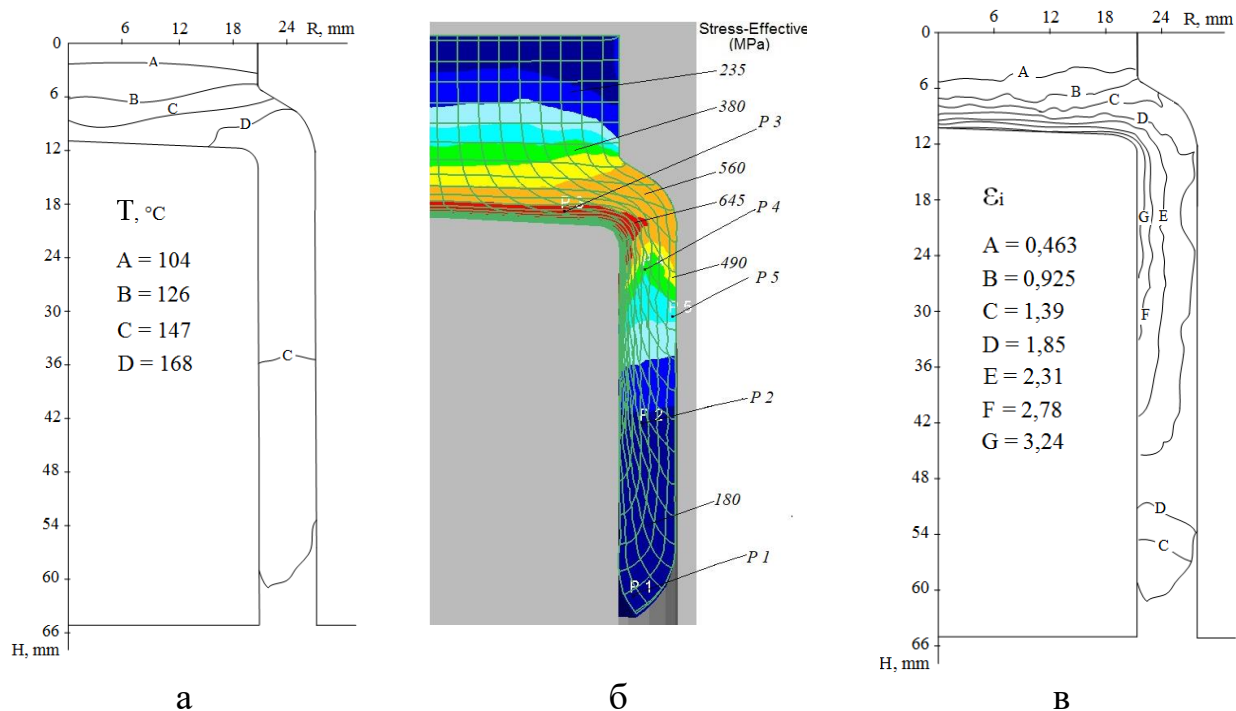


Рис. 6 – Поля розподілу температури деталі (а), інтенсивності напружень (б), інтенсивності деформацій (в) при послідовному прямому видавлюванні

Для розрахунку на послідовних етапах процесу показників НДС в скінчено-елементній моделі задавався набір з 5 точок, які трасуються. Встановлені небезпечні області заготовки можливого руйнування, які розташовані на периферії фланцю. Параметр η напруженого стану в точці $P1$ доходить до критичного значення $\eta = +1$, але після досягнення зони розвороту шлях деформування в координатах « $\epsilon_i - \eta$ » може міняти напрямок і переходити у небезпечну менш жорстку зону з від'ємними значеннями η (рис. 7).

Видавлювання з роздачею забезпечує зниження сил деформування на пуансоні в порівнянні зі зворотним видавлюванням. Чим більше кут конусної поверхні матриці, тим більше величина зниження зазначеної сили. Пряме видавлювання з роздачею в матрицях з кутами конусної поверхні від $\beta = 20^\circ$ до $\beta = 60^\circ$ забезпечує зниження сил видавлювання на пуансоні відповідно від 12%

до 25% у порівнянні зі зворотним видавлюванням порожнистої деталі стакану з наведеними вище розмірами (рис. 8). При видавлюванні з роздачею значення сил на рухливому контрпуансоні (крива 2) і деформувальному пуансоні (крива 3) відрізняються (див. рис. 8). Для кутів матриці, величиною до $\beta = 30^\circ$ вище сили на торці пуансону, а далі – на торці контрпуансону.

