

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ
(ДДМА)

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Видається 2–3 рази на рік

Засновано у травні 2008 р.

№ 1 (51) 2022

Краматорськ
ДДМА
2022

**ОБРОБКА
МАТЕРІАЛІВ
ТИСКОМ****Збірник наукових праць
№ 1 (51) 2022**Засновник і видавець
**Донбаська державна
машинобудівна академія**
Свідцтво
про державну реєстрацію
серія КВ № 13770-2744Р
від 17.03.2008**MATERIALS
WORKING
BY PRESSURE****Collection of science papers
№ 1 (51) 2022**Founder and publisher
**Donbass State
Engineering Academy**
Registration certificate №
13770-2744Р dated
17.03.2008**ОБРАБОТКА
МАТЕРИАЛОВ
ДАВЛЕНИЕМ****Сборник научных трудов
№ 1 (51) 2022**Основатель и издатель
**Донбасская государственная
машиностроительная академия**
Свидетельство
про государственную регистрацию
серия КВ № 13770-2744Р
от 17.03.2008

Збірник «ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ = MATERIALS WORKING BY PRESSURE» включено до **Переліку наукових фахових видань України категорії «Б»** з технічних наук, за спеціальностями 131, 132 (наказ МОН України № 320 від 07.04.2022 р.).

Журнал включено до наукометричних баз, електронних бібліотек та репозитаріїв: National Library of Ukraine (Vernadsky), GoogleScholar, Crossref.

Рекомендовано до друку вченою радою Донбаської державної машинобудівної академії (протокол № 11 від 30.06.2022 р.).

Редакційна колегія:

Алієв І. С., д-р техн. наук, проф. (голова редакційної колегії); Таган Л. В., канд. техн. наук, (відповідальний секретар); Жбанков Я. Г., д-р техн. наук, доц. (заст. голови редакційної колегії); Грибков Е. П., д-р техн. наук, доц. (заст. гол. редакційної колегії); Абхари П., д-р техн. наук, проф.; Алієва Л. І., д-р техн. наук, проф.; Баглюк Г. А., д-р техн. наук, проф., член-кор. НАН України; Бейгельзімер Я. Ю., д-р техн. наук, проф.; Гогаєв К. О., д-р техн. наук, проф., член-кор. НАН України; Головка О. М., д-р техн. наук, проф. (Німеччина); Грушко О. В., д-р техн. наук, проф.; Дашіч П., д-р техн. наук, проф. (Сербія); Драгобецький В. В., д-р техн. наук, проф.; Каложний В. Л., д-р техн. наук, проф.; Кухар В. В., д-р техн. наук, проф.; Лежнев С. М., канд. техн. наук, проф. (Казахстан); Марков О. Є., д-р техн. наук, проф.; Міленін А. А., д-р техн. наук, проф. (Польща); Найзабеков А. Б., д-р техн. наук, проф. (Казахстан); Орлов Д. В., канд. техн. наук, проф. (Швеція); Приходько І. Ю., д-р техн. наук, ст. наук. співроб.; Розов Ю. Г., д-р техн. наук, проф.; Сивак Р. І., д-р техн. наук, доц.; Тараненко М. Є., д-р техн. наук, проф.; Тарасов О. Ф., д-р техн. наук, проф.; Титов В. А., д-р техн. наук, проф.; Тришевський О. І., д-р техн. наук, проф.; Фролов Я. В., д-р техн. наук, проф.

Відповідальний редактор випуску д-р техн. наук, проф. Алієв І. С.

Науковий редактор випуску д-р техн. наук, проф. Марков О. Є.

Обробка матеріалів тиском = Materials working by pressure: збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2022. – № 1 (51). – 242 с.

ISSN 2076-2151

У збірнику розміщено статті різних напрямків процесів і машин обробки матеріалів тиском, підготовлені професорсько-викладацьким складом, науковими співробітниками, аспірантами, здобувачами, фахівцями. Збірник призначений для наукових й інженерних працівників, аспірантів і студентів.

Different articles of various directions of processes and machines of materials forming, prepared by the faculty, scientific employees, post-graduate students, competitors, experts are placed in this collection. The collection is intended for scientific and engineering workers, post-graduate students and students.

Статті порецензовано членами редакційної колегії. Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

ISSN 2076-2151

© **Донбаська державна машинобудівна академія, 2022**

© **Donbass State Engineering Academy, 2022**

УДК. 621.7

DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)46

Калюжний В. Л.
Левченко В. М.
Ярмоленко О. С.
Таган Л. В.

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ НА ГАРЯЧЕ ЗВОРОТНЕ ВИДАВЛЮВАННЯ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ПОРОЖНИСТОГО ВИРОБУ

Моделюванням методом скінченних елементів вивчено вплив швидкості деформування на процес гарячого зворотного видавлювання з осаджуванням із високовуглецевої сталі осесиметричного порожнистого виробу з виступом на торці донної частини. Швидкість переміщення пуансону змінювалася від 50 до 400 мм/сек. Проведено розрахунковий аналіз процесів видавлювання з осаджуванням, процесів вилучення пуансонів із здеформованих заготовок та процесів виштовхування виробів із матриць. Встановлено залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансона, залежності зусилля вилучення пуансона від його зворотного переміщення і залежності зусилля виштовхування виробу з матриці від переміщення виштовхувача. За величинами нормальних напружень визначено розподіл питомих зусиль на торцях пуансона, виштовхувача та по висоті поверхні матриці. Збільшення швидкості деформування з 50 до 200 мм/сек призводить до суттєвого зниження зусилля деформування. Подальше зростання швидкості мало впливає величину зусилля. Наведено рекомендації щодо вибору пресового обладнання. Для кінцевої стадії видавлювання з осаджуванням показано розподіл температури, компонент напружень і деформацій в деформованому металі. Визначено температуру охолодження в шарах металу, розташованих поблизу контактуючих поверхонь. Встановлено кінцеві форма та розміри виробу. Для одержання рівного торця стінки необхідна додаткова операція його підрізання. Проробку структури металу пластичною деформацією оцінено за величиною інтенсивності деформацій у стінці та донній частині виробу. Одночасне формоутворення зворотним видавлюванням з осаджуванням призводить до більш інтенсивного пропрацювання структури металу пластичною деформацією і знижує нерівномірність інтенсивності деформацій по ширині стінки виробу.

Ключові слова: гаряче видавлювання з осаджуванням, порожній виріб, метод скінченних елементів, швидкість деформування, зусилля, температура, напруження, деформація.

Для виробництва осесиметричних порожнистих виробів різної форми та розмірів використовують процеси точного об'ємного штампування видавлюванням [1–4]. Процеси гарячого зворотного видавлювання достатньо добре описано в джерелі [5], в якому наведено рекомендації з проектування технології і штампового оснащення. В вищезгаданому джерелі мало інформації щодо впливу швидкості деформування на гаряче пластичне формоутворення та практично відсутні дані з проектування технології гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів із високовуглецевих сталей, зокрема із сталі AISI 1060.

В теперішній час виготовляється гідравлічне пресове обладнання з високою швидкістю деформування, яке при забезпечує якість і продуктивність виробництва. Тому актуальними задачами є визначення впливу швидкості деформування на параметри гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів [6–8]. Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) для визначення параметрів гарячого штампування дозволяє суттєво зменшити час та витрати на підготовку виробництва різноманітних виробів [9, 10]. Особливо високу ефективність має використання МСЕ для встановлення параметрів гарячого штампування виробів з необхідним пропрацюванням структури металу пластичною деформацією по всьому об'єму або в окремих частинах виробів [11]. Приклади забезпечення потрібного пропрацювання на конкретних деталях, в тому числі в порожнистих виробах із кольорових металів і сталей наведено в роботах [12, 13]. Таке пропрацювання призводить до отримання заданих згідно робочого креслення деталі механічних властивостей у здеформованому металі. Додатково збільшити пропрацювання структури металу можна застосовуючи формоутворення одночасним зворотним видавлюванням з осаджуванням. При цьому використовують вихідні заготовки меншого діаметру або квадратного перерізу та дещо знижується зусилля деформування.

Метою роботи є встановлення за допомогою методу скінченних елементів впливу швидкості деформування на параметри гарячого зворотного видавлювання з осаджуванням вісесиметричного порожнистого виробу із високовуглецевої сталі.

Розрахунковий аналіз проводили за допомогою моделювання з використанням скінченно-елементної програми DEFORM та циліндричної системи координат. Температура вихідної заготовки із сталі AISI 1060 діаметром $D_0 = 97$ мм і висотою $H_0 = 285$ мм становила 1000°C . Для вказаної сталі рекомендують температурний інтервал штампування у межах $1100\div 800^\circ\text{C}$. Швидкість деформування (швидкість переміщення пуансону) складала $V_0 = 50, 100, 150, 200, 300$ і 400 мм/сек. Тертя на контактуючих поверхнях враховували по Зібелю з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,25$. Розміри інструменту, що деформує, який вважався абсолютно жорстким і мав температуру 20°C , будуть представлені нижче. Процес формоутворення порожнистого виробу виконувався зворотним видавлюванням з одночасним осаджуванням заготовки.

Розрахункові положення деформуючого інструменту в розрізі на різних стадіях видавлювання з осаджуванням показано на рис. 1. Положення інструменту на початку видавлювання зображено на рис. 1,а. Вихідну заготовку 1 встановлено в матриці 2 на виштовхувачі 3. Виштовхувач 3 має на торці порожнину для отримання виступу на нижньому торці донної частини виробу. Деформування здійснюється пуансоном 4. Положення на проміжній стадії зображено на рис. 1,б. При опусканні пуансона 4 відбувається формоутворення порожнини і осаджування zdeформованої заготовки. При цьому висота заготовки спочатку зменшується і вона повністю заповнює матрицю по висоті.

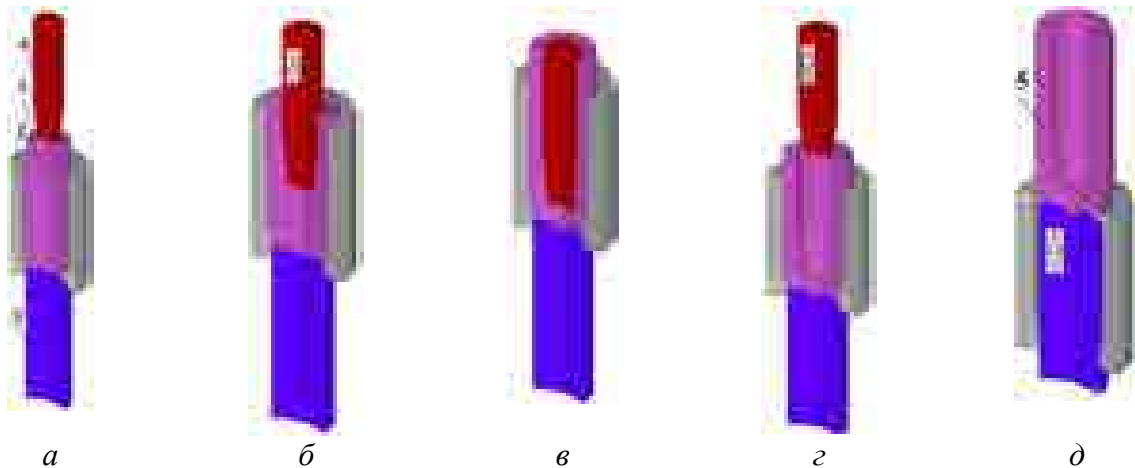


Рис. 1. Розрахункові положення в розрізі деформуючого інструменту при видавлюванні з осаджуванням:

а – на початку видавлювання, б – на проміжній стадії видавлювання, в – в кінці видавлювання, г – після виймання пуансона, д – після виштовхування виробу

Положення після виймання (вилучення) пуансону із zdeформованої заготовки наведено на рис. 1,г, а після виштовхування виробу 5 із матриці 2 – на рис. 1,д.

Силкові режими при видавлюванні з осаджуванням зі швидкістю деформування $V_0 = 50$ мм/сек наведено на рис. 2. На рис. 2, а зображено залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона. Графік зусилля має неусталену і усталену стадії. На неусталеній стадії зусилля інтенсивно зростає і сягає величини 2200 кН при переміщенні пуансону 170 мм. На усталеній стадії зусилля збільшується повільно та сягає максимального значення 2410 кН в кінці видавлювання при переміщенні пуансону 259 мм. Аналогічні залежності отримано для інших величин швидкостей деформування. Залежність максимальної величини зусилля видавлювання з осаджуванням від швидкості деформування V_0 показано на рис. 2, б. Із збільшенням величини швидкості з $V_0 = 50$ мм/сек до $V_0 = 200$ мм/сек зусилля деформування значно зменшується, а подальше зростання швидкості практично не впливає на величину зусилля. Така залежність пов'язана з охолодженням шарів металу zdeформованої заготовки, які контактують з деформуючим інструментом, про що буде сказано нижче.

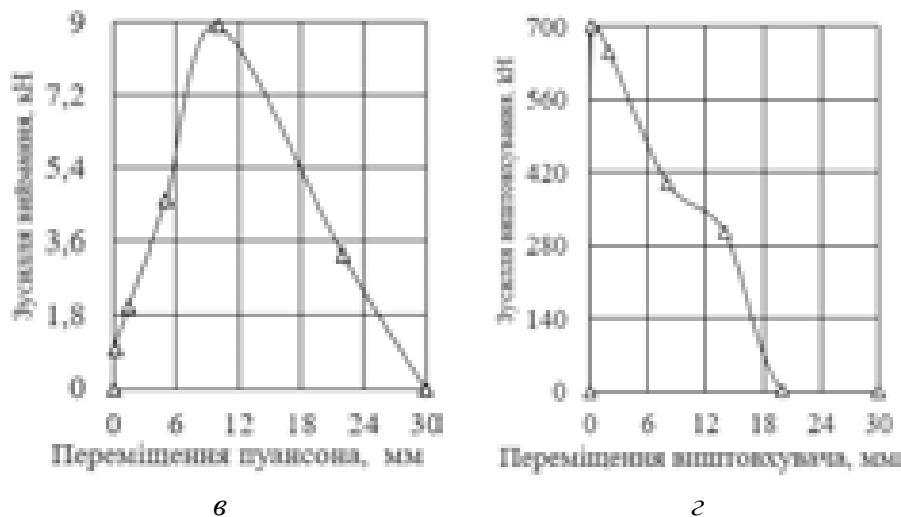
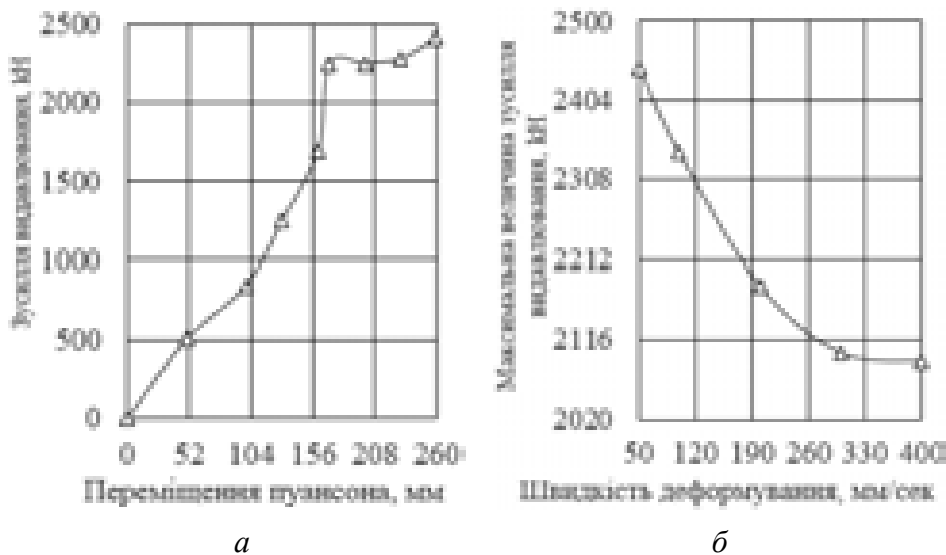


Рис. 2. Силкові режими при видавлюванні з осаджуванням: а – залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона, б – залежність максимальної величини зусилля видавлювання від швидкості деформування, в – залежність зусилля виймання пуансону із zdeформованої заготовки від його зворотного переміщення, г – залежність зусилля виштовхування виробу з матриці від переміщення виштовхувача

На рис. 2,в наведено залежність зусилля виймання пуансона із zdeформованої заготовки від його зворотного переміщення (див. рис. 1,г). Найбільша величина зусилля виймання склала 8,9 кН. Це приблизно складає 4 % від зусилля видавлювання з осаджуванням. Залежність зусилля виштовхування виробу з матриці від переміщення виштовхувача показано на рис. 2, г. Зусилля сягає максимальної величини 700 кН на початку виштовхування і дорівнює 29 % від максимальної величини зусилля видавлювання з осаджуванням. З урахуванням встановлених силкових режимів для реалізації процесу видавлювання з осаджуванням необхідно використовувати гідравлічний прес зусиллям 2,5 МН з величиною робочого ходу повзуна не менше 260 мм із зусиллям виштовхувача більшим за 700 кН та переміщенням його на меншим за 230 мм. При цьому, з урахуванням встановлених основних розмірів деформуючого інструменту (див. рис. 1) та необхідних підкладних плит і плит штампу, відкрита висота пресу повинна бути 1400 мм.



Рис. 3. Розподіли нормальних напружень

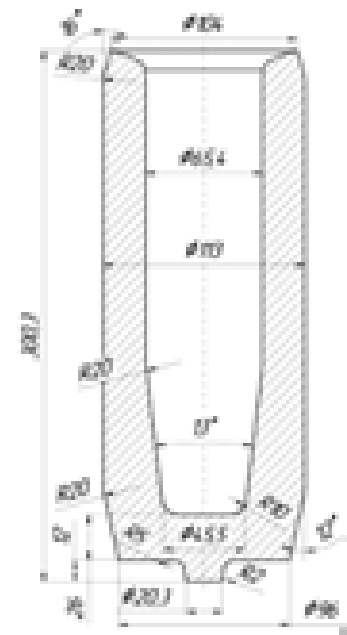


Рис. 4. Форма і розміри виробу

Для проектування штампового оснащення, крім зусилля виймання пуансона із здеформованої заготовки, потрібно знати розподіл питомих зусиль на контактних поверхнях заготовки з інструментом при максимальному значенні зусилля видавлювання з осаджуванням. Такий розподіл можна отримати по значенням нормальних напружень σ_n , які виникають на контактних поверхнях пуансона, матриці та виштовхувача. Розподіли напружень σ_n наведено на рис. 3. Тут і надалі показано половину здеформованої заготовки, тонкими лініями зображено інструмент, що деформує, а розміри по вісях наведено в міліметрах. На поверхні пуансону із здеформованою заготовкою величини таких напружень отримано у межах $\sigma_n = 690 \div 780$ МПа, на поверхні матриці – $\sigma_n = 140 \div 490$ МПа, а на поверхні виштовхувача – $\sigma_n = 490 \div 720$ МПа. При вказаних питомих зусиллях матриця може бути без бандажів.

Кінцеві форма і розміри виробу представлено на рис. 4. Розміри порожнини визначаються розмірами пуансона, розміри зовнішньої поверхні відповідають розмірам матриці, а розміри торця донної частини дорівнюють розмірам порожнини виштовхувача. На торці стінки виробу має місце утяжина зі сторони порожнини, а на боковій поверхні є певне відхилення від циліндричності. Для отримання рівного торця стінки необхідна додаткова операція його підрізки.

