

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3

Вібрації в техніці та технологіях



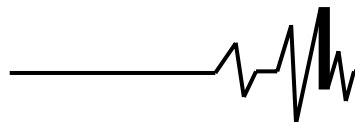
Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

Вібрації в техніці та технологіях

№ 3 (114)

Вінниця 2024

**ВІБРАЦІЇ В
ТЕХНІЦІ ТА
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального
спрямування Видавець: Вінницький національний
аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та
технологіях”

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової
інформації

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця, 2024. – 3 (114) – 119 с.

Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (протокол № 6 від 24.12.2024 р.)

Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 р. № 886)

Згідно рішення Національної ради України з питань телебачення та радіомовлення від 25.04.2024 р. № 1337 науковому журналу «Вібрації в техніці та технологіях» присвоєно ідентифікатор медіа R30-05172.

*- присвоєно ідентифікатор цифрового об’єкта (Digital Object Identifier – DOI);
- індексується в CrossRef, Google Scholar;
- індексується в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus Value з 2018 року.*

Головний редактор

Калетнік Г.М. – д.е.н., професор,
академік НААН України, Вінницький
національний аграрний університет

**Заступник головного
редактора**

Адамчук В.В. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Інститут механіки та
автоматики агропромислового виробництва
НААН України

Відповідальний секретар

Солона О.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Національний університет
біоресурсів і природокористування України

Деревенько І. А. – к.т.н., доцент,
Національний університет «Львівська
політехніка»

Купчук І.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Матвеев В.В. – д.ф.-м.н., професор,
академік НАН, Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Твердохліб І.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Цуркан О.В. – д.т.н. професор, Вінницький
національний аграрний університет

Яропуд В.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

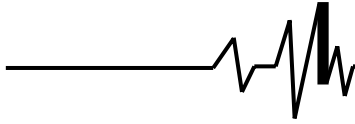
Зарубіжні члени редакційної колегії

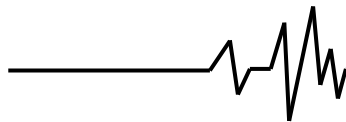
Максімов Джордан Тодоров – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

Технічний редактор **Замрій М.А.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний
університет, тел. 46 – 00– 03

Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/> Електронна адреса: vibration.vin@ukr.net

**З М І С Т****I. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН***Цуркан О.В., Спірін А.В., Руткевич В.С., Дідик А.М.***ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ В КОНВЕКТИВНО-ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ5***Головач І.В., Солона О.В., Мартиненко В.В.***МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ КОРЕНЕПЛОДУ БУРЯКА СТОЛОВОГО ПО СПІРАЛЯХ ВІБРАЦІЙНОГО ОЧИСНИКА.....13***Мельник В.М., Гнатейко Н.В., Бойко Г.В., Косова В.П.***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ НАЗЕМНОГО БАЗУВАННЯ20***Slipchenko M., Polievoda Y., Zamrii M., Symonik B.***STUDY OF GRAIN FLOW IN A CYLINDRICAL VIBRATING SIEVE.....27***Возняк О.М., Ярошенко Л.В., Луц П.М., Тихоненко С.В.***АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ АПК34****II. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА***Михайлевич В.М., Колісник М.А., Штуць А.А.***ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ФЛАНЕЦЬ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ СПОСОБІВ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ.....46***Shargorodskiy S., Halanskyi V.***DEVELOPMENT THE MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF STRIPED SOIL TREATMENT BY THE METHOD OF DISCRETE ELEMENTS.....58***Кондратюк Д.Г., Зозуляк І.А., Комаха В.П., Дмитренко В.П.***ВИТРАТИ ПОТУЖНОСТІ НА ПЛЮЩЕННЯ ТРАВИ ВАЛЬЦЬОВИМ ПЛЮЩИЛЬНИМ АПАРАТОМ66***Паладійчук Ю.Б., Стецюк П.М.***ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КУТА НАХИЛУ ГРАБЛИНИ ВІДНОСНО ВОРУШІННЯ І ЗГРІБАННЯ СІНА РОТАЦІЙНИМИ ГРАБЛИНАМИ.....74****III. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА***Цуркан О.В., Спірін А.В., Присяжнюк Д.В., Дідик А.М.***МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОЗОНУ ПРИ СУШІННІ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ У ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ83***Стаднік М.І., Бабин І.А., Луц П.М., Ріпа С.В.***АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИСТРОЇВ ДОЗУВАННЯ ТА ЗМІШУВАННЯ ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ.....90***Штуць А.А., Григоренко Н.В., Колісник М.А., Григоренко О.В.***АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ СПІРАЛЬНО-ГВИНТОВИМИ ТРАНСПОРТЕРАМИ.....97****IV. ДУМКА МОЛОДОГО ВЧЕНОГО***Лаверенюк П.П.***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ У КОНВЕКТИВНІЙ БУНКЕРНІЙ СУШАРЦІ.....111**

**Михалевич В.М.**

д.т.н., професор

Колісник М.А.

асистент

Штуць А. А.

к.т.н., ст. викладач

**Вінницький національний
аграрний університет.****Mikhalevich V.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Kolisnyk M.**

assistant

Shtuts A.

Ph.D., Senior Lecturer

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.77.01****DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-6****ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ
ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ФЛАНЕЦЬ НА
ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ
СПОСОБІВ КОМБІНОВАНОГО
ВИДАВЛЮВАННЯ**

Дослідження технологічних процесів штампування деталей типу фланець, зокрема із застосуванням комбінованого видавлювання, є надзвичайно актуальним у галузі матеріалознавства та машинобудування. Фланці відіграють важливу роль у різноманітних конструкціях і мають широке застосування в таких галузях, як авіаційна, автомобільна та енергетична промисловості. Їх використання обумовлене необхідністю забезпечення надійних з'єднань між елементами конструкцій, що вимагає високих стандартів якості та точності. Розробка нових методів штампування, що дозволяють виготовляти деталі з покращеною механічними властивостями та мінімальною кількістю дефектів, має велике значення для підвищення конкурентоспроможності продукції вітчизняного машинобудування.

Процеси комбінованого видавлювання, розглянуті у цій роботі, базуються на поєднанні об'ємного штампування та зворотнього видавлювання, що дозволяє досягти одночасного формування складних деталей з високою точністю та покращеною структурою матеріалу. Ця технологія забезпечує рівномірний розподіл напружень і деформацій, зменшуючи ризик виникнення внутрішніх дефектів, таких як порожнечі або тріщини, що критично важливо для виробництва деталей з високими вимогами до надійності та тривалості експлуатації. Оптимізація процесів штампування включає вибір матеріалів із заданими характеристиками, визначення оптимальної геометрії заготовок і режимів обробки, що дозволяє знизити витрати на виробництво та підвищити продуктивність.

Важливим аспектом дослідження є використання чисельного моделювання, яке дозволяє прогнозувати вплив технологічних параметрів на кінцеві властивості деталей. Моделювання дає можливість провести попередню оцінку процесів без проведення великої кількості дорогих експериментів, що скорочує час на впровадження нових технологій у виробництво та підвищує ефективність науково-дослідницької роботи.

Ключові слова: штампування, обкочування, деформовність матеріалу, моделювання процесів, аналіз технологічних параметрів.

Постановка проблеми. Основним із завдань машинобудування в сучасних умовах є випуск високоякісної продукції з мінімальними витратами. Реалізації цих вимог сприяє

застосуванню ресурсозберігаючих процесів виробництва, зокрема об'ємного штампування.