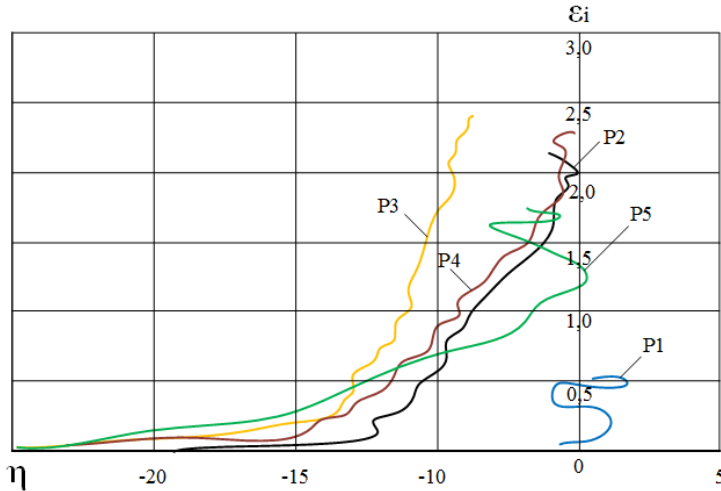


Рис. 7 – Шляхи деформування у різних точках осередку деформації при зворотного (1) і комбінованого прямого видавлюванні з роздачею

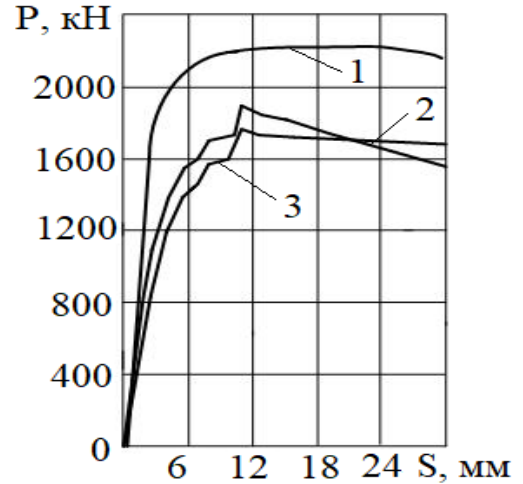


Рис. 8 – Порівняння сил зворотного (1) і комбінованого прямого видавлювання з роздачею (2, 3; $\beta = 35^\circ$)

У четвертому розділі на основі енергетичного балансу потужностей розглянуто схему послідовного поперечно-прямого видавлювання з роздачею та отримано чисельні залежності для розрахунку енергосилових характеристик в межах як складових модулів, так і для варіантів їх сукупності в одному процесі видавлювання порожнистої деталі (рис. 9). Модуль центрального радіального видавлювання 2 прийнятий аналогічним, що і для процесу комбінованого прямого видавлювання з роздачею. Для зони фланця 4 розглянуто можливість розрахунку тисків деформування за двома варіантами модулю: зона 4 має постійну висоту h або зона фланця має в перерізі клиновидну форму з кутом нахилу φ . Для другого варіанту обраний модуль трапецеїдальної форми з непаралельною течією металу, який поширений для дослідження процесів об'ємного деформування. Відмінність у тому, що для спрощення складних розрахункових виразів була прийнята лінеаризована формула для інтенсивності швидкості деформації. Тому сприяли і невеликі значення кутів φ (до 15°), при яких зсувні компоненти швидкості деформації були також незначні.

Для модуля 5 розвороту напрямку течії металу з поперечного на прямий обрано трикутний криволінійний модуль, форма якого добре відповідає межам ОД в зонах розвороту течії металу. Мінімізація величини приведенного тиску за параметром α_2 , дозволила встановити профіль модулю і його криволінійну

контактну границю. В результаті встановлена доцільність у виконанні профілю матриці відповідно залежності для даної границі.

Приведений тиск деформування в процесі послідовного видавлювання був встановлений як сума тисків складових модулів з урахуванням знаку зсувних деформацій на границях між модулями і відповідав залежності від параметрів процесу $\bar{p} = p / \sigma_s = f(\bar{R}_3, \bar{R}_4, \bar{h}, \bar{h}_3, \varphi, \alpha, \mu_s)$.

Залежність тиску видавлювання від h достатньо вагома, при зміні відносної висоти h з 0,8 до 0,2 тиск деформування зростає до 1,4 разів (рис. 10). Вплив зміни кута φ незначний, але з урахуванням витрат на тертя по двом поверхням фланця приріст тиску може бути великим, особливо для більших діаметрів фланців. Так, зростання відносного радіусу порожнини з 1,2 до 2,0 приведе до зростання тиску деформування модулю на 21–33 % навіть при низьких коефіцієнтах тертя.