Розподіли температури $T(^{\circ}\text{C})$ по об'єму здеформованої заготовки в кінці видавлювання з осаджуванням зображено на рис. 5. При деформуванні зі швидкістю $V_o = 50$ мм/сек має місце інтенсивне охолодження здеформованого металу (рис. 5, а). В шарах металу стінки зі сторони порожнини температура отримана у межах $T = 700 \div 800$ $^{\circ}\text{C}$, а в шарах металу зі сторони бокової поверхні – $T = 610 \div 770$ $^{\circ}\text{C}$. Аналогічні величини температури отримано в зоні торця пуансону та поблизу поверхні виштовхувача. Тому при цій швидкості отримано максимальне зусилля деформування (див. рис. 2,б). В самій стінці і донній частині отримано $T = 930 \div 1000$ $^{\circ}\text{C}$. Збільшення швидкості деформування призводить до зменшення охолодження металу у шарах металу зі сторони порожнини та зі сторони бокової поверхні стінки, а також в зоні під торцем пуансону та біля контактної поверхні виштовхувача. При формоутворенні зі швидкістю $V_o = 100$ мм/сек (рис. 5,б) температура у стінці сягає $T = 940 \div 1000$ $^{\circ}\text{C}$. В шарах металу зі сторони порожнини отримано $T = 940$ $^{\circ}\text{C}$, а в шарах зі сторони бокової поверхні – $T = 740$ $^{\circ}\text{C}$. Таким чином, вказані шари металу деформуються в умовах напівгарячої деформації. Збільшення швидкості деформування до $V_o = 150$ мм/сек призводить до розширення області з температурою металу $T = 1000$ $^{\circ}\text{C}$ (рис. 5, в). Подальше зростання швидкості деформування забезпечує формоутворення виробів в умовах гарячої деформації, що показано на рис. 5, в–е. При цьому має місце незначне підвищення температури здеформованого металу за рахунок виділення тепла при пластичній деформації. Очевидно, що видавлювання з осаджуванням наступних заготовок в штампі призведе до розігріву інструменту, що деформує, та необхідності застосування для нього примусового охолодження.

Для розглянутих величин швидкостей деформування встановлено напружено-деформований стан металу в кінці видавлювання з осаджуванням. Розподіли осьових σ_z , радіальних σ_r , тангенціальних σ_{θ} та інтенсивності σ_i напружень при деформуванні зі швидкістю $V_o = 50$ мм/сек зображено на рис. 6. В осередку деформації під пуансоном та між конусною частиною пуансону і матрицею осьові σ_z (рис. 6,а), радіальні σ_r (рис. 6,б) і тангенціальні σ_{θ} (рис. 6, в) напруження є такими, що стискають, та суттєво зменшуються за абсолютною величиною у циліндричній частині стінки. У донній частині під торцем пуансона осьові напруження отримано у межах $\sigma_z = -360 \div -840$ МПа, радіальні – $\sigma_r = -380 \div -730$ МПа, тангенціальні – $\sigma_{\theta} = -370 \div -660$ МПа. При цьому вигляд розподілів для напружень σ_r і σ_{θ} практично однаковий. Осередок деформації охоплює всю донну частину здеформованої заготовки, що видно з розподілу інтенсивності напружень σ_i (рис. 6,г) В цій частині інтенсивність напружень отримано у межах $\sigma_i = 140 \div 165$ МПа.

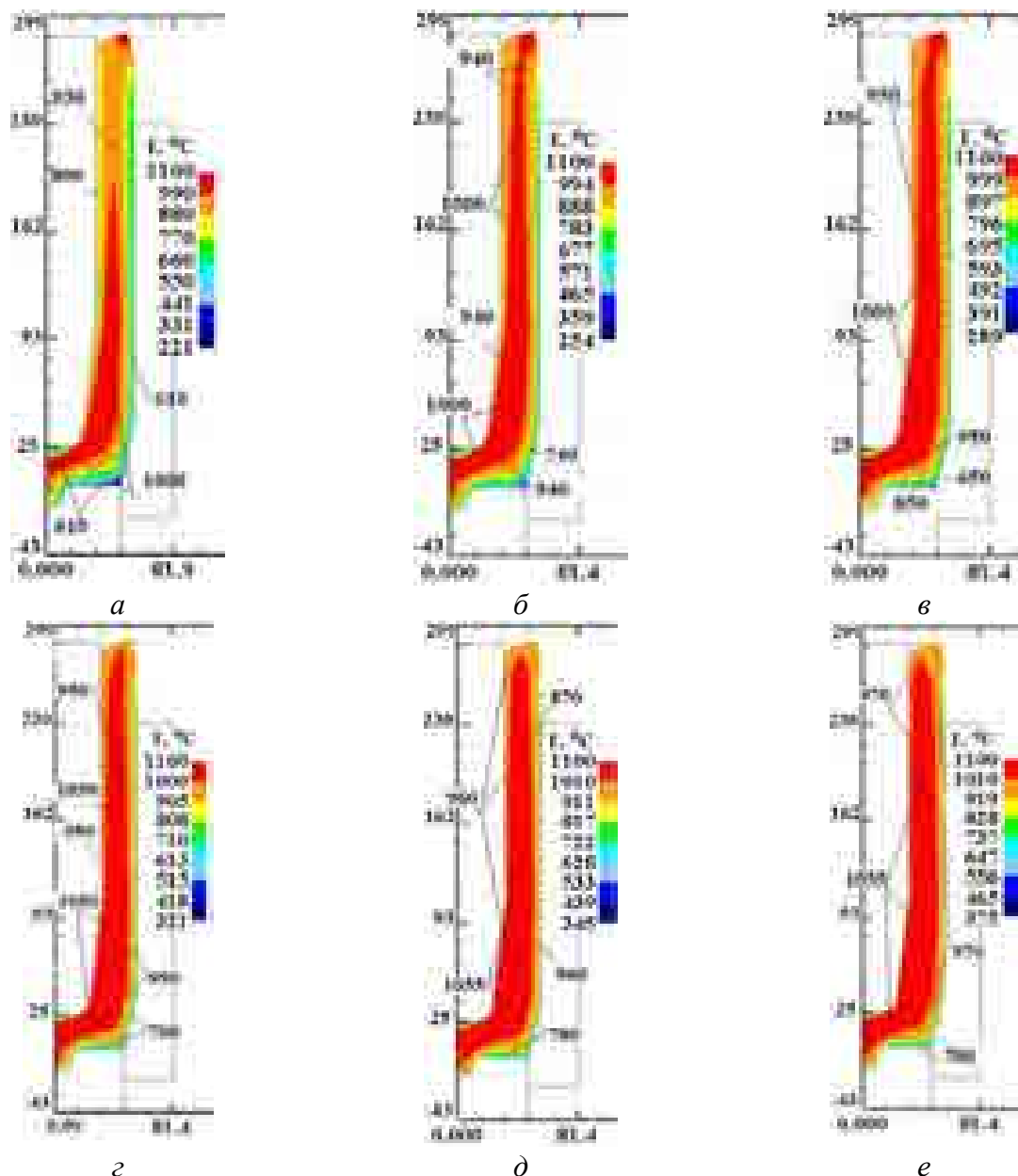


Рис. 5. Розподіли температури $T(^{\circ}C)$ у здеформованому металі в кінці видавлювання з осаджуванням із різними швидкостями деформування:

$a - V_0 = 50$ мм/сек, $б - V_0 = 100$ мм/сек, $в - V_0 = 150$ мм/сек, $г - V_0 =$ мм/сек, $д - V_0 = 300$ мм/сек, $е - V_0 = 400$ мм/сек

Розподіли кінцевих осьових ε_z , радіальних ε_r , тангенціальних ε_{θ} та інтенсивності ε_i деформацій представлено на рис. 7. У донній частині напівфабрикату безпосередньо під торцем пуансону виникають значні осьові деформації, що стискають, величиною у межах $\varepsilon_z = -0,6 \div -2,4$ (рис. 7, а). При формоутворенні виступу на донній частині ці деформації стають розтягувальними та сягають значень $\varepsilon_z = 0,4$. У шарах металу стінки зі сторони порожнини отримано $\varepsilon_z = -1$, а по товщині стінки виникають розтягувальні деформації ε_z . Радіальні деформації, що наведені на рис. 7, б, у циліндричній і конусній частинах стінки є стискаючими і сягають величини $\varepsilon_r = -0,88$ у шарах металу зі сторони порожнини та змінюються по товщині в напрямку бокової поверхні до величини $\varepsilon_r = -0,4$. В області донної частини поблизу вісі симетрії виникають розтягувальні радіальні деформації у межах $\varepsilon_r = 0,3 \div 0,8$. Тангенціальні деформації у стінці і у донній частині під торцем пуансону є також розтягувальними (рис. 7, в). При цьому у шарах металу стінки біля зовнішньої поверхні вони отримано величину $\varepsilon_{\theta} = 0,3$ з поступовим збільшенням до $\varepsilon_{\theta} = 1,2$ в шарах металу зі сторони порожнини. По об'єму донної частини ці дефо-

рмації отримано у межах $\varepsilon_\theta = 0,05 \div 1,6$, а у виступі донної частини такі деформації є стискаючими та сягають величини $\varepsilon_\theta = -0,14$. Пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією можна оцінити з розподілу інтенсивності деформацій ε_i , який наведено на рис. 7, г. По ширині циліндричної і конусної частин стінки має місце інтенсивне пропрацювання у шарах металу зі сторони порожнини ($\varepsilon_i = 1,2$) з подальшим зменшенням по ширині стінки до $\varepsilon_i = 0,43$ в шарах металу біля зовнішньої поверхні. Також інтенсивне пропрацювання відбувається в донній частині під торцем пуансона. Тут величини деформації знаходяться у межах $\varepsilon_i = 0,43 \div 2,1$. У виступі донної частини отримано $\varepsilon_i = 0,11 \div 0,37$. Формоутворення одночасним видавлюванням з осаджуванням призводить до більш інтенсивного пропрацювання структури металу в цілому та отримання більш рівномірного розподілу інтенсивності деформацій по ширині стінки виробу.

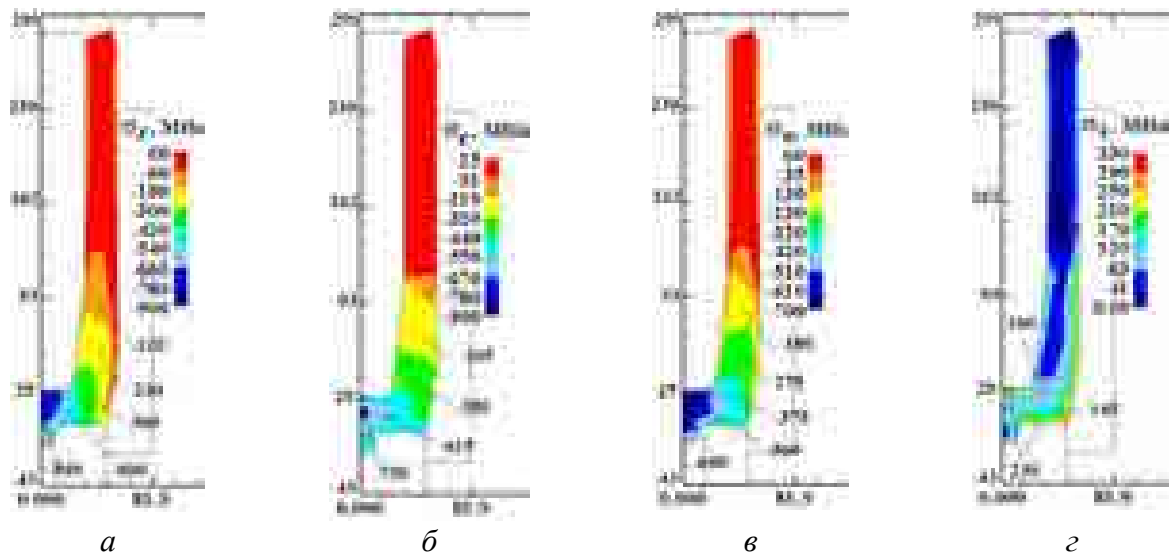


Рис. 6. Розподіли компонент напружень у здеформованій заготовці в кінці видавлювання з осаджуванням:

а – розподіл σ_z , б – розподіл σ_r , в – розподіл σ_θ , г – розподіл ε_i

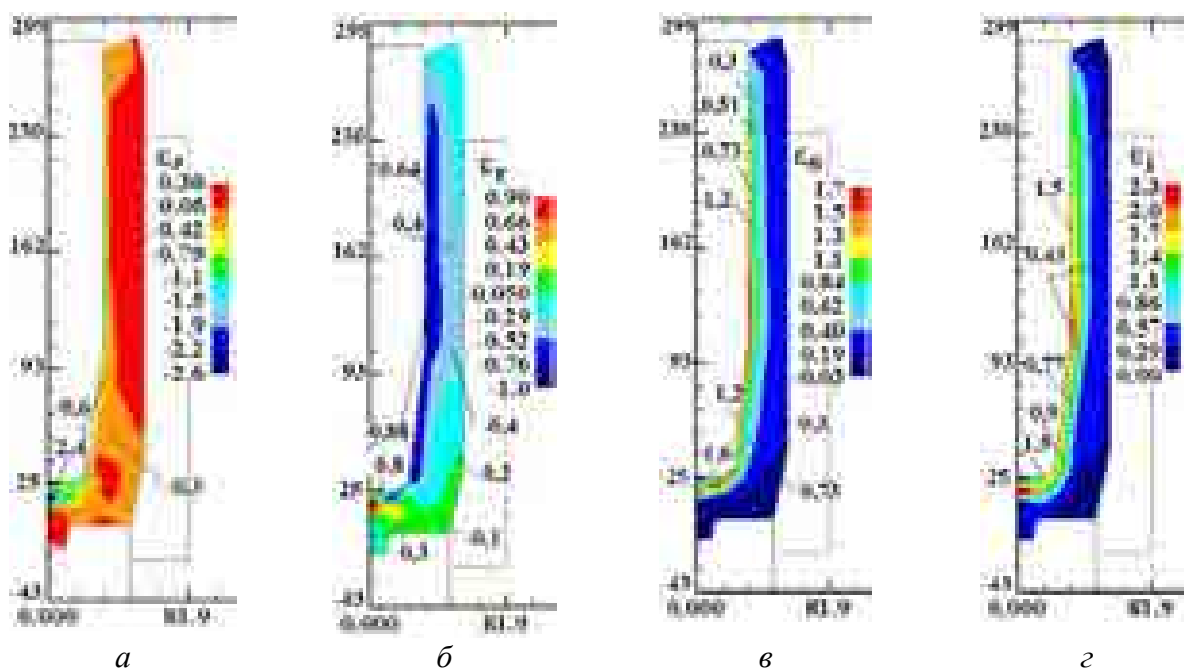


Рис. 7. Розподіли кінцевих осевих ε_z , радіальних ε_r , тангенціальних ε_θ та інтенсивності ε_i деформацій після видавлювання з осаджуванням:

а – розподіл ε_z , б – розподіл ε_r , в – розподіл ε_θ , г – розподіл ε_i

ВИСНОВКИ

Наведено результати скінченно-елементного моделювання по визначенню впливу швидкості деформування величиною 50, 100, 150, 200, 300 і 400 мм/сек на процес гарячого формоутворення одночасним зворотним видавлюванням з осаджуванням осесиметричного порожнистого виробу із високовуглецевої сталі. Встановлено силові режими вказаних процесів, розподіли питомих зусиль на інструменті, що деформує. Зростанням швидкості деформування з 50 до 200 мм/сек призводить до значного зменшення зусилля формоутворення. Подальше збільшення швидкості практично не впливає на величину зусилля. Для кінцевої стадії видавлювання з осаджуванням встановлено розподіли температури, компонент напружень і деформацій у металі здеформованої заготовки. Визначено температуру охолодження в шарах металу, розташованих поблизу контактуючих поверхонь з інструментом.

Встановлено кінцеві форма та розміри виробу. Для одержання рівного торця стінки необхідна додаткова операція його підрізання. Проробку структури металу гарячою пластичною деформацією оцінено за величиною інтенсивності деформацій у стінці та донній частині виробу. Одночасне формоутворення зворотним видавлюванням з осаджуванням призводить до більш інтенсивного пропрацювання структури металу пластичною деформацією і знижує нерівномірність інтенсивності деформацій по ширині стінки виробу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Aliev I. S. Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Metal Stamping Technology (English Translation of Kuznechno-Shtampovoychnoe Proizvodstvo)*. 1988. Part 3. pp. 54–61. ISSN: 0891-334x
2. Алиева Л. И. Совершенствование процессов комбинированного выдавливания: монография. Краматорск: ООО «Тираж - 51». 2018. 352 с. ISBN 978-966-379-846-2.
3. Bhaduri A. Extrusion. In: *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. Springer Series in Materials Science*. 2018. 264, pp. 599-646. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13
4. Алієв І. С., Грудкіна Н. С., Малій Х. В., Таган Л. В. Моделювання та розробка процесів точного штампування видавлюванням: монографія. Краматорськ : ДДМА. 2021. 210 с. ISBN 978-617-7889-08-2.
5. Ковка и штамповка: Справочник в 4-х. т. Москва: Машиностроение. 1986. Т.2. Горячая объемная штамповка. Под ред. Е. И. Семенова. 1986. 592 с.
6. Гусинский В. И., Мулин В. П., Новиков В. В. Влияние скорости деформирования на усилие холодного обратного выдавливания. В кн. *Совершенствование процессов и оборудования для холодного деформирования*. Воронеж: ЭНИКМАШ. 1978. С. 19–23.
7. Neugebauer R., Bouzakis K.-D., Denkena B., et al. Velocity effects in metal forming and machining processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011. 60, pp. 627–650.
8. Aliiev I., Kaliuzhnyi V., Levchenko V., Aliieva L. et al. The Determination of deformation velocity effect on cold backward extrusion processes with expansion in the movable die of axisymmetric hollow: *collective monograph "Mehatronics"*. Vol. II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, 2021, pp. 81–100. ISBN: 978-1-032-10585-7. DOI: 10.1201/9781003225447
9. Данченко В. Н., Миленин А. А., Кузьменко В. И. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы. Днепропетровск: Системные технологии. 2008. 448 с.
10. Kaliuzhnyi V. L., Aliieva L. I., Kartamyshev D. A., Savchinskii I. G. Simulation of cold extrusion of hollow parts, *Metallurgist*. 2017. 61. 5-6, pp. 359-365. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>
11. Алиев И. С., Жбанков Я. Г. Методы расчета процессов горячего пластического деформирования и совершенствование технологийковки крупных поковок: монография. Краматорск : ДДМА. 2020. 192 с. ISBN 978-966-379-910-0
12. Калюжный В. Л., Ярмоленко О. С., Малій Х. В. Гаряче штампування сталевих порожнистих виробів з інтенсивною пластичною деформацією стінки і донної частини. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА. 2020. 1 (50). С. 98–103.
13. Алієва Л. І., Калюжний В. Л., Картамішев Д. О., Моїсєєва А. М., Сивак Р. І. Дослідження напружено-деформованого стану порожнистих виробів при комбінованому видавлюванні з роздачею. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА, 2019. 2 (49). С. 14–22.

REFERENCES

1. Aliev I.S. Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Metal Stamping Technology (English Translation of Kuznechno-Shtampovoychnoe Proizvodstvo)*. 1988. Part 3. pp. 54–61. ISSN: 0891-334x
2. Aliieva L. I. Improvement of combined extrusion processes: monograph. Kramatorsk: LLC "Tiraj – 51". 2018. 352 p. ISBN 978-966-379-846-2. (in Russian).

