

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія

**ГРУДКІНА НАТАЛІЯ СЕРГІЇВНА**



УДК 621.777.4: 621.7.01

**РОЗВИТОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
РЕЖИМІВ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТОЧНОГО ОБ'ЄМНОГО  
ШТАМПУВАННЯ ВИДАВЛЮВАННЯМ**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Краматорськ – 2021

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий консультант:** 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  
**Бейгельзімер Яків Юхимович,**  
Донецький фізико-технічний інститут  
ім. О.О.Галкіна НАН України (м. Київ), головний  
науковий співробітник;

доктор технічних наук, професор  
**Калюжний Володимир Леонідович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», професор кафедри технології  
виробництва літальних апаратів;

доктор технічних наук, доцент  
**Сивак Роман Іванович,**  
Вінницький національний аграрний університет,  
доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та  
охорони праці.

Захист відбудеться «13» травня 2021 р. об 11<sup>00</sup> 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 «12» квітня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 12.105.01



Ю. К. Доброносів

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** На сучасному етапі розвитку промисловість пред'являє високі вимоги до технологічних процесів, які повинні забезпечувати виробництво якісних виробів з високими експлуатаційними характеристиками, дотримання яких стає можливим перш за все за рахунок розробки та впровадження нових наукоємних і ресурсозберігаючих технологій. Різноманіття методів обробки металів тиском (ОМТ) робить першочерговою задачу вибору найбільш раціонального та економічно обумовленого з наявних. З огляду на це перспективним напрямком створення вискоєфективних технологій є застосування способів точного об'ємного штампування (ТОШ), які дозволяють отримувати напівфабрикати з формою, розмірами і якістю, які наближаються або відповідають готовим виробам, що значно зменшує або повністю виключає необхідність доопрацювання різанням.

Проектування технологій холодного видавлювання для отримання виробів із заданими властивостями пов'язане з вирішенням цілого комплексу завдань. Основними є визначення оптимальних технологічних параметрів і режимів обробки та умов сталого протікання процесів пластичного формозмінення, прогнозування формоутворення деталі, що є особливо важливим етапом оцінки можливостей застосування комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу, яке протікає в оптимальному саморегульованому режимі. Також необхідним є визначення навантажень на деформувальний і формоутворювальний інструменти, оптимальної форми і стійкості інструменту, оцінка напружено-деформованого стану (НДС) та прогнозування можливості дефектоутворення і т.д. Незважаючи на високу ефективність, приклади освоєння способів комбінованого видавлювання послідовного або суміщеного з наявністю декількох ступенів свободи течії металу обмежені як колом досліджуваних процесів, так і діапазоном технологічних факторів. Приклади успішного вирішення конкретних практичних завдань з дослідження широкого кола процесів нерозривно пов'язані із розвитком та постійним удосконаленням енергетичних методів та скінченно-елементного моделювання. Особливо актуальним з огляду на можливості удосконалення штампового оснащення є питання визначення впливу конструктивних особливостей конфігурації інструменту на силовий режим, НДС та формоутворення деталі. Однак в даний час недостатньо науково обґрунтованих рекомендацій з проектування технологічних режимів, визначення оптимальної форми інструментів та оцінки технологічних можливостей способів комбінованого видавлювання з точки зору ефективного керування формоутворенням деталей.

Розв'язок окреслених проблем пов'язаний в першу чергу з розвитком ефективних теоретичних методів досліджень процесів комбінованого холодного видавлювання, основним з яких є метод балансу потужностей. Створення повноцінних і точних математичних моделей прогнозування формоутворення з урахуванням особливостей конфігурації інструменту та особливостей характеру течії металу сприятиме розробці на їх основі ефективних методів проектування процесів об'ємного деформування.

Зважаючи на вищевикладене, науково-прикладна проблема вдосконалення і розвитку методів проектування технологічних процесів точного об'ємного штампування на базі розвитку наукових основ енергетичного методу балансу потужностей, є **актуальною**.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Результати роботи спрямовані на вирішення завдань, поставлених у Програмі науково-технічного розвитку Донецької області на період до 2020 року. Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку «Розвиток ресурсозберігаючих процесів обробки тиском на основі створення нових технологічних способів і методик аналізу закономірностей пластичного деформування» наукової школи «Обробка металів тиском» Донбаської державної машинобудівної академії. Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР) за планами Міністерства освіти і науки України та виконаних на кафедрі ОМТ ДДМА (№ держреєстрації 0115U003123, 0115U004736, 0117U001164, 0119U000242), де авторка була виконавцем, та виконаних на кафедрі КДіМППМ ДДМА (№ держреєстрації 0120U101973), де авторка є відповідальним виконавцем, а також в рамках спільних науково-дослідних робіт з рядом підприємств.

**Мета дисертаційної роботи і задачі дослідження:**

Мета роботи полягає в підвищенні ефективності процесів точного об'ємного штампування на основі розвитку наукових основ енергетичних методів аналізу і розробки методики проектування технологічних процесів і оснащення.

Для досягнення зазначеної мети поставлені і розв'язані задачі:

- проведення аналізу проблем, тенденцій розвитку нових та резервних можливостей відомих технологій точного об'ємного штампування (ТОШ);

- розвиток методу кінематичних модулів (МКМ) для моделювання процесів комбінованого об'ємного деформування на основі розробки нових та розширення можливостей відомих кінематичних модулів складної конфігурації;

- виявлення властивостей кінематичних модулів складної форми та обмежень для їх використання із урахуванням їх розташування в осередку деформації та особливостей НДС формування осередку деформацій із подальшою розробкою рекомендацій щодо раціональності їх використання;

- розвиток методів розрахунку та проектування способів ТОШ видавлюванням, що включають теоретично і експериментально обґрунтовані залежності і комп'ютерні моделі для визначення енергосилових параметрів, прогнозування поетапного та граничного формоутворення, в тому числі з можливим дефектоутворенням;

- вивчення закономірностей формоутворення і технологічних можливостей процесів холодного видавлювання, розширення сфери їх застосування шляхом розробки нових рішень, які враховують конструктивні особливості інструменту у вигляді складних елементів перехідних ділянок;

- удосконалення способів ТОШ видавлюванням складнопрофільованих деталей, розробка нових технологічних способів, технічних рішень і технологічних процесів, що забезпечують розширення можливостей та підвищення якості деталей із зниженням матеріальних і енергетичних витрат;

- удосконалення методів проектування процесів точного об'ємного штампування видавлюванням на основі розроблених розрахункових моделей із можливістю оперативної вбудовуваності кінематичних модулів

- підготовка результатів теоретичних і конструкторсько-технологічних розробок до практичного застосування. Розробка рекомендацій з проектування і впровадження результатів проведених досліджень на виробництві.

**Об'єкт дослідження.** Технологічні процеси і оснащення точного об'ємного штампування видавлюванням.

**Предмет дослідження.** Методи енергетичного аналізу технологічних режимів, розрахунку і оцінки можливостей процесів точного об'ємного штампування видавлюванням на основі врахування схем течії і параметрів інструменту.

**Методи дослідження.** Для досліджень використано комплексний метод, який включає проведення наставних експериментів і моделювання на їх основі процесів об'ємного деформування з експериментальною перевіркою запропонованих рішень.

Теоретичні дослідження силового і деформаційного режимів процесів видавлювання проведені з використанням енергетичних методів і методу скінченних елементів (МСЕ), експериментальні дослідження виконано методом фізичного моделювання. Механічні властивості визначені випробуванням зразків стандартними методами, експериментальні дослідження проводились з використанням методів тензометрії та ділильних сіток. Для оцінки умов контактної тертя використані спеціальні пристрої для вимірювання сил тертя безпосередньо в процесі холодного об'ємного деформування. Для оцінки точності отриманих результатів експериментальних досліджень використовувалися методи статистичної обробки дослідних даних.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. *Вперше* на основі енергетичного методу балансу потужностей із застосуванням кінематичних модулів складної конфігурації розроблено комплекс математичних моделей процесів видавлювання, використання яких *дозволяє* встановити енергосилові режими та визначити оптимальну конфігурацію інструменту із наявністю конструктивних особливостей у вигляді складних елементів перехідних ділянок, в тому числі із заокругленням.

2. *Отримав подальший розвиток* метод кінематичних модулів для математичного моделювання на основі енергетичного методу балансу потужностей, який відрізняється розширенням можливостей відомих та розробкою кінематичних модулів нових конфігурацій із наявністю похилих меж різної форми, встановленням та використанням їх властивостей, що *дає можливість* проведення оперативного аналізу силового режиму деформування і постадійного формоутворення деталей в процесах комбінованого послідовного та суміщеного видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу.

3. *Отримали розвиток* методи та прийоми спрощення оцінки приведенного тиску деформування кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми із криволінійними межами, *завдяки* чому вдалося отримати вираз потужності сил деформування в аналітичному вигляді, що *дає можливість* проводити подальшу оптимізацію силового режиму з прогнозуванням формозмінення напівфабрикату.

4. *Вперше* в рамках використання енергетичного методу балансу потужностей обґрунтовано можливість використання швидкості течії металу у поздовжньому напрямку у якості варіюємого кінематичного параметру для осьового трапецеїдального модуля виключно за умови наявності додатної радіальної складової швидкості суміжних модулів, що *дозволило* отримати дані щодо прогнозування силового режиму та приростів напівфабрикату у вигляді інженерних формул.

5. *Отримали розвиток* уявлення на основі використання даних НДС та викривлення ділильних сіток про особливості формування осередку деформації в осьовій зоні розвороту до радіальної течії металу, *суть новизни яких полягає* у встановленні

оптимальної форми у вигляді комплексу прямокутного та трапецеїдального кінематичних модулів з криволінійною межею розділу течії металу всередині заготовки, що *сприяло зниженню* прогнозованої оцінки силового режиму в процесах з наявністю радіальної складової течії металу.

6. *Отримали розвиток* уявлення про особливості вбудовуваності розроблених та узагальнення існуючих кінематичних модулів складної конфігурації та їх комплексів, *суть новизни яких полягає* у встановленні обмежень щодо раціональності їх використання у розрахункових схемах із урахуванням особливостей формування різних осередків деформації та конфігурації суміжних модулів, що *забезпечило підвищення* оперативності енергетичного методу балансу потужностей з визначення оптимального силового режиму та керування формоутворенням напівфабрикату.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Практичну цінність дисертаційної роботи складають наступні її основні результати:

- рекомендації з вибору кінематичних модулів складної конфігурації із виокремленням властивостей та особливостей використання, які дозволяють виділити перспективні напрямки розробки нових кінематичних модулів з криволінійними межами, що сприятиме розширенню можливості енергетичного методу балансу потужностей (ЕМБП) для моделювання нових способів комбінованого видавлювання складних деталей в умовах додаткових впливів;

- методика розрахунків процесів комбінованого видавлювання та осадження, в тому числі із застосуванням кінематичних модулів з двома ступенями свободи течії, що дозволяють оперативно і повно досліджувати процеси деформування напівфабрикату із прогнозуванням силового режиму, формоутворення та дефектоутворення;

- удосконалення способів послідовного та суміщеного комбінованого видавлювання за рахунок визначення оптимальної форми інструменту із наявністю конструктивних особливостей у вигляді складних елементів перехідних ділянок в формі фасок і заокруглень та встановлення закономірностей формоутворення та дефектоутворення, що дозволяють підвищити ступінь керованості течією металу;

- методики проектування технологічних процесів та технічні рішення виготовлення складнопрофільованих деталей типу гільз, втулок і стаканів, що дозволяють знизити витрати на технологічну підготовку виробництва і процесів радіального і комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання порожнистих і суцільних деталей з фланцем, що сприяють розширенню можливостей процесів штампування за рахунок ускладнення конфігурації отримуваних деталей і виключення можливості дефектоутворення.

Методичні матеріали та рекомендації з проектування процесів і оснащення комбінованого видавлювання і штампування в роз'ємних матрицях передані для промислового освоєння на ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ, м. Краматорськ), ПАТ «Енергомашспецсталь» (ЕМСС, м. Краматорськ), ПАТ Дружківський завод металевих виробів» (ДЗМВ, м. Дружківка) і ТОВ «Завод рейкових скріплень» (ЗРС, м. Дніпро). Результати досліджень використовуються в навчальному процесі при викладанні курсів «Теорія процесів кування і штампування» і

«Холодне об'ємне штампування» та практичних, лабораторних і проектних робіт студентами та магістрами.

**Особистий внесок здобувачки** полягає в наступному: обґрунтування мети роботи, розробка основних ідей і методик досліджень, постановка і рішення задач дисертаційної роботи; розробка комплексу математичних моделей процесів комбінованого послідовного та суміщеного видавлювання на основі удосконалення існуючих та розробки нових кінематичних модулів складної форми; вдосконалення і застосування методики оцінки можливого дефектоутворення у вигляді утягнення і керування формоутворенням деталі; розробка технологічних рекомендацій і методик проектування процесів комбінованого видавлювання з урахуванням отриманої бази комплексів кінематичних модулів та розрахункових моделей; розробка способів і пристроїв об'ємного формоутворення. Авторка планувала і проводила експериментальні дослідження, обробку та аналіз отриманих результатів, а також брала участь у розробці технологій і оснащення для виготовлення деталей з номенклатури заводів і впровадженні результатів роботи у виробництво. Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві, відображено в анотації до списку опублікованих праць за темою дисертації.

**Апробація роботи.** Основні положення роботи, наукові та практичні результати доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК) всеукраїнських та регіональних науково-технічних (НТК) і науково-практичних конференціях (НПК), в тому числі: НТК «Енергомашспецсталь – 2007» (Краматорськ, 2007); VIII, XIII МНПК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ, 2010, 2015); НТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії», присвяченій 125-річчю НТУ «ХП» (Харків, 2010); IV НТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (Харків, 2012); V МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», присвяченій 115-річчю підготовки спеціалістів в області ОМТ (Київ, 2014); XVII МНТК «Досягнення і проблеми розвитку технологій та машин обробки тиском», присвяченій 80-річчю ПАТ «НКМЗ» (м. Краматорськ, 2014); VII МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (Київ – Херсон, 2016); МНТК «Університетська наука-2019» (Маріуполь), ювілейній МНПК «Сучасні інновації в області науки, технологій інтеграції знань», присвяченій 60-річчю Рудненського індустріального інституту (м. Рудний, Казахстан, 2019); МНТК «Університетська наука-2020» (Маріуполь); VI МНПК «Сучасні технології промислового комплексу» (Херсон, 2020); XI МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», присвяченій 90-річчю кафедри ОМТ (Київ, 2020); XIX–XXIII МНТК «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (Краматорськ, 2016 – 2020) та на науковому семінарі при спеціалізованій раді Д.12.105.01 (ДДМА, 2020).