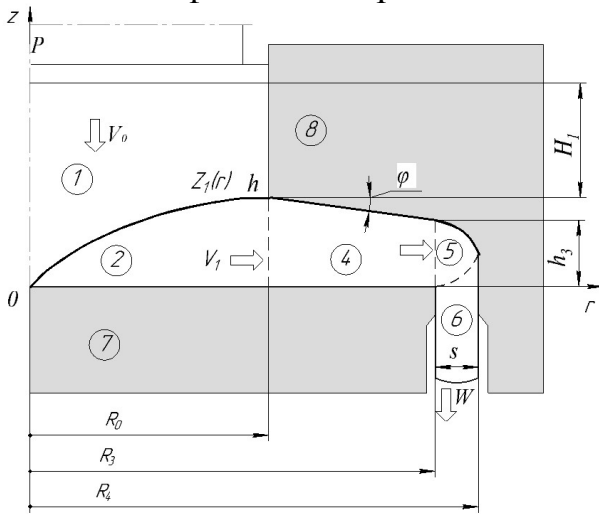


Рис. 9 – Схема поперечно-прямого видавлювання з роздачею

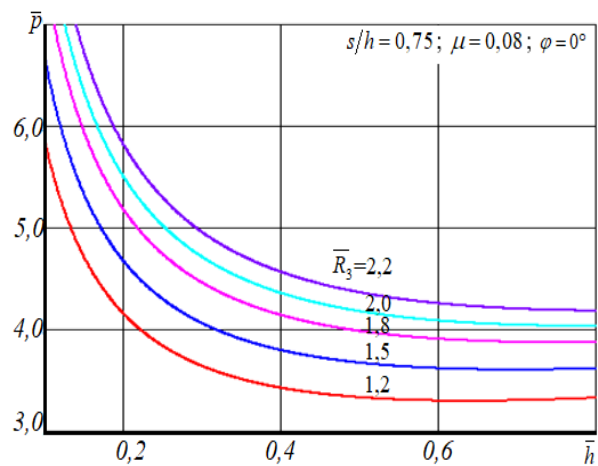


Рис. 10 – Графік залежності приведенного тиску видавлювання від відносної товщини фланця $\bar{h}$

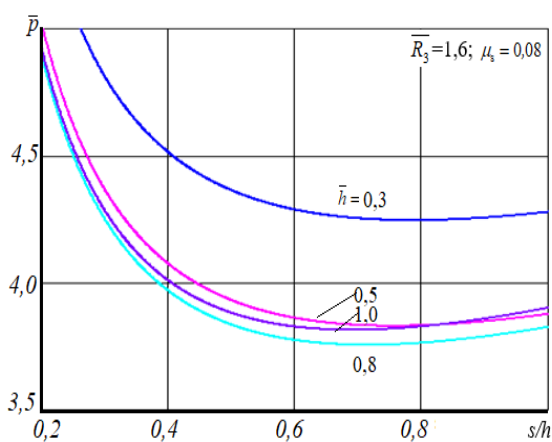


Рис. 11 – Графіки залежності приведенного тиску видавлювання від відносної товщини стінки

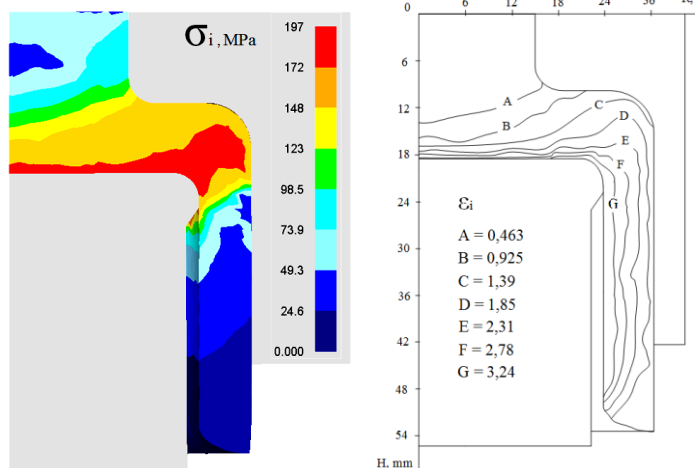


Рис. 12 – НДС порожнистої деталі при поперечно-прямої видавлюванні з роздачею

Помітно впливає на енергосилові параметри зменшення відносної товщини стінки стакану s/h , що видавлюється. Встановлено, що перехід на товщину 0,4 з товщини 0,8 дає зростання приведенного тиску до 10 % (рис. 11).

Моделювання МСЕ напружено-деформованого стану при послідовному поперечно-прямому видавлюванні виконано для заготовок з алюмінієвого сплаву АД1. Виявлено декілька зон з характерним розподілом показників НДС: осьова придонна сильно деформована зона; зона фланця (дна); зона розвороту металу в стінку і зона стінки стакану (рис. 12 і 13). Порівняння результатів оцінки деформованого стану, отриманих методами ділільних сіток і МСЕ, показало схожість характеру зростання і накоплення деформації при послідовному видавлюванні порожнистої деталі. У центральній частині деталі ОД має конічну форму. До найбільшої деформації схильні шари металу, що примикають до дна деталі. Більші значення інтенсивності деформації зосереджені в шарі матеріалу заготовки поблизу внутрішньої поверхні стакану, а менші – в шарі поблизу зовнішнього контуру. При видавлюванні деталей з перемінною товщиною стінки діаграма «Шлях–Сила» має характерні ступінчаті відрізки, які відповідають розмірам стінки деталі на даному етапі деформування (рис. 13, в).