Вироби складної конфігурації широко поширені в промисловості та виготовляються поетапно способами об'ємного штампування, у



тому числі видавлюванням. Для цих процесів характерні високі питомі навантаження на інструмент та обмеження номенклатури виробів. Для зниження сили деформування при простому видавлюванні збільшують кількість переходів, знижують сили тертя та площу контакту інструменту із заготівлею. Крім того, для зниження сили деформування застосовують способи локального та комбінованого деформування.

Для деталей складної форми є перспективним спосіб комбінованого тристороннього видавлювання. Цей спосіб дозволяє значно знизити силу деформування і як наслідок збільшити стійкість інструменту. Також зменшується кількість переходів, завдяки чому зменшується кількість штампової оснастки та відповідно знижується собівартість продукції. Однак, незважаючи на переваги застосування цього способу в практиці штампувального виробництва, його практична розробка і освоєння вимагає значних витрат на технологічну підготовку, так як пошук раціональних режимів проведення технологічних операцій вимагає трудомістких експериментальних робіт з відпрацювання технологій. Це пов'язано з відсутністю технологічних рекомендацій і методик проектування та вибору технологічних режимів деформування з кількома етапами течії

матеріалу. Недолік таких рекомендацій відсутність таких розробок процесу видавлювання деталей типу втулок з фланцем і осьовим відростком. Тому існує необхідність проведення теоретичних та експериментальних досліджень для заповнення існуючої прогалини та створення науково-обґрунтованих методик проектування процесів видавлювання деталей даного типу способом комбінованого видавлювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток науки тісно пов'язане з підвищенням практичного використання її результатів у промисловому та господарському виробництві. Найважливішим фактором у вирішенні подібних завдань є розробка нових технологічних процесів, що дозволяють отримувати вироби високої якості із заданими експлуатаційними властивостями та з найменшими витратами на їх виробництво.

Значного розширення технологічних можливостей холодного штампування обкочуванням (ХШО) є розробка та впровадження процесів, що дозволяють суттєво зменшити силові характеристики за рахунок регулювання кінематики течії металу та його напруженого стану в порожнині штамп як при традиційних схемах ХШО, так і у комбінації з процесами з примусовою локалізацією осередку деформації.



Рис. 1. Класифікація способів видавлювання

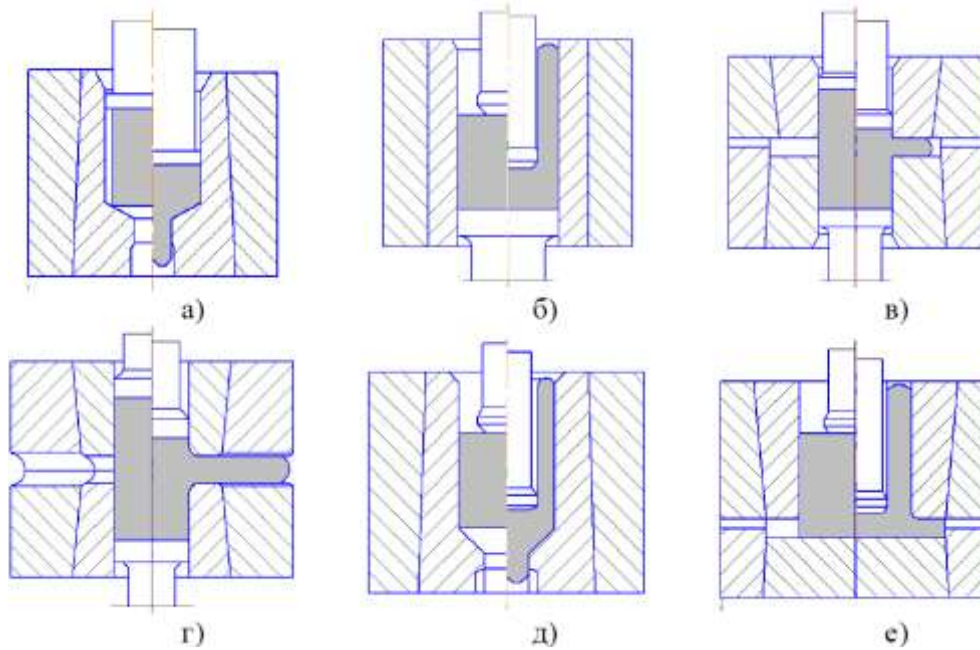


Рис. 2. Способи холодного видавлювання

(а - пряме; б - зворотне; в - поперечне (радіальне); г - поперечне (бічне); д - комбіноване (зворотно-пряме); е – комбіноване (радіально-зворотне)

Розширити номенклатуру деталей, що штамкуються та область застосування видавлювання можна, освоюючи способи, засновані на поєднанні прямого, зворотного і поперечного видавлювання. Для впровадження процесів штампування складних деталей необхідні розробка та широке застосування різних поєднаних та комбінованих процесів, способів та пристроїв для регулювання

кінематики плинину металу та його напруженого стану в штампі.

У роботі [1] досліджується метод верхньої оцінки несиметричних процесів комбінованого видавлювання. У даному дослідженні проводився аналіз полів швидкостей, які визначають штампувальні навантаження, довжину, що видавлюється, і швидкість розподілу металу по ходу течії в процесі комбінованого видавлювання (рис.3).

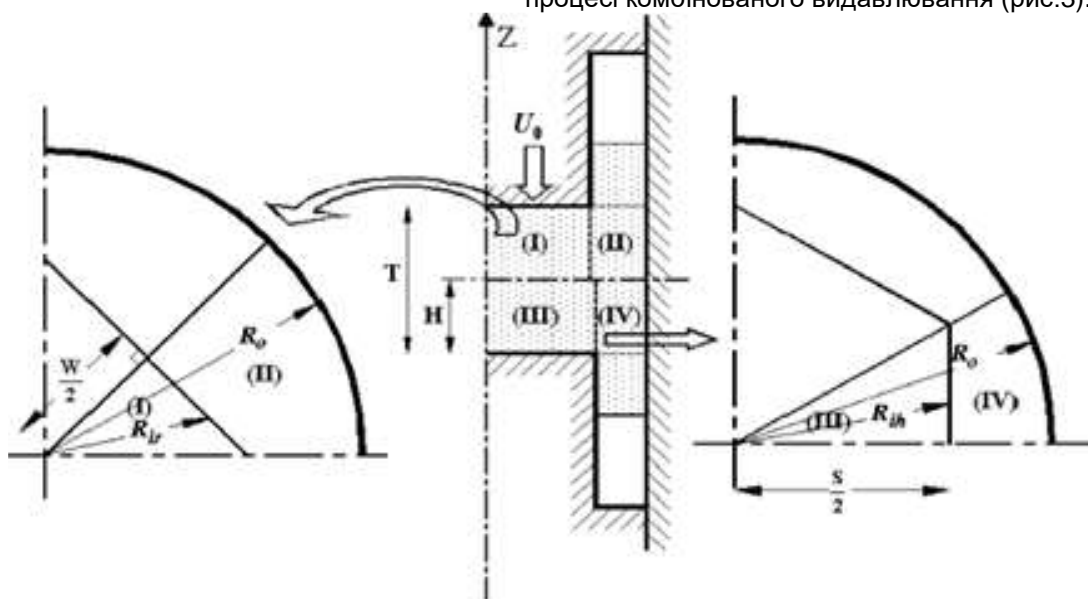


Рис. 3. Поле швидкостей під час видавлювання

Експеримент здійснювався на зразку свинець при кімнатній температурі (рис.4). Штампувальні навантаження і довжина, що

видавлюється, були порівняні між теорією і експериментом.