**Публікації.** Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 40 роботах, у тому числі 10 статей в міжнародних наукових журналах, які входять до бази даних Scopus та WoS, 14 у фахових та періодичних зарубіжних виданнях, в тому числі 7 з них одноосібні, 11 робіт опубліковано в матеріалах міжнародних конференцій, 2 роботи

опубліковано в галузевих збірниках, на нові технічні рішення отримані 3 патенти України на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, шести розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 485 сторінок машинописного тексту, з них 310 сторінок основного тексту, 184 рисунки і 20 таблиць, список використаних джерел з 302 найменувань на 35 сторінках, анотації і 7 додатків, що включають і список опублікованих праць за темою дисертації і перелік науково-технічних конференцій.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, приведена загальна характеристика, сформульована мета і завдання дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами і темами, виділені предмет та об'єкт дослідження, особистий внесок здобувача, наведені наукова новизна і практична цінність результатів роботи, їх апробація і практичне застосування.

У першому розділі розглянуті сучасні тенденції та шляхи розвитку технологій об'ємного пластичного деформування. Встановлено, що процеси холодного видавлювання, комбінованого послідовного та суміщеного з декількома ступенями свободи течії, завдяки техніко-економічним перевагам знаходять все більше застосування на виробництві.

Проведено аналіз стану теорії і технології точного об'ємного штампування (ТОШ) складнопрофільованих порожнистих та стрижневих деталей. Відзначено, що основні тенденції удосконалення процесів холодного видавлювання знаходяться у площині пошуку резервних можливостей деформування за базовими схемами та розвитку процесів на основі їхнього поєднання із додаванням ступенів свободи течії металу. Розробка та застосування нових способів послідовного та суміщеного радіально-поздовжнього видавлювання для виготовлення деталей зі складним профілем покладає основу для інтенсифікації процесів об'ємного штампування за рахунок скорочення кількості технологічних переходів та зниження енергетичних витрат. Проведено аналіз основних здобутків вітчизняних та закордонних авторів з розвитку теоретичних методів, скінчено-елементного аналізу та експериментальних досліджень процесів ТОШ видавлюванням.

Напрямки удосконалення відомих та розробка нових методів розрахунків процесів холодного видавлювання стосуються розширення можливостей з отримання кількісних співвідношень, що забезпечать отримання оцінки впливу різних технологічних параметрів на характеристики процесу деформування. Це, в свою чергу, сприятиме створенню програмних модулів та комплексів, розроблених на базі математичних моделей досліджуваних процесів.

Встановлено, що інтенсифікації освоєння процесів об'ємного пластичного формоутворення за новими технологічними схемами сприятиме створення математичних розрахункових моделей із визначення енергосилового режиму та поетапної формозміни із виокремленням основних факторів керування формоутворенням та можливостями зниження силових параметрів. Це особливо важливе для процесів комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу та з огляду на можливості варіації конструктивних особливостей



інструменту у вигляді різної форми кромки, фаски та наявності заокруглень. Практична цінність результатів оцінки силового режиму деформування та можливості прогнозування формоутворення та дефектоутворення в процесах холодного видавлювання, отриманих ЕМБП, ґрунтується на можливостях постійного розвитку методу за рахунок розробки прийомів спрощення розрахунків та розширення можливостей із оперативного врахування особливостей конфігурації інструменту та керування процесом. Це сприятиме вирішенню поставленої науково-технічної проблеми підвищення ефективності процесів ТОШ видавлюванням саме за рахунок розширення можливостей використання ЕМБП та розвитку методів проектування, що в свою чергу сприятиме створенню та застосуванню нових способів комбінованого видавлювання зі складною кінематикою.

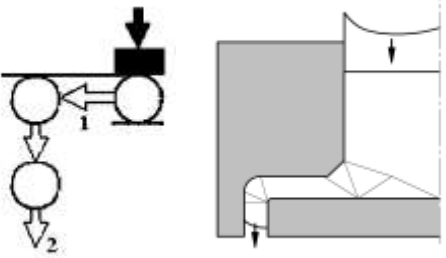
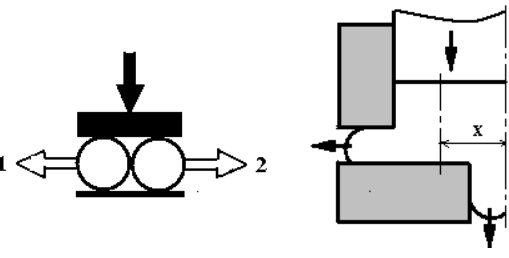
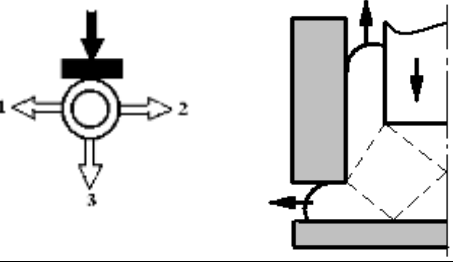
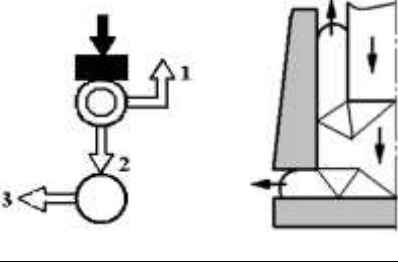
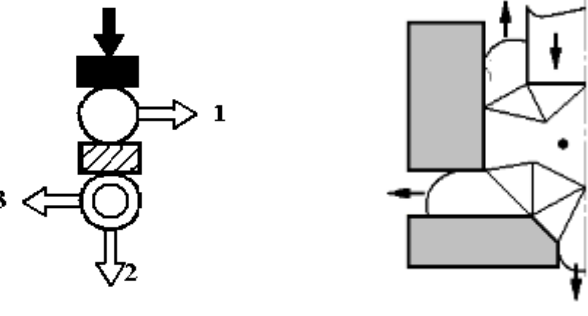
На основі проведеного аналізу сформульовані мета роботи і завдання дослідження.

У другому розділі обґрунтовано вибір напрямків досліджень і прийнятих методів і методик теоретичного і експериментального дослідження, скінченно-елементного моделювання процесів холодного видавлювання.

У якості основного методу теоретичних досліджень процесів комбінованого суміщеного та послідовного радіально-поздовжнього видавлювання обраний ЕМБП. Застосування методу кінематичних модулів (МКМ) дозволяє розглядати побудовану розрахункову схему досліджуваного процесу у якості комплексу окремих уніфікованих елементів, розрахунки яких відомі. Для кінематичних модулів найпростішої прямокутної форми із паралельною течією металу на даний час відомі всі складові приведенного тиску деформування. Розширенню можливостей МКМ сприяла розробка кінематичних модулів складної форми, основними з яких є трапецеїдальні та трикутні. Однак їх використання пов'язане із наявністю більш складного кінематично можливого поля швидкостей (КМПШ), що значно ускладнює подальші розрахунки. Вирішення цієї проблеми вимагає перш за все уваги до розробки прийомів спрощення при визначенні інтенсивності швидкостей деформації та обов'язкового аналізу раціональності та правомірності їх використання. Окремо зосереджено увагу на особливості застосування МКМ для моделювання процесів комбінованого видавлювання згідно із класифікацією за основними осередками деформації (ОД) (таблиця 1). Запропонований поділ є корисним з точки зору подальшого використання відомих та напрямків пошуку нових кінематичних модулів із виробленням рекомендацій при побудові розрахункової схеми процесу. Найбільшою простотою відрізняються процеси комбінованого видавлювання першої групи із одним ступенем свободи течії металу, де фактично проходить послідовне додавання суміжних кінематичних модулів із урахуванням повної складової потужності сил зрізу на межі контакту. Для другої групи із наявністю різноспрямованих потоків металу, що зароджуються в одному об'єднаному ОД, характерною є необхідність використання кінематичних модулів із двома ступенями свободи течії із подальшою оптимізацією за кінематичним параметром у вигляді швидкості течії металу у поздовжньому напрямку. Для процесів третьої групи основним завданням стає пошук положення границі межування двох суміжних ОД із одним ступенем свободи течії металу. При аналізі процесів четвертої групи

враховують течію металу через проміжну жорстку зону між автономними ОД та виконання додаткової умови у вигляді рівноваги потужностей, що діють з обох боків від поверхні, що розділяє два самостійних ОД. Для процесів комбінованого видавлювання із комбінованим ОД із поєднанням фактично ОД перших чотирьох груп процедура розрахунків є більш складною.

Таблиця 1 – Різновиди пластичних ОД та відповідних розрахункових схем при комбінованому видавлюванні

Умовна схема	Схема видавлювання
<p data-bbox="347 600 596 633">1. Послідовний</p> 	<p data-bbox="954 600 1187 633">3. Приєднаний</p> 
<p data-bbox="357 996 587 1030">2. Об'єднаний</p> 	<p data-bbox="954 996 1187 1030">4. Транзитний</p> 
<p data-bbox="660 1335 932 1368">5. Комбінований</p> 	

Використання більш складних кінематичних модулів з наявністю похилих меж різної форми у математичних розрахункових моделях ЕМБП дозволить точніше описати реальну форму контактних поверхонь інструменту та поверхні розділу течії матеріалу всередині заготовки при розрахунку енергосилових параметрів процесу та прогнозуванні формоутворення в процесі деформування. При цьому використання МКМ за наявності даних щодо властивостей кінематичних модулів та рекомендацій щодо їх вбудовуваності з огляду на відповідний ОД дозволить оперативно реагувати на

всі зміни в розрахунковій схемі, пов'язаній з урахуванням зміни конфігурації деталі або інструменту. Однак на даний час відсутні узагальнені характеристики та визначення властивостей відомих кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми, рекомендації щодо наявності їх можливих різновидів та подальшого використання мають зазвичай обмеженість досліджуваною розрахунковою схемою. Це в певному сенсі веде до труднощів у використанні розроблених кінематичних модулів складної конфігурації в розрахункових схемах нових процесів деформування.

Метод скінчених елементів необхідний для прогнозування особливостей формоутворення напівфабрикату в умовах неоднозначних пластичних течій, особливо при моделюванні процесів з декількома ступенями свободи течії металу та отримання інформації про НДС заготовки. Для дослідження деформованого стану заготовок обраний метод координатних сіток, який дозволяє вивчити закономірності формування характерних зон пластичної течії й розподілу ступеня деформації всередині заготовки.

Експерименти проведено із використанням універсально-переналагоджуваної установки, яка дозволяє здійснювати видавлювання в рухомих і роз'ємних матрицях за кінематичними схемами комбінованого видавлювання з вимірюванням сил деформування. На основі фізичного моделювання виконували порівняльний аналіз з теоретично отриманими результатами досліджень силового і деформаційного режимів та формоутворення з варіюванням геометричних і технологічних параметрів процесу пластичного деформування. Для вимірювання сил тертя безпосередньо в процесах видавлювання використано пристрої у вигляді пластотрибометрів, заснованих на способі радіального видавлювання.

**Третій розділ** присвячений розвитку методу кінематичних модулів стосовно узагальнення основних характеристик та властивостей, аналізу проблем застосування та прийомів їх вирішення, виокремленню напрямків подальшої розробки нових кінематичних модулів складної конфігурації.

Для розвитку МКМ в рамках використання ЕМБП були проаналізовані КМПШ відомих кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми (рис. 1) із визначенням їх можливих варіацій, властивостей на наявності обмежень. Особливу увагу було звернуто на наявність (чи відсутність) інверсії та зв'язку між потужностями сил зрізу (або тертя) на похилій межі із відповідними потужностями сил зрізу (тертя) на горизонтальній поверхні. Розглядалося окремо питання можливості узагальнення відомих КМПШ за рахунок визначення форми похилої межі в загальному вигляді, наявності виродження однієї форми в іншу, обмеження, що стосуються опису форм криволінійних похилих меж.

Для трапецеїдальних кінематичних модулів виокремлено випадки зі зміною та відсутністю зміни напрямків течії, відмінності в побудові КМПШ осьових та кільцевих кінематичних модулів. Аналіз можливих варіацій для кожного типу бази відомих кінематичних модулів продемонстровано на прикладі трапецеїдального кільцевого модуля (таблиця 2). Проведено узагальнення КМПШ з огляду на варіанти зміни течії від доцентрового до відцентрового та із урахуванням різної форми похилої межі, яке дозволяє оперативно вбудовувати даний кінематичний модуль в розрахункові схеми.

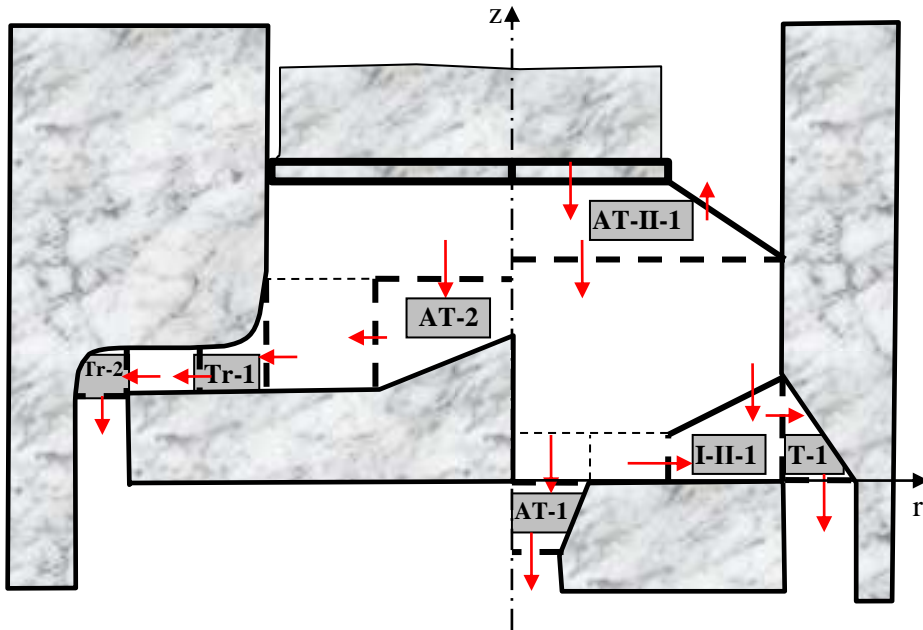


Рисунок 1 – Узагальнена схема комбінованого видавлювання

Таблиця 2 – Варіативність та КМПШ кінематичного трапецеїдального кільцевого модуля

		<p>КМПШ узагальненого трапецеїдального кінематичного модуля:</p> $\begin{cases} V_z = \frac{R_i h_i V_i}{r z^2(r)} z'(r) \cdot z, \\ V_r = \frac{R_i h_i V_i}{r z(r)}, \end{cases}$ <p>де <math>z_i(r)</math> – довільна крива, що проходить через точки <math>(R_i, h_i)</math> та <math>(R_{i+1}, h_{i+1})</math>.  індекс <math>i</math> відповідає поверхні входу у кінематичний модуль, індекс <math>(i+1)</math> – поверхні виходу</p>

Найпростішим варіантом задавання похилої межі є лінійна функція, для якої виокремлено властивість рівності потужності сил зрізу на поверхнях входу та виходу (для криволінійної межі ця властивість не справджується). У якості узагальненої лінійної межі використовуємо функцію вигляду:

$$z_1(r) = k(r - R_i) + h_i, \quad (1)$$

$$\text{де } z_1'(r) = \frac{h_{i+1} - h_i}{R_{i+1} - R_i} = k = \begin{cases} -\frac{1}{\operatorname{tg}\beta} < 0 & \text{для } I-1 \\ \frac{1}{\operatorname{tg}\beta} > 0 & \text{для } I-2 \end{cases}$$

Отриманий вираз інтенсивності швидкості деформації ускладнює отримання потужності сил деформування у аналітичному вигляді, тому необхідним є використання її верхньої оцінки у вигляді:

$$N_{\partial} = \sigma_s \cdot \sqrt{V_i \cdot \iiint_{V_i} \dot{\varepsilon}_i^2 dV_i}, \quad (2)$$

де  $\dot{\varepsilon}_i$  - інтенсивності швидкості деформації,  $V_i$  - об'єм області, обмеженої кінематичним модулем  $i$ .