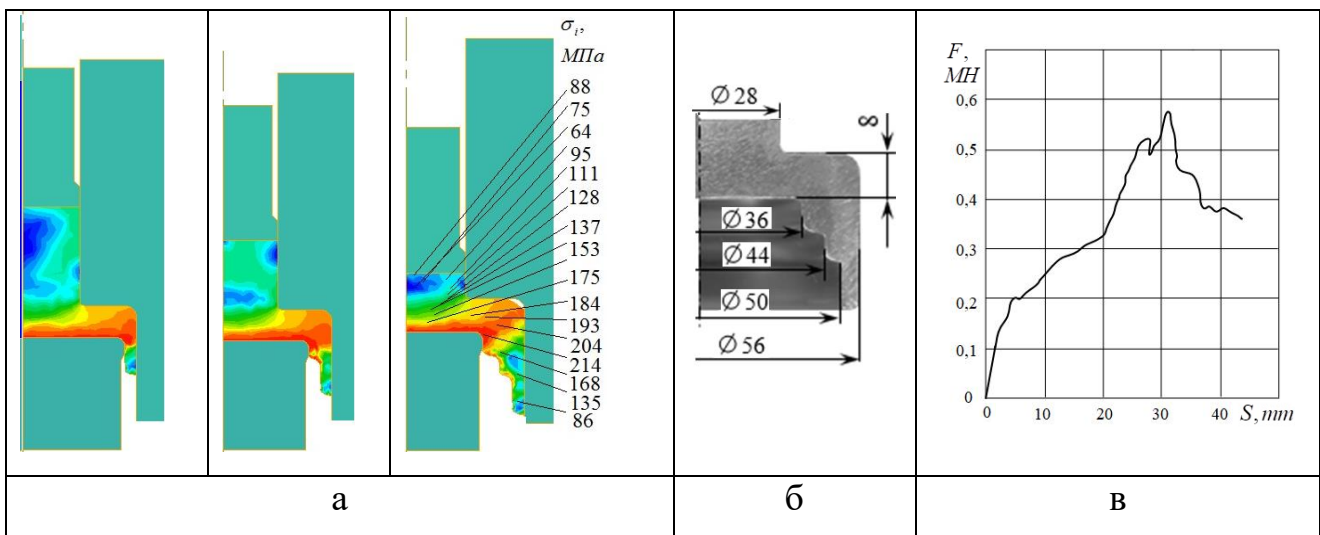


Рис. 13 – Розподіл інтенсивності напружень (а) при видавлюванні деталі з перемінною товщиною стінки (б) і діаграма «Шлях–Сила» (в)

Для оцінки показників напружено-деформованого стану заготовки в осередку деформації на послідовних стадіях процесу поперечно-прямого видавлювання були також обрані характерні точки в різних зонах по висоті осередку деформації в заготовці. Встановлено, що зростання відносної товщини фланцевої зони з 0,2 до 0,8 приводить до підвищення граничного ступеню деформації, оскільки показник напруженого стану η не досягає небезпечного значення +1,0.

Для експериментального дослідження способів комбінованого видавлювання були використані зразки діаметрами 15,2; 21,2; 28,2 і 40 мм. Варіювання товщини фланцевої зони (дна деталі) проводилося в межах

$h = 4..14$ мм і зовнішнього діаметру стаканів $D_4 = 28..56$ мм. Перевірка адекватності розроблених математичних моделей проводилась на основі порівняння силового режиму процесів комбінованого видавлювання. Відхилення результатів вимірювання сил видавлювання в порівнянні з теоретичними розрахунками (рис. 14, а, крива 2) склало 4%. У розділі наведено результати експериментальних досліджень формозміни і силового режиму деформування порожнистих деталей типу гільз і стаканів різних конфігурацій (рис. 14, б). Встановлено можливості комбінування схем послідовного і суміщеного видавлювання в одному процесі, що забезпечує розширення номенклатури за рахунок отримання складних порожнистих виробів типу стакану з фланцем в придонній частині.

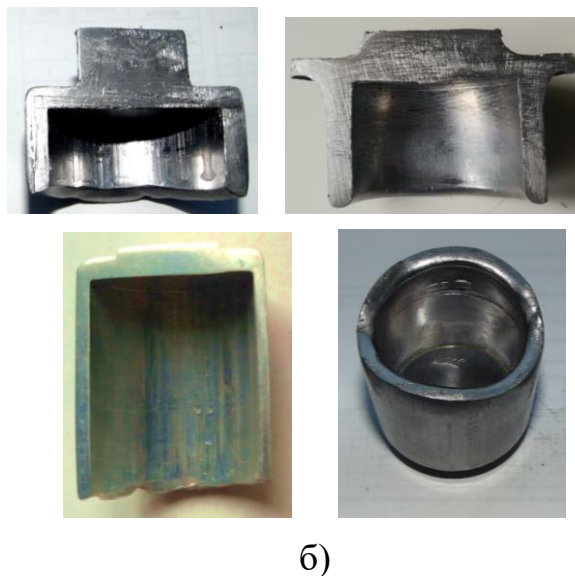
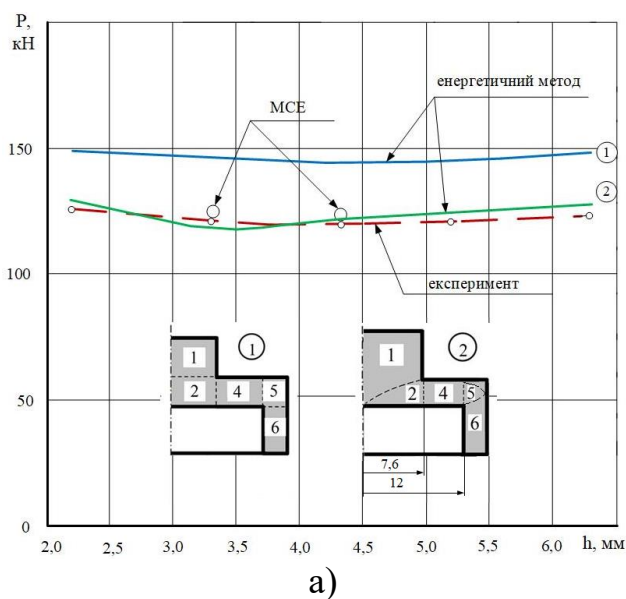