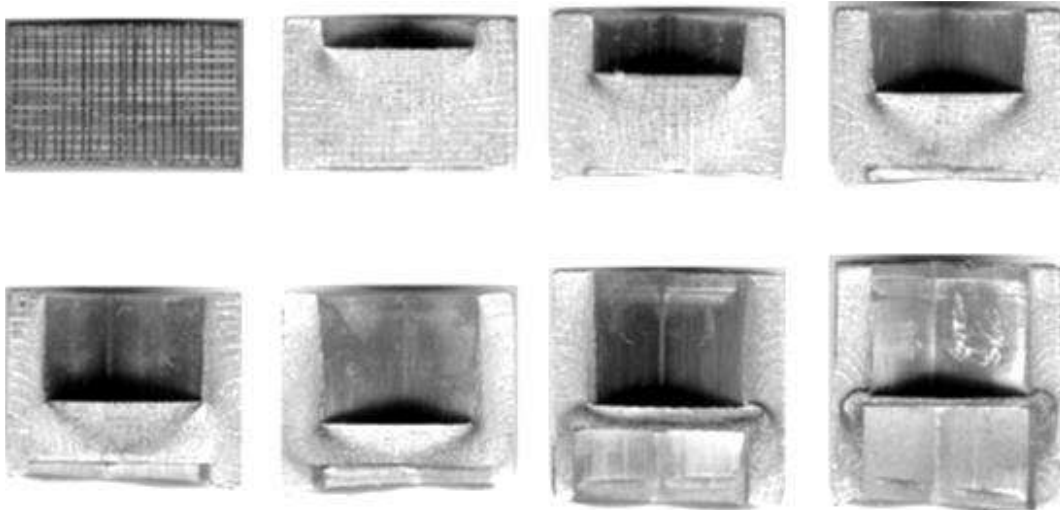


Рис. 4. Свинцева заготовка для експерименту

Левченко В. Н. у своїх дослідженнях проводить чисельне моделювання процесу комбінованого видавлювання, додатково здійснює розрахунки процесів прямого та зворотного видавлювання (рис.5). На основі енергетичного методу розроблено математичну модель процесу комбінованого видавлювання, що дозволяє визначити енергосилові параметри процесу як функції від основних параметрів [2].

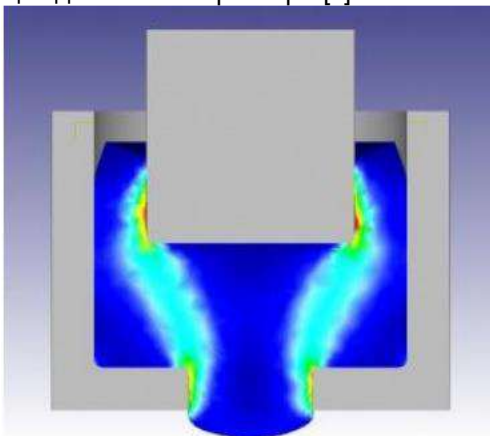


Рис. 5. Схема циклічного комбінованого видавлювання

У роботі [3] проведено моделювання методом кінцевих елементів процесу формоутворення заготовки типу втулка з комбінованим фланцем, за допомогою тристороннього видавлювання. Отримано залежності керування процесом комбінованого видавлювання за рахунок зміни геометрії робочого інструменту. Розроблено методику прогнозування дефекту металу та надано рекомендації щодо запобігання появи даного дефекту при комбінованому тристоронньому видавлюванні деталей типу втулка з фланцем.

Мета і задачі дослідження. Основною метою є розробка методів, що дозволять підвищити точність і якість виготовлення деталей типу

фланець, забезпечити рівномірний розподіл деформації, знизити сили деформування та мінімізувати кількість дефектів у готових виробах. Дослідження спрямоване на створення нових ефективних технологій штампування, які можуть бути застосовані в сучасному матеріалознавстві та машинобудуванні для підвищення економічності та якості виробництва.

Основні результати дослідження.

Одним з ефективних методів вирішення завдань пластичного деформування вважається енергетичний метод (ЕМ) основними перевагами якого є його гнучкість, оперативність, можливість ефективного застосування ЕМ для вибору відповідних функцій та параметрів, що варіюються, що описують кінематику течії [3, 4, 5].

Згідно з цим методом у деформованій заготовці виділяють ряд пластичних зон кінематичних елементів. Після чого для кожного елемента знаходять кінематично можливе поле швидкостей (КМПШ) та на його основі повну потужність деформування, спрощення якої дозволяє уточнити оцінки силового режиму та картину пластичного плину та оптимізувати параметри протікання процесу деформації.

$$v_z = c_1 \cdot z + c_2$$

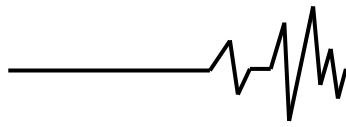
$$v_r = -\frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot r + \frac{c_3}{r} \quad (1)$$

де c_1, c_2, c_3 – шукані змінні.

Для вирішення завдання енергетичним методом необхідно розділити заготовку, що деформується, на кілька зон простої форми і визначити всі можливі потужності, що витрачаються на деформування заготовки [6, 7, 8]. Рівняння балансу потужностей виглядає так:

$$N_a = N_b + N_c + N_t \quad (2)$$

де N_a, N_b, N_c, N_t – потужності активних, деформуючих сил і сил зрізу та тертя.



Потужність активних сил:

$$N_d = \iiint_{V_d} \sigma_s \dot{\epsilon}_i dV_d \quad (3)$$

де N_d – потужність, що витрачається на деформування;

σ_s – інтенсивність напружень, МПа;

$\dot{\epsilon}_i$ – інтенсивність деформації;

V_d – об'єм деформування;

dV_d – нескінченно малий обсяг деформування.

Інтенсивність деформації:

$$\dot{\epsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2 + \dot{\epsilon}_z^2) + \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{rz}^2} \quad (4)$$

де

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{dV_z}{dz}, \dot{\epsilon}_r = \frac{dV_r}{dr}, \dot{\epsilon}_\theta = \frac{dV_\theta}{r}, \dot{\gamma}_{rz} = \frac{dV_r}{dr} + \frac{dV_z}{dr} -$$

швидкості лінійних та кутових деформацій.

При цьому має виконуватися умова стискання матеріалу:

$$\dot{\epsilon}_z + \dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\theta = 0 \quad (5)$$

Для виключення можливих розбіжностей при оцінці деформованості металів необхідно, щоб у досліджуваному технологічному процесі та експериментах щодо побудови діаграм пластичності дотримувалися умови ідентичності параметра Надаї-Лоде, що характеризує вид девіатора напруг:

$$\mu_\sigma = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 = \frac{2 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (6)$$

Залежність пластичності від схеми напруженого стану може бути описана шляхом побудови повної поверхні пластичності в координатах « $\epsilon_i - \eta - \mu_\sigma$ ».

Вибір та обґрунтування інваріантів напруженого стану при вирішенні завдань механіки матеріалів розглянуто у роботі А. А. Лебедева, В. М. Михалевича [9].

У роботі [10] запропоновано побудову поверхні пластичності в координатах « $\epsilon_i - \mu - \chi$ », де χ – показник, що враховує третій інваріант тензора напруг.