Для випадку використання (1) отримаємо за співвідношенням (2) верхню оцінку потужності сил деформування у аналітичному вигляді:

$$N_{\partial} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \pi \sigma_s |V_i| R_i h_i \sqrt{\left( A \frac{R_{i+1}^2 - R_i^2}{2} + k \frac{R_{i+1}^3 - R_i^3}{3} \right)^2 \times \left( \frac{12 + k^2}{4A} \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_{i+1}^2} \right) + \frac{k^2(1+k^2)}{A} \left( \frac{1}{(A+kR_{i+1})^2} - \frac{1}{h_i^2} \right) + \frac{k(5k^2+24)}{2A^2} \left( \frac{1}{R_{i+1}} - \frac{1}{R_i} \right) + \frac{4k^2(2+k^2)}{A^2} \left( \frac{1}{A+kR_{i+1}} - \frac{1}{h_i} \right) + \frac{k^2(40+13k^2)}{2A^3} \left[ \ln \frac{R_{i+1}}{R_i} + \ln \left| \frac{h_i}{A+kR_{i+1}} \right| \right] \right)}, \quad (3)$$

де  $A = h_i - kR_i$ .

Потужності сил тертя на поверхні із інструментом та зрізу на поверхнях межування із суміжними кінематичними модулями труднощів не викликають, тому приведений тиск із урахуванням (3) теж можна отримати в аналітичному вигляді. Однак використання у якості похилих меж більш складних кривих для типів II-1 та II-2 значно ускладнює можливості в отриманні як потужності сил деформування, так і інших складових приведенного тиску деформування всередині кінематичного модуля. Виявлено, що у якості кривих узагальненого КМПШ можуть використовуватися криві, що задовольняють умові існування  $z'(r)$  та  $z''(r)$  при  $r \in [R_i, R_{i+1}]$  для II-1. При цьому використання функції, що відповідає чверті кола у вигляді  $z(r) = h_{i+1} + R - \sqrt{R^2 - (r - (R_i + R))^2}$  є неможливим для подальших розрахунків з огляду на невиконання вище описаної умови. Це значно звужує можливості використання даного кінематичного модуля для моделювання процесів холодного

видавлювання із складовою радіальною течією у фланцеву зону. Узагальнення кінематичного кільцевого модуля трапецеїдальної форми (таблиця 2, підтип I-1) можна досягти шляхом введення додаткової швидкості течії металу  $W$  у вертикальному напрямку (рис. 2, а). Використання верхньої оцінки вигляду (2) дозволяє отримати приведений тиск деформування у вигляді функції  $\bar{p}^* = \bar{p}^*(\bar{W})$  відносного кінематичного параметра  $\bar{W} = W/V_0$ , що відповідає за відносну швидкість витікання металу у вертикальному напрямку. Порівняльний аналіз чисельно отриманих значень приведенного тиску деформування  $\bar{p}$  та отриманих із використанням верхньої оцінки у вигляді  $\bar{p}^*$  вказує на правомірність та раціональність такої заміни (рис. 2, б).

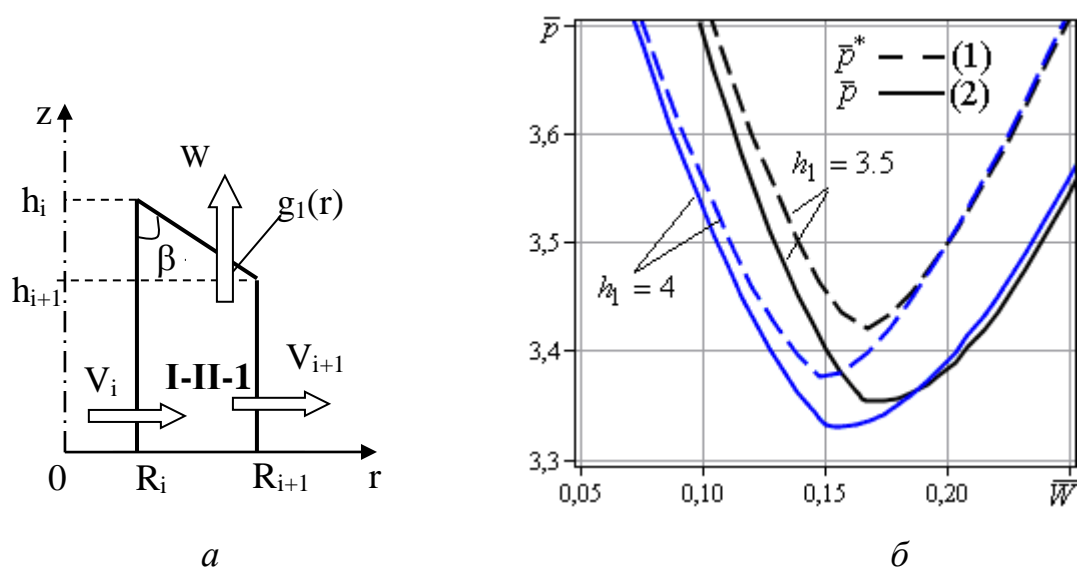


Рисунок 2 – Схема кінематичного модуля (а) та порівняльний аналіз залежності приведенного тиску деформування  $\bar{p}$  та верхньої оцінки  $\bar{p}^*$  від  $\bar{W}$  (б)

Відмінність оптимальних значень відносної швидкості витікання металу (точки мінімуму функції, рис. 2, б) у вертикальному напрямку для чисельних обчислень та наближеного значення складає 1–1,5 % і може вважатися несуттєвою. Перевищення величини приведенного тиску деформування може досягати 5 – 8%, але для величини повного приведенного тиску деформування із урахуванням всіх складових розрахункової схеми значно зменшується і складатиме не більше 1 – 3%. Таким чином, раціонально у подальшому рекомендувати верхню оцінку потужності сил деформування у формі (2). Також проаналізовано за аналогією властивості кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми за різними характеристиками. Аналізуючи кінематичні модулі трапецеїдальної форми з одним ступенем свободи течії металу, виділено окремо типи із радіальною течією (доцентровою або відцентровою), поздовжньою (вздовж осі симетрії OZ) та із зміною напрямку течії. Для кожного із заданих підтипів виділено особливості та напрямки подолання труднощів, основні з яких стосуються необхідності використання наближених оцінок потужності сил деформування, при цьому рекомендується використання верхньої оцінки вигляду (2).

Для осьового трапецеїдального кінематичного модуля із поздовжньою течією (рис. 1, модуль АТ-1) виявлено можливості отримання величини приведенного тиску деформування в аналітичному для випадку прямолінійної похилої межі, що значно спрощує подальші розрахунки та свідчить про перспективність використання даного кінематичного модуля. Узагальнення із додаванням додаткової швидкості течії у поздовжньому напрямку (рис. 1, модуль АТ-II-1) не впливає на властивості кінематичного модуля даної форми, але збільшує ступінь свободи течії. При цьому для осьового трапецеїдального кінематичного модуля АТ-II-1 продемонстровано прийом побудови кривої, яка визначає похилу межу згідно розв'язку відповідного диференціального рівняння  $T''(z)T(z) - 3[T'(z)]^2 = 0$ , що значно спрощує вираз інтенсивності швидкості деформації. Цей прийом може бути реалізований у разі задавання функції межі у вигляді  $T(z)$  та дозволяє отримати потужність сил деформування у аналітичному вигляді як функцію, яка лінійно залежить від кінематичних параметрів, що окреслює питання можливості використання оптимізації саме за швидкістю витікання металу у одному із напрямків. Зазначимо, що використання саме кінематичних модулів із двома вихідними швидкостями є необхідним при дослідженні процесів із об'єднаним, транзитним та комбінованим ОД. До найуживаніших кінематичних модулів складної форми відносять також модулі трикутної форми із наявністю двох похилих меж криволінійної форми або однієї похилої межі у формі прямої чи деякої кривої. Дані кінематичні модулі моделюють області із зміною напрямку течії із поздовжнього до радіального та мають один ступінь свободи течії. Для трикутних кінематичних модулів із двома похилими межами КМПШ є доволі нескладним, що дозволяє отримати приведений тиск деформування у вигляді аналітичної функції. Основна відмінність у порівнянні із трапецеїдальними кінематичними модулями полягає у визначеності форми кривих як функцій деякого параметра  $\alpha$ , при цьому використання прямолінійних меж або меж, що описуються іншими кривими, є неможливим у рамках використання даного КМПШ. Трикутні модулі із прямолінійною похилою межею (рис.1, модуль Т-1) є частинними випадками відповідних трапецеїдальних кільцевих кінематичних модулів із зміною напрямку течії з радіального на поздовжній.

Проведений аналіз дозволив систематизувати кінематичні модулі трикутної та трапецеїдальної форми за наступними ознаками:

1) форми кінематичного модуля: прямокутна (найпростіша), трапецеїдальна або трикутна із подальшим поділом згідно наявності прямолінійної або криволінійної межі (або меж) та їх кількості;

2) розташування кінематичного модуля (осьовий або неосьовий (кільцевий), внутрішній (повністю належить заготовці на початку процесу деформування) або зовнішній (заповнюється металом із плином процесу деформування та зазвичай враховує особливості конфігурації інструменту) та кількістю меж із суміжними кінематичними модулями та меж контакту заготовки та інструменту;

3) кількістю швидкостей на вході та виході із кінематичного модуля, що обумовлює і ступінь свободи течії металу через об'єм модуля (один чи більше);

4) наявність (або відсутність) швидкостей входу чи виходу через похилі (криволінійні) межі кінематичного модуля, що обумовлює наявність зміни

характеру течії металу від поздовжнього (прямого або зворотного) до радіального (доцентрового або відцентрового);

5) наявність (або відсутність) обмежень щодо форми кривої, що описує похилу межу з точки зору можливості розгляду її як сімейства функцій деякого варіюємого параметру або відсутність такої можливості;

6) наявність (або відсутність) обмежень щодо варіації конфігурації суміжних модулів, що може накладати обмеження у використанні даного кінематичного модуля;

7) наявність можливості випадків виродження даного кінематичного модуля у іншу форму або частинні випадки з меншим ступенем свободи течії металу.

Фрагмент властивостей та ознак для трикутних кінематичних модулів наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Систематизація кінематичних модулів трикутної форми

1	Трикутні	
		
2	Неосьовий внутрішній 1 вертикальна та 2 похилі межі із суміжними модулями	Неосьовий внутрішній 1 вертикальна та 1 горизонтальна межі із суміжними модулями 1 похила межа контакту з інструментом
3	Один ступінь свободи течії: 1 вхідна швидкість 1 вихідна швидкість	Один ступінь свободи течії: 1 вхідна швидкість 1 вихідна швидкість
4	Швидкість входу через похилу межу є Зміна напрямку течії є	Швидкостей входу (виходу) через похилу межу немає Зміна напрямку течії є
5	Варіативності форми немає Криві, що описують похилі межі, однозначно визначені	Варіативність форми кривої під питанням Найпростіший випадок похилої межі - пряма
6	Обмеження: жорсткий верхній модуль та мертва зона знизу	Обмежень щодо суміжних кінематичних модулів немає
7	-	Частинний випадок трапецеїдального кільцевого кінематичного модуля із зміною напрямку течії



Таким чином визначено напрямки розвитку ЕМБП з огляду на необхідність побудови нових кінематичних модулів складної форми, які дозволять моделювати течію металу зі зміною напрямків та враховуватимуть форму перехідних ділянок інструменту.

У четвертому розділі розроблено нові кінематичні модулі трапецеїдальної та трикутної форми, які дозволяють враховувати конструктивні особливості інструменту у вигляді заокруглень та фасок, та розширені можливості раніше відомих за рахунок ускладнення форми похилої межі. Для можливості врахування конусності оправлення протипуансону необхідною є розробка осового кінематичного трапецеїдального модуля типу АТ-2 (рис. 1, таблиця 4).