Рис. 14 – Порівняння сил деформування (а) і деталі, виготовлені послідовним комбінованим видавлюванням (б)

У п'ятому розділі на основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблена методика проектування технологічного процесу послідовного комбінованого поперечно-поздовжнього видавлювання. Розроблено рекомендації щодо призначення технологічних параметрів, вибору схем штампування порожнистих деталей різної конфігурації на основі використання способів комбінованого видавлювання і програмного забезпечення для розрахунку режимів комбінованого видавлювання. Запропоновано спосіб видавлювання, що дозволяє усунути дефект типу утягнення в корпусі порожнистої деталі за рахунок комбінування впливу на течію металу. На спосіб отримано патент України.

Запропоновані маршрутні технології послідовного комбінованого поперечно-поздовжнього видавлювання і конструкції штампного оснащення для здійснення комбінованого прямого з роздачею та поперечно-прямого видавлювання порожнистих деталей типу гільз і стаканів. Розроблені і передані для промислового освоєння технологічні рекомендації з проектування процесів і оснащення для виготовлення деталей на ПрАТ НКМЗ і ПрАТ ДЗМВ. Результати досліджень використовуються в навчальному процесі в проектних роботах студентів спеціальності «Металургія».

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічних завдань з розширення можливостей і підвищення ефективності точного об'ємного штампування за рахунок застосування способів послідовного комбінованого видавлювання і зменшення енергосилових параметрів, забезпечення якості і розширення номенклатури виробів, що штампуються.

1. Аналіз стану питання дослідження і застосування у виробництві процесів отримання порожнистих деталей показав перспективність технологій ТОШ, при цьому процеси за комбінованими схемами видавлювання можуть дозволити отримання виробів більш складного профілю і типорозміру за один технологічний перехід із меншими енерговитратами. Обмеженням щодо їх впровадження у виробництво є недостатня вивченість технологічних режимів деформування, особливо щодо способів послідовного комбінованого видавлювання з роздачею.

2. Отримано на основі енергетичного методу верхньої оцінки (балансу потужностей) залежності енергосилових параметрів для плоскої і осесиметричної задач послідовного прямого видавлювання з роздачею із застосуванням як прямолінійних, так і криволінійних модулів і встановлено, що застосування пропонованого трикутного криволінійного модулю дозволяє за рахунок зниження величин розриву швидкостей на межах модулів суттєво (до 22 %) знизити верхню оцінку силових параметрів у порівнянні з модулями з виключно радіальною течією і прямокутною формою і більш точно оцінити поетапне навантаження при комбінованому видавлюванні.

3. Отримали подальший розвиток на основі енергетичного методу моделі штампування порожнистих деталей при послідовному поперечно-поздовжньому видавлюванні з урахуванням впливу схем деформування та умов тертя, що дозволило підвищити точність прогнозування зусиль формоутворення деталей і прогнозувати граничні можливості з точки зору навантаження на інструмент. Виявлено, що основними факторами, які впливають на силовий режим процесів є відносні розміри дна, стінки і порожнини деталі. Збільшення відносного (до радіусу заготовки) радіусу порожнини веде до зросту приведенного тиску до 33 %, а зміна відносної товщини стінки стакану s/h з 0,8 до 0,4 збільшує тиск деформування на 10 %.

4. Розроблені розрахункові залежності для технологічних режимів деформування відносно складних порожнистих деталей з конічними донами (фланцевими ділянками), в яких враховано вплив проміжного модулю для фланцевої зони перемінної висоти і що дає можливість підвищити точність визначення силових параметрів при комбінованому видавлюванні. Відхилення цих параметрів від експериментальних даних складає у середньому 4%. Зміна відносної висоти порожнини під фланцеву зону (товщині дна) від 0.2 до 0.8, при інших рівних параметрах деталі, призводить до зменшення приведенного тиску на 22–30 %; при $\mu = 0.08$ і до 40% при $\mu = 0.20$. Встановлено, що контактне тертя значно впливає на силовий режим процесу, особливо при кутах нахилу поверхні фланцевої зони (дна стакану) вище 5° .