3. Bhaduri A. Extrusion. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. *Springer Series in Materials Science*. 2018. 264, pp. 599-646. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13
4. Aliiev I.S., Hrudkina N.S., Malii Kh.V., Tahan L.V. Modeling and development of the processes of precise volumetric stamping for various purposes: monograph. Kramatorsk: DSEA, 2021. 210 p. ISBN 978-617-7889-08-2 (*in Russian*).
5. Forging and stamping. Handbook. In 4 t., T. 2. Hot stamping. Ed. Semenov E.I. Moscow: Mechanical Engineering. 1987. 592 p. (*in Russian*).
6. Gusinsky V.I., Mulin V.P., Novikov V.V. Influence of the strain rate on the force of cold reverse extrusion. In book. Improvement of processes and equipment for cold deformation. Voronezh: ENIKMASH. 1978, pp. 19-23. (*in Russian*).
7. Neugebauer R., Bouzakis K.-D., Denkena B., et al. Velocity effects in metal forming and machining processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011. 60, pp. 627-650.
8. Aliiev I., Kaliuzhnyi V., Levchenko V., Aliieva L. et al. The Determination of deformation velocity effect on cold backward extrusion processes with expansion in the movable die of axisymmetric hollow: collective monograph "Mehatronics". Vol. II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, 2021, pp. 81-100. ISBN: 978-1-032-10585-7. DOI: 10.1201/9781003225447
9. Danchenko V.N., Milenin A.A., Kuzmenko V.Y. Computer design of processes of treatment of metals pressure. Numeral methods. Dnipropetrovsk: System technologies. 2008. 448 p. (*in Russian*).
10. Kaliuzhnyi V. L., Aliieva L. I., Kartamyshev D. A., Savchinskii I. G. Simulation of cold extrusion of hollow parts, *Metallurgist*. 2017. 61. 5-6, pp. 359-365. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>
11. Aliiev I.S., Zhabankov Ya.G. Methods for calculating the processes of hot plastic deformation and improving the technology of forging large forgings: a monograph. Kramatorsk: DDDMA. 2020. 192 p. ISBN 978-966-379-910-0 (*in Russian*).
12. Kaliuzhnyi V. L., Yarmolenko O. S., Malii Kh. V. Hot stamping of steel empty molds with intense plastic deformation of the wall and bottom part. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2020. 1 (50), pp. 98-103. (*in Russian*).
13. Aliieva L. I., Kaliuzhnyi V. L., Kartamyshev D. O., Moiseeva A. M., Sivak R. I. Follow-up of a stress-strained mill of empty bins with a combined type of injection with distribution. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2019. 2 (49), pp. 14-22. (*in Russian*).

Kaliuzhnyi V. L., Levchenko V. M., Yarmolenko O. S., Tahan L. V. The influence of the deformation rate on the hot extrusion of axisymmetric hollow product

The influence of the deformation rate on the process of hot backward extrusion with a setting made of high-carbon steel of an axisymmetric hollow product with a projection on the end of the bottom part was studied using finite element modeling. The speed of movement of the punch varied from 50 to 400 mm/sec. A computational analysis of the processes of extrusion with setting, the processes of extracting punches from deformed workpieces and the processes of pushing products out of dies was carried out. The dependence of the force of extrusion vs the movement of the punch, the dependence of the force of extraction of the punch vs its reverse movement and the dependence of the force of pushing the product out of the die vs the movement of the knock-out are established. The distribution of specific forces on the ends of the punch and the knock-out and along the height of the die surface are determined by the values of the normal stresses. Increasing in the rate of deformation from 50 to 200 mm/sec leads to a significant decreasing the force of deformation. Further growth of speed practically does not affect the amount of force. Recommendations for choosing press equipment are given. For the final stage of extrusion with setting, temperature distributions, the stress component and deformations in the deformed metal are shown. The cooling temperature in the metal layers located near the contacting surfaces, is determined. The final shape and dimensions of the product are established. To obtain a smooth end of the wall, an additional operation of cutting it is necessary. The processing of the metal structure by plastic deformation is estimated by the magnitude of the intensity of the deformations in the wall and the bottom part of the product. Simultaneously forming by backward extrusion with setting leads to more intensive processing of the metal structure by plastic deformation and reduces the unevenness of the intensity of deformations along the width of the product wall.

Key words: hot extrusion with setting, hollow product, finite element method, deformation rate, force, temperature, stress, deformation.

Калиужный В. Л., Левченко В. Н., Ярмоленко А. С., Таган Л. В. Влияние скорости деформирования на горячее выдавливание осесимметричного полого изделия

Моделированием методом конечных элементов изучено влияние скорости деформирования на процесс горячего обратного выдавливания с осадкой из высокоуглеродистой стали осесимметричного полого изделия с выступом на торце донной части. Скорость перемещения пуансона изменялась от 50 до 400 мм/сек. Проведен расчетный анализ процессов выдавливания с осадкой, процессов извлечения пуансонов из деформированных заготовок и процессов выталкивания изделий из матриц. Установлены зависимости усилия выдавливания, от перемещения пуансона, зависимости усилия извлечения пуансона от его обратного перемещения и зависимости усилия выталкивания изделия из матрицы от перемещения выталкивателя. По величинам нормальных напряжений определены распределения удельных усилий на торцах пуансона, выталкивателя и по высоте поверхности матрицы. Увеличение скорости деформирования с 50 до 200 мм/сек приводит к существенному снижению усилия деформирования. Дальнейший рост скорости практически не влияет на величину усилия. Приведены рекомендации по выбору прессового оборудования. Для конечной стадии выдавливания с осадкой показаны распреде-

ления температуры, компонент напряжений и деформаций в деформированном металле. Определена температура остывания в слоях металла, расположенных вблизи контактирующих поверхностей. Установлены конечные форма и размеры изделия. Для получения ровного торца стенки необходима дополнительная операция его подрезки. Проработка структуры металла пластической деформацией оценена по величине интенсивности деформаций в стенке и донной части изделия. Одновременное формообразование обратным выдавливанием с осадкой приводит к более интенсивной проработке структуры металла пластической деформацией и снижает неравномерность интенсивности деформаций по ширине стенки изделия.

Ключевые слова: горячее выдавливание с осадкой, полая заготовка, метод конечных элементов, скорость деформирования, усилие, температура, напряжение, деформация.

Калюжный Владимир Леонидович – д-р техн. наук, профессор НТУУ

Kaliuzhnyi Vladymyr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor of NTUU

Калюжный Володимир Леонідович – д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

E-mail: kwl_2011@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4904-8879>

Левченко Владимир Николаевич – канд. техн. наук, мл. науч. сотр. ИРЭ им. А. Я. Усикова НАНУ

Levchenko Volodymyr – Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher of Ya. Usikov IRE of NASU

Левченко Володимир Миколайович – канд. техн. наук, мол. наук. співроб. ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАНУ

E-mail: goldangel271@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2411-4198>

Ярмоленко Александр Сергеевич – аспирант НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»

Yarmolenko Oleksandr – aspirant of NTUU

Ярмоленко Олександр Сергійович – аспірант НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

E-mail: olesboxme@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6568-4963>

Таган Любовь Викторовна – канд. техн. наук, ст. препод. ДГМА

Tahan Liubov – PhD, Senior Lecturer of DSEA

Таган Любов Вікторівна – канд. техн. наук, ст. викл. ДДМА

E-mail: l.vik.tagan@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7628-2142>

НТУУ – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

NTUU – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky», Kyiv

НТУУ – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАНУ – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків

Ya. Usikov IRE of NASU – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

ИРЭ им. А. Я. Усикова НАНУ – Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова Национальной академии наук Украины, г. Харьков

Статья поступила в редакцию 13.05.22 г.

РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ КРИВИХ ДЕФОРМУВАННЯ ВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З МЕТАЛЕВОЮ МАТРИЦЕЮ

Розроблено метод побудови кривих деформування металевих композиційних матеріалів (КМ), які зміцнені безперервними круглими волокнами. Метод враховує механічні властивості структурних компонент (волокна і матриці), їх розміри та взаємне положення в КМ. Враховуючи ортотропність властивостей, метод розповсюджується на деформування волокнистих КМ в умовах лінійного навантаження (розтяг або стиск) в площинах, що перпендикулярні напрямку волокон.

Аналіз процесу деформування волокнистих КМ показує, що при деформуванні виникає суттєва нерівномірність деформації пластичної матриці. Так, оцінка деформування КМ системи АІ-В показує, що при зміні кроку волокон в межах 0,16 – 0,24 мм та діаметрі волокон 0,14 мм величина межі пропорційності композиту становить 0,12 – 0,42 від межі пропорційності матриці.

Отримані залежності, що дозволяють розраховувати криві деформування металевих композитів в пружнопластичній області на основі властивостей матеріалу матриці. Отримані криві деформування для типових КМ систем АІ-В для деформацій до 0,5 – 0,6%.

Метод може бути ефективним для прогнозування пластичних властивостей при проектуванні структури нових КМ.

Ключові слова: волокнисті композиційні матеріали, криві деформування, металева матриця, волокно, деформації, напруження.

Для розрахунку процесів пластичного формоутворення конструкцій необхідно знати механічні властивості волокнистих композиційних матеріалів (КМ) на металевій матриці (ВМКМ). Основним показником наряду з модулем пружності та границею міцності являється діаграма деформування у вигляді залежності напруження σ від деформації ϵ . Як показано в роботах [1, 2, 3] механічні властивості ВМКМ часто визначають експериментально. Однак, враховуючи невеликий ступінь пластичної деформації до руйнування (0,5 – 0,6%) [4], експериментальні методи мають багато недоліків пов'язаних з використанням спеціальних тензометричних методів та виміром малих величин деформації в широкому діапазоні напружень.

Тому актуальними являються роботи присвячені аналітичному розрахунку кривих деформування ВМКМ в пружнопластичній області.

Метою роботи є розробка методу побудови кривих деформування металевих КМ, які зміцнені круглими волокнами, на основі властивостей структурних компонент (матриці і волокна), їх розмірів та взаємного положення в КМ.

В роботі розглянутий аналітичний метод побудови кривої деформування ВМКМ при випробуваннях на одновісний стиск або розтяг. При цьому вважаємо, що пластичні деформації ВМКМ можуть розвиватися в площині, що перпендикулярна напрямку волокон відносно деформованого стану приймаємо наступні припущення:

1. Деформації вздовж осі волокон відсутні;
2. В силу малості деформацій вважаємо деформований стан лінійним. Деформації розвиваються в напрямку осі прикладання зовнішнього лінійного навантаження.
3. Матеріал матриці пружнопластичний, що зміцнюється за ступеневим законом.

На рис.1. показана схема деформування елементарного об'єму ВМКМ, який містить два волокна з'єднанні матрицею, наприклад для матеріалу ВКА-2. В процесі деформування вважаємо також, що для структурних компонент виконуються наступні умови:

а – волокна ВМКМ являються абсолютно жорсткими по відношенню до матриці, тому що модуль пружності алюмінієвої матриці $E_a = 0,71 \cdot 10^5$ МПа, а борного волокна $E_g = 4,2 \cdot 10^5$ МПа;

б – матеріал матриці пружнопластичний;

в – в процесі розрахунку враховуємо форму граничної поверхні між волокном та матрицею. При цьому вважаємо, що міцність з'єднання на граничній поверхні волокна та матриці достатня для деформування матриці.

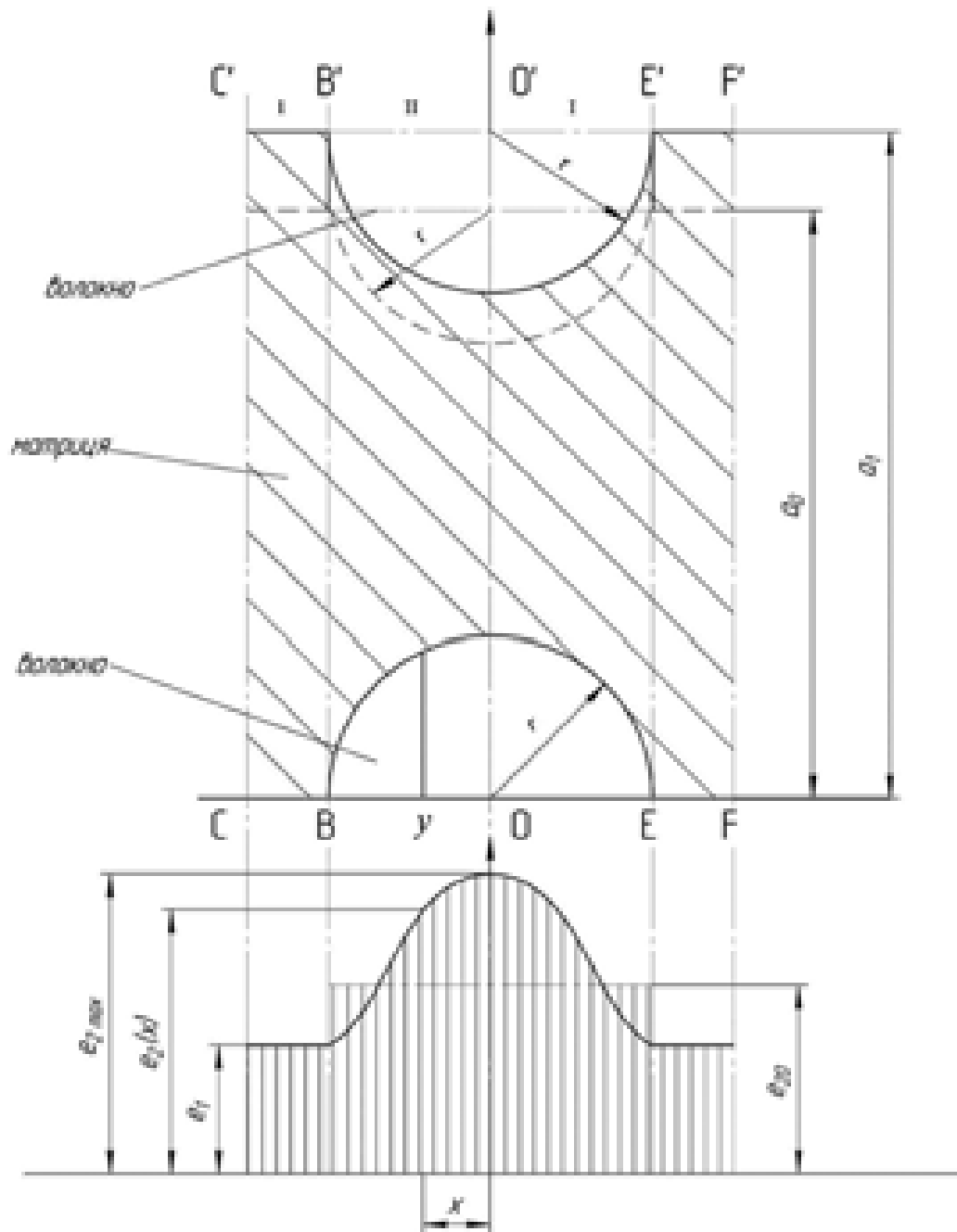


Рис. 1. Формалізоване представлення вихідних даних для розрахунку деформацій матриці ВМКМ (схема деформування елементарного об'єму).

Напруження розтягування в композиційному матеріалі σ_k визначаємо у феноменологічній постановці (на макрорівні напруження усереднені рівномірно по площині перерізу) [5]. Тоді при розтягуванні або стисканні зразків можна записати рівняння рівноваги сил у вигляді:

$$\sigma_k = \frac{1}{F_0} [(n + 1)F_1\sigma_1 + nF_2\sigma_2], \quad (1)$$

де F_0 – площа поперечного перерізу зразка;

F_1 і σ_1 – відповідно площа перерізу і напруження в зонах рівномірних деформацій;

F_2 і σ_2 – площа перерізу напруження в матриці між волокнами в моношарах;

n – кількість моношарів волокон.

У (1) нелінійність σ_k спостерігатиметься при нелінійності одного із доданків у квадратних дужках.

У пружній зоні ($e \leq e_p$, e_p – величина деформацій в точці переходу від пружних до пластичних деформацій) існує лінійна залежність виду $\sigma = Ee$. Для пластичної області приймемо нелінійний, наприклад, ступеневий закон $\sigma = Ke^m$. Тоді величина, що характеризує перехід пружних деформацій у пластичні, для матеріалу матриці визначиться виразом.

$$e_{pm} = \left(\frac{K}{E}\right)^{\frac{1}{1-m}}, \quad (2)$$

де E – модуль пружності;

K і m – константи ступеневої апроксимації і кривої деформування в пластичній області. Враховуючи, що для металевих композитів, що розглядаються, поперечний переріз волокна круглий, то для визначення деформацій в проміжку між волокнами моношару, можна записати

$$e_2 = \ln \frac{a_1 - 2\sqrt{r^2 - x^2}}{a_0 - 2\sqrt{r^2 - x^2}}, \quad (3)$$

де r – радіус волокна;

x – відстань від центру волокна до перерізу, що розглядається;

a_0 та a_1 – відстань між волокнами в напрямку деформування, відповідно, до та після деформації.

Рівномірні деформації в шарах без волокон визначаються співвідношенням (4) при $x = r$:

$$e_1 = \ln \frac{a_1}{a_0} \approx \frac{a_1 - a_0}{a_0} \quad (4)$$

Оскільки наявність волокна у матеріалі зумовлює локалізацію деформацій, зазвичай $e_2 > e_1$. З цього випливає, що при рівномірних загальних пружних деформаціях зразка e_1 деформації e_2 можуть перевищувати межу пропорційності e_{cp} і в металевих композитах будуть мати місце пластично деформовані області.

Величина e_1 , при якій виникають пластичні деформації e_2 у матриці між волокнами, визначаються величиною межі пропорційності для металевих композитів у цілому:

$$e_{pk} = \frac{e_1}{e_{2max}} e_{pm}, \quad (5)$$

де e_{2max} – максимальна величина деформацій між волокнами при $x = 0$.

Після підстановки виразів (2), (3) (4) та заміни логарифму першим членом його розкладання в ряд, отримуємо залежність:

$$e_{pk} = \left(1 - \frac{2r}{a_0}\right) \left(\frac{K}{E}\right)^{\frac{1}{1-m}} \quad (6)$$

Формула (6) показує, що межа пропорційності, обчислена за деформаціями, залежить від механічних властивостей матеріалу матриці та структурних параметрів металевго композиту.

Межа пропорційності, визначена за напруження, з урахуванням (1):

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{E}{F_0} \left(\frac{K}{E} \right)^{\frac{1}{1-m}} \left[(n+1)F_1 + \frac{n}{2}F_2 \left(1 - \frac{2r}{a_0} \right) \right] \quad (7)$$

Оцінки, виконані для типових структур, зокрема, КМ системи АІ-В, показують, що при зміні кроку волокон в межах 0,16–0,24 мм та діаметрі волокон 0,14 мм величина межі пропорційності композиту становить 0,12–0,42 від межі пропорційності матриці.

Наведена оцінка деформаційних властивостей демонструє, що з метою підвищення точності діаграми деформування композитів з жорсткими армуючими компонентами їх слід апроксимувати нелінійними функціями. Разом з тим необхідно відзначити, що нехтування лінійною ділянкою деформування навіть при розрахунку інтегральних характеристик процесів (роботи деформування та ін.) не тягне за собою появи великих похибок розрахунку.

Діаграми деформування металевих композитів, зміцнених волокнами круглої форми, можуть бути побудовані аналітично з використанням наступної залежності:

$$\sigma_k = \frac{K}{\delta} \left\{ e_1^m (\delta - 2nr) + \left[\frac{1}{r} \int_0^1 \left(\frac{a_1 - a_0}{a_0 - \sqrt{2r^2 - x^2}} \right)^m dx \right] 2nr \right\} \quad (8)$$

На рис. 2. показані діаграми, одержані аналітично.