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3 \cdot I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3}}{\sigma_i} \quad (7)$$

Поверхня пластичності, побудована в координатах « $\epsilon_i - \mu - \chi$ », можна визначити як об'ємну діаграму пластичності.

У цій роботі експериментальні дослідження були проведені з метою отримання даних, що підтверджують адекватність обраних розрахункових схем та математичних моделей деформування, а також для отримання картини перебігу матеріалу з метою визначення зсувних деформацій, логарифмічних деформацій та інтенсивності деформацій за перерізом.

Для проведення експериментів було розроблено конструкцію універсального штампу (рис. 6) для комбінованого тристороннього видавлювання, а також було виготовлено набір оснастки, що складається з матриць, пуансонів, кілець, протипуансонів необхідних геометричних розмірів.

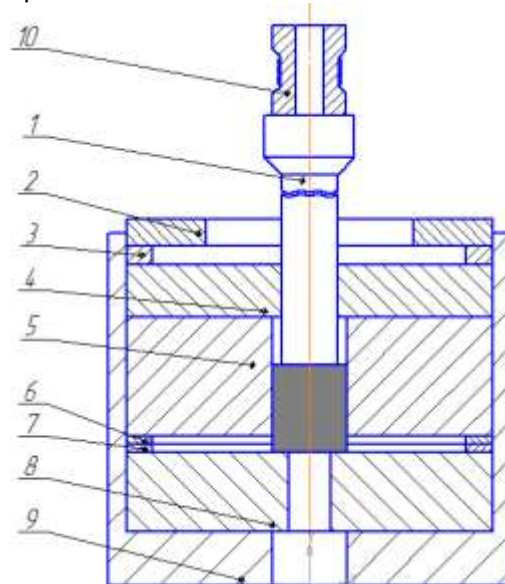


Рис. 6. Схема універсального штампу: 1 – пуансон, 2 – кришка, 3 – кільце, 4 – центруюче кільце, 5 – верхня матриця, 6,7 – півкільця, 8 – нижня матриця, 9 – контейнер, 10 – месдоза.

Для обліку зміцнення матеріалів АД31 використовувалися криві справжньої напруги, побудовані за результатами механічних випробувань на стиск циліндричних зразків (рис. 7). Апроксимація кривих зміцнення, наведених на рис. 7 проводилася статечним рівнянням $\sigma_s = Ce^n$. Значення опорів течії за певних ступенів деформації наведено у таблиці 1.

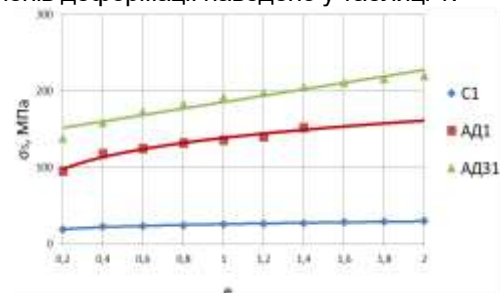


Рис. 7. Криві зміцнення для матеріалів які використовуються



Таблиця 1 - Значення опорів течії

ε	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
АД1	95	118	125	132	136	140	152	162	169	177
АД31	138	159	173	183	192	198	205	211	216	220
С1	19	22	23	24	25	26	27	28	29	30

При комбінованому тристоронньому видавлюванні спостерігається наявність двох осередків деформації з жорсткою зоною між ними, яка врівноважується показником, що залежить від геометричних параметрів та ступеня деформації λ [11]. Верхній осередок деформації, сформований зворотнім перебігом матеріалу, а нижній осередок деформації радіально-прямою течії [12]. Особливістю радіально-прямого видавлювання є наявність межі поділу течії матеріалу в двох напрямках, яка описується параметром, що варіюється - радіусом R_k .

Розглянуто завдання комбінованого тристороннього видавлювання у два етапи. Верхній осередок деформації є зворотним видавлюванням стакану (рис. 8).

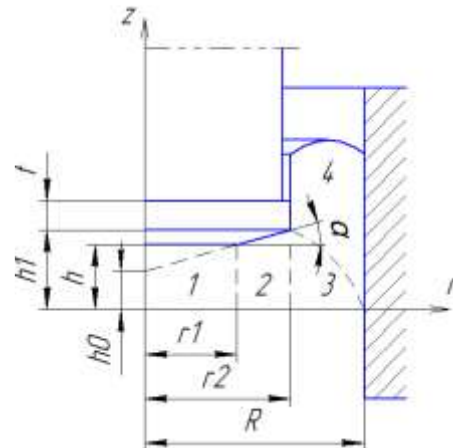


Рис. 8. Розрахункова схема зворотного видавлювання

Тиск видавлювання, з урахуванням фаски на пуансоні має вигляд:

$$\bar{P}_{звор.в} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{\mu \cdot r_2}{12 \cdot h} + \frac{h}{r_2} + \frac{R - r_2}{a} + 3 \cdot \mu + 0,226 + \frac{b}{r_2^2} \cdot \left(b \cdot \ln \frac{a}{h} - 0,5 \cdot r_2 \right) \cdot (8 \cdot \mu - 1,57) + \frac{2}{R^2 - r_2^2} \cdot \left[R^2 \cdot \ln \frac{R}{r_2} + 2 \cdot \mu \cdot t \cdot (R + r_2) + 2 \cdot a \cdot \left(\mu \cdot R + \frac{1}{3} \cdot \frac{R^3 - r_2^3}{R^2 - r_2^2} \right) \right] \right]$$

де

$$a = h + 0,134 \cdot r_2; \quad b = 3,73 \cdot h - 0,5 \cdot r_2.$$

Нижній осередок деформації включає наведений тиск нижнього осередку деформації зі схеми з прямолінійними блоками.

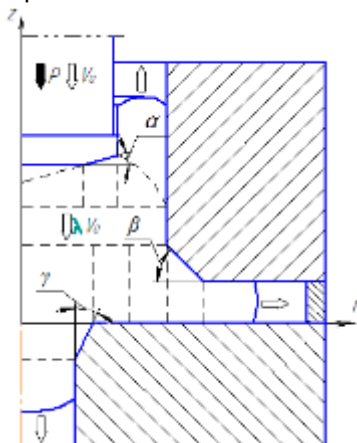


Рис. 9. Розрахункова схема комбінованого тристороннього видавлювання енергетичним методом із трапецеїдальними модулями

Загальна схема розбиття осередків деформації комбінованого тристороннього видавлювання із застосуванням трапецеїдальних модулів показано на рис. 9.

Графіки залежності наведеного зусилля від різних геометричних параметрів для схеми з трапецеїдальними модулями показані на рис. 10 мають схожий характер із графіками залежності для прямолінійних блоків [13].

У зв'язку із зменшенням ступеня деформації в зоні фланця та зменшенням тертя між фланцем та матрицею значення наведеного зусилля залежно від збільшення висоти фланця зменшуються, що показано на рис. 10 а.

А із збільшенням окружного ступеня деформації та збільшенням контактної поверхні тертя значення наведеного зусилля зростають залежно від відносного радіусу фланця (рис. 10, б).

При зміні відносного радіусу пуансона (рис. 10 в) значення зусиль зростають. Це пояснюється збільшенням поверхні тертя та



збільшенням ступеня деформації у зворотному перебігу матеріалу.

Для схем з кінематичними трапецеїдальними модулями, які враховують наявність фасок на перехідних кромках

інструменту, аналіз теоретичних даних показав аналогічний характер розподілу показників зусилля з відхиленням 7-10% у бік, що пов'язано зі збільшенням обсягів осередку деформації та зон зрізів на межах модулів.