5. Методом скінченних елементів для осесиметричного деформування встановлено залежності для визначення поетапної зміни сил, розмірів напівфабрикату з врахуванням впливу геометричних параметрів інструмента, умов тертя та схем видавлювання, які дозволили прогнозувати можливість отримання порожнистих деталей із заданими параметрами альтернативними способами прямого і поперечно-прямого видавлювання з роздачею. Показано, що в порівнянні зі зворотним видавлюванням деталей тих же розмірів, пряме видавлювання з роздачею потребує зусилля, меншого до 30%. Спостерігається зменшення сил при зростанні величині кута матриці, оскільки знижується ступень обтиснення металу на зоні розвороту. Сили на верхньому рухомому контрпуансоні і нижньому пуансонах відрізняються, при цьому зі зростанням кута сили на пуансоні поступово перевищують. Рациональне значення кута нахилу матриці при плоскій і осесиметричній деформації встановлюється з однакових правил і відповідає рівності площ входу і виходу з модулю, що розглядається.

6. Моделюванням МСЕ напружено-деформованого стану заготовки на етапах прямого і поперечно-прямого видавлювання встановлено немонотонний характер зміни компонентів напруженого стану в осередку деформування. На основі результатів поетапного аналізу побудовані шляхи деформування і виявлені небезпечні жорсткі зони з додатними показниками напруженого стану, що дає змогу визначити граничні ступені деформації і технологічні можливості способу. Оцінка витрати ресурсу пластичності показала, що при досягненні в процесі деформування у фланцевої зоні значення граничного ступеня деформації $\epsilon_{\max} = 09$ виникає небезпека руйнування напівфабрикату як на периферії зони, так і в зоні розвороту.

7. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень силових режимів і напружено-деформованого стану заготовок встановлені закономірності навантаження деформувальних і формоутворюючих інструментів і відхилення формі порожнистих деталей при штампуванні способами послідовного комбінованого видавлювання. Підтверджена можливість виготовлення деталей з перемінною товщиною стінки, а також можливості комбінування схем послідовного і суміщеного видавлювання в одному процесі, що забезпечує розширення номенклатури за рахунок отримання складних порожнистих виробів типу стакану з фланцем в придонній частині. Пропоновано спосіб усунення дефекту типу утягнення у складнопрофільованих порожнистих деталях.

8. Розроблені рекомендації для проектування процесів і штамів комбінованого прямого і поперечно-прямого видавлювання з роздачею забезпечують зниження витрат і часу на технологічну підготовку виробництва, а нові технології штампування порожнистих деталей – підвищення ефективності виробництва. Методичні матеріали, рекомендації з розрахунку і проектування процесів і оснащення штампування порожнистих деталей передані для освоєння на промислові підприємства. Результати досліджень і відповідні програми використовуються студентами спеціальності «Металургія-ОМТ» при виконанні проектних та практичних робіт.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Aliieva L., Aliiev I., Kartamyshev D. Combined radial - forward extrusion of hollow parts like cups, *XVIII International scientific conference*. Czestochowa: Czestochowa university. 2017. Monografie. Nr 68, pp. 108-114.
2. Алиева Л.И., Алиев И.С. Картамышев Д.А., Чучин О.В., Формоизменение в процессе комбинированного выдавливания полых деталей типа стакана. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА. 2017. 1 (44). С 100-107.
3. Kalyuzhnyi V. L., Alieva L. I., Kartamyshev D. A., Savchinskii I. G. Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts, *Metallurgist*. 2017. 61. 5-6, pp. 359-365. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>
4. Алиева Л. И., Картамышев Д. А., Махмудов К. Д. Комбинированное выдавливание-разделение деталей типа колец. *Вісник НТУ «ХПІ» : Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. 2017. 43 (1265). С. 10–17.
5. Алієва Л. І., Картамишев Д. О., Махмудов К. Д., Чучин О. В. Енергосилові параметри процесів холодного видавлювання порожнистих деталей. *Вісник НТУ «ХПІ» : Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. 2018. 30 (1306). С. 3–9.
6. Алиева Л. И., Картамышев Д. А., Грудкина Н. С., Чучин О. В. Технологические процессы изготовления полых деталей на основе способов комбинированного выдавливания. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА. 2018. 1 (46). С. 22-28.
7. Алиева Л. И., Алиев И. С., Картамышев Д. А., Донченко Е. И., Чучин О. В. Изготовление сложнопрофилированных деталей в процессе радиально-прямого выдавливания. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА. 2018. 2 (47). С. 83–89.
8. N. Hrudkina, L. Aliieva, O. Markov, D. Kartamyshev, S. Shevtsov, M. Kuznetsov. Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 3/1 (105), pp. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203989>
9. Алієва Л. І., Калюжний В. Л., Картамишев Д. О., Моїсєєва А. М., Сивак Р. І. Дослідження напружено-деформованого стану порожнистих виробів при комбінованому видавлюванні з роздачею. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА, 2019. 2 (49). С. 14–22.
10. Калюжний О. В., Калюжний В. Л., Картамишев Д. О. Холодне витягування з потоншенням сталевих порожнистих виробів. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА. 2020. 1 (50). С. 50-56.
11. Пат. 122023 Україна. В21 К21/08. Спосіб отримання порожнистих виробів з фланцем. Абхарі П.Б., Алієва Л.І., Таган Л.В., Картамишев Д.О. № u201706444; заявл. 23.06.2017; опубл. 26.12.2017. Бюл. №24.
12. Алиева Л. И., Чучин О. В., Картамышев Д. А. Формоизменение в процессе комбинированного выдавливания полых деталей типа стакана. *Матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія і інженерна освіта»*. 21–24 червня 2016 р. Одеса–Київ : НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». 2016. С. 97–100.