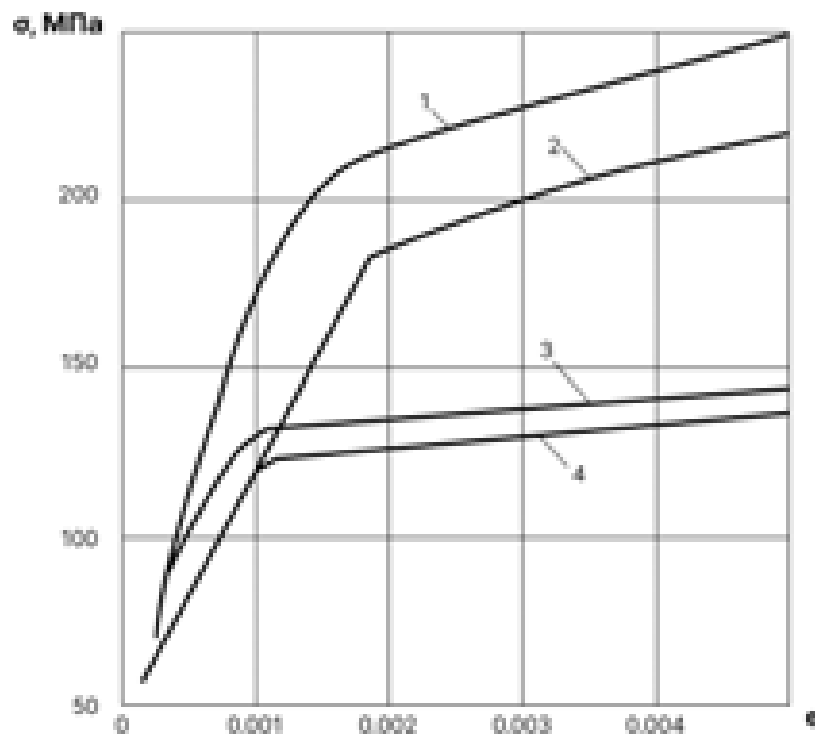


Рис. 2. Діаграми деформування боралюмінієвого композита, отриманих аналітично, та їх порівняння з властивостями відносних сплавів алюмінієвої матриці:

1 – ВМКМ система АМг6-В; 2 – алюмінієвий сплав АМг-6; 3 – ВМКМ система АД33-В; 4 – алюмінієвий сплав АД33

ВИСНОВКИ

1. Розроблено метод побудови кривих деформування металевих композиційних матеріалів, які зміцнені безперервними круглими волокнами. Метод враховує механічні властивості структурних компонент (волокна і матриці), їх розміри та взаємне положення в КМ. Враховуючи ортотропність властивостей, метод розповсюджується на деформування волокнистих КМ в умовах лінійного навантаження (розтяг або стиск) в площинах, що перпендикулярні напрямку волокон. Отримані залежності, що дозволяють розраховувати криві деформування $\sigma - \epsilon$ в пружнопластичній області отримані криві деформування для типових КМ систем АІ-В.

2. Аналіз процесу деформування волокнистих КМ показує, що при деформуванні виникає суттєва нерівномірність деформацій пластичної матриці. Так, оцінка деформування КМ системи АІ-В показує, що при зміні кроку волокон в межах 0,16 – 0,24 мм та діаметрі волокон 0,14 мм величина межі пропорційності композиту становить 0,12 – 0,42 від межі пропорційності матриці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Композиционные материалы. Справочник. Под ред. Д.М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985. 592 с.
2. Композиционные материалы. Т. 8. Анализ и проектирование конструкций. Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. Москва: Мир. 1978. 508с.
3. Кривов Г. А., Титов В. А., Лупкин Б. В. и др. Конструкции из металлических композиционных материалов. Киев: Техніка. 1992. 224 с.
4. Кривов Г. А., Титов В. А., Федоренко Ю. М. Модерирование технологических процессов формообразования деталей из плоских металлополимерных композитов. *Механика композитных материалов*. 1995. 3. С. 417–427.
5. Титов В. А., Митрофанова В. В., Шлянников В. Н. и др. Построение диаграмм деформирования КМ на металлической матрице, упрочненной непрерывными волокнами. *Технология производства деталей из композиционных материалов*. Москва: ВИМИ. 1991. С. 57.

REFERENCES

1. Composite materials. Directory. Ed. D.M. Karpinosa. Kyiv: Naukova dumka. 1985. 592 p. (in Russian).
2. Composite materials. T. 8. Analysis and design of structures. Ed. L. Brautman and R. Krok. Moscow: Mir. 1978. 508 p. (in Russian).
3. Kryvov G.A., Titov V.A., Lupkin B.V., et al. Structures from metallic composite materials. Kyiv: Technika. 1992. 224 p. (in Russian).
4. Kryvov G.A., Titov V.A., Fedorenko Yu.M., et al. Moderation of technological processes of forming parts from flat metal-polymer composites. *Mechanics of composite materials*. 1995. 3, pp. 417–427. (in Russian).
5. Titov V.A., Mitrofanova V.V., Shlyannikov V.N. Construction of diagrams of CM deformation on a metal matrix reinforced with continuous fibers. *Technology of production of parts from composite materials*. Moscow: VYMY. 1991, p. 57. (in Russian).

Titov V., Nazaruk T. Development of the method for calculating the deformation curves of fiber composite materials with a metal matrix.

A method of constructing deformation curves of metal composite materials reinforced with continuous round fibers has been developed. The method takes into account the mechanical properties of structural components (fibers and matrices), their sizes and relative position in composite materials (CM). Taking into account the orthotropy of the properties, the method is extended to the deformation of fibrous CM under conditions of linear loading (tension or compression) in planes perpendicular to the direction of the fibers.

The analysis of the process of deformation of fibrous CM shows that during deformation there is a significant non-uniformity of deformations of the plastic matrix. Thus, the evaluation of the deformation of the CM of the AI-B system shows that with a change in the fiber pitch within 0.16–0.24 mm and a fiber diameter of 0.14 mm, the value of the limit of proportionality of the composite is 0.12–0.42 of the limit of proportionality of the matrix.

The obtained dependencies allow calculating the deformation curves of the metal composite in the elastoplastic region based on the properties of the matrix material. Deformation curves obtained for typical AI-B CM systems for deformations up to 0.5–0.6%.

The method can be effective for predicting plastic properties when designing the structure of new CMs.

Key words: deformation curves, fibrous composite materials, metal matrix, fiber, deformations.

Титов В. А., Назарук Т. А. Разработка метода расчета кривых деформирования волокнистых композиционных материалов с металлической матрицей

Разработан метод построения кривых деформирования металлических композиционных материалов (КМ), укрепленных непрерывными круглыми волокнами. Метод учитывает механические свойства структурных компонентов (волокна и матрицы), их размеры и взаимное положение в КМ. Учитывая ортотропность свойств, метод распространяется на деформирование волокнистых КМ в условиях линейной нагрузки (растяжение или сжатие) в плоскостях, перпендикулярных направлению волокон.

Анализ процесса деформирования волокнистых КМ показывает, что при деформировании возникает существенная неравномерность деформаций пластической матрицы. Так, оценка деформирования КМ системы АІ-В показывает, что при изменении шага волокон в пределах 0,16-0,24 мм и диаметре волокон 0,14 мм величина предела пропорциональности композита составляет 0,12–0,42 от предела пропорциональности матрицы.

Получены зависимости, позволяющие рассчитывать кривые деформирования металлического композита в упругопластической области на основе свойств материала матрицы. Получены кривые деформирования для типичных систем КМ АІ-В для деформаций до 0,5–0,6%.

Метод может быть эффективен для прогнозирования пластических свойств при проектировании структуры новых КМ.

Ключевые слова: композиционные волокнистые материалы, кривые деформирования, металлическая матрица, волокно, деформации, напряжения.

Тітов В'ячеслав Андрійович – д-р техн. наук, професор, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Titov Viacheslav – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Титов Вячеслав Андреевич – д-р техн. наук, професор, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

E-mail: vat.kpi@gmail.com

ORCID: [0000-0002-4234-6961](https://orcid.org/0000-0002-4234-6961)

Назарук Тетяна Олександрівна – магістрант, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Nazaruk Tetiana – Master Student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Назарук Татьяна Александровна – магістрант, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

E-mail: divateese@icloud.com

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина.

Стаття надійшла до редакції 10.05.22 р.

Гожій С. П.
Мироненко В. А.

ПЕРСПЕКТИВНИЙ НАПРЯМ ЛОКАЛЬНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ – СУМІЩЕНЕ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ

Багаторічні дослідження процесу штампування обкочуванням, відпрацювання технологічних процесів обробки та розробка обладнання і оснащення, які проводяться на кафедрі технології виробництва літальних апаратів науково-навчального механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, призвели до реєстрації і накопичення випадків, коли зразки зазнавали руйнування. Саме характерне руйнування при штампуванні обкочуванням стало підставою до розповсюдження традиційного процесу за рахунок якісних ефектів. Специфічне силове та циклове навантаження при локальному деформуванні викликають нетипове, на перший погляд, в порівнянні з звичайним стисканням, руйнування. В статті наведені експериментальні результати досліджень та характерні руйнування зразків. Найбільш поширеним видом руйнування при штампуванні обкочуванням є утворення центральної лунки. Розглянута фізична модель при пластичному формоутворенні та надані детальні пояснення таким проявам процесу як руйнування центральної частини. Запропоновані заходи запобігання та позитивного застосування. Одним з варіантів застосування є утворення нових процесів і обладнання, що суміщають два принцеси і дозволяють отримати нову якість та розширити технологічні можливості. Новий технологічний процес і схема обробки суміщеного штампування обкочуванням та прошивання змодельовані із застосуванням методу скінчених елементів для групи типових деталей. Результати моделювання підтвердили базові передумови. Технологічний процес готується до виробничого впровадження.

Ключові слова: штампування обкочуванням, руйнування зразків, метод скінчених елементів, питомі зусилля, осередок деформації, суміщене штампування обкочуванням

Аналіз руйнування зразків при локалізованому стисканні обкочуванням, яке притаманне більшості технологічних операцій або етапів процесу, та виявлення фізичних причин, що їх викликали, показав, що вони відбуваються за класичними закономірностями, але мають специфічний прояв, який пов'язаний з специфікою протікання процесу.

В технічній літературі майже повністю відсутні відомості про типові види руйнування зразків при локалізованому стисканні та аналіз причин руйнування. Найбільше даних про поза контактні зміни форми в центральній зоні деталі у вигляді лунки та виробничі дефекти штампування обкочуванням (ШО) [1, 2, 3].

Метою роботи є запобігання характерним видам руйнування та появи виробничого браку чи запровадження заходів, що не тільки усувають негативні прояви, але і розширюють технологічні можливості процесу.

Характерним дефектом циліндричних деталей отриманих ШО є центральна поверхнева лунка, яка розвивається і призводить до руйнування. Цей дефект виникає при обкочуванні відносно тонких циліндричних зразків ($d/h > 4 \dots 6$, де d – діаметр зразка; h – висота) і він проявляється навіть при незначних ступінях деформації.

Механізм утворення лунки протікає у відповідності до розглянутої моделі напруженого стану. Характерною особливістю ШО є локалізований осередок деформації від дії обкочувального інструменту. Форма осередку контактних деформації визначена експериментально [4] і аналітично [5]. В залежності від співвідношення розмірів осередку на контакті переважають тангенціальні або радіальні деформації. При найбільш ефективних параметрах штампування, коли співвідношення площі осередку (F_K) до площі торця заготовки (F) знаходяться в межах $\lambda = F_K/F \approx 0,1$, переважають тангенціальні деформації [6, 7], які одночасно викликають силове навантаження в поза контактній частині деталі.

В основу будови моделі [8] покладені якісні ефекти, які були встановлені експериментально при осаджуванні обкочуванням циліндричних зразків. Основним якісним моментом є реєстрація в центральній області напружень розтягу.

Наявність центральної зони, що розтягнута, свідчить про переважно тангенціальну течію металу з контактного пластичного осередку. За механізм деформування, який пояснює

ефект утворення центральної лунки, слід вважати пластичний вигин заготовки в поза контактній області, що протилежить контактному осередку деформування. Фізична модель напружено-деформованого стану представлена на (рис. 1, а) [8]. Будова моделі підтверджується не тільки опосередкованими ефектами, а і стовщенням полотна заготовки [7], що протилежить осередку деформування, а також спостереженням поля ліній ковзання (Чернова-Людєрса) в цій частині на торцевій поверхні заготовки (рис. 1, б).

Пластичний вигин в позаконтактній зоні виникає і розвивається під дією моментів M , які викликані тангенціальною течією металу з контактної осередку деформації, як на (рис. 1, б).

Маючи обчислені геометричні розміри осередку контактних деформацій можливо збудувати фізичну і геометричну модель дії зон контактних та позаконтактних пластичних течій. Можна також визначити напруження та характер їх розподілу на контурі локалізованого осередку та в позаконтактній області (рис.1,б). Розміри центральної зони, де виникає пластична лунка, яка утворюється від дій напружень розтягу, вираховані аналітично [8].

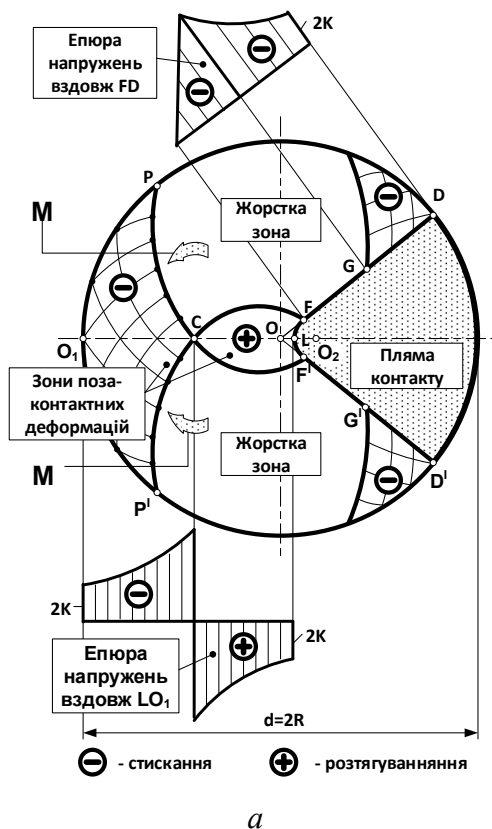


Рис. 1. Будова фізичної моделі напруженого стану і пластичних течій при осаджуванні циліндричної заготовки обкочуванням (M – моменти, що викликані тангенціальною течією металу з плями контакту та створюють стовщення в зоні поза контактної деформації):

а – схема моделі пластичних течій з локалізованої плями контакту з утворенням позаконтактних зон деформацій; б – спостереження ліній ковзання на торцевій поверхні циліндричної заготовки, які покладені в основу будови моделі

При обробці пластичних матеріалів і при досягненні значних ступенів деформації поверхнева лунка переростає у центральний крізний отвір. На рис. 2 надані фотографії циліндричних свинцевих зразків після осаджування обкочуванням на 87 % та 95 % висотної деформації відповідно.

Руйнування супроводжується значними пластичними деформаціями, зокрема початково виникає пластична лунка. Згодом виникають поверхні розривів, що вимальовують чотирипроменеву зірку, яка при наступній деформації трансформується в правильний квадрат. На рис. 2, б видно зародження нових вершин квадрату (поверхонь розривів), так як квадратний отвір досяг своїх максимальних розмірів по відношенню до розмірів зразка і не в змозі розвиватися надалі.



Рис. 2. Свинцевий циліндричний зразок після осаджування обкочуванням:
а – на 87 % висотної деформації; б – на 95 % висотної деформації

Після утворення центральної лунки контакт між інструментом і заготовкою відсутній, центральна частина заготовки знаходиться в зоні плоского напруженого стану розтягу.

Особливість утворення в центральній частині напружень розтягу при ШО має сенс позитивного застосування з одночасним зануренням прошивного пуансону (утворенні центральної порожнини). В такому випадку технологічний ефект від ШО стрімко підвищується:

- одночасно на одній позиції виконуються декілька різних операцій без переміщення та переорієнтації, що вплине на загальну продуктивність;
- перед початком ШО центральний пуансон притисне заготовку, що унеможливило її зміщення або вивертання на початковій стадії, а надалі центральний пуансон утримує заготовку, що підвищує точність виготовлення [9];
- можна спрогнозувати, що в умовах дії осередку напружень розтягу питомі зусилля на прошивному пуансоні будуть меншими ніж при традиційному прошиванні.

Це дає вигоду в продуктивності та має технологічні переваги з позиції якості та енерговитратності. Суміщення ШО з одночасним прошиванням, коли периферія заготовки оброблюється обкочувальною головкою, а центральна частина прошивається центральним пуансоном (рис.3,а) надає комплексний позитивний ефект. Має місце унікальна технічна ситуація: з однієї сторони обкочувальна головка, що виконує ШО, створює умови для процесу прошивання; з іншої, прошивання забезпечує якість виробів без суттєвого стоншення центральної частини.

Зважаючи на складність процесу, коли прошивний пуансон знаходиться всередині обкочувальної головки існують конструкторські рішення його реалізації. Найбільш простим по конструкції є пристрій облаштований жорстким прошивним пуансоном, схема якого надана на рис. 3, б. На повзуні 1 пресу (прес не показаний) облаштований пристрій орбітального руху обкочування, який складається з корпусу 2, в якому на радіальних 3 і упорних 4 підшипниках з можливістю обертання змонтований ротор 5 з нахилоною під кутом γ проточкою. В нахилену проточку ротору 5 вмонтована на радіальному 6 і упорному 7 підшипниках обкочувальна головка 8. Вздовж центральної осі в корпусі 2 жорстко встановлений прошивний пуансон 9, який виступає за горизонтальну твірну конусу обкочувальної головки на величину k , що відповідає глибині порожнини, яка буде прошиватись. На столі пресу 10 кріпиться опорний інструмент 11, на якому розташовується циліндрична заготовка 12.