Таблиця 4 – Схема та КМПШ осового кінематичного модуля АТ-2

	<p>Узагальнене КМПШ:</p> $\begin{cases} V_z = -V_i + \frac{V_i(z_i - h_i)}{z_i(r) - h_i} \cdot \left(1 + \frac{z_i'(r)r}{2(h_i - z_i(r))}\right), \\ V_r = \frac{V_i r}{2(h_i - z_i(r))}, \end{cases}$ <p>де <math>z_i(r)</math> – довільна крива, що описує похилу межу та проходить через точки <math>(0, h)</math> та <math>(R_i, 0)</math>.</p>
--	---

Використовуючи в найпростішому випадку прямолінійну похилу межу розділу течії, отримуємо співвідношення:

$$z_1(r) = k_1(r - R_i), \quad k_1 = z_1'(r) = -\frac{h}{R_i}. \quad (4)$$

Вираз інтенсивності швидкостей деформації  $\dot{\varepsilon}_i$  для даного кінематичного модуля з урахуванням (4) приймає вигляд:

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{rV_i}{2\sqrt{3}(h_i - z_1(r))^2} \sqrt{(3(h_i - h) - 2k_1r)^2 + 3(h_i - h)^2 + \left(\frac{k_1(3(h_i - h) - k_1r)}{z_1(r) - h_i}\right)^2 (z - h_i)^2}. \quad (5)$$

Отриманий вираз (5) є досить громіздким. Для перевірки можливості використання формул лінеаризації в цьому випадку досить вирішити питання порівняльного аналізу функцій в межах даного кінематичного модуля за умови  $h < 2R_i / \sqrt{3}$ :

$$\sqrt{3}\dot{\varepsilon}_i = \begin{cases} |\xi| + 0,4 \cdot |\dot{\gamma}_{rz}|, & |\xi| > |\dot{\gamma}_{rz}|, \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{де } \sqrt{3}\xi = -\frac{V_i}{2(z_1(r) - h_i)^3} \left(3(h_i - h) + \frac{2h}{R_i}r\right) \text{ за умови } (\dot{\varepsilon}_r - \dot{\varepsilon}_\theta) \cdot (\dot{\varepsilon}_r - \dot{\varepsilon}_z) < 0.$$

Отримано верхню оцінку потужності сил деформування на основі лінеаризації:

$$N_{d1} = \frac{2\pi\sigma_S V_i}{3} (2 - 0.1\sqrt{3}k_1) \left[ \frac{R_i(3R_i k_1 + 2h_i)}{2k_1} + AR + \left( A \left( R_i + \frac{h_i}{k_1} \right) + \left( R_i + \frac{h_i}{k_1} \right)^2 \right) \ln \left( \frac{h_i}{h_i - h} \right) \right], \quad (7)$$

$$\text{де } A = \frac{(3 - 0.3\sqrt{3}k_1)(h_i - h)}{(0.1\sqrt{3}k_1 - 2)k_1}.$$

Для отримання величини приведенного тиску  $\Delta\bar{p}$  в аналітичному вигляді також можна виконати верхню оцінку потужності сил деформування у вигляді (1), враховуючи величину об'єму області модуля:

$$N_{d2} = \sigma_S \sqrt{V \cdot \iiint_V \dot{\varepsilon}_i^2 dV}, \quad (8)$$

$$\text{де } \iiint_V \dot{\varepsilon}_i^2 dV = -\frac{\pi V_i^2}{18k_1} (12 + k_1^2) \left[ \begin{aligned} & R_i + (3C - A) \ln \left( \frac{h_i}{h_i - h} \right) - \left( \frac{1}{C} - \frac{k_1}{h_i} \right) (3C^2 - 2AC + B) - \\ & - \frac{1}{2} \left( \frac{k_1^2}{h_i^2} - \frac{1}{C^2} \right) (C^3 - AC^2 + BC) \end{aligned} \right],$$

$$A = \frac{6(h_i - h)(6 + k_1^2)}{(12 + k_1^2)k_1}, \quad B = \frac{9(h_i - h)^2(4 + k_1^2)}{(12 + k_1^2)k_1^2}, \quad C = R + \frac{h_i}{k_1},$$

$$V = 2\pi \int_0^{R_i} r dr \int_{z_1(r)}^{h_i} dz = \frac{(3(h_i + R_i k_1) - 2R_i k_1) R_i^2}{3} \pi - \text{об'єм області модуля.}$$

Порівняльний аналіз величини  $\bar{N}_d = N_d / \pi\sigma_S V_i R_i^2$ , отриманої чисельно, і верхніх оцінок (6) у вигляді лінеаризації  $\bar{N}_{d1} = N_{d1} / \pi\sigma_S V_i R_i^2$  і (8) у вигляді  $\bar{N}_{d2} = N_{d2} / \pi\sigma_S V_i R_i^2$  відповідно дозволив визначитися з висновками. Дані функції монотонно спадають за всіх  $\bar{h} = h/R_i \in (0, \bar{h}_i)$ , характер зміни не змінюється при різних співвідношеннях  $h_i/R_i$  (рис.3, а). Однак відхилення величини  $\bar{N}_{d1}$  (з використанням лінеаризації інтенсивності швидкостей деформації) від  $\bar{N}_d$  є більш істотним, як в чисельному вигляді, так і в характері зміни кривих. Тому необхідно рекомендувати використання верхньої оцінки у вигляді (8), при цьому найменше відхилення від  $\bar{N}_d$  характерне для значень  $\bar{h} \in (0, \bar{h}_i/2)$  та не перевищує 1 – 3%. Для проведення аналізу можливостей використання спрощених оцінок приведенного тиску деформування для кінематичного модуля необхідно розглянути сумарну величину, що враховує потужності сил деформування, тертя і зрізів у вигляді  $\Delta\bar{p}$  і верхніх оцінок  $\Delta\bar{p}_1$  (на основі лінеаризації) і  $\Delta\bar{p}_2$  відповідно (8) (рис. 3, б). Для умов тертя, найбільш характерних для процесів холодного видавлювання  $\mu_s = 0.08 \div 0.16$  для величин  $\Delta\bar{p}$  і  $\Delta\bar{p}_2$  можлива оптимізація за параметром  $\bar{h}$ , однак функція  $\Delta\bar{p}_1$  монотонно зростає на

всьому проміжку значень відносної висоти, що відповідає куту нахилу похилої межі, та має більше відхилення від оцінки приведенного тиску деформування, отриманої чисельно. Таким чином, однозначно підтверджена раціональність використання верхньої оцінки у вигляді (8) для отримання потужності сил деформування в аналітичному вигляді.

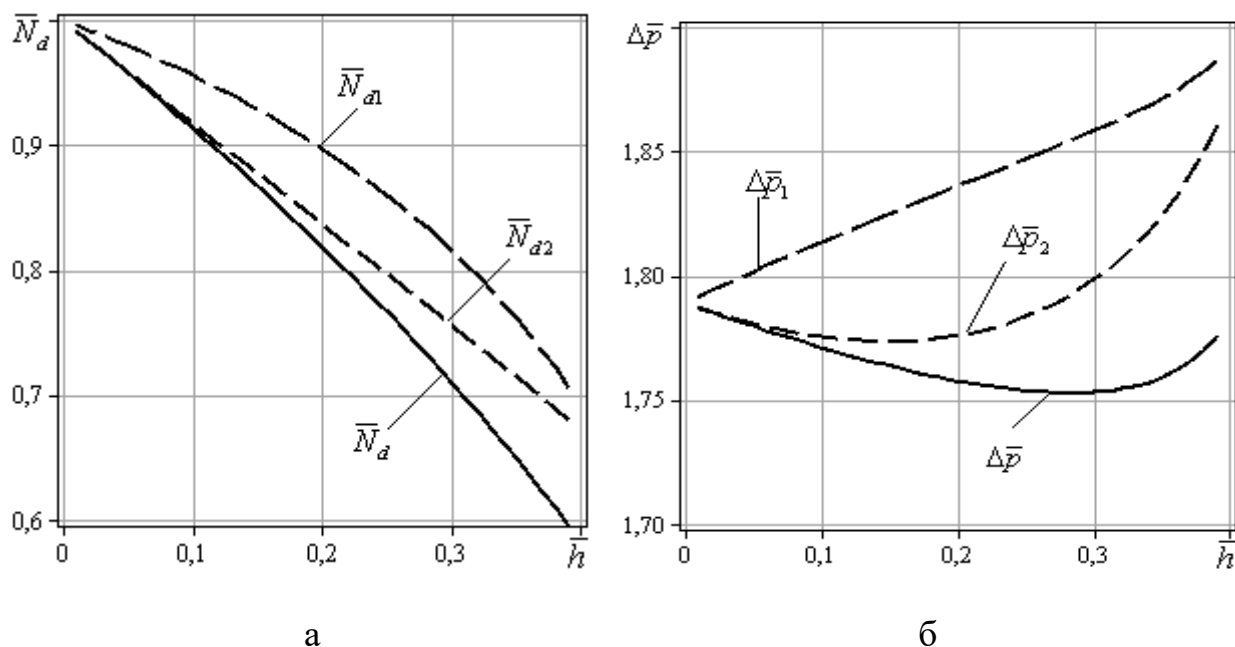


Рисунок 3 – Порівняльний аналіз величин  $\bar{N}_d$  (а) та приведенного тиску деформування  $\Delta\bar{p}$  (б) та їх верхніх оцінок при  $\bar{h}_i = 0.4$ ,  $\mu_s = 0.08$  (б)

Врахування геометрії інструменту та радіусів перехідних ділянок матриць є важливим при проектуванні штампів та аналізі можливостей корегування формоутворенням деталі в процесах комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу. Заокруглення на матриці відображає похила межа у вигляді чверті кола радіусу  $R$  у кінематичному трапецеїдальному модулі типу Tr-1 – частинного випадку форми П-1, представленої в таблиці 1. При аналізі обмежень щодо виду функцій похилої межі було виявлено неможливість використання чверті кола  $z(r) = h_i + R - \sqrt{R^2 - (r - (R_i + R))^2}$  з огляду на існування першої та другої похідної функції при  $r = R_i$ , що унеможлиблює подальші розрахунки в рамках заданого КМПШ. Подолати цю проблему можна шляхом заміни даної кривої на наближену до неї. У якості наближень до кривої чверті кола запропоновано наступні:

$$z_1(r) = \frac{A}{r - R_i \left(1 - \frac{R}{2\pi}\right)} + B, \quad (9)$$

$$\text{де } A = \frac{R^2 R_i}{2\pi} \left(1 + \frac{R_i}{2\pi}\right); \quad B = h_i - \frac{2\pi A}{R_i R}.$$

$$z_2(r) = \frac{(r - R_{i+1})^4}{R^3} + h_{i+1}. \quad (10)$$

Крива чверті кола відображена чорною лінією, наближені криві – синьою для  $z_1(r)$  та червоною для  $z_2(r)$  пунктирними лініями (рис. 4). Характер зміни кривих наближено подібний, однак відхилення кривої  $z_1(r)$  за довжиною дуги та площею криволінійної трапеції від чверті кола є меншим (є сталою величиною та не перевищує 0,8 %) по відношенню використання наближення у вигляді  $z_2(r)$ , що говорить про раціональність використання наближення у формі (9). Аналіз величин приведенного тиску деформування всередині кінематичного модуля із заокругленням виявив наявність точки мінімуму (рис. 4) та суттєвий вплив умов тертя отримання оптимального значення радіусу заокруглення.

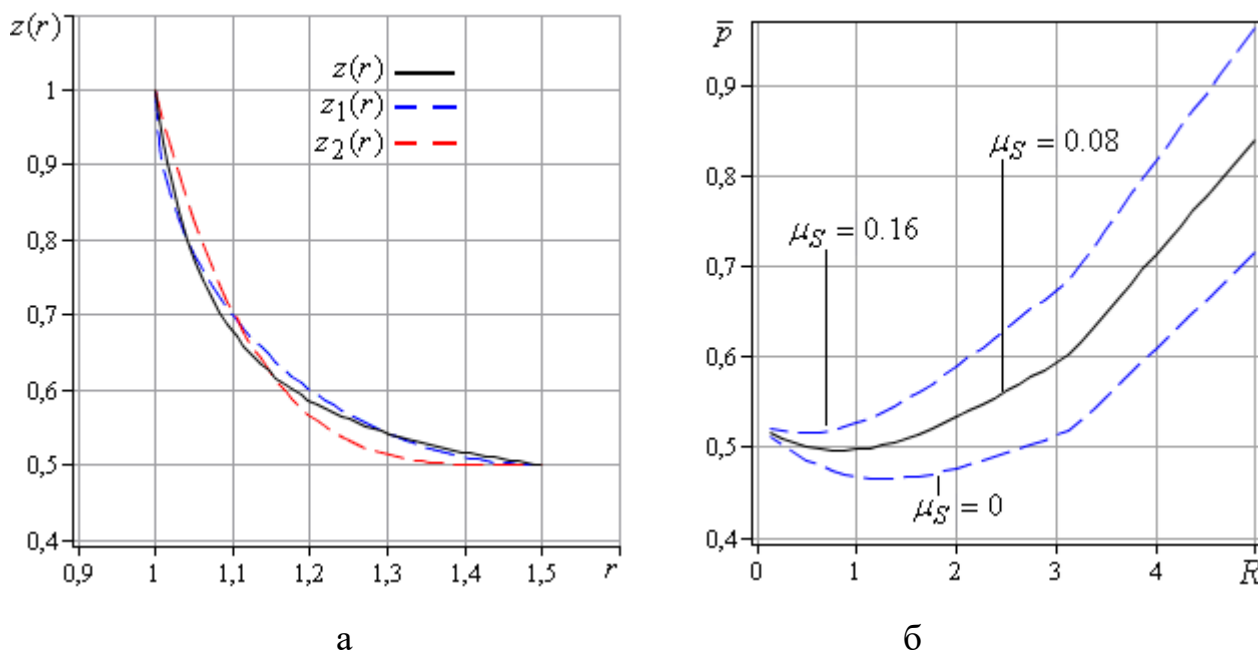
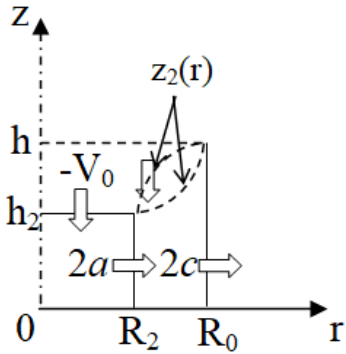


Рисунок 4 – Залежності відхилення форми кривих (а) та приведенного тиску деформування від радіусу  $R$  при  $h_{i+1}=9$  мм,  $R_i=18$  мм за різних умов тертя (б)

У якості альтернативи при моделюванні процесів послідовного комбінованого радіально-прямого видавлювання проаналізовано раціональність заміни найуживанішого осьового модуля прямокутної форми на комплекс із двох суміжних кінематичних модулів, один з яких є трапецеїдальним з похилою межею (таблиця 5). Рівняння похилої межі знайдено з умови суцільності та граничних умов та дозволяє відображати як вгнуті, так і опуклі криві в залежності від значень параметру  $\alpha \in (0, 1)$ . КМПШ має ненульову вертикальну складову  $V_{z2c}$  та є достатньо простим для можливості подальшої оптимізації як за параметром  $\alpha$ , що визначає форму кривої, так і за положенням  $R_2$ , що визначає розміри модулів. Частинним випадком комплексу 2a-2c є виродження при  $R_2=0$  у трикутний кінематичний модуль із похилою межею із наявністю оптимізації тільки за параметром  $\alpha \in (0, 1)$ . Аналогічно розроблено комплекс 2a-2b із наявністю нульової вертикальної складової КМПШ трапецеїдального модуля 2b, який виявився нераціональним у порівнянні із комплексом 2a-2c за рахунок одномоментного переходу від прямого видавлювання до радіального в зоні 2b, що не відповідає дійсності (рис. 5, а).