13. Алиева Л. И., Картамышев Д. А. Последовательное комбинированное радиально-прямое выдавливание полых деталей. *Материалы VIII МНТК «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии»*. 23-25 листопада 2016 р. Харків: НТУ «ХПІ». С. 8–11.

14. Алиева Л.И., Картамышев Д.А. Комбинированное радиально-прямое выдавливание полых деталей типа гильз. *Матеріали всеукраїнської НТК «Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки»*. 17–19 травня 2017 р. Вінниця: ВНТУ. 2017. С. 21-23.

15. Калюжный В. Л., Алиева Л. И., Картамышев Д. А., Махмудов К. Д. Влияние конструктивных параметров матрицы на холодное обратное выдавливание с раздачей пустотелых изделий. *Матеріали VI МНТК «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві»*. 25–28 вересня 2017 р. Краматорськ : ДДМА. 2017. С. 68-70.

16. Алиева Л. И., Калюжный В. Л., Махмудов К. Д., Картамышев Д. А. Напряжённо-деформированное состояние полых деталей при холодном выдавливании. *Матеріали IX МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії»*. 22–24 листопада 2017 р. Харків: ХПІ. 2017. С. 30-32.

17. Алиев И.С., Картамышев Д.А., Чучин О.В. Холодное выдавливание прецизионных полых деталей типа гильз. *Університетська наука–2017: тези доп. міжнар. науково–техн. конф.* Т.1. Маріуполь: ПДТУ. 2017. С. 189-190.

18. Алиева Л. И., Чучин О. В., Картамышев Д. О. Энергосиловые параметры процессов комбинированного выдавливания порожнистых деталей типу стакану. *Університетська наука–2018: тези доп. міжнар. науково–техн. конф.* Т.1. Маріуполь: ПДТУ. 2018. С. 130–131.

19. Картамышев Д.А. Исследование силовых параметров комбинированного выдавливания полых деталей типа «Стакан». *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. 31 жовтня – 02 листопада 2018 р.* Краматорськ: ДДМА. 2018. С. 70.

20. Алиева Л.И., Чучин О.В., Картамышев Д.О., Косарев В.С. Выдавливания с раздачей порожнистых деталей з фланцем. *Університетська наука–2019: тези доп. міжнар. науково–техн. конф.* Т.1. Маріуполь: ПДТУ. 2019. – С. 64–65.

21. Алиева Л.И., Картамышев Д.О. Комбіноване видавлювання деталей типу гільз. *Університетська наука–2020: тези доп. міжнар. науково–техн. конф.* Т.1. Маріуполь: ПДТУ. 2020. С. 79–80.

22. Картамышев Д.А., Алиева Л.И., Жбанков Я.Г., Малий К.В. Особенности формообразования сложнопрофилированных полых деталей в процессе последовательного радиально-прямого выдавливания. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2020»*. Херсон: ХНТУ. 2020. С. 116-120.

23. Алиева Л.И., Грудкіна Н.С., Абхари П.Б., Картамышев Д.О.. Конструювання штампів для холодного видавлювання порожнистых деталей з фланцями. *Матеріали XI МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці*

матеріалів тиском і якості фахової освіти». 5– 9 жовтня 2020 р. Київ: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». 2020. С. 422–424.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві:

[1, 2, 7, 20] – дослідження можливостей нових способів видавлювання; [3, 15] – аналіз напружено-деформованого стану процесу комбінованого видавлювання на основі комп'ютерного моделювання; [9, 13] – аналіз силових параметрів процесу послідовного видавлювання з роздачею; [4] – теоретичний аналіз силових параметрів процесу комбінованого видавлювання; [5] – розробка математичних моделей та графічний аналіз впливу параметрів процесу; [6] – отримання і аналіз кінематично можливих полів швидкостей; [8] – узагальнення результатів літературного огляду, аналіз і обробка отриманих залежностей; [9, 10, 16] – отримання і аналіз показників напруженого стану заготовок; [12, 14] – експериментальне дослідження силового режиму процесу послідовного видавлювання з роздачею; [21, 22] – експериментальне дослідження формоутворення в процесі холодного видавлювання; [11] – аналіз прототипів і описання заяви; [23] – розробка принципових схем штампів для холодного видавлювання.

АНОТАЦІЯ

Картамишев Д.О. Удосконалення процесів формоутворення порожнистих деталей на основі способів послідовного комбінованого видавлювання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – «Процеси та машини обробки тиском». – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2021.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності процесів штампування порожнистих деталей на основі застосування способів послідовного комбінованого видавлювання з роздачею, а також розробки технологічних рекомендацій.