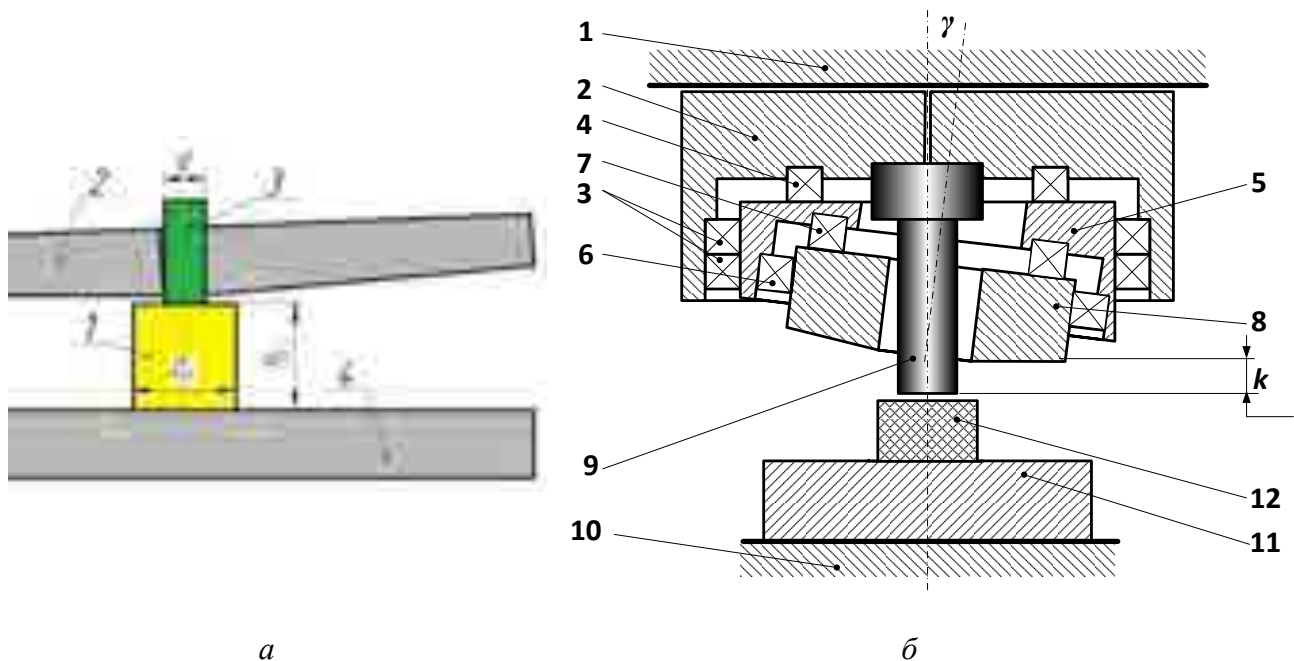


Рис. 3. Схема процесу та пристрою для суміщеного штампування обкочуванням та прошивання процесу (1 – заготовка; 2 – обкочувальна головка; 3 – центральний прошивний пуансон, що виступає на задану глибину порожнини $k=2\text{мм}$; 4 – нижня плита; H_0 та D_0 – висота та діаметр циліндричної заготовки; d – діаметр прошивного пуансону: 1 - повзун пресу; 2 – корпус; 3,6 – радіальні підшипники; 4,7 – упорні підшипники; 5 - ротор; 8 - обкочувальна головка; 9 - прошивний пуансон; 10 - стіл пресу; 11 - опорний інструмент; 12 - циліндрична заготовка; k – величина виступу прошивного пуансону; γ – кут нахилу осі обкочувальної головки): а – розрахункова схема суміщеного процесу; б – конструктивна схема пристрою

Цей варіант конструкції (рис. 3,б) реалізується в пристроях обкочувальних рухів безводильного типу [10] за рахунок нескладної модернізації, інші вимагають більш складного конструкторського доопрацювання.

Було приведені чисельне моделювання процесу суміщеного ШО та прошивання. Схема процесу суміщеного штампування наведена на рис. 3,а. Процес відбувається наступним чином: заготовка 1 встановлюється на нижню плиту 4. Центральний пуансон 3 та обкочувальна головка 2 рухаються вниз вздовж осі заготовки із рівними швидкостями, спочатку прошиваючи отвір і згодом деформуючи заготовку по висоті.

При цьому, центральний пуансон на початку і впродовж всього процесу виступає за край обкочувальної головки на незмінну величину k для створення осьового притискання заготовки до нижньої плити в момент початку деформування заготовки обкочувальною головкою для усунення вивертання заготовки під дією цього інструменту.

ШО не можливо звести до плоскої або вісесиметричної задачі, то моделювання МСЕ проводилось в тривимірній постановці.

ШО характеризується наявністю обкочувальної головки (активного інструменту), що призводить до зростання часу обчислень. Для зменшення часу для розрахунків, матеріал заготовки приймався жорстко-пластичним, матеріал інструментів – жорстким.

Моделювання проводилось в ізотермічній постановці – температура заготовки та інструментів під час моделювання – незмінні (20°C), без термoeфекту та теплопередачі.

В якості матеріалу заготовки було прийнято американський аналог Сталі 35X – AISI 5135H. Заготовку було дискретизовано на 40000 скінченних елементів тетраедричної форми (рис. 4).

Коефіцієнт тертя між заготовкою та інструментом було прийнято рівним 0,12. Швидкість осьового переміщення обточувальної головки та центрального пуансону були прийнятими однаковими та рівними 2,5 мм/с. Частота прецесії обточувальної головки становила 280^{-1} . Такі параметри забезпечують коефіцієнт співвідношення площ $\lambda = 0,1$.



Рис. 4. Скінченно-елементна сітка на вихідній заготовці

Так як ціллю моделювання є встановлення енерго-силових параметрів та закономірностей і напружено-деформованого стану при різних співвідношеннях висоти вихідної заготовки до її діаметру (H_0/D_0) та при різних співвідношеннях діаметру прошивного пуансону до діаметру вихідної заготовки (d/D_0), то для дослідження впливу зміни вищезгаданих параметрів на процес суміщеного штампування обточуванням були прийняті наступні співвідношення розмірів заготовок і центральних пуансонів (табл. 1), утворюючи таким чином дев'ять варіантів комбінацій для досліджень.

Таблиця 1

Вихідні розміри заготовок та пуансонів

Параметр № варіанту	H_0 , мм	D_0 , мм	H_0/D_0	d , мм	d/D_0
1.1	30,0	30,0	1,0	12,0	0,4
1.2				9,0	0,3
1.3				6,0	0,2
2.1	24,76	33,02	0,75	13,21	0,4
2.2				9,91	0,3
2.3				6,6	0,2
3.1	18,9	37,8	0,5	15,12	0,4
3.2				11,34	0,3
3.3				7,56	0,2

На рис. 5 показано кінцеву форму виробу по варіанту 2.1, кінцева форма у випадку варіантів 1.1-3.1 – подібна.

На рис. 6 наведений графік залежності зусилля на деформуючих інструментах від їх переміщення та графіки сумарного навантаження.



а



б

Рис. 5. Кінцева формозміна заготовки по розмірам інструменту по варіанту 2.1:

а – загальний вигляд; б – збільшена центральна лунка під прошивним пуансоном при глибині занурення прошивного пуансону $k = 2$ мм

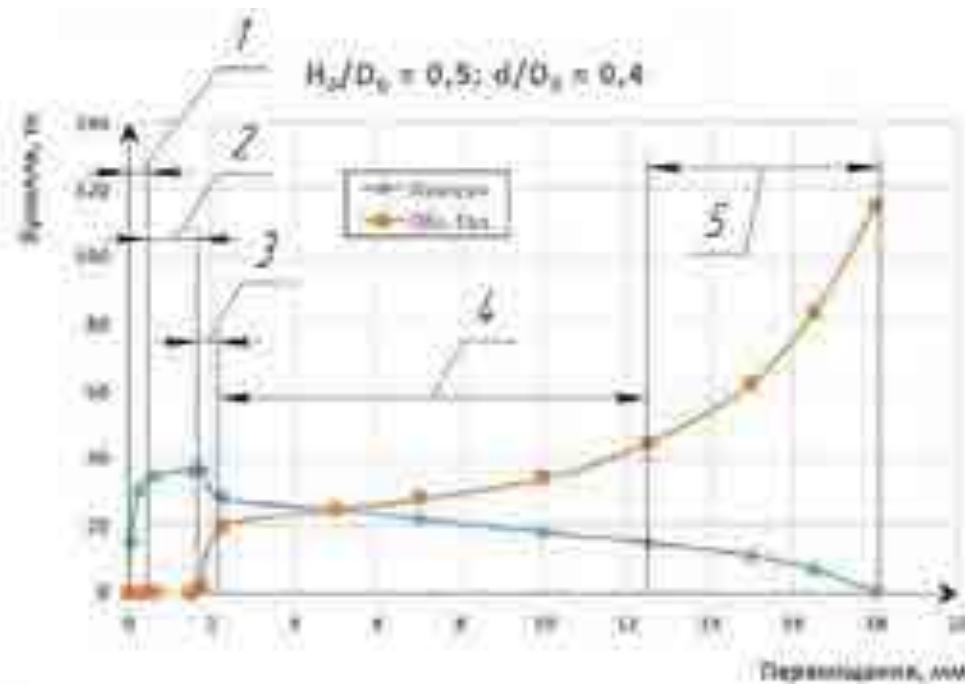


Рис. 6. Графік співвідношення «Зусилля – Переміщення» за результатами моделювання та характерні зони (H_0 та D_0 – висота та діаметр циліндричної заготовки; d – діаметр прошивного пуансону; 1, 2, 3, 4, 5 – характерні зони на графіку)

Результати моделювання показують, що характер напружено-деформованого стану при різних співвідношеннях розмірів заготовок та пуансонів є подібним, також подібним є характер кривих. Опис особливостей, проводиться по одному графіку-представнику, який показаний на рис. 6, де позначені: - 1 – зона занурення деформуючої частини прошивного центрального пуансона, характеризується стрімким зростанням зусилля деформування; - 2 – зона сталого деформування заготовки центральним пуансоном, характер зміни зусилля – сталий; - 3 – перехідна зона, обкочувальна головка починає деформувати заготовку, як видно з рис.6, контакт обкочувальної головки із заготовкою виникає при переміщенні інструмента на відстані меншій ніж відстань виступу центрального пуансону з обкочувальної головки ($k = 2$ мм), що пов'язано із утворенням, характерного для процесу прошивання напливу на поверхні заготовки, неусталений характер зусилля на обкочувальній головці продовжується до розгладжування напливу, в той час як, зусилля на пуансоні починає стрімко спадати, що підтверджує виникнення зони розтягу в центрі заготовки; - 4 – характеризується рівномірною зміною зусилля на інструментах до 5 %, з однаковою швидкістю спадання на пуансоні та зростання на обкочувальній головці; - 5 – зона інтенсивного зростання зусилля на обкочувальній головці, через значне зменшення висоти заготовки, та інтенсивного спадання зусилля на пуансоні, у зв'язку із зростанням рівня розтягуючих напружень в центрі заготовки.

Середні напруження на інструментах було розраховано, як відношення поточного зусилля на інструменті до поточної площі контакту. У випадку центрального прошивного пуансона, площа контакту залишається незмінною. У випадку обкочувальної головки, площа контакту весь час змінюється, тому для кожного моменту часу її було обраховано за допомогою вбудованого в програмне середовище інструменту для визначення контактної площі.

Характер розподілу середніх напружень при різних співвідношеннях розмірів заготовок та пуансонів є подібним, також подібним є характер закономірностей самих кривих. Опис особливостей буде проводитися по одному графіку-представнику, який показаний на рис.7, де позначені: - 1 – це зона занурення деформуючої частини центрального пуансона (характеризується стрімким зростанням середніх напружень) та сталого деформування заготовки центральним пуансоном; - 2 – це перехідна зона, коли обкочувальна головка починає деформувати заготовку, а саме, напливи на поверхні заготовки біля пуансону, це пояснює пік на графіку;

- 3 – зона розгладжування напливу, зусилля на пуансоні починає різко спадати, що підтверджує припущення про утворення зони розтягу в центрі заготовки; - 4 – характеризується рівномірністю середніх напружень на інструментах, приблизно з однаковою швидкістю спадання на пуансоні та зростання на обкочувальній головці; - 5 – зона незначного зростання середніх напружень на обкочувальній головці, через значне зменшення висоти заготовки, та інтенсивного спадання середніх напружень на пуансоні, у зв'язку із зростанням дії розтягуючих напружень в центрі заготовки.

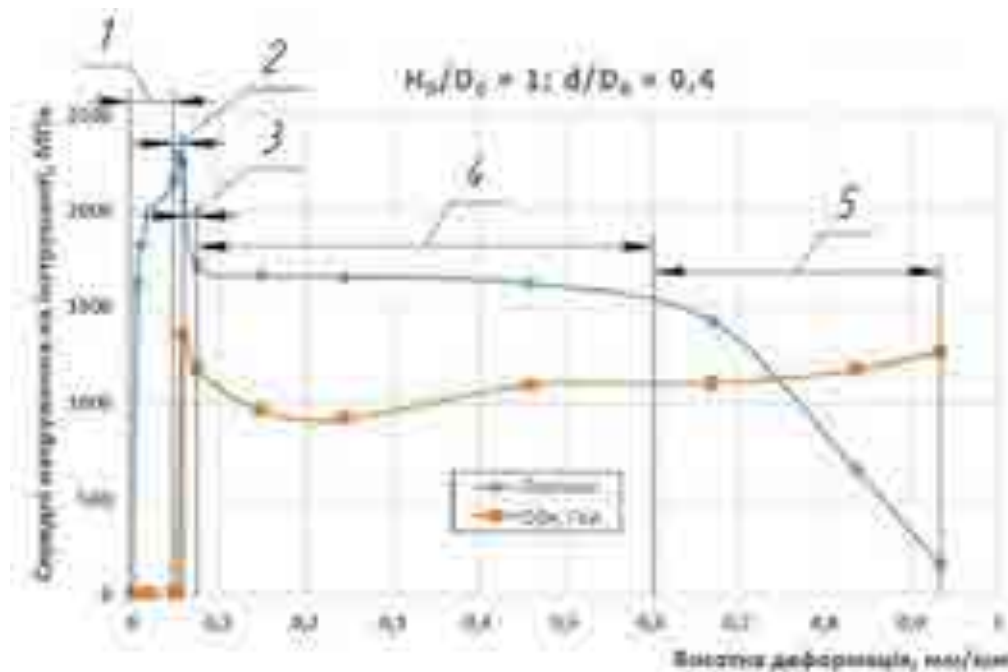


Рис. 7. Графік співвідношення «Середні напруження на інструменті – Висотна деформація» за результатами чисельного моделювання та характерні зони (H_0 та D_0 – висота та діаметр циліндричної заготовки; d – діаметр прошивного пуансону: 1, 2, 3, 4, 5 – характерні зони на графіку)

Ефект від дії напружень розтягу в центрі заготовки настільки значний, що в центрі заготовки з протилежної сторони від центрального прошивного пуансону утворюється лунка, форма та розмір якої показаний на рис.5,б.

Вплив співвідношення діаметру пуансону до початкового діаметру заготовки (d/D_0) і вплив співвідношення початкової висоти заготовки до початкового діаметру заготовки (H_0/D_0) є невизначальними.

На поточний момент проводяться дослідницькі роботи в двох напрямках. По-перше, створюється спеціалізоване оснащення і обладнання для реалізації суміщених з ШО процесів. По-друге, розробляються нові перспективні схеми утворення суміщених схем обробки та визначаються їх технологічні можливості.

Стаття підготовлена з використанням матеріалів магістерської дисертації Суботенка Г. М. – «Комп'ютерне та експериментальне моделювання формоутворення фланця штампуванням обкочуванням з активними силами тертя», захищеної на кафедрі механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів у 2014 році за спеціальності 131 прикладна механіка.

ВИСНОВКИ

Особливу технологічну зацікавленість при ШО викликає центральна зона, де виникають і діють напруження розтягу, що призводить до її позаконтактних деформацій, а згодом

і до руйнування. Тому при проектуванні технологічних процесів виготовлення відносно тонких та фланцевих деталей слід вживати технологічних заходів щодо забезпечення щільності цієї зони: - деформування обкочувальною головкою у вигляді усіченого конусу, який в початковий період сформує стовщення центральної частини; - спрямоване формування стовщення центральної частини; - при формоутворенні фланця призначити кінцеві розміри з міркувань, щоб діаметр стрижневої частини був більший за центральну зону дії напружень.

В ряді випадків, виникнення і дію напруження розтягу можна використати з технологічною корисністю, зокрема, при формуванні з енергетичною доцільністю центральної порожнини.

Шляхом моделювання методом скінченних елементів встановлено напружено-деформований стан заготовки, енерго-силові параметри процесу та підтверджено виникнення зони напружень розтягу і доцільність використання центрального прошивного пуансона.

Поєднання процесу ШО, який виконується на периферійній частині заготовки, з іншими операціями обробки надає нові технологічні можливості виготовлення конструкцій машинобудування з утворенням позитивних якісних і кількісних властивостей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гожій С. П. Особливості руйнування деталей при виконанні операцій штампування обкочуванням. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2007. 1(51). С. 58-65.
2. Кривда Л. Т., Гожій С.П. Технологічні особливості стабілізації технологічних процесів моноблочного штампування обкочуванням деталей з відносно тонким фланцем. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Машинобудування*. 1999. 37. С. 53-57.
3. Божидарник В. В., Сулим Г. Т. Елементи теорії пластичності та міцності. У 2 т. Львів: Світ, 1999. Т. I. 532 с.
4. Marciniak Z., Chj dakowski A. Press for rotary forging. *Shahl und Eisen*. 1970. 90. 20, pp. 1077-1080.
5. Кривда Л. Т., Гожій С. П. Геометрія контакту при пластичному деформуванні обкочуванням. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2006. 3(47). С. 49-56.
6. Yu Z., Chen M., Ma C., Luo S., Zhu C. Numerical model simulation of the double-roll rotary forging of large diameter thin-walled disk. *Metals*. 2021. 11, p. 1767. <https://doi.org/10.3390/met11111767>.
7. Тітов В., Гожій С., Мироненко В. Універсальна дослідна установка для пресування трубних заготовок. *Механіка та новітні технології*. 2022. 6 (1). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.260002>.
8. Гожій С. П. Розвиток моделі пластичних деформацій при осаджуванні циліндричного зразка обкочуванням. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Машинобудування*. 2008. 52. С. 359-365.
9. Кривда Л. Т., Гожій С. П. Спосіб виготовлення деталей: патент 15245. Україна. B21D 37/00. № u20512822; заявл. 29.12.2005; опубл. 15.06.2006.
10. Гожій С. П., Ландар Р. М., Носенко А. І. Класифікація обладнання для штампування обкочуванням. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА. 2011. (26). С. 209-211.

REFERENCES

1. Gozhii S.P. Peculiarities of the destruction of parts during rolling stamping operations. *Scientific news NTUU "KPI"*. 2007. 1(51), pp. 58-65. (in Ukrainian).
2. Kryvda L.T. Gozhii S.P. Technological features of stabilization of technological processes of monobloc stamping by rolling of parts with a relatively thin flange. *Herald NTUU "KPI". Mechanical engineering series*. 1999. 37, pp. 53-57. (in Ukrainian).
3. Bozhidarnyk V.V., Sulym G.T. Elements of the theory of plasticity and strength. In 2 t. Lviv: Svit. 1999. T. I. 532 p. (in Ukrainian)
4. Marciniak Z., Chj dakowski A. Press for rotary forging. *Shahl und Eisen*. 1970. 90. 20, pp. 1077-1080.
5. Kryvda L.T. Gozhii S.P. Contact geometry during plastic deformation by rolling. *Scientific news NTUU "KPI"*. 2006. 3(47), pp. 49-56. (in Ukrainian)
6. Yu Z., Chen M., Ma C., Luo S., Zhu C. Numerical model simulation of the double-roll rotary forging of large diameter thin-walled disk. *Metals*. 2021. 11, p. 1767. <https://doi.org/10.3390/met11111767>
7. Titov V., Gozhii S., Myronenko V. Universal experimental installation for pressing pipe blanks. *Mechanics and New Technologies*. 2022. 6 (1). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.260002>. (in Ukrainian).
8. Gozhii S.P. Development of the model of plastic deformations during deposition of a cylindrical sample by rolling. *Herald NTUU "KPI". Mechanical engineering series*. 2008. 52, pp. 359-365. (in Ukrainian).
9. Kryvda L.T., Gozhii S.P. The method of manufacturing parts: Pat. 15245. Ukraine. B21D 37/00. Bull. 6, 15.06.2006.
10. Gozhii S.P., Landar R.M., Nosenko A.I. Classification of rolling stamping equipment. *Processing of Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2011. 1 (26), pp. 209-211. (in Ukrainian).