Таблиця 5 – Схема та КМПШ комплексу з прямокутного осьового 2а та трапецеїдального кінематичного модуля 2с

<p>Схема комплексу 2а-2с</p> 	<p>КМПШ 2с: <math display="block">\begin{cases} V_{z2c} = -\frac{\alpha V_0}{h} z, \\ V_{z2c} = \frac{V_0 [R_0^2(1-\alpha) + \alpha r^2]}{2hr}, \end{cases}</math></p> <p>де <math>h_{2c} = \frac{R_2^2 h}{R_0^2(1-\alpha) + \alpha R_2^2}</math>, <math>z(r) = \frac{hr^2}{R_0^2(1-\alpha) + \alpha r^2}</math>.</p>
--	---

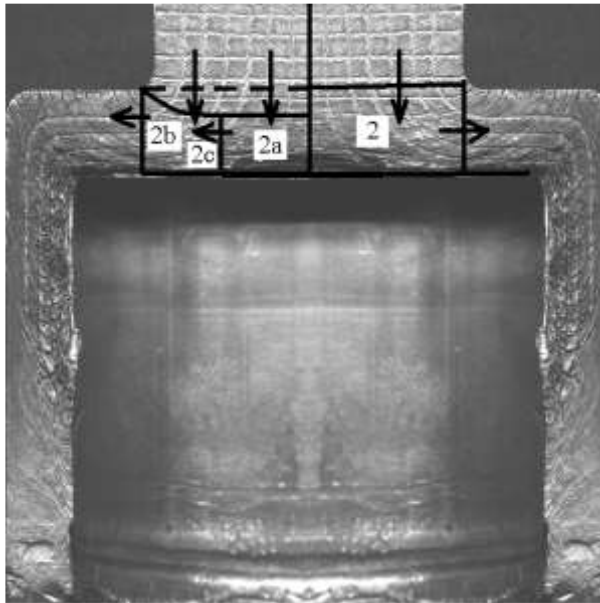
Додатково досліджено та розширено можливості використання відомих кінематичних модулів із двома ступенями свободи течії металу типів АТ-ІІ-1 та Іт-3 за рахунок побудови рішень для похилих меж криволінійної форми.

У п'ятому розділі проведено дослідження процесів послідовного та суміщеного комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання порожнистих і суцільних деталей з фланцем.

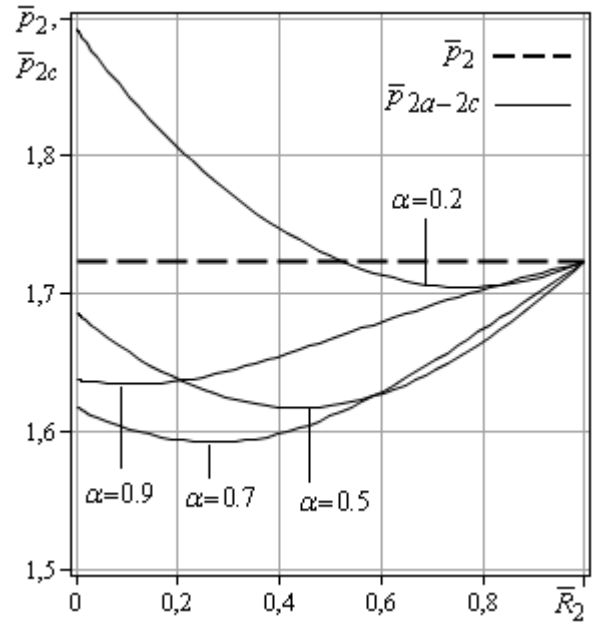
Зважаючи на розробки нових кінематичних модулів, проведено дослідження процесів комбінованого послідовного та суміщеного видавлювання із декількома ступенями свободи течії металу з огляду порівняння їх використання із найуживанішими кінематичними модулями із урахуванням специфіки осередків деформації. Використання комплексу 2а-2с прямокутного та трапецеїдального кінематичних модулів (таблиця 4, рис. 5, а) або його частинного випадку у вигляді виродження у трикутний кінематичний модуль замість прямокутного для опису осьового зони розвороту від прямої до радіальної течії є раціональним для розрахункових схем із наявністю розвинутої радіальної течії у фланцевій зоні, що дозволяє знизити прогнозовану оцінку за силовим режимом до 10 %, для схем із наявністю суміжних кінематичних модулів трикутної форми Т-1 така заміна є менш суттєвою. Величина приведенного тиску деформування може бути оптимізована у відносних величинах за параметрами  $\bar{R}_2 \in [0, 1]$  та  $\alpha \in (0, 1)$ , що визначає форму похилої межі модуля 2с. Порівняльний аналіз величин  $\bar{p}_2$  та  $\bar{p}_{2a-2c}(R_2, \alpha)$  для наочності представимо у вигляді перерізів поверхонь  $\bar{p}_{2a-2c}(R_2, \alpha)$  кривими  $\bar{p}_{2a-2c}(R_2)_{\alpha=const}$  (рис. 5, б). Зазначимо, що вплив параметра форми кривої  $\alpha \in (0, 1)$  є суттєвим, оптимальне значення коливається в межах від 0,6 до 0,97 для різних комбінацій суміжних кінематичних модулів.

Для процесів комбінованого видавлювання із наявністю декількох ступенів свободи течії металу із приєднаним осередком деформації основні дослідження було спрямовано на визначення положення границі межування двох суміжних ОД із одним ступенем свободи течії металу, що наближене до дійсного. Використання нової розрахункової схеми процесу радіально-прямого видавлювання стрижневих деталей з наявністю трапецеїдального кінематичного модуля 4 запропоновано згідно з викривленням ділильної сітки та аналізу НДС заготовки (рис. 6, а). Це дозволило

отримати зниження прогнозованих оцінок за приведеним тиском деформування до 50% по відношенню до раніше використаних розрахункової схеми РС-1а із наявністю тільки прямокутних модулів (рис. 6, б, в). Про правомірність використання розрахункової схеми РС-1 з трапецеїдальним кінематичним модулем свідчить і отримана оцінка формоутворення деталі (відхилення теоретичних розрахунків від експериментально отриманих приростів осевого відростка не перевищує 7–10 %).

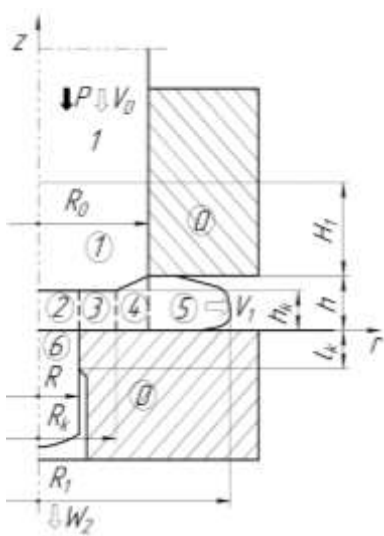


а

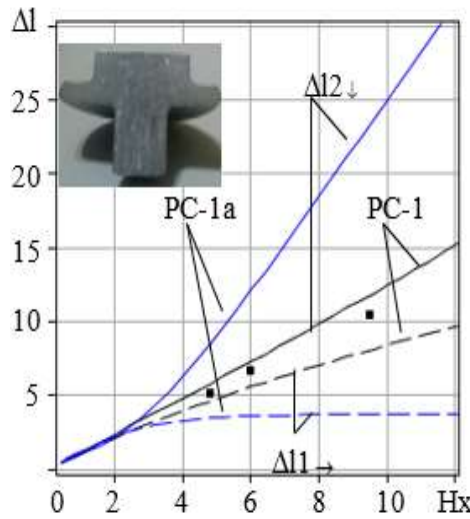


б

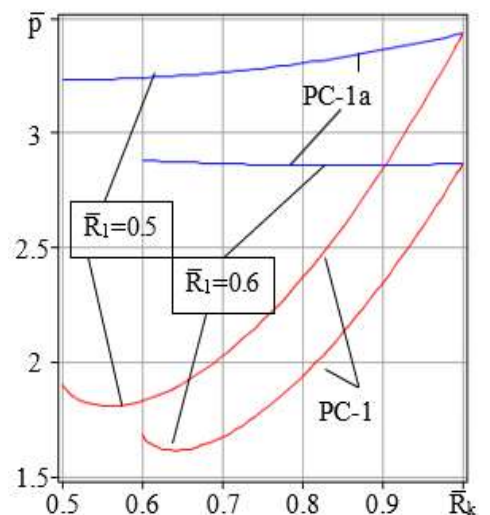
Рисунок 5 – Викривлення діляної сітки (а) та порівняльний аналіз приведених тисків деформування  $\bar{p}_2$  та  $\bar{p}_{2\alpha-2c}$  при  $h/R_0 = 0.7$ ,  $\mu_S = 0.08$  (б) процесу радіально-прямого видавлювання



а



б



в

Рисунок 6 – Розрахункова схема (а) та порівняльний аналіз залежностей приростів напівфабрикату (б) і приведенного тиску деформування (в) розрахункових схем РС-1а та РС-1 процесу радіально-прямого видавлювання з осевим відростком

Дана розрахункова схема може бути використана у якості автономного осередку деформації і для моделювання процесів із наявністю комбінованого осередку деформації, що значно підвищує практичну цінність отриманих результатів. Запропоновано спосіб комбінованого видавлювання для виготовлення складнопрофільованих порожнистих деталей із формуванням на заключному етапі зовнішнього фланця на бічній поверхні (рис. 7).

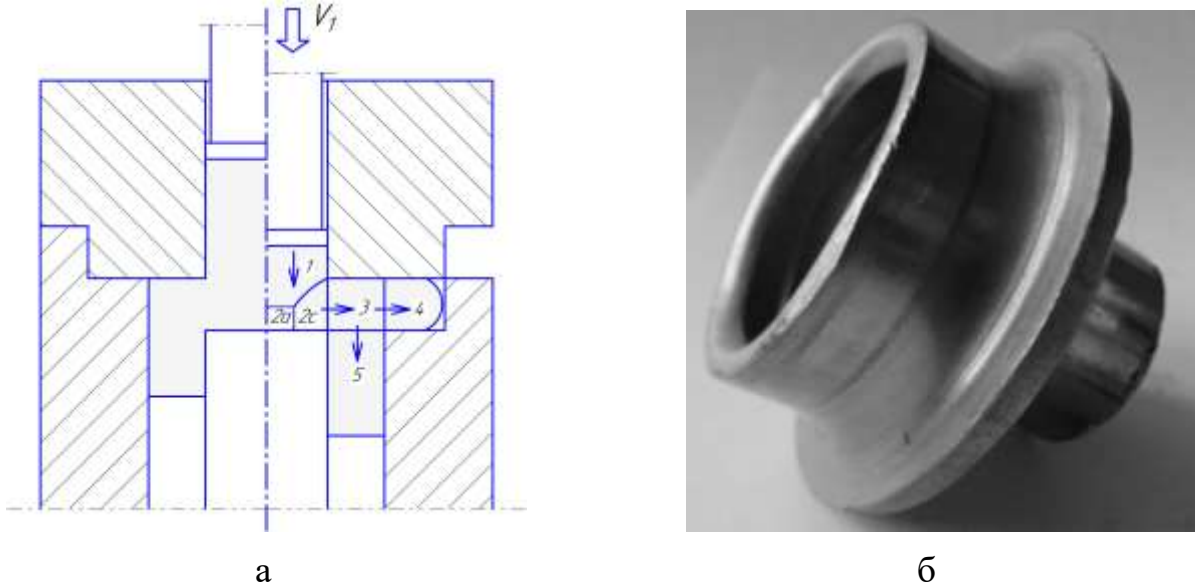


Рисунок 7 – Розрахункова схема процесу комбінованого радіально-прямого видавлювання із формуванням на заключному етапі зовнішнього фланця на бічній поверхні (а) та отримана деталь (б)

Отримано приведений тиск деформування розрахункової схеми із використанням кінематичного модуля 3 з двома ступенями свободи течії металу, модуль 2 обрано як частинний випадок комплексу 2а-2с при  $R_2=0$  з огляду зменшення параметрів при подальшій оптимізації. Для другого етапу деформування за запропонованим способом комбінованого видавлювання приведений тиск деформування кінематичного модуля 3 та 4 із урахуванням потужності сил деформування, зсуву та тертя для суміжних модулів 2, 4 і 5 набуває вигляду:

$$\bar{p}_{3-II} = \frac{1}{\sqrt{3}(R_1^2 - R_0^2)} \left[ \begin{aligned} & t_2 - t_1 + A \ln \left| \frac{(t_1 + A)R_1^2}{(t_2 + A)R_0^2} \right| + 2(1 - \lambda)(R_1^2 - R_0^2) \ln \left( 1 + \frac{\Delta l_2}{R_1} \right) + \\ & \frac{1 + 2\mu_{s2}}{h} \left( (R_1^2 + R_0^2(\lambda - 1))(R_1 - R_0) - \lambda \frac{R_1^3 - R_0^3}{3} \right) + hR_1 + \\ & \frac{h}{R_0} |R_1^2 - R_0^2(\lambda - 1)| + 4\mu_{s2}(1 - \lambda) \frac{R_1^2 - R_0^2}{h} l_2 + 4\mu_{s1}(R_0 + R_1) \Delta l_1 \end{aligned} \right], \quad (11)$$

де  $A = R_1^2 - R_0^2(1 - \lambda)$ ,  $t_1 = \sqrt{3\lambda^2 R_1^4 + A^2}$ ,  $t_2 = \sqrt{3\lambda^2 R_0^4 + A^2}$ ,  $\Delta l_1$  та  $\Delta l_2$  – прирости напівфабрикату у відростку (модуль 5) та зовнішній фланцевій зоні (модуль 4),  $\mu_{s1}$  та  $\mu_{s2}$  – коефіцієнти тертя для радіальної складової та відростку відповідно.

Це надає можливості дослідити оптимальне значення параметру  $\lambda$ , що визначає швидкість течії металу при прямому видавлюванні для формування відростку, приведеного тиску деформування  $\bar{p}_{3-II}$  та визначити прирости напівфабрикату за ходом процесу за різних технологічних параметрів:

$$\begin{cases} \Delta l_i = \Delta l_{i-1} + \lambda_{i-1} \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2} \cdot \Delta, \\ \Delta l_{2i} = \sqrt{\frac{R_0^2 \Delta H_x - (R_1^2 - R_0^2) \Delta l_i}{h} + R_1^2 - R_0^2}, \end{cases} \quad (12)$$

де  $i$  – номер ітерації,  $\Delta$  – крок ітерації.

Таким чином, розроблена розрахункова схема двоетапного процесу деформування дозволяє прогнозувати появу утягнення на основі характеру змінення кінематичного параметру у вигляді швидкості течії металу у прямому напрямку, що визначає швидкість течії металу при прямому видавлюванні для формування відростку (рис. 8, а), що підтверджене моделюванням в Qform2/3D (рис. 8, б).