На основі енергетичного методу отримали подальший розвиток моделі визначення силового режиму деформування при послідовному видавлюванні з роздачею. Розроблено кінематичні модулі, відповідні формам осередків плоскої і осесиметричної деформації, і встановлено залежності режимів формоутворення порожнистих деталей, з урахуванням впливу контактної тертя, схем деформування і геометричних параметрів процесу. Дослідження МСЕ дозволили визначити закономірності впливу параметрів інструменту на характер формування і розвитку напружено-деформованого стану заготовки, встановити зони зі зниженою деформовністю. Результати теоретичного аналізу підтверджені експериментальними дослідженнями. На основі результатів досліджень запропоновано технологічні рекомендації для проектування процесів видавлювання.

Ключові слова: точне об'ємне штампування, послідовне комбіноване видавлювання, порожнисті деталі, , формоутворення, приведений тиск, напружено-деформований стан, силовий режим, оснащення.

ABSTRACT

Kartamyshev D.O. Improvement of the forging forming processes with hollow parts based on the methods of sequential combined extrusion — Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the Candidate's degree of Technical Science, specialty 05.03.05 – Processes and Machines of Plastic Working. Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk. 2021.

The dissertation is devoted to increasing the efficiency of the forging processes with hollow parts based on the use of methods in sequential combined extrusion with expansion, as well as the development of recommendations for the design of precision forging technologies.

Based on the energy method of the upper bound the models for determining the power mode in the processes of sequential transverse-forward and forward extrusions with expansion are further developed. The kinematic modules, corresponding to the forms of deformation centers have been developed and the dependences of the modes of forming hollow parts on the conditions of contact friction, deformation patterns and geometric parameters of the process have been established. The finite element method is used to determine the regularities of the influence with tool parameters on the nature of the formation and development of the stress-strain state in the billets, zones with reduced deformability were established, which made it possible to develop recommendations for reducing power parameters and increasing the uniformity of parts processing.

The results of theoretical analysis are confirmed by experimental investigations. New methods of extrusion with hollow parts have been tested, which improve the quality of parts and expand their range. Based on the research results, technological recommendations and designs of dies for sequential combined extrusion in split and movable dies are proposed.

Key words: precision forging, hollow parts, sequential combined extrusion, shaping, relative pressure, stress-strain state, power mode, tool.

АННОТАЦИЯ

Картамышев Д. А. Совершенствование процессов формообразования полых деталей на основе способов последовательного комбинированного выдавливания. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – «Процессы и машины обработки давлением». – Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, 2021.

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

На основе проведенного литературного анализа определено, что процессы точной объемной штамповки являются резервом экономии

энергетических, материальных и трудовых ресурсов. Анализ существующих схем штамповки полых деталей показал, что основные ограничения процессов штамповки связаны с предельными нагрузками на инструмент, потерей устойчивости тяжело нагруженного инструмента и возникновением отклонений формы штампуемых деталей в виде несоосности и утяжин.

На основе энергетического метода верхней оценки получили дальнейшее развитие модели определения силового режима деформирования при последовательном поперечно-прямом и прямом выдавливании с раздачей. Разработаны кинематические модули, соответствующие формам очагов деформации и установлены зависимости режимов формообразования полых деталей, позволяющие прогнозировать изменение энергосиловых показателей процесса в зависимости от схемы деформирования, геометрических параметров штампуемой детали и условий контактного трения.

В энергетических моделях поперечно-прямого выдавливания определены критерии минимизации в виде параметров, определяющих положение узловых точек треугольного модуля и кривизну линии разрыва скорости. Проанализировано влияние геометрических параметров детали и условий трения на параметры оптимизации. Установлено, что на свойства и результаты расчета по модулю влияют как форма модуля, так и подбор функций скоростей перемещения металла.

Исследование процессов выдавливания методом конечных элементов позволили определить закономерности влияния параметров инструмента на характер формирования и развития напряженно-деформированного состояния заготовки, установить зоны с неблагоприятными показателями напряженного состояния и с пониженной деформируемостью и дать рекомендации по снижению силовых параметров и повышению равномерности обработки деталей.

Результаты теоретического анализа подтверждены экспериментальными исследованиями. Апробированы новые способы выдавливания полых деталей, которые обеспечивают повышение качества полых деталей и расширение их номенклатуры.

Экспериментальные исследования показали правомерность использования разработанных расчетных схем, позволяющих качественно и количественно прогнозировать силовой режим и особенности формообразования полых деталей в процессе последовательного комбинированного выдавливания. По результатам исследования напряженно-деформированного состояния деталей по схемам поперечно-продольного выдавливания определены особенности проработки стенок полых деталей, влияющих на неоднородность механических свойств и исчерпание запаса пластичности.

На основе результатов исследований предложены технологические рекомендации и конструкции штампов для последовательного комбинированного выдавливания в разъемных и подвижных матрицах.

Ключевые слова: точная объемная штамповка, последовательное комбинированное выдавливание, полые детали, формообразование, приведенное давление, напряженно-деформированное состояние, силовой режим, оснастка.

Підп. до друку 16.03.2021. Формат 60 х 84/16. Ум. друк. арк. 1,1.
Обл.вид. арк. 0,9. Тираж 80 пр. Зам. № 30.

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