Gozhii S. P., Myronenko V. A. Prospective direction of local formation - combined stamping by rolling

Long-term research of the process of rolling stamping, development of technological processes of processing and development of equipment and equipment, which are carried out at the Department of Aircraft Production Technology of the Scientific and Educational Mechanics and Mechanical Engineering Institute of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", led to the registration and accumulation of cases, when the samples were subjected to destruction. It is the characteristic destruction during rolling stamping that became the basis for the spread of the traditional process at the expense of quality effects. Specific force and cyclic loading during local deformation cause atypical, at first glance, destruction compared to ordinary compression. The article presents the experimental results of the research and the characteristics of the destruction of the samples. The most common type of failure during rolling stamping is the formation of a central hole. The physical model during plastic molding is considered and detailed explanations are provided for such manifestations of the process as the destruction of the central part. A new technological process and processing scheme of combined rolling and stitching stamping is modeled using the finite element method for a group of typical parts. The simulation results confirmed the basic assumptions. The technological process is being prepared for production implementation.

Keywords: rolling stamping, destruction of samples, finite element method, average specific forces, deformation center, combined rolling stamping.

Гожий С. П., Мироненко В. А. Перспективное направление локального формообразования – совмещенная штамповка обкатыванием

Многолетние исследования процесса штамповки обкатыванием, отработка технологических процессов обработки и разработка оборудования и оснащения, проводимых на кафедре технологии производства летательных аппаратов научно-учебного механико-машиностроительного института Национального технического университета "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", привели к регистрации и накоплению случаев, когда образцы терпели разрушение. Самое характерное разрушение при штамповке обкатыванием легло в основу распространения традиционного процесса за счет качественных эффектов. Специфическую силовую и цикловую нагрузку при локальном деформировании вызывают нетипичное, на первый взгляд, по сравнению с обычным сжатием, разрушение. В статье приведены экспериментальные результаты исследований и характер разрушения образцов. Наиболее распространенным видом разрушения при штамповке обкатки является образование центральной лунки. Рассмотрена физическая модель при пластическом формообразовании и даны подробные объяснения таким проявлениям процесса как разрушение центральной части. Предложены меры по предотвращению и положительному применению. Одним из вариантов применения является образование новых процессов и оборудования, совмещающие два процесса и позволяющие получить новое качество и расширить технологические возможности. Новый технологический процесс и схема обработки совмещенной штамповки обкатывания и прошивки смоделированы с применением метода конечных элементов для группы типовых деталей. Результаты моделирования подтвердили основные предпосылки. Технологический процесс готовится к производственному внедрению.

Ключевые слова: штамповка обкаткой, разрушение образцов, метод конечных элементов, средние удельные силы, ячейка деформации, совмещенная штамповка обкаткой.

Гожій Сергій Петрович – д-р техн. наук, доц., проф. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Gozhii Serhii – Doctor of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Гожий Сергей Петрович – д-р техн. наук, доц., проф. НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»

E-mail: s.godzy@kpi.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2276-1225>

Мироненко Віталій Анатолійович – аспірант НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Myronenko Vitalii – Praduate student, NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Мироненко Виталий Анатольевич – аспирант НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»

E-mail: il671563@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6624-3564>

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

Стаття надійшла до редакції 15.06.22 р.

Орлюк М. В.
Піманов В. В.

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ DEFORM ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ОПЕРАЦІЙ ЛИСТОВОГО ФОРМУВАННЯ

Використання при розробці технології виготовлення деталей зі складною геометрією з листового матеріалу та проектуванні відповідного штампового оснащення лише практичних рекомендацій з довідникової літератури не гарантує отримання якісних деталей та відсутність браку за результатами штампування, оскільки ці рекомендації не можуть врахувати усі особливості деформування за конкретних умов. У випадку появи під час штампування браку розроблений технологічний процес або існуюче штампове оснащення потребує доопрацювання. Подібна проблема, пов'язана з руйнуванням матеріалу, виникла при штампуванні корпусної деталі великокаліберного кулемету із листової заготовки із сталі 30ХГСА. З ціллю усунення браку в роботі була досліджена ефективність використання програмного комплексу DEFORM для встановлення особливостей листової формовки складних просторових деталей та оптимізації параметрів процесу деформування. Процес деформування досліджувався за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням методу скінчених елементів у середовищі DEFORM 3D та перевірки отриманих результатів експериментальним шляхом. Під час моделювання в якості оптимізаційного параметру в роботі використовувались граничні значення критерію руйнування Normalized Cockcroft-Latham, визначені для операції вісесиметричного витягування без потоншення. За результатами досліджень були виявлені негативні фактори, що призводили до перенавантаження матеріалу заготовки в процесі деформування та його руйнування. Отримані результати дозволили оптимізувати форму вихідної заготовки та деформуючого інструменту. Оптимізація геометрії деформуючого інструменту та заготовки велась за умови, що за результатами моделювання у найбільш деформованих ділянках заготовки розраховані значення критерію руйнування Normalized Cockcroft-Latham не мають перевищувати граничного значення 0,6, визначеного для операції вісесиметричного витягування. Результати натурного експерименту підтвердили правомірність прийнятих припущень. Після внесення відповідних змін у геометрію вихідної заготовки та деформуючого інструменту проблема появи браку під час штампування була успішно вирішена.

Ключові слова: штампування, оптимізація, формовка, чисельне моделювання, метод скінчених елементів, критерій руйнування.

При виготовленні деталей із застосуванням операцій листового штампування на жаль виникають ситуації, коли при проектуванні штампового оснащення практичні рекомендації з довідникової літератури [1, 2] не дозволяють врахувати усі особливості процесу деформування листового матеріалу. Дуже часто такі ситуації закінчуються руйнуванням заготовки в процесі деформування, що призводить до необхідності корегування геометрії заготовки та деформуючого інструменту задля усунення браку процесі виготовлення деталей та збереження інструменту як такого.

Однак доопрацювання інструменту – це процес ітераційний та витратний. І якщо він виконується без врахування особливостей процесу деформування, то може закінчитись безрезультатним псуванням вартісного штампового оснащення. У таких випадках використання моделювання процесу деформування дозволяє встановити причини руйнування заготовки та визначити необхідну геометрію інструменту, яка б забезпечила деформування вихідної заготовки без руйнування [3–6].

Подібна ситуація виникла при виготовленні зі сталі 30ХГСА корпусної деталі великокаліберного кулемету. У конструкцію даної деталі були закладені мінімально допустимі радіуси переходів, але її формування супроводжувалось постійним руйнуванням заготовки на радіусній кромці деформуючого пуансона (рис. 1). Тому виникла необхідність скорегувати параметри процесу деформування заготовки для усунення браку.

Ціллю роботи є перевірка можливості та ефективності використання комп'ютерного моделювання у середовищі DEFORM для оптимізації параметрів процесу формовки корпусної деталі великокаліберного кулемету із листової заготовки із сталі 30ХГСА для усунення браку штампування.



Рис. 1. Характер руйнування вихідної заготовки при деформуванні

Для встановлення причин руйнування заготовки в процесі деформування в роботі за допомогою комп'ютерного моделювання у програмному комплексі Deform-3D були досліджені особливості формоутворення корпусної деталі за умов, максимально наближених до реальних умов деформування (геометрія деформуючого інструменту, геометрія та матеріал вихідної заготовки, умови тертя). Для моделювання використовувалась пластична модель матеріалу вихідної заготовки. Схема деформування та zdeформована заготовка представлені на рис. 2.

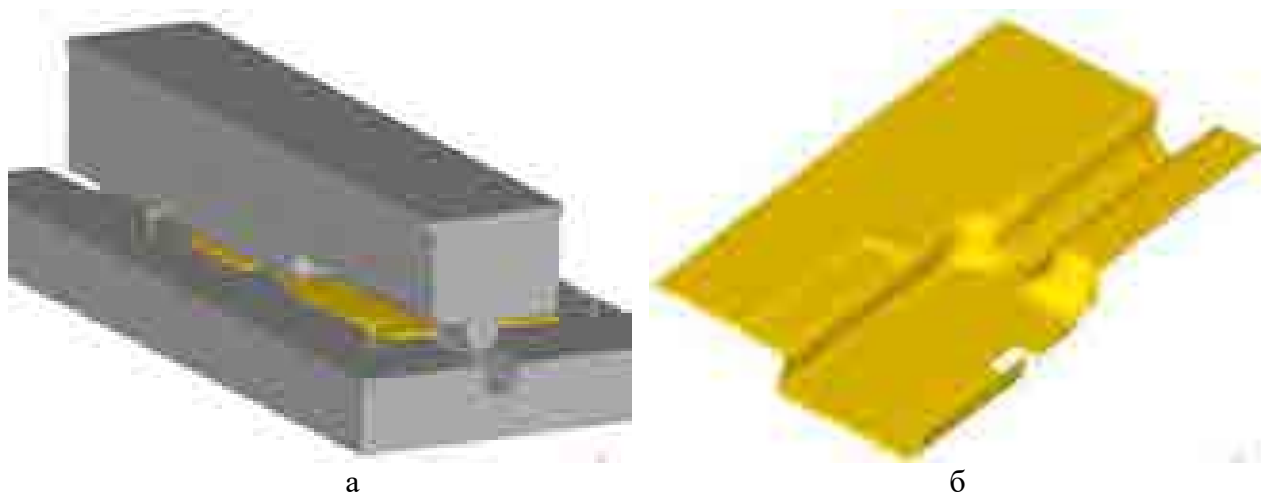


Рис. 2. Моделювання деформування заготовки з початковою геометрією:
а – схема деформування; б – zdeформований напівфабрикат

Однак програмний комплекс Deform не призначений для моделювання процесів, пов'язаних з руйнуванням матеріалу, тому очікувано за результатами моделювання руйнування заготовки в небезпечному перерізі не відбулось (рис. 3), хоча геометрія деталі, отримана за результатами моделювання процесу формовки (рис. 3) дуже точно повторює геометрію напівфабрикату, отриманого під час натурного експерименту (рис. 1).

Для прогнозування руйнування матеріалу заготовки в процесі деформування в Deform передбачено використання різноманітних критеріїв руйнування [7]. В даній роботі використовувався критерій руйнування Normalized Cockcroft-Latham, значення якого визначаються за формулою:

$$C = \int \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon},$$

де $\bar{\varepsilon}$ – накопичена пластична деформація, $d\bar{\varepsilon}$ – приріст накопиченої деформації, σ^* – максимальне головне напруження, $\bar{\sigma}$ – інтенсивність напружень.

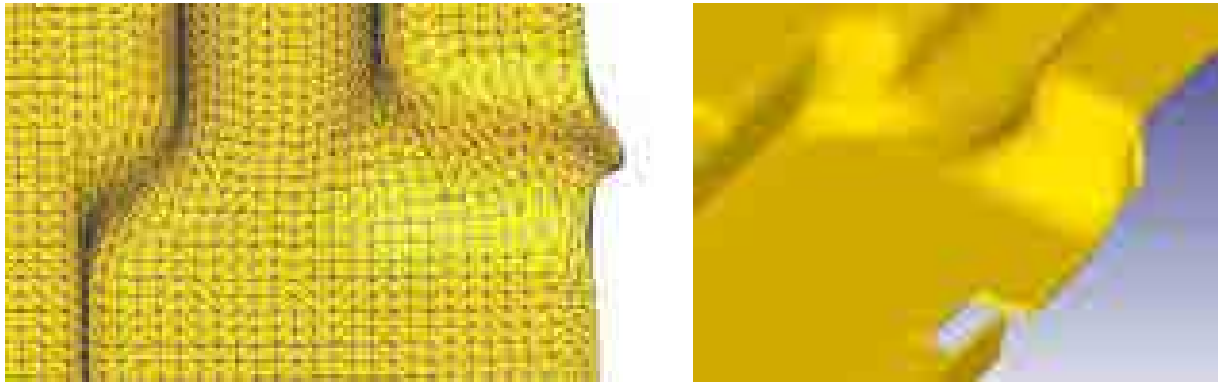


Рис. 3. Характер деформування заготовки в місці руйнування напівфабрикату

Для оцінки ймовірності руйнування було використано граничне значення критерію 0,6, встановлене для сталі 20 [8]. При цьому виходили з припущення, що даний критерій безрозмірний і його що граничне значення для сталі 30ХГСА якщо і буде відрізнятися від прийнятого, то не суттєво, а перевищення розрахованих значень критерію руйнування граничного значення сигналізує про високу ймовірність руйнування заготовки у даному місці в процесі деформування.

На рис. 4 представлені картини розподілу інтенсивності деформацій та значень критерію руйнування на небезпечній ділянці заготовки.

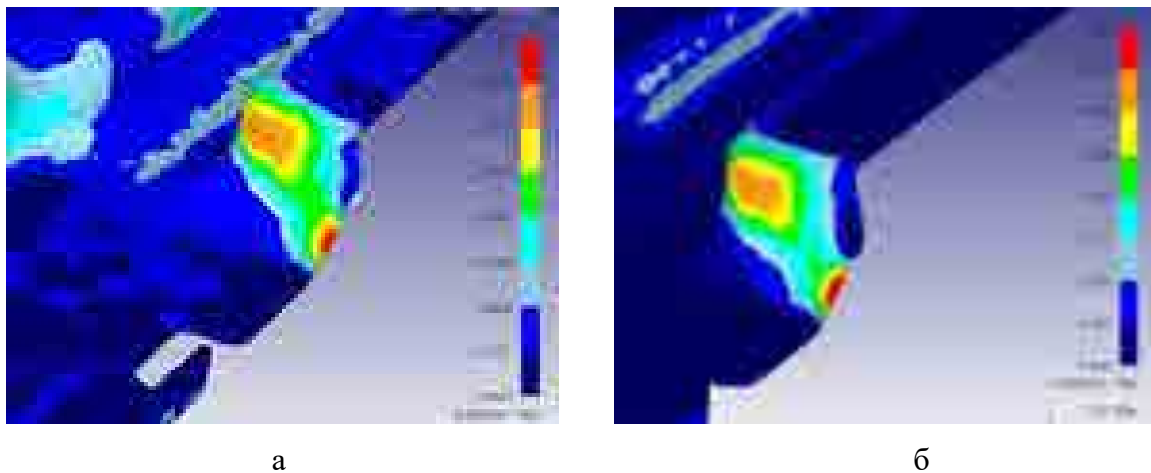


Рис. 4. Розподіл параметрів деформованого стану в zdeформованій заготовці з початковою геометрією:

а – інтенсивності деформації ε_i ; б – значень критерію руйнування

З рис. 4 видно, що на небезпечній ділянці напівфабрикату існує два місця з піковими значеннями інтенсивності деформації та критерію руйнування, а максимальні значення критерію руйнування 1,6 (значно перевищує прийняте граничне значення 0,6) та інтенсивності деформації $\varepsilon_{i\max}=1,45$ відповідають місцю руйнування заготовки у реальному процесі (рис. 1).

Також за результатами аналізу процесу деформування заготовки було встановлено що початкова форма вихідної заготовки не оптимальна, вона ускладнює процес деформування напівфабрикату та призводить до небажаного збільшення ступеня деформації на небезпечній ділянці.

Для покращення умов деформування геометрія вихідної заготовки була скорегована (рис. 5, а) та виконане моделювання процесу формування напівфабрикату із скорегованої заготовки (рис. 5, б).



Рис. 5. Моделювання деформування заготовки зі скорегованою геометрією:
а – елемент контуру заготовки; б – zdeформований напівфабрикат

На рис. 6 представлені картини розподілу інтенсивності деформацій та значень критерію руйнування на небезпечній ділянці напівфабрикату при деформуванні скорегованої заготовки.

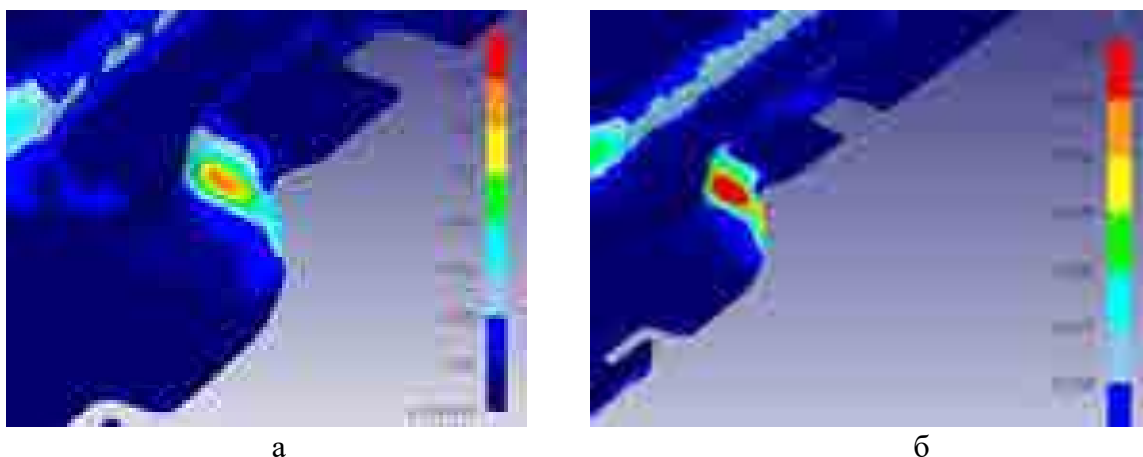


Рис. 6. Розподіл параметрів деформованого стану в zdeформованій заготовці зі скорегованою геометрією:
а – інтенсивності деформації ε_i ; б – значень критерію руйнування

Результати моделювання показали, що використання заготовки зі скорегованою геометрією дозволяє розвантажити ділянку напівфабрикату на радіусній кромці пуансона, де відбувалось руйнування заготовки, проте залишилась небезпечна ділянка на радіусній кромці матриці. Максимальне значення інтенсивності деформації на цій ділянці становить $\varepsilon_{i\max} = 1,3$, критерію руйнування – 1,5, що перевищує прийняте граничне значення 0,6 та свідчить про дуже високу ймовірність руйнування.

Проведений натурний експеримент підтвердив, що використання заготовки із скорегованою геометрією дозволяє уникнути руйнування заготовки на радіусній кромці пуансону, проте руйнування заготовки відбулось на радіусній кромці матриці (рис. 7), де за результатами моделювання значення критерію руйнування перевищили граничне значення.

Оскільки величина деформації матеріалу заготовки на кромці матриці за інших рівних умов залежить від радіуса заокруглення матриці, наступним кроком був підбір за результатами моделювання мінімально допустимого радіуса заокруглення кромки матриці у місці руйнування.

За результатами чисельних експериментів була підібрана відповідна геометрія матриці, за якої значення критерію руйнування вдалось знизити до критичного значення 0,6...0,62 (рис. 8).



Рис. 7. Характер руйнування скорегованої заготовки при деформуванні

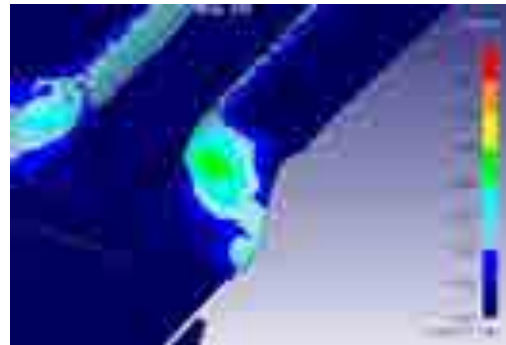


Рис. 8. Розподіл значень критерію руйнування за результатами моделювання деформування заготовки інструментом з оптимізованою геометрією

Відповідно до отриманих даних були скореговані геометрія та розміри деформуючої матриці. Остаточні результати по формуванню напівфабрикату корпусу представлені на рис. 9. Як видно з рисунку, деформування відбулось у відповідності до результатів моделювання, без руйнування заготовки в процесі деформування. При виготовленні експериментальної партії напівфабрикатів корпусу деформування заготовок відбувалось прогнозовано, без руйнування.