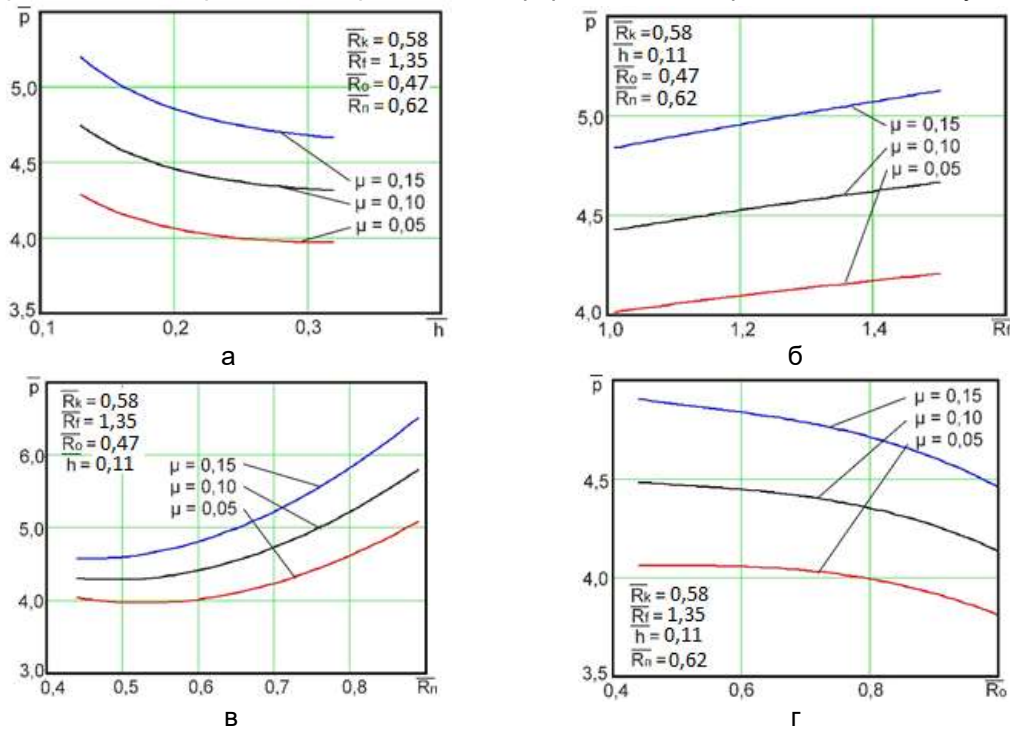


Рис. 10. Графіки залежності зусилля від відносної висоти фланця (а), від відносного радіусу фланця (б), від відносного радіусу пуансону (в) та від відносного радіусу відростка (г) при різних значеннях тертя μ схеми з трапецеїдальними модулями.

Поетапна зміна деформованого стану при видавлюванні порожнистих деталей з фланцем та осьовим відростком у пакеті «Deform-3d» наведено на рис. 11. З рисунка

видно, що найбільша деформація виникає біля краю нижньої напівматриці при отриманні відростка.

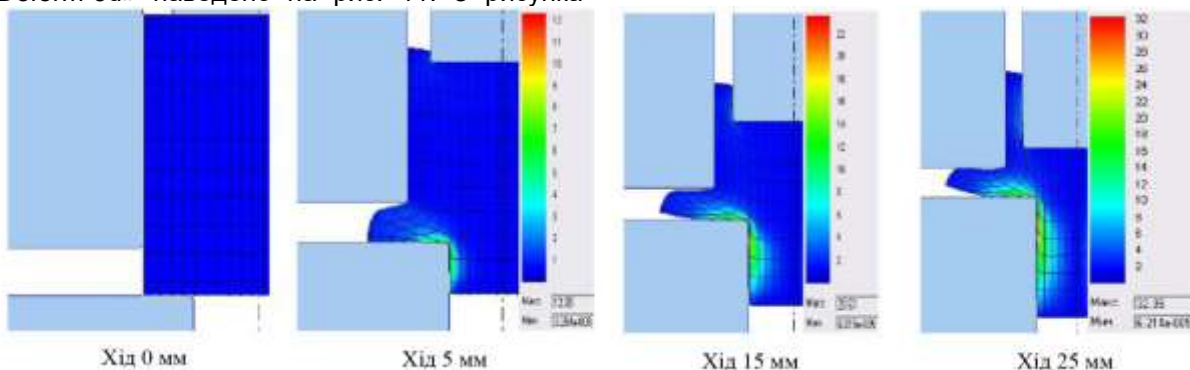


Рис. 11. Поетапна зміна деформованого стану при комбінованому тристоронньому видавлюванні деталей з фланцем та осьовим відростком у пакеті «Deform-3d»

На рис. 12 показано залежність зусилля деформування залежно від перебігу пуансону. Зниження зусилля пов'язане зі зменшенням

поверхні тертя при плинні металу у радіальному напрямку, а також з розшаруванням металу на периферійних ділянках фланця.

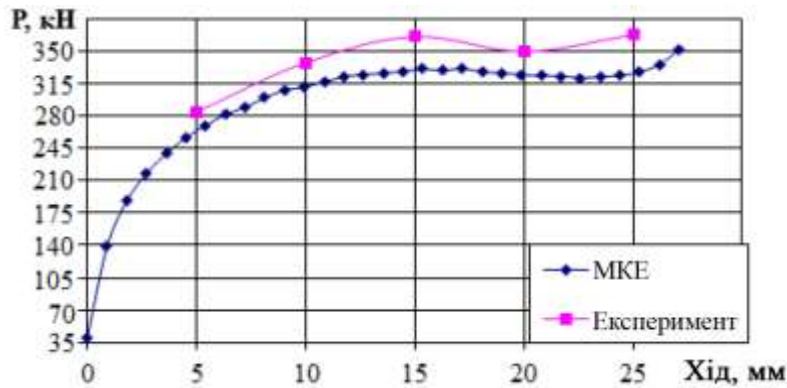
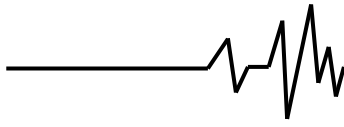


Рис. 12. Графік залежності зусилля деформування від ходу пуансона

На рис. 13 показано зменшення поверхні тертя. Можна відзначити, що в міру руху пуансона, поверхня контакту між заготовкою, що видавлюється, і нижньою напівматрицею зменшується.

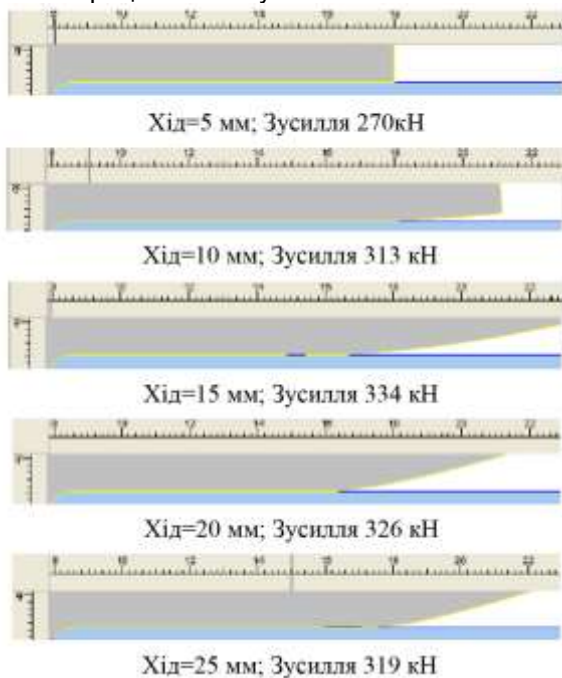


Рис. 13. Відхилення форми фланця в процесі деформування

На рис 14 показано залежність зусилля деформування від радіуса заокруглення кромки отвору нижньої напівматриці за різних коефіцієнтів тертя [14, 15]. З графіка можна побачити, що при збільшенні радіуса заокруглення зусилля деформування збільшується. Так як більший обсяг металу виявляється залученим до пластичної зони.