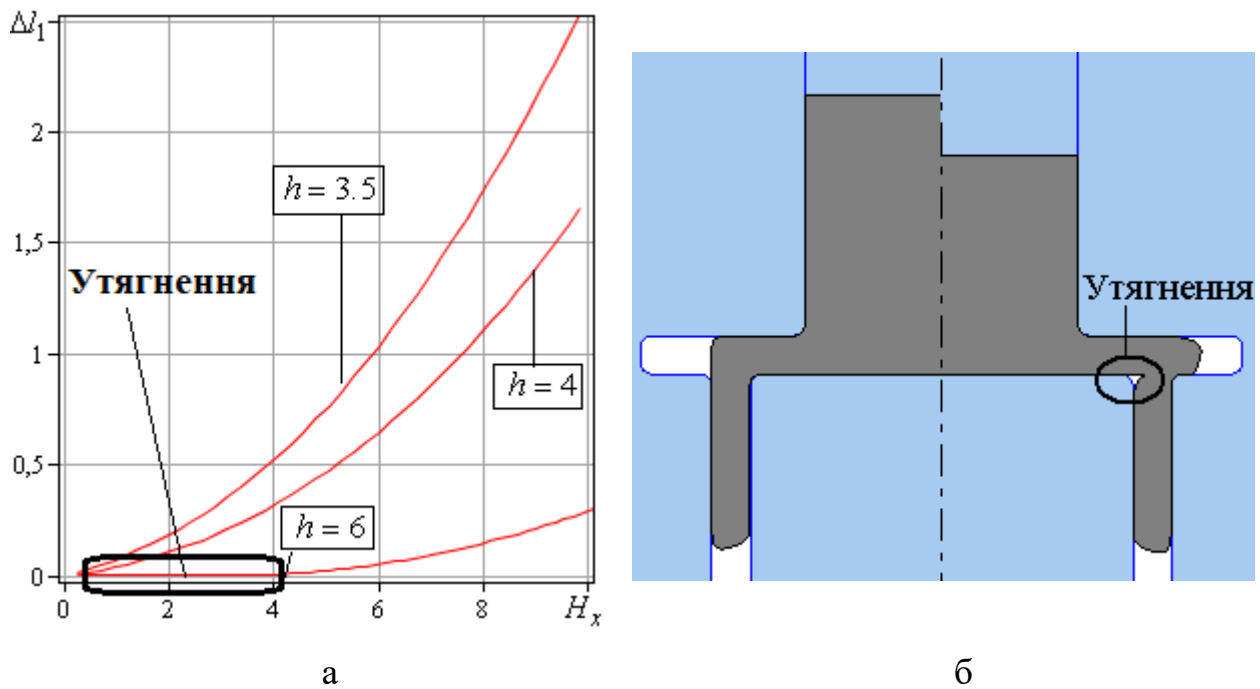


Рисунок 8 – Аналіз формоутворення деталі від ходу процесу із появою утягнення за розрахунковою схемою (а) та в Qform 2/3D (б)

Подальші дослідження процесів комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу стосувалися визначення раціональності використання похилих меж криволінійної форми та можливості використання кінематичних параметрів у якості варійованих для оптимізації приведеного тиску деформування. Встановлено конфігурації суміжних кінематичних модулів для трапецеїдального типу АТ-II-1, для яких є можливою така оптимізація та неможливість використання у розрахункових схемах із транзитним осередком



деформації. Встановлено суттєвий вплив умов тертя та на прирости напівфабрикату та продемонстровано можливості побудованої розрахункової схеми для прогнозування дефектоутворення у вигляді утягнення, яку розширено на випадок положення пуансони нижче товщини фланцевої зони аж до товщини дна, яка прямує до нуля. Удосконалення раніше розроблених розрахункових схем процесу комбінованого радіально-прямого видавлювання за рахунок використання нових форм похилих меж дозволило визначити границі їх використання із урахуванням різних співвідношень процесу та наявності транзитного або об'єднаного осередків деформації. При цьому основні дії було зосереджено на використанні нових кінематичних модулів у нижньому автономному осередку деформації за наявності комплексу кінематичних модулів 2а-2с або його частинного випадку, що відображає картину розвороту течії металу осьової зони у радіальному напрямку (рис. 9, а). Також можливим є використання верхнього автономного осередку деформації, що відповідає зворотному видавлюванню, у трьох можливих варіаціях відповідно до форми похилої межі осьового трапецеїдального кінематичного модуля 1.

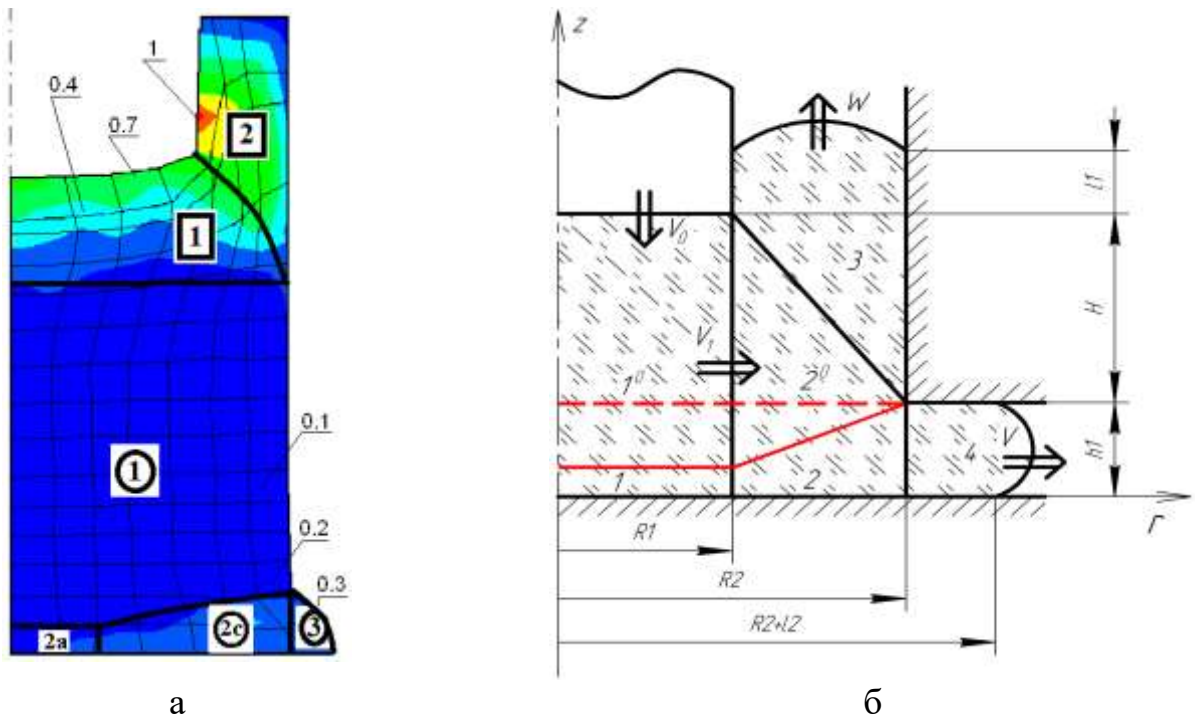


Рисунок 9 – Розрахункова схема процесу радіально-зворотного видавлювання на основі аналізу НДС для транзитного осередку деформації (а) та для прогнозування дефектоутворення (б)

Розвиненням попередніх досліджень щодо прогнозування утягнення у донній частині заготовки для випадку із об'єднаним осередком деформації схему процесу розширено на випадок положення пуансони нижче товщини фланцевої зони аж до товщини дна, яка прямує до нуля, що відповідає етапу III (рис. 9, б). Підтверджено, що початку утворення утягнення відповідає зміна характеру відносної швидкості витікання металу  $\bar{W}$  з зони 2 до зони 3, що відповідає точці мінімуму та суттєво залежить від геометричних співвідношень та умов тертя (рис. 10). Початку появи дефектоутворення відповідає і стрімкий скачок сили деформування на заключній стадії процесу. Зміни умов тертя на стінці стакану і пуансоні  $\mu_2$ , що відповідають за

напрямок зворотної течії і  $\mu_1$ - за витікання металу, що формує фланцеву зону в радіальному напрямку, суттєво впливають на можливість утворення утягнення (рис. 10). При рівних значеннях величин  $\mu_1=\mu_2$  відбувається незначне зміщення критичного ходу пуансона  $\Delta H_x$ , що відповідає початку утворення даного дефекту. Проведено порівняльний аналіз отриманих даних згідно характеру змінення кінематичного параметру із співвідношенням за верхньою оцінкою (плоска задача) згідно геометричних параметрів процесу деформування. Виявлено вплив введення радіусу заокруглення  $R$  в зоні 4, що сприяє відтермінуванню (запізненню за ходом процесу) появи утягнення подекуди до  $0,4 - 0,5R$ .

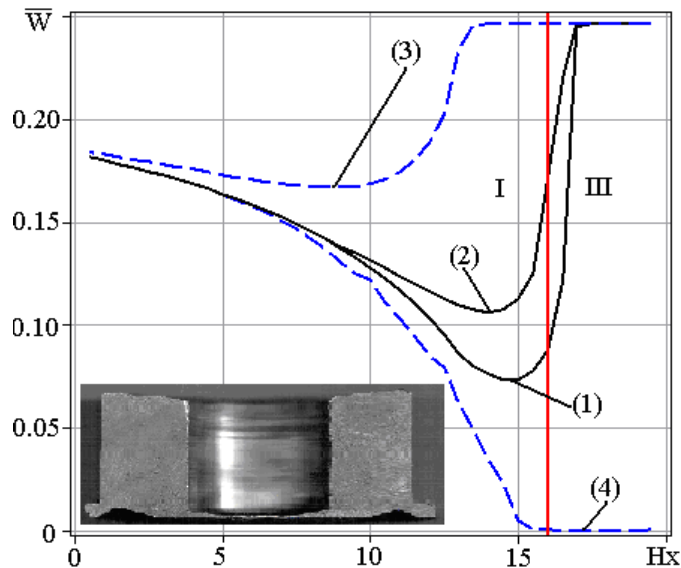


Рисунок 10 – Змінення оптимальної величин відносної швидкості витікання металу  $\bar{W}$  у вертикальному напрямку за ходом процесу:  $\mu_1=\mu_2=0.3$  – крива (1),  $\mu_1=\mu_2=0.08$  – крива (2),  $\mu_1=0.3, \mu_2=0$  – крива (3),  $\mu_1=0, \mu_2=0.3$  – крива (4)

Узагальненням цих досліджень є рекомендації щодо меж використання кожної із розрахункових схем відповідно до геометричних співвідношень, стадії процесу та можливого дефектоутворення у вигляді утягнення.

**У шостому розділі** виконано систематизацію та узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень для їх підготовки до практичного використання. Розглянуто основні етапи проектування процесів комбінованого суміщеного та послідовного видавлювання та запропоновано відповідні технологічні рекомендації.

Окремо згідно із основних ознак запропонованої класифікації відомих кінематичних модулів розширено базу кінематичних модулів трикутної та трапецеїдальної форми, що відображають картину переходу течії металу з осьової зони до радіальної течії всередині заготовки, та конструктивні особливості інструменту у вигляді заокруглення. Сформульовано рекомендації щодо використання розроблених криволінійних модулів та їх комплексів замість найуживаніших прямокутних для процесів радіально-поздовжнього видавлювання в залежності від осередків деформації та ступенів свободи течії металу. Проведено розрахунки приведенного тиску деформування всередині розроблених кінематичних

модулів трапецеїдальної форми, які моделюють наявність фаски та заокруглення, що забезпечують оперативну вбудовуваність у нові розрахункові схеми. Для оцінки можливого дефектоутворення у вигляді утягнення в процесах комбінованого видавлювання з двома ступенями свободи течії запропоновано проводити попередню оцінку за розробленими розрахунковими схемами та виявленими співвідношеннями. Розширення меж використання розроблених розрахункових схем процесів комбінованого послідовного радіально-прямого видавлювання та радіально-прямого видавлювання деталей з фланцем і осьовим відростком можливе як за рахунок вбудовуваності кінематичних модулів, що моделюють фаски та заокруглення на матриці, так і за рахунок використання їх у якості автономних ОД для більш складних процесів із комбінованим ОД.

Розроблено програму з використанням безкоштовного середовища «Delphi Community Edition», яка містить два основні модулі (рис. 11).

**Модулі**

- Модуль 1
  - Конфігурація інструмента
    - Внутрішнє
      - AT-1
      - AT-2
      - AK\_2R<math>2</math>
      - AP-1
    - Зовнішнє
      - T-1
      - T-1
      - TR-1
      - TR-1
      - F-1
      - FR-1
  - Вихідні
    - Осьові
      - Два ступеня свободи течії
      - Два ступеня свободи течії
    - Результат
- Модуль 2
  - Забірний осередок діючий
  - Радіально-зворотне видавлювання
    - Радіально-зворотне видавлювання (без утягнення)
    - Дефектоутворення
  - Прокінений осередок діючий
    - Радіально-пряме видавлювання з осьовим відростком
    - Кінематичні модулі

**Властивості, обмеження та рекомендації:**

- 1) Наявність похилої межі – поверхні контакту із інструментом або омертвіла зона, інших обмежень на суміші кінематичні модулі немає.
- 2) Можливо дослідження криволінійної похилої межі.
- 3) Буття нахилу  $\beta$  можна розглядати у якості параметра оптимізації.
- 4) Для найпростішого випадку кривої:  $N_r = 2\beta_1 \cdot (\beta + \beta_1^2) \cdot N_{r1}^-$

**КМШП:**

$$F_{z2a} = -F_r + \frac{F_r(z_1 - A)}{z_1(r) - R_1} \left( 1 + \frac{z_1(r)F_r}{2(A - z_1(r))} \right)$$

$$F_{z2a} = \frac{F_r F_r}{2(A - z_1(r))}$$

де  $z(r)$  – довільна крива, що описує похилу межу та проходить через точки  $(0, h)$  та  $(R, 0)$

Для випадку лінійної функції:  $z_1(r) = h_1(r - R_1)$ ,  $h_1 = z_1(r) = -\frac{h}{R}$

$$N_{r2} = \pi \cdot \sqrt{\frac{F_r}{V}} \cdot \prod_{i=1}^n c_i^2 \cdot dV$$

де  $V = 2\pi \int_0^R r dr$ ,  $dV = \frac{(2R - R_1) - 2R_1 R_2}{R}$

та  $\prod_{i=1}^n c_i^2 \cdot dV = \frac{\pi R^2}{180} \cdot (\beta + \beta_1^2) \left[ R + (\beta C - A) \ln \left( \frac{A}{A - A} \right) - \left( \frac{1}{C} - \frac{h_1}{h} \right) (\beta C^2 - 2AC + \beta) - \frac{1}{2} \left( \frac{h_1^2}{A^2} - \frac{1}{C^2} \right) C^3 - AC^2 + \beta C \right]$

$$\text{де } A = \frac{h(A - 1)h_1 + h_1^2}{h_1 + h_1^2 \beta_1}, \beta = \frac{h(h_1 - h_1^2)(h_1 + h_1^2)}{h_1 + h_1^2 \beta_1}, C = \beta - \frac{h_1}{R_1}$$

$$N_{r1}^- = \frac{\pi \pi F_r}{\sqrt{\beta} R_1} \left[ \frac{R_1^2}{2} + \left( R_1 + \frac{h_1}{R_1} \right) R_1 + \left( R_1 + \frac{h_1}{R_1} \right) \ln \left( \frac{A}{A - h_1} \right) \right], N_{r1}^- = \frac{\pi \pi F_r}{\sqrt{\beta}} \left( 1 - \frac{R_1}{2h_1} \right) R_1 R_1, N_r = 2h_1 \cdot (\beta + \beta_1^2) \cdot N_{r1}^-$$

а

**Calculation of the combined radial reverse extrusion process**

**Data input | results**

Form of boundary:  $T_1(z)$ ,  $T_2(z)$

Dimensional radius of punch R1, [mm]: 10

Dimensional radius of die R2, [mm]: 10

Dimensional thickness of flange h1, [mm]: 5

Initial workpiece height H0, [mm]: 22

Active tool stroke Hx, [mm]: 10

Coefficient of friction,  $\mu$  ( $\mu = \mu_0 = 0.5$ ): 0,08

Material: A21

**Diagram:** Schematic of the extrusion process showing a punch (1) and die (2) with a workpiece (3) being extruded. The workpiece is divided into regions 1, 2, 3, and 4. Forces  $T_1(z)$ ,  $T_2(z)$ , and  $T_3(z)$  are indicated. Geometric parameters include radii  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_2 + l_2$ , and heights  $l_1$ ,  $H$ .