Рис. 9. Результати натурного експерименту по деформуванню заготовки інструментом з оптимізованою геометрією

ВИСНОВКИ

В роботі за результатами порівняльного аналізу комп'ютерного моделювання та натурних експериментів по деформуванню сталі 30ХГСА в процесі формовки напівфабрикату корпусної деталі великокаліберного кулемета встановлено, що використання граничного значення 0,6 критерію руйнування Normalized Cockcroft-Latham дозволяє за результатами моделювання ефективно прогнозувати руйнування листової заготовки в процесі формовки. Підтверджено, що якщо за результатами моделювання розраховані значення критерію руйнування не перевищують граничного значення, формовка в реальних умовах протікає без руйнування заготовки. Отримані результати досліджень дозволили шляхом моделювання оптимізувати форму вихідної заготовки та деформуючого інструменту з наступним їх доопрацюванням, що забезпечило подальше штампування напівфабрикату без руйнування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение. 1979. 520 с.
2. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка Под общ. ред. Л.И. Рудмана. Москва: Машиностроение. 1988. 496 с.
3. Стеблюк В.І., Орлюк М.В., Шкарлута Д.Б. Витягування вісесиметричних тонкостінних виробів із нержавіючої сталі 04X18H9T. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*: Тематич. зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА. 2007. С. 268–270.
4. Калюжний В. Л., Ярмоленко О. С., Марчук К. Л. Штампування із маловуглецевої сталі заготовки гільзи середніх розмірів. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2021. 5. 1. С. 113–121.
5. Калюжний В.Л., Бісик С.П., Калюжний О.В., Горностай В.М. Підвищення продуктивності та зниження витрат металу при штампуванні латунних гільз великої довжини. *Озброєння та військова техніка*. Київ. 2021. 2(30). С. 85–95.
6. Stebunov S., Vlasov A., Biba N. Prediction of the fracture in cold forging with modified Cockcroft-Latham criterion. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918309594>
7. Власов А. В. Расчет поврежденности металла при холодной радиальной ковке по результатам конечно-элементного моделирования в программе Deform 3D. *Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения и обработки давлением: сборник докладов и материалов IX Конгресса «Кузнец-2009»*. Рязань. 2009. С. 204–218.
8. Орлюк М. В. Граничні значення критеріїв руйнування при моделюванні процесів витягування в середовищі DEFORM. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА. 2017. 2(45). С. 22–29. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2\(45\)_2017/article/6.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2(45)_2017/article/6.pdf)

REFERENCES

1. Romanovskii V.P. Cold Forging Handbook. 6th edition revised and expanded. Leningrad: Machinebuilding. 1979. 520 p. (*in Russian*).
2. Die design Handbook: Sheet Metal Stamping. Under the general editorship of L.I. Rudmana. Moscow: Machinebuilding. 1988. 496 p. (*in Russian*).
3. Stebliuk V.I., Orliuk M.V., Shkarluta D.B. Axisymmetric drawing of thin-walled products made of stainless steel 04Cr18Ni9Ti. *Improvement of pressure processing processes and equipment in metallurgy and mechanical engineering*: Thematic collection of scientific papers. Kramatorsk: DSEA. 2007, pp. 268-270. (*in Ukrainian*).
4. Kaliuzhnyi V.L., Yarmolenko O.S., Marchuk K.L.. Stamping of mild steel blank of medium cartridge case. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2021. 5. 1, pp. 113–121. (*in Ukrainian*).
5. Kaliuzhnyi V.L., Bisys S.P., Kaliuzhnyi O.V., Hornostai V.M. Productivity increasing and metal consumption reducing while large length brass sleeves stamping. *Armament and military equipment*. Kyiv. 2021. 2(30), pp.85-95. (*in Ukrainian*).
6. Stebunov S., Vlasov A., Biba N. Prediction of the fracture in cold forging with modified Cockcroft-Latham criterion. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918309594>
7. Vlasov A.V. Metal damage calculation while cold radial forging according to the results of finite element simulation in Deform 3D software package. *State, problems, and prospects for the development of forging engineering and metal forming processes*: Reports and materials collection of the IX Congress "Blacksmith-2009". Ryazan. 2009, pp. 204–218. (*in Russian*).
8. Orliuk M.V. Limit values of fracture criteria while sheet drawing process simulating in DEFORM software package. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2017. 2(45), pp.22-29. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2\(45\)_2017/article/6.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2(45)_2017/article/6.pdf) (*in Ukrainian*).

Orliuk M., Pimanov V. Using of the DEFORM software package to optimize sheet metal forming operations

Using only practical recommendations of reference literature while developing of the technology of parts with complex geometry manufacturing and stamping equipment design, does not ensure high-quality parts obtaining and defects absence, since these recommendations cannot consider all the features of deformation in specific conditions. In case of defects emergence during the stamping, developed technological process or existing stamping equipment needs to be improved. A similar problem, related to the material fracture, arose in the process of heavy machine gun body part stamping from a sheet steel blank made of 30CrMnSiA steel. To eliminate defects, the effectiveness of using the DEFORM software package was studied to determine the features of complex solid parts sheet metal forming and stamping process parameters optimization. Stamping process was studied using finite element method computer simulation in DEFORM 3D environment to acquired experimental results confirming. As a computer simulation optimization parameter limit values of Normalized Cockcroft-Latham criteria defined for axisymmetric sheet drawing operations were used. According to the results of the research, negative factors that led to overload of the workpiece material and its destruction in the process of deformation were identified. Obtained results made it possible to optimize the shape of the initial workpiece and the deforming tool. Deforming tool and workpiece geometry improvement was carried out on the condition of Normalized Cockcroft-Latham criteria limit value equal 0,6 defined for axisymmetric sheet drawing operations is not exceeded.

The results of the natural experiment proved the relevancy of the accepted assumptions. After making appropriate changes to the geometry of the initial workpiece and the deforming tool, the problem of the defects appearance during stamping was successfully solved.

Keywords: stamping, optimization, forming, computer simulation, finite element method, fracture criteria.

Орлюк М. В., Пиманов В. В. Использование программного комплекса DEFORM для оптимизации операций листовой формовки

Использование при разработке технологии изготовления деталей со сложной геометрией из листового материала и проектировании соответствующего штампового оснащения только практических рекомендаций справочной литературы не гарантирует получения качественных деталей и отсутствие брака по результатам штамповки, поскольку эти рекомендации не могут учесть все особенности деформирования в конкретных условиях. В случае появления при штамповке брака разработанный технологический процесс или существующее штамповое оснащение требует доработки. Подобная проблема, связанная с разрушением материала, возникла при штамповке корпусной детали крупнокалиберного пулемета из листовой заготовки из стали 30ХГСА. С целью устранения брака в работе была исследована эффективность использования программного комплекса DEFORM для определения особенностей листовой формовки сложных пространственных деталей и оптимизации параметров процесса деформирования. Процесс деформирования исследовался с помощью компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов в среде DEFORM 3D и проверки полученных результатов экспериментальным путем. При моделировании в качестве оптимизационного параметра в работе использовались предельные значения критерия разрушения Normalized Cockcroft-Latham, определенные для операций осесимметричной вытяжки без утонения. По результатам исследований были выявлены негативные факторы, приводившие к перегрузке материала заготовки в процессе деформирования и его разрушения. Полученные результаты позволили оптимизировать форму исходной заготовки и деформирующего инструмента. Оптимизация геометрии деформирующего инструмента и заготовки велась при условии, что по результатам моделирования в наиболее деформированных участках заготовки рассчитанные значения критерия разрушения Normalized Cockcroft-Latham не должны превышать предельного значения 0,6, определенного для операции осесимметричной вытяжки. Результаты натурного эксперимента подтвердили правомерность принятых допущений. После внесения соответствующих изменений в геометрию исходной заготовки и деформирующего инструмента проблема появления брака во время штамповки была успешно решена.

Ключевые слова штамповка, оптимизация, формовка, численное моделирование, метод конечных элементов, критерий разрушения.

Орлюк Михайло Володимирович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

Orliuk Mykhailo – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor NTU “I. Sikorsky KPI”

Орлюк Михаил Владимирович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»

E-mail: minorkpi@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4728-9097>

Піманов Валерій Володимирович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

Pimanov Valerii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor NTU “I. Sikorsky KPI”

Пиманов Валерий Владимирович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»

E-mail: pimanov@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6609-6904>

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

NTU “I. Sikorsky KPI” – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv

НТУУ «КПИ им. И. Сикорского» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев

Стаття надійшла до редакції 14.05.22 р.

Кухар В. В.
Горностай В. М.
Курпе О. Г.

ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТА ВИТРАТИ ЕМУЛЬСОЛУ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ СМУГ З ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ НА БЕЗПЕРЕРВНОМУ 4-Х КЛІТЬОВОМУ СТАНІ 1680

У роботі виконане порівняння споживання електроенергії при холодній прокатці на безперервному 4-х клітьовому стані тандем 1680 для сортаменту з вуглецевих сталей із використанням мастильно-охолоджуючих емульсолів «Quakerol» та «Універсал ІТС». Об'єктом дослідження був процес виробництва холоднокатаних штаб у цеху холодної прокатки. Предметом дослідження стали закономірності впливу технологічних умов виготовлення холоднокатаних штаб на чотирьох клітьовому стані 1680 з використанням емульсолів «Quakerol» та «Універсал-ІТС» на енергосилові параметри прокатки. Виявлено, що середнє сумарне навантаження на двигуни прокатних клітей і моталку при використанні емульсії «Quakerol» на 4,19 % вище, ніж при виробництві такого ж сортаменту, прокатаного на емульсії з «Універсал-ІТС». Показано, що сумарні питомі витрати електроенергії при прокатці на емульсії, приготованій з дослідного емульсолу «Quakerol», більше на 2,7 %, ніж при прокатці на емульсії, приготованій з серійного емульсолу «Універсал-ІТС». Обґрунтоване припущення, що більш висока питома витрата електроенергії при експлуатації мастильно-охолоджувальної рідини з дослідного емульсолу, що має більш високе число омилання, може бути причиною невірно вибраної і заниженої концентрації емульсії з метою зниження витрати емульсолу на процес прокатки. Встановлено, що загальні витрати емульсолу «Quakerol» склали 0,151 кг/т прокату, при чому виявлено, що тривалість використання до заміни дослідної емульсії «Quakerol» у 2,17 рази більше, ніж емульсії «Універсал-ІТС».

Ключові слова: холодна прокатка, безперервний стан 1680, емульсол, енергоспоживання, питомі витрати електроенергії.

Чотирьохклітьові безперервні чотиривалкові стани застосовують для холодної прокатки штаб та листів широкого призначення товщиною 0,6–2,5 мм, шириною 1300–1800 мм з гарячої штаби (підкату) товщиною 3–8 мм у рулонах масою 25–50 т. Довжина бочки валків 1500–2000 мм при діаметрі робочих валків 500–550 мм і опорних – 1300–1500 мм. Швидкість прокатки – щонайменше 5–12 м/с, продуктивність – від 0,6–0,8 млн. т на рік [1]. Із зарубіжного сучасного досвіду в області станів холодної прокатки слід відзначити насамперед широке застосування станів з чотиривалковими клітями тандемного типу у складі чотирьох та п'яти клітей для виробництва смуг і п'яти та шести клітей для виробництва жерсті [2, 3].

Підвищення конкурентоспроможності та виробітки продукції цеху холодної прокатки (ЦХП) досягають використанням сучасних емульсій, які забезпечують належний рівень показників якості холоднокатаних рулонів [4–6]. Використання нового емульсолу «Quakerol» замість «Універсал-ІТС» потребує оцінки впливу цієї мастильно-охолоджувальної рідини на показники якості, технологічності й енергосилові параметри прокатки. Нові результати дозволять розробити та рекомендувати технологічні умови використання емульсолу «Quakerol» в технологіях холодної прокатки, прогнозувати показники якості та витрати емульсолу.

Об'єктом дослідження був процес виробництва холоднокатаних штаб у цеху холодної прокатки. Предметом дослідження стали закономірності впливу технологічних умов виготовлення холоднокатаних штаб на чотирьох клітьовому стані 1680 з використанням емульсолів «Quakerol» та «Універсал-ІТС» на енергосилові параметри прокатки.

У роботі [7] значну увагу приділено підвищенню енергетичної ефективності холодної прокатки на новому двох клітьовому реверсивному стані 1700 (стосовно до умов комбінату «Запоріжсталь»). Шляхом проведення розрахунків показано, що застосування емульсолів «Cold Roller» та «Агрінол ОМ» дозволить знизити розхід електроенергії при холодній прокатці штаб на 1–7 %. Умови силового навантаження на електродвигун реверсивного стану холодної прокатки 1680 розглянуто у роботі [8]. Виявлено важливість забезпечення надійності й стабільності режимів роботи електрообладнання й автоматики для досягнення високої якості та відсутності дефектів прокатки тонких холоднокатаних штаб. Причому, особливо підкреслено

необхідність проведення прокатки з емульсіями типу «Універсал-1ТС» і «Cold Roller» для досягнення пом'якшення умов експлуатації електродвигунів прокатного стану.

Дослідження [9, 10] присвячені виявленню впливу характеристик і фізико-хімічних властивостей різних емульсолів на енерговитрати безперервних станів холодної прокатки. В них визначено, що використання емульсолу з більшою кінематичною в'язкістю дозволяє в деяких випадках знизити питомі витрати електроенергії. У станах тандем режим роботи електродвигунів клітей повинні бути синхронізовані [11] з врахуванням деформаційних явищ (різні витяжки штаби по клітях, нагрівання-охолодження при прокатці тощо), що впливає на показники якості та розхід електроенергії.

Умови тертя і змащування, як правило, суттєво впливають на енергосилові режими деформації [12]. Коефіцієнт деформаційного тертя визначають різноманітними способами, серед яких для пластичної деформації найпоширенішим є осаджування заготовок з різними умовами на контакті інструмент-заготовка [13]. Дослідження [14] присвячено аналізу режимів деформації на одноклітьовому стані холодної прокатки 1500. Причому, як за рахунок зміни контактних умов, так і за рахунок варіювання натягами, розроблено енергозберігаючі режими прокатки штаб товщиною 0,4, 0,5 та 0,8 мм.

В роботі [15] представлені результати випробувань трьох прокатних емульсій: «Gerolub 3022», «Gerolub CTS 87-1» та «Gerolub 6528». Визначено, що застосування цих прокатних емульсолів дозволяє збільшити швидкість прокатки при збереженні якості поверхні виробу та зниженні енергосилових параметрів прокатки порівняно з параметрами, отриманими раніше під час використання мастил «Quakerol 683» та «Quakerol NLM 4.0». В той же час, дослідники [16] відзначають, що за час проведення ними однократних оцінок більш ефективного емульсолу, ніж «Quakerol 671», для умов ЦХП 1700 БАТ «АМТ» не виявлено.

Метою роботи є оцінка завантаження електродвигунів та споживання електроенергії в умовах безперервного стану холодної прокатки, враховуючі перспективи застосування емульсолу «Quakerol» замість з емульсолу «Універсал-1ТС».

Для проведення дослідно-промислових випробувань було поставлено 11 м³ (~9900 кг) дослідного емульсолу «Quakerol». Для визначення фактичних фізико-хімічних показників було відібрано проби емульсолу. Враховуючи те, що гарячекатаний травлений прокат може перебувати перед прокаткою у відкритому просторі не більше 48 годин, а кампанія випробувань дослідного емульсолу «Quakerol» тривала близько місяця, то розподіл дослідної плавки для порівняльного прокатування частини рулонів на серійному емульсолі «Універсал-1ТС» не виконували. Для порівняння використовували дані, отримані раніше на рулонах, прокатаних на емульсії з емульсола «Універсал-1ТС» більш ранніх поставок.

Проведено вхідний контроль відповідності характеристик емульсолу вимогам ТУ У 24.6-31709624-001:2005. Встановлено, що випробуваний зразок дослідного емульсолу «Quakerol» відповідає вимогам паспорту якості. За своїми фізико-хімічними показниками дослідний емульсол «Quakerol» відрізняється від застосовуваного емульсолу «Універсал-1ТС» тим, що має більш високі змащувальні властивості (число омилення 164,44 мгКОН/г, проти 38,57 мгКОН/г у емульсу «Універсал-1ТС»).

Безперервний чотирьох клітьовий стан 1680 є основним прокатним станом цеху холодної прокатки (ЦХП-1, ПрАТ «Запоріжсталь»). Він складається з 4-х послідовно розташованих клітей кварто, що мають у своєму складі два опорних і два робочих валка, а також допоміжного обладнання (підвідного приймального пристрою, поворотного столу, розмотувача, моталки барабанного типу та ін.). Характеристика приводу валків наведена у табл. 1.

Привід робочих валків від електродвигунів здійснюється через проміжні вали із зубчатою муфтою, шестеренні кліті та шпіндельні з'єднання. Характеристика валків наведена у табл. 2.

Для поліпшення захоплення першої кліті використовуються насічені робочі валки. У четвертій кліті також використовуються робочі валки з насіченою поверхнею для унеможливлення зварювання витків рулонів при подальшій термообробці. Для кожної марки сталі, а також кінцевого перерізу холоднокатаних смуг, розроблено режими обтиснення.

Таблиця 1

Характеристика приводу валків

№ кліти	Потужність двигуна, кВт	Число обертів якоря, об/хв	Швидкість прокатки, м/с
1	3300	110/200	2,75 - 5,0
2	3300	160/280	4,0 - 7,0
3	3300/2800	220/280	5,8 - 9,5
4	2 x 1650	200/450	5,6 - 10

Таблиця 2

Характеристика валків безперервного стану

Вид валків	Діаметр діжки, мм	Довжина діжки, мм	Маса валка, т	Тип підшипників
Робочі	510	1680	3,12	Роликові
Опорні	1300	1680	23,6	Рідинного тертя

Стан обладнаний системою подачі технологічного мастила (емульсія з концентрацією емульсолу 2–4 %), системами протизгинання робочих валків, контрольно-вимірювальною апаратурою, за допомогою якої здійснювали контролювання енергосилових параметрів прокатки та енергоспоживання.

Аналіз енергосилових параметрів прокатки. Проаналізовані режими роботи електродвигунів клітей і моталки стану "Тандем" при прокатці плавков на мастильно-охолоджувальній рідині (МОР) з дослідного емульсолу «Quakerol», промасленого емульсом «Quakerol» і серійного емульсолу «Універсал-1ТС», промасленого маслом консервації «ОК-2». Результати аналізу навантажень при прокатці смуг перерізом 0,68x1000 мм з підкату завтовшки 3,0 мм узагальнені в табл. 3.

Таблиця 3

Середні сумарні навантаження на двигуни при прокатці

Марка сталі	Розмір	Середнє сумарне навантаження на електродвигуни клітей та моталку при прокатці одного рулону дослідної плавки, кВА	
		Прокат на емульсії з дослідного емульсолу «Quakerol»	Прокат на емульсії з емульсом «Універсал-1ТС»
08кп	3,0/1,0 × 1265	10,965	10,505

Як видно з табл. 3, середнє сумарне навантаження на двигуни клітей і моталку 4-х клітьового стану 1680 в установленому режимі прокатки при використанні емульсії з дослідного емульсолу «Quakerol» на промасленому емульсом «Quakerol» металі на 4,19 % вище, ніж при прокатці такого ж сортаменту, промасленого в БТА-4 маслом ОК-2 і прокатаного на емульсії з «Універсал-1ТС».

Аналіз спожитої електроенергії. Проаналізовано споживання електроенергії при прокатці однотипного сортаменту при прокатці плавков на МОР з дослідного емульсолу «Quakerol», промасленого емульсом «Quakerol» і серійного емульсолу «Універсал-1ТС», промасленого маслом консервації «ОК-2». Дані про спожиту електроенергію представлені в табл. 4.