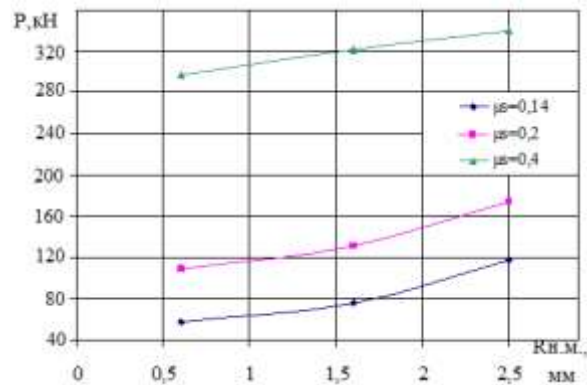


Рис. 14. Графік залежності зусилля деформування від радіуса заокруглення кромки отвору нижньої напівматриці за різних коефіцієнтів тертя

Для вирішення цієї проблеми було застосовано деформування зі зворотно-поступальним плином матеріалу до зони відростка.

Для підтвердження було проведено аналіз методом кінцевих елементів, який якісно підтвердив припущення (рис. 15).

Було проведено порівняльний аналіз процесів комбінованого двостороннього та тристороннього видавлювання. Для дослідження використовувалося програмне забезпечення Deform-3d [16, 17, 18]. Були розглянуті наступні схеми двостороннього видавлювання – зворотно-пряме, зворотно-радіальне, радіально-пряме та схема тристороннього видавлювання (рис. 16). Вихідні розміри заготовок приймалися діаметром 45 мм, висота 45 мм. Геометричні розміри інструменту всім схем деформування приймалися рівними: діаметр відростка 21 мм, висота фланця 5 мм і товщина стінки склянки 4,5 мм.

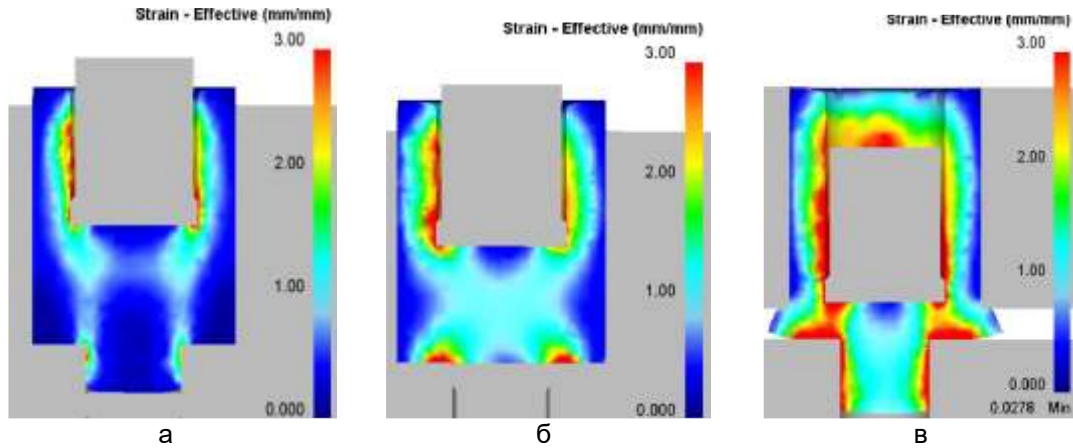


Рис. 15. Якісне опрацювання структури на основі запропонованого способу (а – перший етап; б – другий етап; в – тристороннє видавлювання)

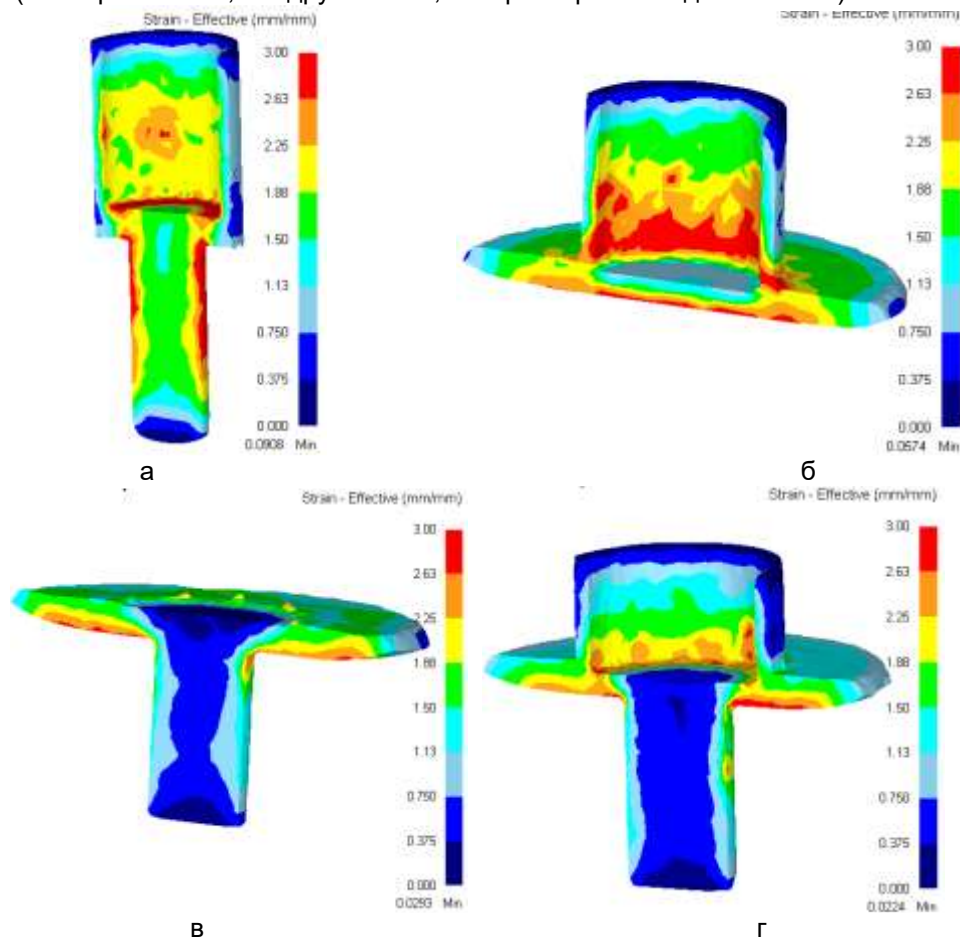
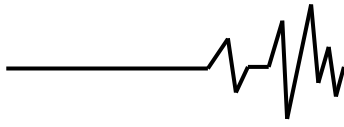


Рис. 16. Ступінь деформації при комбінованому видавлюванні:

а – обернено-прямє видавлювання; б - зворотно-радіальне видавлювання; в – радіально-прямє видавлювання; г – тристороннє видавлювання

На рис. 16 показано розподіл ступеня деформації за перерізом заготовки. Більш однорідне опрацювання матеріалу спостерігається при протіканні зворотно-прямого і радіально-зворотного видавлювання. При застосуванні комбінованого тристороннього способу деформування спостерігається більш якісне видавлювання фланцевої частини заготовки [20, 21, 22].