**Graph:** Dependence of  $T_1$  and  $T_2$  from  $H_0$ . The graph shows two curves: a solid red line for  $T_1$  and a dashed blue line for  $T_2$ , both increasing with distance.

б

в

Рисунок 11 – Приклад демонстрації бази кінематичних модулів (а) та реалізованої розрахункової схеми процесу радіально-зворотного видавлювання порожнистих деталей з фланцем із урахуванням форми похилої межі (б, в)

Перший модуль дозволяє отримати дані щодо КМПШ, розрахункових залежностей приведенного тиску деформування та рекомендацій щодо використання кінематичних модулів з непаралельною течією із урахуванням форми, розташування, властивостей та обмежень, що накладаються на форму похилої межі, конфігурацію суміжних модулів та осередку деформації досліджуваної розрахункової схеми згідно із основними ознаками розробленої класифікації. Другий модуль містить банк розрахункових математичних моделей дослідження процесів радіально-зворотного видавлювання порожнистих деталей з фланцем, що відповідають різним співвідношенням процесу із можливістю поповнення.

Запропоновано спосіб комбінованого видавлювання для виготовлення складнопрофільованих порожнистих деталей із формуванням на заключному етапі зовнішнього фланця на бічній поверхні, розташованим в придонній частині деталі, та розрахункову схему, що дозволяє дослідити можливість дефектоутворення у вигляді утягнення на другому етапі процесу деформування.

Надано технологічні рекомендації з проектування процесу радіально-прямого видавлювання з роздачею порожнистих і суцільних деталей з фланцем, деталей типу гільз, втулок і стаканів, а також програмне забезпечення для розрахунку технологічних силових режимів та формоутворення і дефектоутворення, що забезпечують необхідні показники якості та допустимі співвідношення геометричних параметрів. З застосуванням такої методики розроблені і передані на ряд підприємств ресурсозберігаючі технології комбінованого видавлювання порожнистих і стрижневих деталей з фланцем і типу гільз і втулок, стаканів з фланцем. На нові технічні рішення, що дозволяють істотно розширити номенклатуру отримуваних виробів, отримані патенти України на корисну модель. Підвищення ефективності нових та удосконалених технологій досягнуто за рахунок зниження матеріаломісткості і трудомісткості виробництва, розширення номенклатури деталей, підвищення якості деталей і надійності технологічного оснащення. Результати досліджень та розроблені на їх основі методи розрахунків, технічні рішення та програмні модулі передані на підприємства ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», ПАТ «Енергомашспецсталь», ПАТ «Дружківський завод металевих виробів» та ТОВ «Завод рейкових скріплень» та використовуються також в наукових дослідженнях і навчальному процесі ДДМА.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема підвищення ефективності процесів об'ємного пластичного формоутворення на базі розвитку наукових основ енергетичних методів аналізу технологічних режимів і способів, удосконалення процесів точного штампування видавлюванням.

1. На підставі проведеного літературного аналізу стану теорії і технологій точного об'ємного деформування встановлено проблеми та напрямки розвитку процесів об'ємного точного штампування видавлюванням. Основні тенденції вдосконалення даної галузі обробки тиском знаходяться у площині пошуку резервних можливостей деформування за базовими схемами та розвитку процесів на основі їх поєднання із додаванням ступенів свободи течії металу. Практична цінність

результатів оцінки силового режиму деформування та наявності можливості прогнозування формоутворення та дефектоутворення в процесах видавлювання, в тому числі із урахуванням конструктивних особливостей інструменту, отриманих енергетичним методом балансу потужностей, вимагає розвитку методу за рахунок розробки прийомів спрощення розрахунків та розробки відповідних рекомендацій.

2. Встановлено основні класифікаційні ознаки кінематичних трикутних та трапецеїдальних модулів за формою, розташуванням, кількістю ступенів свободи течії, варіативністю похилої межі, обмеженнями, що накладаються на суміжні модулі. Проведений аналіз та порівняння із відповідними кінематичними модулями прямокутної форми дозволив виявити прогалини та обґрунтувати необхідність в розробці кінематичних модулів складної конфігурації, що перш за все дозволять врахувати конструктивні особливості інструменту. Виявлено суттєві відмінності у побудові КМПШ для кінематичних модулів із зберіганням поздовжньої, радіальної складової течії від кінематичних модулів із зміною течії металу. Встановлено особливості побудови кривих для опису похилих меж трикутних та трапецеїдальних кінематичних модулів, що відображають характер розділу течії металу всередині заготовки при переході від радіальної до поздовжньої течії та навпаки.

3. Встановлені обмеження щодо форми кривих, що описують похилі межі кінематичних модулів трапецеїдальної форми, та конфігурації суміжних кінематичних модулів. Для подолання проблеми неможливості використання чверті кола у якості похилої межі для кінематичного трапецеїдального модуля, що моделює заокруглення на матриці, запропоновано використовувати наближену за формою функцію, відхилення якої за довжиною дуги та площею криволінійної трапеції від чверті кола не перевищує 0,8 %, це розширює можливості кінематичного модуля для моделювання процесів із наявністю складної конфігурації інструменту. Радіус заокруглення слід розглядати у якості параметра оптимізації форми інструменту для зниження силових параметрів процесу деформування та у якості фактору керування течією металу в процесах комбінованого видавлювання з декількома степенями свободи течії металу. Розроблено осьовий кінематичний модуль трапецеїдальної форми, що дозволяє врахувати конусність протипуансону та розглядати кут нахилу у якості варійованого параметру, що оптимізує форму інструменту.

4. Використання комплексу прямокутного та трапецеїдального кінематичного модуля з криволінійною похилою межею замість найуживанішого осьового прямокутної форми для моделювання форми осередку деформації в суцільній заготовці в осьовій зоні розвороту від прямого до радіального видавлювання дозволило суттєво знизити прогнозовану оцінку силового режиму. Це досягнуто завдяки можливості оптимізації як за параметром  $\alpha$ , що визначає форму похилої межі, так і за положенням  $R_2$ , що визначає розміри модулів. Зменшення прогнозованої величини приведенного тиску деформування до 10% дозволило теоретично обґрунтувати можливість зниження навантаження на інструмент.

5. Розроблена розрахункова схема процесу радіально-прямого видавлювання стрижневих деталей із наявністю трапецеїдального кінематичного модуля дозволила визначитися із комплексом модулів згідно з викривленням ділильної сітки та аналізу НДС заготовки. Це дозволило отримати зниження прогнозованих оцінок за

приведеним тиском деформування до 50% по відношенню до раніше використаних розрахункових схем із наявністю тільки прямокутних кінематичних модулів. Про правомірність використання розробленої розрахункової схеми з трапецеїдальним кінематичним модулем свідчить і отримана оцінка формоутворення деталі (відхилення теоретичних розрахунків від експериментально отриманих приростів осьового відростка не перевищує 7–10 %). Дана розрахункова схема може бути використана у якості автономного осередку деформації і для моделювання процесів із наявністю комбінованого осередку деформації, що значно підвищує практичну цінність отриманих результатів.

6. Кінематичний параметр у вигляді швидкості течії у поздовжньому напрямку рекомендується використовувати у якості варійованого для розрахункових схем із осьовим трапецеїдальним кінематичним модулем виключно для випадку об'єднаного осередку деформації із суміжними модулями із додатною радіальною складовою. Розвиненням попередніх досліджень щодо процесів комбінованого радіально-зворотного видавлювання порожнистих деталей з фланцем стосувалися також розширення форм кривих, що відображають похилу межу трапецеїдальних модулів та встановлення меж їх використання. Розширено можливості прогнозування появи утягнення у донній частині заготовки для випадку із об'єднаним осередком деформації схеми процесу на випадок положення пуансону нижче товщини фланцевої зони аж до виродження товщини дна, що значно підвищує значущість отриманих раніше результатів. Підтверджено, що початку появи утягнення відповідає зміна характеру відносної швидкості витікання металу, що відповідає точці мінімуму і стрімкий скачок зусилля деформування на заключній стадії процесу деформування, що підтверджено експериментальними даними та МСЕ-моделюванням.

7. Для способу комбінованого радіально-прямого видавлювання в роз'ємних матрицях з використанням розрахункової схеми з двома ступенями свободи течії металу отримано залежності для оцінки силового режиму деформування від параметру  $\lambda$ , що визначає оптимальну швидкість течії металу в прямому напрямку і дозволяє прогнозувати формоутворення виробу і утворення дефектів форми у вигляді утягнення, що підтверджено МСЕ-моделюванням. Запропонований спосіб дозволяє отримати за одну операцію складнопрофільовані порожнисті деталі з фланцем на бічній поверхні.

8. Розроблено технологічні рекомендації з проектування процесів ТОШ видавлюванням з дотриманням основних етапів розробки процесів на основі запропонованої класифікації відомих та розроблених кінематичних модулів та створеної бази розрахункових моделей. Отримано вирази приведенного тиску деформування розроблених кінематичних модулів трапецеїдальної форми, що моделюють наявність фаски та заокруглення, що забезпечують оперативну вбудовуваність у нові розрахункові схеми. Для оцінки можливого дефектоутворення у вигляді утягнення в процесах комбінованого видавлювання з двома степенями свободи течії запропоновано проводити попередню оцінку за розробленими розрахунковими схемами. Методики розрахунку і проектування процесів деформування, результати теоретичних і експериментальних досліджень, технічні рішення та розроблені модулі програмної реалізації досліджуваних процесів передано на

ряд підприємств та використовуються в навчальному процесі і в науково-дослідних роботах академії.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Vlasenko K., Hrudkina N., Reutova I., Chumak O. Development of calculation schemes for the combined extrusion to predict the shape formation of axisymmetric parts with a flange. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 3/1 (93), P. 51–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131766> (Scopus)
2. Markov O., Zlygoriev V., Gerasimenko O., Hrudkina N., Shevtsov S. Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 5. 1 (95). P. 16–24. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142674> (Scopus)
3. Hrudkina N., Aliieva L., Abhari P., Kuznetsov M., Shevtsov S. Derivation of engineering formulas in order to calculate energy-power parameters and a shape change in a semi-finished product in the process of combined extrusion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 2. 7 (98). P. 49–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160585> (Scopus)
4. Hrudkina N., Aliieva L., Abhari P., Markov O., Sukhovirska L. Investigating the process of shrinkage depression formation at the combined radial-backward extrusion of parts with a flange. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 5/1 (101). P. 49–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179232> (Scopus)
5. Hrudkina N. S., Aliieva L. I. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*. 2020. 48. 2. P. 357–363. doi:10.5937/fme2002357H (WoS, Scopus)
6. Aliieva L., Hrudkina N., Aliiev I., Zhbakov I., Markov O. Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 2/1 (104). P. 15–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433> (Scopus)
7. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Kartamyshev D., Shevtsov S., Kuznetsov M. Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 3/1 (105). P. 17–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203989> (Scopus)
8. Markov O.E., Aliiev I.S., Aliieva L.I., Hrudkina N.S. Computerized and physical modeling of upsetting operation by combined dies. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2020. 55. 3. P. 640–648. (Scopus)
9. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Marchenko I., Shapoval A., Abhari P., Kordenko M. Predicting the shape formation of hollow parts with a flange in the process of combined radial-reverse extrusion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 4/(106). P. 55–62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203988> (Scopus)
10. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Malii K., Sukhovirska L., Kuznetsov M. Predicting the shape formation of parts with a flange and an axial protrusion in the process of combined aligned radial-direct extrusion. *Eastern-European Journal of Enterprise*

*Technologies*. 2020. 5/1 (107). P. 110–117. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212018> (Scopus)

11. Алиева Л. И., Грудкина Н. С. Исследование процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей с фланцем с разъединенным очагом деформации. *Вестник КГИУ. Республ. науч. журнал*. Темиртау. 2014. № 1 (4). С. 19–24.

12. 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*. 2018. 1 (46). С. 22–28.

13. Алиева Л. И., Грудкина Н.С., Крюгер К. Моделирование процесса радиально-обратного выдавливания полых деталей. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. 1 (79). С. 91–99. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.95873>

14. Алиева Л. И., Грудкина Н.С. Особенности проектирования процессов холодного выдавливания на основе развития модульного подхода в рамках энергетического метода. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харків. 2015. 24 (1133). С. 21–32.

15. Алієва Л. І., Алієв І. С., Грудкіна Н. С., Малій Х. В. Моделювання процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання деталей з фланцем. *Обработка материалов давлением*. 2019. 1 (48). С. 23–34.

16. Грудкіна Н. С. Верхня оцінка приведенного тиску деформування осьового трапецеїдального кінематичного модуля з нижньою похилою межею. *Вісник ДДМА*. 2019. 3 (47). С. 21–27.