Висновки. Представлено детальне дослідження процесів штампування деталей типу фланець із застосуванням комбінованого видавлювання, що має важливе значення для сучасного машинобудування акцентовано увагу на актуальності дослідження, обумовленій зростаючими вимогами до якості продукції та необхідністю підвищення ефективності виробничих процесів. Фланці, як невід’ємні



елементи конструкцій у різних галузях промисловості, потребують застосування високоефективних технологій виробництва, які можуть забезпечити точність, механічну міцність і довговічність виробів.

Дослідження показує, що комбіноване видавлювання є перспективним методом, який дозволяє досягти високої якості виготовлених деталей. Основні переваги цього методу полягають у здатності виробляти складні деталі з рівномірним розподілом деформації по всьому об'єму, що значно підвищує надійність і стійкість до зносу. Це особливо важливо для виробництва деталей, які піддаються значним механічним навантаженням у процесі експлуатації.

Важливою складовою роботи є аналіз різних аспектів оптимізації процесу штампування обкочуванням, включаючи вибір матеріалів, геометричні параметри заготовок, режими термічної обробки та інші важливі технологічні параметри. Завдяки чисельному моделюванню вдалося передбачити вплив цих параметрів на кінцеві властивості деталей, що дозволило значно скоротити час і витрати на проведення експериментальних досліджень. Застосування чисельного моделювання відіграє ключову роль у розробці технологій штампування обкочуванням, які забезпечують стабільно високу якість продукції.

Також розглянуто використання енергетичного методу для аналізу процесів деформування, що дозволяє визначити кінематично можливі поля швидкостей і оптимізувати параметри деформації. Це підхід надає можливість більш точного контролю за процесом штампування і знижує ризик появи дефектів у готових виробах.

Список використаних джерел

1. Cho H. Y., Min G. S., Jo C. Y., Kim M. H. Process design of the cold forging of a billet by forward and backward extrusion. *J Mater Process Technol.* 2003. №135. P. 375–381.
2. Werner N. Einsatz der Massivumformung in der Automobilindustrie. *Umformtechnik.* 1992. № 26. P. 393–395.
3. Носаков А. А., Солодун Є. М., Алієва Л. І. Прогнозування дефектів типу усадки при штампуванні видавлюванням. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії та машинобудуванні.* 2002. С. 105-110.
4. Михалевич В. М., Матвійчук В. А., Колісник М. А. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому видавлюванні методом штампування обкочуванням. *Обробка матеріалів тиском.* 2022. № 1(51). С. 87-97.
5. Алієв І. С., Абхарі П. Б., Гончарук К. В. Визначення величини утяжини в процесі радіально-подовжнього видавлювання в роз'ємних матрицях. *Вісник Національного технічного*

університету "ХПІ": зб. наук. пр. 2014. № 44 (1087). С. 3-7.

6. Алієв І. С., Матвійчук В. А. Удосконалення процесу обтискання корпусу конденсатора обкаткою шляхом керування деформованістю матеріалу. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії.* 2007. № 3 (9). С. 7-12.

7. Дмитрієв А. М., Воронцов А. Л. Видавлювання порожнистих виробів з роздачею заготовлі в матриці, що рухається. *Вісник машинобудування.* 2004. № 10. С. 55-61.

8. Wang Z. Numerical simulation i experimental study на multistep psetting of thick and wide flange on the end of a pipe. *J. Mater. Process. Technol.* 2004. № 1 (3). P. 321-327.

9. Лебедев А. А., Михалевич В. М. Про вибір інваріантів напруженого стану при вирішенні завдань механіки матеріалів. *Проблеми міцності.* 2003. №3. С. 5-14.

10. Shtuts A, Kolisnyk M. Study of the influence of technological parameters on the mechanics of shaping of billets using roll stamping processes. *Agricultural Engineering.* 2022. Vol. 54, 62-72.

11. Bakhshi-Jooybari M., Saboori M., Hosseinipour S. J., Shakeri M., Gorji A. Experimental and numerical study of optimum die profile in backward rod extrusion. *Journal of Materials Processing Technology.* 2006. № 177. P. 596-599.

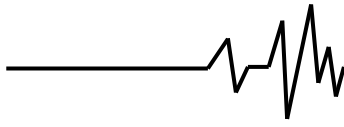
12. Алієва Л. І., Солодун Є. М., Гончарук Х. В., Шкіра О. В. Експериментальне дослідження деформованого стану комбінованого радіально-здовжнього видавлювання. *Вісник Херсонського національного технічного університету.* 2015. № 4 (55). С. 82–87.

13. Lebedev A. A., Mikhalevich V. M. On the Choice of Stress Invariants in Solving Problems of Mechanics : Strength of Materials N 35, *Plenum Publishing Corporation (USA),* May-June. 2003. P. 217-224.
<https://doi.org/10.1023/A:1024605520187>.

14. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation. *Key Engineering Materials. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering.* 2022. № 66 (1). P. 51–58.

15. Matviychuk V., Mikhalevich V., Shtuts A. Analysis of stress-strain state (sss) of billet material in the course of setting by resource-saving method of roll stamping. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2023. № 1 (108). С. 63-72. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-7
<http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/May2023/kVbXGt7oZFDiQXkau0n6.pdf>

16. Matviychuk V., Shtuts A. Construction of curve boundary deformations of metals. In: *Traditional and innovative approaches to scientific research: theory, methodology, practice: Scientific monograph:*



Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2022. P. 90-113. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-241-8-4>.

17. Matviychuk V. A., Aliyeva L. I. Development of technological process of flanges upsetting on tubular billets by face rolling. *Produkcyia i Zarzadzanie w Hutnictwie. XIV Miedzynarodowa Konferencya Naukowo-Techniczna : Politechnika Czestochowska*. Szczyrk 28 czerwca. 1 lipca. 2006. S. 132-136.

18. Mikhalevich V. M., Dobranuk Y. V., Kraevsky V. A., Mikhalevich O. V. Dependence of plastic ultimate strain from a friction at end faces at axisymmetric compression. *Bulet. Inst. Politehnic Din lasi Tomul LIV(LVIII)*, 2008. Fasc. 3-4. P. 49-53.

19. Mikhalevich V. M., Lebedev A. A. Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression. *Strength of Materials*. 2011. Vol. 43, No. 6. (1 October 2011), P. 591-603.

20. Кухар В. В., Бурко В. А. Зміщені обсяги при осаді циліндричних заготовок опуклими плитами. *Обробка металів тиском: збірник наукових праць. Краматорськ : ДДМА*. 2008. № 1. С. 177-182.

21. Матвійчук В. А., Штуць А. А., Явдик В. В., Розвиток технологічних можливостей процесів штампування обкочуванням. *Технічні науки: Збірник наукових праць. ВНАУ*. 2015. № 1 (89). С. 27-32.

22. Огородніков В. А., Грушко О. В., Гуцалюк О. В. Історія деформування, що визначає застосування феноменологічних критеріїв руйнування у процесах обробки тиском. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. № 1. С. 67-77.

References

1. Cho H. Y., Min G. S., Jo C. Y., Kim M. H. (2003). Process design of the cold forging of a billet by forward and backward extrusion. *J Mater Process Technol*. №135. P. 375–381. [in Netherlands].

2. Werner N. (1992). Einsatz der Massivumformung in der Automobilindustrie. *Umformtechnik*. № 26. P. 393–395. [in German]

3. Nosakov A. A., Solodun E. M., Aliyeva L. I. (2002). Prediction of shrinkage-type defects during extrusion stamping. *Improvement of pressure treatment processes and equipment in metallurgy and mechanical engineering*. P. 105-110. [in Ukrainian].

4. Myhalevich V. M., Matviychuk V. A., Kolisnyk M. A. (2022). Evaluation of the deformability of the material of the blanks during direct extrusion by the rolling stamping method. *Processing of materials by pressure*. № 1(51). P. 87-97. [in Ukrainian].

5. Aliyev I. S., Abhari P. B., Honcharuk K. V. (2014). Determination of the amount of gravity in the process of radial-longitudinal extrusion in detachable matrices. *Bulletin of the National Technical University*

"KhPI": coll. of science pr. №. 44 (1087). P. 3-7. [in Ukrainian].

6. Aliyev I. S., Matviychuk V. A. (2007). Improvement of the process of crimping the capacitor case by running in by controlling the deformability of the material. *Bulletin of the Donbas State Machine-Building Academy*. № 3 (9). P. 7-12. [in Ukrainian].

7. Dmitriev A. M., Vorontsov A. L. (2004). Extrusion of hollow products with distribution of the workpiece in a moving matrix. *Herald of mechanical engineering*. № 10. P. 55-61. [in Ukrainian].

8. Wang Z. (2004). Numerical simulation i experimental study на multistep psetting of thick and wide flange on the end of a pipe. *J. Mater. Process. Technol*. № 1 (3). P. 321-327. [in Netherlands].

9. Lebedev A. A., Mikhalevich V. M. (2003). On the selection of stress state invariants when solving problems of mechanics of materials. *Durability issues*. № 3. P. 5-14. [in Ukrainian].

10. Shtuts A, Kolisnyk M. (2022). Study of the influence of technological parameters on the mechanics of shaping of billets using roll stamping processes. *Agricultural Engineering*. Vol. 54, 62-72. [in Lithuania].

11. Bakhshi-Jooybari M., Saboori M., Hosseinipour S. J., Shakeri M., Gorji A. (2006). Experimental and numerical study of optimum die profile in backward rod extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*. № 177. P. 596-599. [in USA]

12. Aliyeva L. I., Solodun E. M., Honcharuk H. V., Shkira O. V. (2015). Experimental study of the deformed state of combined radial-longitudinal extrusion. *Bulletin of the Kherson National Technical University*. № 4 (55). P. 82–87. [in Ukrainian].

13. Lebedev A. A., Mikhalevich V. M. (2003). On the Choice of Stress Invariants in Solving Problems of Mechanics: *Strength of Materials N 35*, Plenum Publishing Corporation (USA), May-June. P. 217-224. [in USA].

14. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. (2022). Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. No. 66 (1). P. 51–58. [in Switzerland].

15. Matviychuk V., Mikhalevich V., Shtuts A. (2023). Analysis of stress-strain state (sss) of billet material in the course of setting by resource-saving method of roll stamping. *Vibrations in engineering and technology*. No. 1 (108). P. 63-72. [in Ukrainian].

16. Matviychuk V., Shtuts A. (2022). Construction of curve boundary deformations of metals. In: *Traditional and innovative approaches to scientific research: theory, methodology, practice: Scientific monograph: Riga, Latvia: Baltija Publishing*, P. 90-113. [in Latvia].

17. Matviychuk V. A., Aliyeva L. I. Development of technological process of flanges upsetting on tubular billets by face rolling. *Produkcyia i Zarzadzanie w Hutnictwie. XIV Miedzynarodowa*



Konferencya Naukowo-Techniczna: Politechnika Czestochowska. Szczyrk 28 czerwca. 1 lipca. 2006. P. 132-136. [in Poland].

18. Mikhalevich V. M., Dobranuk Y. V., Kraevsky V. A., Mikhalevich O. V. Dependence of plastic ultimate strain from a friction at end faces at axisymmetric compression. *Bulet. Inst. Politehnic Din Iasi Tomul LIV(LVIII)*, 2008. Fasc. 3-4. P. 49-53. [in Romania]

19. Mikhalevich V. M., Lebedev A. A. Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression. *Strength of Materials*. 2011. Vol. 43, № 6. (1 October 2011), P. 591 - 603. [in USA].

20. Kuhar V. V., Burko V. A. (2008). Displaced volumes during deposition of cylindrical blanks by convex plates. *Processing of metals by pressure: a collection of scientific papers*. Kramatorsk: DDMA. No. 1. P. 177-182. . [in Ukrainian].

21. Matviychuk V.A., Shtuts A.A., Yavdyk V.V., (2015). Development of technological capabilities of rolling stamping processes. *Technical sciences: Collection of scientific works*. VNAU.. No. 1 (89). P. 27-32. . [in Ukrainian].

22. Ogorodnikov V. A., Hrushko O. V., Gutsalyuk O. V. (2015). The history of deformation that you means the application of phenomenological criteria of destruction in pressure treatment processes. *Herald of mechanical engineering and transport*. No. 1. P. 67-77. . [in Ukrainian].

STUDY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF STAMPING OF FLANGE-TYPE PARTS BASED ON THE APPLICATION OF COMBINED EXPRESSION METHODS

The research of technological processes for stamping flange-type parts, particularly using combined extrusion methods, is a relevant direction in

the field of materials science and mechanical engineering. Flanges, as structural elements, are widely used in various industries, especially in mechanical engineering, where high quality requirements are imposed. Ensuring high quality and cost-effectiveness in production necessitates the development of effective stamping technologies that achieve the required mechanical properties and accuracy of the parts.

This paper examines the processes of combined extrusion, which integrate methods of bulk stamping and reverse extrusion. This approach allows for the simultaneous production of complex-shaped parts with enhanced accuracy and uniformity in the material structure. Such technologies ensure uniform deformation distribution and minimize the occurrence of defects, which is particularly important when manufacturing parts with high demands for reliability and durability.

Special attention is given to the optimization of the stamping process parameters, including the selection of suitable materials, geometric parameters of the workpieces, and processing modes. The use of numerical modeling made it possible to investigate the influence of these parameters on the final properties of the parts, thereby reducing the number of experiments and shortening the development time of new technologies. Additionally, the paper addresses the energy consumption of the process, tool wear resistance, and the influence of different technological modes on the material's microstructure. Thus, the research findings can be utilized to improve existing technologies and develop new methods for stamping flange-type parts, enhancing their market competitiveness and meeting the growing demands of modern production.

Key words: stamping, wrapping, material deformability, process modeling, analysis of technological parameters.

Відомості про авторів

Михалевич Володимир Маркусович – доктор технічних наук, професор, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: mykhalevych@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1557-7331>).

Колісник Микола Анатолійович – асистент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: kolisnik30@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5502-6556>).

Штуць Андрій Анатолійович – к.т.н, ст. викладач, кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Mykhalevych Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3 Solnechna St., Vinnitsa, 21008, e-mail: mykhalevych@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1557-7331>)

Kolisnyk Mykola – Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: kolisnik30@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5502-6556>).

Shtuts Andrii – Ph.D., Senior Lecturer., Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).