17. Грудкіна Н. С. Оцінка формоутворення порожнистих деталей з фланцем у процесі радіально-зворотного видавлювання енергетичним методом. *Обработка материалов давлением*. 2019. 2 (49). С. 41–46. DOI: 10.37142/2076-2151/2019-2(49)41

18. Грудкіна Н.С., Алієва Л.І. Моделювання процесів комбінованого видавлювання із використанням трапецеїдальних криволінійних кінематичних модулів. *Вісник ХНТУ*. Херсон. 2020. 1(72). 1. С. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2020.1.1.3>

19. Грудкіна Н. С. Особливості моделювання процесів радіально-поздовжнього видавлювання із використанням трикутних кінематичних модулів. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2020. 2 (121). С. 116–121. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.2.110-115

20. Грудкіна Н. С. Моделювання процесів комбінованого радіально-прямого видавлювання складнопрофільованих порожнистих деталей із використанням методу кінематичних модулів. *Вісник КНУТД. Мехатронні системи. Енергоефективність та ресурсозбереження*. 3 (146). 2020. С. 69–78. <https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2020.3.6>

21. Грудкіна Н. С. Математичне моделювання процесів радіально-поздовжнього видавлювання з використанням трапецеїдальних кінематичних модулів. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2020. 4 (123). С. 78–83. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.4.78-83

22. Грудкіна Н., Марков О. Математичне моделювання процесів холодного видавлювання зі складною конфігурацією інструменту. *Технічні науки та технології*. 2020. 3 (21). С. 89–97. DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-89-97



23. Грудкіна Н. С. Аналіз вбудовуваності осьового трапецеїдального кінематичного модуля з нижньою похилою межею в розрахункові схеми моделювання процесів поздовжньо-поперечного видавлювання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр.* Харків : НТУ «ХПІ». 2020. 2 (1356). С. 7–12. ISSN 2519-2671.

24. Грудкіна Н. С. Математичне моделювання процесів холодного видавлювання із використанням кінематичних модулів складної конфігурації. *Обработка материалов давлением.* 2020. 1 (50). С. 45–49.

*Наукові праці апробаційного характеру:*

25. Алиева Л. И., Мартынов С. В., Грудкина Н. С., Мясущкин Е. А. Возникновение утяжин при прямом выдавливании на оправке. *I научно-техническая конференция «Энергомашспецсталь – 2007».* Краматорск : ПАО «Энергомашспецсталь». 2007. С. 33–35.

26. Алієв І. С., Мартинов С. В., Грудкіна Н. С. Штамп для отримання порожнистих деталей з внутрішнім фланцем. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції.* Краматорськ : ДДМА. 2010. С. 5.

27. Алиева Л. И., Грудкина Н. С. Особенности исследования процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания полых деталей с фланцем с разъединенным очагом деформации. *Тези доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», присвяченої 115-річчю підготовки спеціалістів в області ОМТ.* Київ: НТТУ «КПІ». 19–23 травня 2014. С. 87–89.

28. Гончарук К. В., Алиева Л. И., Грудкина Н. С., Таган Л. В., Шкира А. В. Анализ энергосиловых параметров процесса комбинированной осадки. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали тринадцятої Міжнародної науково-технічної конференції 2–4 червня 2015 року.* Краматорськ: ДДМА, 2015. С. 24–25.

29. Алиева Л.И., Жбанков Я.Г., Грудкина Н.С., Абхари П.Б. Дефектообразование в процессах холодного выдавливания. *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції.* Київ–Херсон, 2016. С. 148–152.

30. Марков О.Е., Алиев И.С., Алиева Л.И., Грудкина Н.С. Компьютерное и физическое моделирование процесса осадки комбинированным инструментом. *Современные инновации в области науки, технологий и интеграции знаний: Сборник материалов юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Рудненского индустриального института.* Рудный, Казахстан. 2019. С. 337–353. ISBN 978-601-7994-10-5.

31. Грудкіна Н. С. Пошук прийомів спрощення попередньої оцінки формозмінення напівфабрикату у процесі комбінованого видавлювання з декількома степенями свободи течії. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Університетська наука-2019» 16–17 травня 2019 року.* Маріуполь: ПДТУ. 2019. 1. С. 61–62.

32. Грудкіна Н.С. Моделювання процесів холодного видавлювання енергетичним методом із використанням кінематичних модулів складної конфігурації. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2020»*. Херсон: ХНТУ. 2020. С. 97–100.

33. Грудкіна Н.С. Оцінка силового режиму у процесах холодного видавлювання із використанням кінематичних модулів складної конфігурації. *Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», присвяченої 90-річчю кафедри ОМТ*. Київ. 2020. С. 416–419.

34. Грудкіна Н. С., Алієв І. С., Алієва Л. І., Таган Л. В. Використання кінематичних параметрів для оптимізації силових характеристик процесів комбінованого суміщеного видавлювання. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Університетська наука-2020» 20–21 травня 2020 року*. Маріуполь : ПДГУ. 2020. С. 85–87.

35. Грудкіна Н.С., Алієва Л.І., Марков О.Є., Корденко М.Ю. Особливості проектування штампів для холодного видавлювання прецизійних деталей. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2020»*. Херсон: ХНТУ. 2020. 6. С. 289–292.

*Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

36. Пат. 51884 Україна, В21J 13/02. Штмп для отримання порожнистих деталей з внутрішнім фланцем. Алієва Л. І., Мартинов С. В., Грудкіна Н. С. u200913740; заявл. 28.12.2009; опубл. 10.08.2010. Бюл. 15.

37. Пат. 65528 України. В21J 13/02 (2006.01). Штмп для отримання порожнистих деталей з зовнішнім та внутрішнім фланцем. Алієва Л. І., Мартинов С. В., Грудкіна Н. С. u201105798; заявл. 10.05.2011; опубл. 12.12.2011. Бюл. 23.

38. Пат. 138662 Україна. МПК (2006) В21К 21/00. Спосіб комбінованого видавлювання порожнистих деталей. Алієва Л.І., Алієв І.С, Грудкіна Н.С., Левченко В.М., Малій Х.В. u201904812; заявл. 06.05.2019; опубл. 10.12.2019. Бюл. 23.

39. Алиева Л.И., Мартынов С.В., Грудкина Н.С., Комиренко А.Д. Технологическая деформируемость при штамповке стаканов с фланцем. *Научный Вестник ДГМА*. Краматорск: ДГМА. 2013. 1 (11Е). С. 20–24. URL : [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/%E2%84%961\(11%D0%95\)\\_2013/article/5.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961(11%D0%95)_2013/article/5.pdf)

40. Гончарук К. В., Алиева Л. И., Грудкина Н. С., Таган Л. В., Шкира А. В. Анализ влияния формы инструмента на энергосиловые параметры при комбинированной осадке. *Научный Вестник ДГМА*. Краматорск. 2015. 3 (18Е). С. 70–79.

### **Особистий внесок автора в роботах, які опубліковані у співавторстві:**

[1, 10, 11, 13, 15, 18, 27, 34] – постановка задач математичного моделювання, розробка розрахункових схем згідно особливостей формування осередків деформації, аналіз впливу параметрів процесу деформування на технологічні

режими і формоутворення деталей з фланцем в процесах радіально-поздовжнього видавлювання; [3, 18, 22] – розробка та пошук прийомів спрощення, аналіз властивостей і розширення можливостей застосування кінематичних модулів складної конфігурації для моделювання процесів видавлювання; [6, 7, 12] – розробка розрахункових схем, аналіз процесів радіально-прямого видавлювання з обтисненням і роздачею; [4, 25, 29, 39] – дослідження напружено-деформованого стану, поетапного та граничного формоутворення, оцінка можливості дефектоутворення в процесах холодного видавлювання за базовими схемами та з декількома ступенями свободи течії; [26, 35 – 38] – пропонування основних ідей корисних моделей, розробка конструкцій штампів для процесів видавлювання порожнистих деталей; [5, 9, 14, 15] – розробка алгоритмів і методик проектування технологічних процесів точного об'ємного штампування видавлюванням на основі методу кінематичних модулів; [2, 8, 28, 30, 40] – аналіз впливу конфігурації інструменту на формоутворення та дефектоутворення в процесах осадження.

## АНОТАЦІЯ

Грудкіна Н. С. Розвиток енергетичних методів аналізу технологічних режимів та удосконалення процесів точного об'ємного штампування видавлюванням. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском (13 – Механічна інженерія). – Донбаська державна машинобудівна академія, Міністерство освіти і науки України, Краматорськ, 2021.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення ефективності процесів пластичного деформування на базі розвитку методів аналізу та проектування технологічних способів і режимів процесів точного об'ємного штампування (ТОШ) видавлюванням. В рамках розвитку енергетичного методу балансу потужностей розроблено кінематичні модулі, які дозволяють описати осередки деформації із криволінійними межами розділу течії металу всередині заготовки та враховують конструктивні особливості інструменту у вигляді складних елементів перехідних ділянок, в тому числі із заокругленням. Встановлено можливості використання швидкості течії металу у поздовжньому напрямку у якості варійованого кінематичних параметрів для визначення оптимального силового режиму, прогнозування формоутворення напівфабрикату та дефектоутворення у вигляді утягнення. Проведено теоретичний аналіз енергетичним методом балансу потужностей та методами скінчено-елементного аналізу і розроблено комплекс розрахункових моделей процесів комбінованого послідовного і суміщеного радіально-поздовжнього видавлювання, комбінованого осадження із порівнянням отриманих результатів із експериментально отриманими даними. Розроблено технологічні рекомендації з проектування процесів ТОШ видавлюванням згідно основних етапів розробки процесів на основі запропонованої систематизації кінематичних модулів та створеної бази розрахункових моделей.

Методики, результати теоретичних і експериментальних досліджень, технічні рішення та розроблені модулі програмної реалізації досліджуваних процесів передано на ряд підприємств та використовуються в навчальному процесі і в науково-дослідних роботах академії.

**Ключові слова:** енергетичний метод балансу потужностей, комбіноване видавлювання, кінематичний модуль, розрахункова модель, силовий режим, формоутворення, дефектоутворення.

## АННОТАЦИЯ

Грудкина Н. С. Развитие энергетических методов анализа технологических режимов и усовершенствование процессов точной объемной штамповки выдавливанием. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.05 – процессы и машины обработки давлением (13 – Механическая инженерия). – Донбасская государственная машиностроительная академия, Министерство образования и науки Украины, Краматорск, 2021.

Диссертация направлена на решение важной научно-технической проблемы повышения эффективности процессов пластического деформирования на базе развития методов анализа и проектирования технологических способов и режимов процессов точной объемной штамповки (ТОШ) выдавливанием. В рамках развития энергетического метода баланса мощностей разработаны кинематические модули, которые позволяют описать очаги деформации с криволинейными границами раздела течения металла внутри заготовки и учитывают конструктивные особенности инструмента в виде сложных элементов переходных участков, в том числе с закруглением. Установлены возможности использования скорости течения металла в продольном направлении в качестве варьируемого кинематического параметра для определения оптимального силового режима, прогнозирования формообразования полуфабриката и дефектообразования в виде утяжины. Проведен теоретический анализ энергетическим методом баланса мощностей и методами конечно-элементного анализа и разработан комплекс расчетных моделей процессов комбинированного последовательного и совмещенного радиально-продольного выдавливания, комбинированной осадки со сравнением полученных результатов с экспериментально полученными данными. Разработаны технологические рекомендации по проектированию процессов ТОШ выдавливанием согласно основных этапов разработки процессов на основе предложенной систематизации кинематических модулей и созданной базы расчетных моделей. Методики, результаты теоретических и экспериментальных исследований, технические решения и разработанные модули программной реализации исследуемых процессов переданы на ряд предприятий и используются в учебном процессе и в научно-исследовательских работах академии.

**Ключевые слова:** энергетический метод баланса мощностей, комбинированное выдавливание, кинематический модуль, расчетная модель, силовый режим, формообразование, дефектообразование.

## ABSTRACT

Hrudkina N. S. Development of energy methods for the analysis of technological modes and improvement the processes of precise volumetric stamping by extrusion. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.03.05 Processes and Machines of Plastic Working. – Donbass State Engineering Academy, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kramatorsk, 2021.

The dissertation is aimed at solving an important scientific and technical problem of improving the efficiency of plastic deformation processes on the basis of the development of analysis methods and design of technological methods and modes of precise volumetric stamping processes by extrusion. On the basis of the proposed systematization of kinematic modules of complex configuration, the directions of development of the energy method of power balance are determined. They consist in the development of kinematic modules that will allow you to simulate the flow of metal with a change of directions and take into account the design features of the tool in the form of complex elements of transition sections. The possibilities of the method of kinematic modules are developed due to the designing of kinematic modules of triangular and trapezoidal shapes, the features are identified and recommendations are given for the rationality of their usage.

The possibilities of using kinematic parameters as such that allow us to determine the optimal power mode, predict the formation of semi-finished products and defect formation in the form of a weight are established. Restrictions on the shapes of curves describing the inclined boundaries of kinematic modules of trapezoidal and triangular shapes and configurations of adjacent kinematic modules are revealed. To solve the problem of the impossibility of using a quarter of a circle as an inclined boundary for a kinematic trapezoidal module, it is proposed to use an approximate function whose deviations in the length of the arc and the area of the curved trapezoid do not exceed 0.8%. It significantly expands the possibilities of using the kinematic modules method for modeling processes with a complex tool configuration in the form of transition edges and rounding. It is established that the radius of rounding can be considered as a parameter for optimizing the shape of the tool to reduce the force parameters of the deformation process and as a factor for controlling the flow of metal in the processes of combined extrusion with several degrees of freedom of metal flow. The axial kinematic module of the trapezoidal shape is developed, which allows taking into account the taper of the contrapunch and considering the angle of inclination as a variable parameter, which optimizes the shape of the tool. The possibilities of predicting the appearance of sink mark in the bottom part of the billet up to the degeneration of the bottom thickness are expanded, which substantially increases the significance of the previously obtained results.

It is confirmed that the beginning of the formation of the sink mark corresponds to a change in the nature of the relative velocity of the metal flow with the presence of a minimum point and a rapid jump in the deformation force at the final stage of the deformation process, which is confirmed by experimental data and finite element modeling. A method of combined extrusion for the manufacture of hollow parts of a complex profile in detachable matrices is proposed. The expression of the reduced strain pressure of the design scheme is obtained at the second stage using a rectangular kinematic

module with two degrees of freedom of metal flow. This allowed us to obtain data on the evaluation of the optimal force mode of deformation from the parameter that determines the flow rate of the metal during direct extrusion for the formation of the process, as well as the formation of the semi-finished product and defect formation in the form of sink mark. The theoretical analysis is carried out by the energy method and the methods of finite element analysis and the set of mathematical models of the processes of combined and sequential radial-longitudinal extrusion, combined precipitation with a comparison of the obtained results with the experimentally obtained data is developed.

Technological recommendations for design of precise volumetric stamping processes by extrusion are developed in compliance with the main stages of process development on the basis of the proposed classification of kinematic modules and the created database of computational models. Methods, technical solutions, the results of theoretical and experimental research, the developed modules of the software implementation of the studied processes were transferred to a number of enterprises and are used in the educational process and in the research works of the Academy.

**Keywords:** power balance energy method, combined extrusion, kinematic module, computational model, power mode, shaping, defect formation.

Підп. до друку 01.04.2021. Формат 60 x 84/16. Ум. друк. арк. 2,2.  
Обл.вид. арк. 1,8. Тираж 130 пр. Зам. № 31.

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