Як видно з табл. 4, сумарна питома витрата електроенергії при прокатці на емульсії, приготованій з дослідного емульсолу «Quakerol» дещо більша (на 2,7 %), ніж витрата при прокатці на емульсії, приготованій з серійного емульсолу «Універсал-1ТС». При цьому середня концентрація емульсії при прокатці рулонів на емульсолі «Quakerol» складала 1,9 % проти 3,0 % на рулонах, прокатаних на МОР, приготованою з серійного емульсолу «Універсал-1ТС». Більш висока питома витрата електроенергії при експлуатації МОР з дослідного емульсолу, що має більш високе число омилання, може бути причиною невірно вибраної і заниженої концентрації емульсії з метою зниження витрати емульсолу на прокат.

Витрата емульсолу. Тривалість роботи дослідної емульсії «Quakerol» при випробуваннях склала 521 годину проти 240 годин згідно технологічним інструкціям (у 2,17 рази більше, ніж для емульсолу «Універсал-1ТС»). Випробування були зупинені унаслідок повного вироблення дослідного емульсолу. Дослідний емульсол використовувався як для промаслення гарячекатаних смуг в лінії безперервно-травильного агрегату (БТА-4), так і для приготування прокатної емульсії. Окрім цього, 200 кг емульсолу витрачені на приготування збідненої емульсії (концентрація – 0,5 %) для промивання емульсивної системи стану Тандем.

Таблиця 4

Споживання електроенергії при прокатці на стані тандем

Розмір штаб, мм	Кількість рулонів, шт	Концентрація емульсії при прокатці, %	Розходування електро-енергії, КВт×год	Маса рулонів, т	Питомий розхід електро-енергії, КВт×год/т	Сумарний розхід електро-енергії при прокатці, КВт×год/т
«Quakerol»						
0,5×1000	10	1,5	9063,9	98	92,49	504
1,5×1250	4	1,8	1746,9	53,06	32,92	
0,5×1000	13	1,9	12852	143,16	89,77	
1,5×1250	9	1,8	4236,3	117,23	36,14	
0,5×1000	6	1,7	5595,3	68,13	82,13	
1,5×1250	9	2	3919,5	113,76	34,45	
0,5×1000	5	2,4	5344,2	56,89	93,94	
1,5×1250	10	2	4609,8	109,75	42,00	
Середнє значення концентрації емульсії		1,9				
«Універсал-1ТС»						
0,5×1000	4	3,1	3800,7	44,21	85,97	490
1,5×1250	4	2,6	1693,8	54,74	30,94	
0,5×1000	7	3,8	6930,9	78,58	88,20	
1,5×1250	8	3	3631,5	93,95	38,65	
0,5×1000	9	2,7	8404,2	101,23	83,02	
1,5×1250	11	3,3	4701,6	147,54	31,87	
0,5×1000	9	2,2	9208,8	96,94	94,99	
1,5×1250	6	3	2781,9	76,58	36,33	
Середнє значення концентрації емульсії		3,0				

За перший період випробувань було промаслено емульсом «Quakerol» 40918,38 т гарячекатаного металу. За вказаний період витрачено 3600 кг емульсолу. Витрата емульсолу склала: $3600 / 40918,38 = 0,088$ кг/т (при нормі для «ОК-2» – 0,1 кг/т). Протягом 12 днів був другий період, коли прокат не промаслювався, що призводило до збільшення витрат емульсолу на прокатному стані, відповідно для розрахунку загальної витрати емульсолу приймаємо витрату емульсолу на промаслення рівним $3600 / 64165 = 0,056$ кг/т.

Всього за два періоди випробувань було прокатано 64165,73 т (у тому числі: 1932,15 т нагарттованих рулонів, 1115,7 т для подальшого виготовлення жерсті, 61117,88 т для подальшого виготовлення холоднокатаних рулонів і листів). Для прокатки холоднокатаного прокату на стані витрачено 6300 кг емульсолу. Питома витрата емульсолу склала: $6300 \text{ кг} / 64165,73 = 0,095$ кг/т (норма 0,45 кг/т для емульсолу «Універсал-1ТС»). Загальна витрата емульсолу склала: $0,056 + 0,095 = 0,151$ кг/т прокату.

ВИСНОВКИ

Розроблено методики оцінки енергосилових параметрів при холодній прокатці з емульсолами. Встановлені закономірності впливу технологічних умов прокатки на 4-х клітьовому стані з використанням емульсолу «Quakerol» на енергосилові параметри прокатки. Виявлено, що середнє сумарне навантаження на двигуни клітей і моталку 4-х клітьового стану 1680 в установленому режимі прокатки при використанні емульсії «Quakerol» на 4,19 % вище, ніж при прокатці такого ж сортаменту, прокатаного на емульсії з "Універсал-1ТС". Встановлено рівень енергосилових витрат при прокатці у 4-х клітьовому стані з використанням емульсорів «Quakerol» та «Універсал 1ТС». Показано, що сумарні питомі витрати електроенергії при прокатці на емульсії, приготіваній з дослідного емульсолу «Quakerol», більше на 2,7 %, ніж при прокатці на емульсії, приготіваній з серійного емульсолу «Універсал-1ТС». Загальні витрати емульсолу «Quakerol» склали 0,151 кг/т прокату, при чому виявлено, що тривалість використання до заміни дослідної емульсії «Quakerol» у 2,17 рази більше, ніж емульсії «Універсал-1ТС».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Василев Я.Д., Самокиш Д.М., Журавльова С.В., Пройдак Ю.С., Замогильний Р.О. Стан виробництва тонкого плоского сталевго проката у світі і тенденції розвитку штабових станів холодної прокатки. *Теорія і практика металургії*. 2019. №1. С. 15–28. DOI:<https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.02>
2. Pittner J., Simaan M. A. Optimal control of continuous tandem cold metal rolling. *2008 American Control Conference*. Seattle, Washington, USA June 11-13. 2008, pp. 2834–2839.
3. Asghar M. T., Jungers M., Khelassi A., Francken J. Tandem cold rolling mill modeling for multi-variable control synthesis. *17th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, Aug 2016. Vienna. Austria. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01393445>
4. Мазур В. Л., Качайлов А. П., Иванченко В. Г., Добронравов А. И. Повышение качества листового проката. Киев: Техника, 1979. 143 с.
5. Мазур В. Л. Производство листа с высококачественной поверхностью. Киев: Техника. 1982. 166 с.
6. Tahir M., Ståhlberg U. Environmental improvement by using a water-based synthetic lubricant in steel-strip rolling. *Proceedings of Iron and Steel Society/AIME: 44th Mechanical Working and Steel Processing*. Orlando, USA, 2002. September 8-11. 40, pp. 291-302.
7. Василев Я. Д., Самокиш Д. Н., Замогильный Р. А. Разработка энергосберегающих режимов деформации на новом двухклетевом реверсивном стане холодной прокатки 1700 для комбината «Запорожсталь». *Металл и лите Украины*. 2013. 7 (242). С. 8–13.
8. Kukhar V., Korenko M., St'opin V., Karmazina I., Elchaninov A., Hurkovska S., Prysiazhnyi A., Zubrytskyi V. Operation Modes of Electric Motors of Reversing Cold Rolling Mill 1680 while Rolling with Emulsions. *Modern Electrical and Energy System*. Kremenichuk, Ukraine: Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. September 23–25. 2019, pp. 46–49. DOI:<https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896465>.
9. Кухар В. В., Кармазіна І. В., Присяжний А. Г. Вплив фізико-хімічних показників прокатної емульсії на енерговитрати безперервних станів холодної прокатки жерсті. *Проблеми трибології*. 2018. 4. С. 92–100. DOI:<https://doi.org/10.31891/2079-1372-2018-90-4-92-99>.
10. Василев Я. Д., Замогильный Р. О., Самокиш Д. М. Інженерна методика визначення антифрикційної ефективності емульсолів для холодної прокатки по їх фізико-хімічним властивостям. *Теорія і практика металургії*. 2018. 6. С. 15–21. DOI:<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.2>.
11. Kurpe O., Kukhar V., Puzyr R., Burko V., Balalayeva E., Klimov E. Electric Motors Power Modes at Synchronization of Roughing Rolling Stands of Hot Strip Mill. *Proceeding of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive*. 21–25 September 2020. Ukraine. Kremenichuk. 2020, pp. 510–513. DOI:<https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240818>.
12. Dykha A., Kukhar V., Artiukh V., Aleksandrovskiy M. Contact-deformation mechanism of boundary friction. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164, pp.14004. DOI:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016414004>.
13. Kukhar V.V., Klimov E.S., Chernenko S.M., Balalayeva E.Y. Correlation of Barreling Effect with Boundary Friction Coefficient during Upsetting of Various Materials Workpieces under Processing Conditions. *Material Science Forum*. 2020. Vol. 992, pp. 751–756. DOI:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.751>.
14. Романюк Р. Я. Энергосберегающие режимы обтирания для одноклетьевого реверсивного стану холодної прокатки 1500 ПАТ „МОДУЛЬ”. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету*. 2016. Т. 2. 29. С. 42–48.
15. Dolmatov A.P., Morozov A.V., Usachev M.A., Shipilov V.D., Chelyadinov A.A. Testing of rolling oils made by the Henkel company on a continuous five-stand 2030 mill. *Metallurgist*. 58. 9–10, pp. 788–795.
16. Naizabekov A., Samsonov D., Krivtsova O., Lezhnev S., Talmazan V., Arbuz A. Comparative evaluation of technologic lubricants. *International Conference on Metallurgy and Materials. Paper presented at the METAL 2013 - 22nd. Conference Proceedings*, pp 403-407.

REFERENCES

1. Vasilev Y.D., Samokish D.M., Zhuravleva S.V., Projdak Y.S., Zamogilny R.O. State of production of thin flat rolled steel in the world and trends of development of cold rolling mills. *Theory and Practice of Metallurgy*. 2019. 1, pp. 15–28. DOI:<https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.02>. (in Ukrainian).
2. Pittner J., Simaan M. A. Optimal control of continuous tandem cold metal rolling. *2008 American Control Conference*. Seattle. Washington. USA. 2008. June 11–13, pp. 2834–2839.
3. Asghar M. T., Jungers M., Khelassi A., Francken J. Tandem cold rolling mill modeling for multi-variable control synthesis. *17th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, Aug 2016. Vienna, Austria. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01393445>
4. Mazur V. L. L., Kachaylov A. P., Ivanchenko V. G., Dobronravov A. I. *Improvement of quality of sheet rolling*. Kiev: *Tehnika*. 1979. 143 p. (in Russian).
5. Mazur V. L. L. Sheet production with high quality surface. Kiev: *Technique*. 1982. 166 pp. (in Russian).
6. Tahir M., Ståhlberg U., Environmental improvement by using a water-based synthetic lubricant in steel-strip rolling. *Proceedings of Iron and Steel Society/AIME: 44th Mechanical Working and Steel Processing*. Orlando. USA. 2002. September 8 – 11. Volume 40, pp. 291–302.
7. Vasilev Y. D. D., Samokish D. N., Zamogilny R. A. Development of energy-saving deformation modes at the new two-stand reversing mill 1700 for Zaporizhstal plant. *Metal and casting of Ukraine*. 2013. № 7 (242), pp. 8–13. (in Russian).
8. Kukhar V., Korenko M., Stopin V., Karmazina I., Elchaninov A., Hurkovska S., Prysiashnyi A., Zubrytskyi V. Operation Modes of Electric Motors of Reversing Cold Rolling Mill 1680 while Rolling with Emulsions. *Modern Electrical and Energy System*. Kremenichuk, Ukraine: Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. 2019. September 23–25, pp. 46–49. DOI:<https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896465>.
9. Kukhar V. V., Karmazina I. V., Prysiashnyj A.G. Influence of physical and chemical indices of rolling momentum on energy consumption of continuous cold rolling mill. *Problems of tribology*. 2018. 4, pp. 92–100. DOI:<https://doi.org/10.31891/2079-1372-2018-90-4-92-99>. (in Ukrainian).
10. Vasilev Y. D. D., Zamogilny R.O., Samokish D.M. Ingenious method of specifying the antifriction effectiveness of cold rolling resins according to their physical and chemical properties. *Theory and practice of metallurgy*. 2018. 6, pp. 15–21. DOI:<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.2>. (in Ukrainian).
11. Kurpe O., Kukhar V., Puzyr R., Burko V., Balalayeva E., Klimov E. Electric Motors Power Modes at Synchronization of Roughing Rolling Stands of Hot Strip Mill. *Proceeding of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive*. 21–25 September 2020. Ukraine. Kremenichuk. 2020, pp. 510–513. DOI:<https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240818>.
12. Dykha A., Kukhar V., Artiukh V., Aleksandrovskiy M. Contact-deformation mechanism of boundary friction. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164, pp.14004. DOI:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016414004>.
13. Kukhar V.V., Klimov E.S., Chernenko S.M., Balalayeva E.Y. Correlation of Barreling Effect with Boundary Friction Coefficient during Upsetting of Various Materials Workpieces under Processing Conditions. *Material Science Forum*. 2020. Vol. 992, pp. 751–756. DOI:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.751>.
14. Romanjuk R.Y. Energy-saving modes of friction for single-plate reversing cold rolling mill 1500 of PAT "MODUL". *Collection of scientific works of Dnipropetrovsk State Technical University*. 2016. T. 2. 29, pp. 42–48. (in Ukrainian).
15. Dolmatov A.P., Morozov A.V., Usachev M.A., Shipilov V.D., Chelyadinov A.A. Testing of rolling oils made by the Henkel company on a continuous five-stand 2030 mill. *Metallurgist*. 58. 9–10, pp. 788–795.
16. Naizabekov A., Samsonov D., Krivtsova O., Lezhnev S., Talmazan V., Arbuz A. Comparative evaluation of technologic lubricants. *International Conference on Metallurgy and Materials. Paper presented at the METAL 2013 - 22nd. Conference Proceedings*, 403–407.

Kukhar V. V., Hornostai V. M., Kurpe O. G. Energy consumption and emulsol spending during cold flat rolling of carbon steel on a continuous 4-stand mill 1680.

The paper compares energy consumption during cold rolling on a 4-stand mill 1680 of carbon steel assortment using "Quakerol" and "Universal-ITS" lubricating-cooling emulsols. The object of the study was the manufactory process for cold rolled strips in the cold rolling shop. The subject of the study were regularities of the technological conditions influence for cold rolled strips production on a four-stand mill 1680 with the use of "Quakerol" and "Universal-ITS" emulsions on the rolling energy and power parameters. It was found that the average total load on mill's stands motors and winder when using "Quakerol" emulsion is on 4.19% higher than when rolling the same assortment rolled with emulsion from "Universal-ITS". It is shown that the total specific consumption of electricity when rolling on an emulsion prepared from the experimental "Quakerol" emulsol is 2.7% more than rolling on an emulsion prepared from the serial "Universal-ITS" emulsol. The assumption is substantiated that higher specific power consumption in the operation of lubricant-coolant from experimental emulsols, which has a higher saponification number, can be the cause of incorrectly selected and emulsion underestimated concentration in order to reduce the emulsol consumption for the rolling process. It was established that the total consumption of the "Quakerol" emulsion was 0.151 kg/t of rolled product, and it was found that the duration of use before replacement of the experimental emulsion "Quakerol" is in 2.17 times more than that of the "Universal-ITS" emulsion.

Key words: cold rolling, 1680 continuous mill, emulsol, energy consumption, specific consumption of electricity

Кухарь В. В., Горностай В. Н., Курпе А. Г. Энергопотребление и расход эмульсола при холодной прокатки полос из углеродистой стали на непрерывном 4-х клетевом стане 1680.

В работе проведено сравнение потребления электрической энергии при холодной прокатке на непрерывном 4-х клетевом стане тандем 1680 для сортамента из углеродистых сталей с использованием смазочно-охлаждающих эмульсолов «Quakerol» и «Универсал-ИТС». Объектом исследования был процесс производства холоднокатаных полос в цехе холодной прокатки. Предметом исследования стали закономерности влияния технологических условий изготовления холоднокатаных полос на четырех клетевом стане 1680 с использованием эмульсолов «Quakerol» и «Универсал-ИТС» на энергосиловые параметры прокатки. Выявлено, что средняя суммарная нагрузка на двигатели прокатных клетей и моталку при использовании эмульсии Quakerol на 4,19 % выше, чем при производстве такого же сортамента, прокатанного с использованием эмульсии Универсал-ИТС. Показано, что суммарный удельный расход электроэнергии при прокатке на эмульсии, приготовленной из опытного эмульсола «Quakerol», больше на 2,7 %, чем при прокатке на эмульсии, приготовленной из серийного эмульсола «Универсал-ИТС». Обосновано предположение, что более высокий удельный расход электроэнергии при эксплуатации смазочно-охлаждающей жидкости из опытного эмульсола, имеющего более высокое число омыления, может быть причиной неверно выбранной и заниженной концентрации эмульсии с целью снижения расхода эмульсола на процесс прокатки. Установлено, что общие расходы эмульсола «Quakerol» составили 0,151 кг/т проката, причем обнаружено, что продолжительность использования до замены опытной эмульсии «Quakerol» в 2,17 раза больше, чем эмульсии «Универсал-ИТС».

Ключевые слова: холодная прокатка, непрерывный прокатный стан 1680, эмульсол, энергопотребление, удельный расход электроэнергии.

Кухар Володимир Валентинович – д-р техн. наук, професор, проректор з науково-дослідної роботи, ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»

Kukhar Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, vice-rector for R&D work, "Metinvest Polytechnic Technical University" LLC

Кухарь Владимир Валентинович – д-р техн. наук, профессор, проректор по научно-исследовательской работе, ООО «Технический университет «Метинвест Политехника»

E-mail: kvv.mariupol@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4863-7233>

Горностай Вадим Миколайович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

Hornostai Vadym – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Горностай Вадим Николаевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии изготовления летательных аппаратов НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»

E-mail: w.gornostay@kpi.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5766-931X>

Курпе Олександр Геннадійович – д-р техн. наук, керівник групи холодного прокату, ТОВ «Метінвест Інжиніринг»

Kurpe Oleksandr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, head of the cold rolling group, "Metinvest Engineering" LLC

Курпе Александр Геннадиевич – д-р техн. наук, руководитель группы холодного проката, ООО «Метинвест Инжиниринг»

E-mail: aleksandr.kurpe@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2039-7239>

ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя

"Metinvest Polytechnic Technical University" LLC, Zaporizhzhia

ООО «Технический университет «Метинвест Политехника», м. Запорожье

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

НТУУ «КПИ им. И. Сикорского» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина.

"Metinvest Engineering" LLC, Dnipro

ООО «Метинвест Инжиниринг», г. Днепр

ТОВ «Метінвест Інжиніринг», м. Дніпро

Статья поступила в редакцию 21.05.2022 г.

ХОЛОДНЕ ПРОКАТУВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ AL-MG

Алюмінієві зварювані та термічно не зміцнювальні сплави системи Al-Mg широко використовуються в якості легких конструкційних матеріалів в різноманітних галузях промисловості. Покращення питомих міцнісних характеристик таких сплавів за рахунок холодної пластичної деформації є однією із актуальних науково-технічних проблем. Проте важливим питанням при розробці технологічних режимів пластичної формозміни алюмінієвих сплавів також є прогнозування руйнування, яке супроводжується розвитком та збільшенням кількості мікропор та мікротріщин. В роботі виконано дослідження деформаційної обробки алюмінієвого сплаву системи Al-Mg холодним прокатуванням. Чисельне моделювання процесу холодного прокатування алюмінієвого сплаву 5056 системи Al-Mg виконували методом скінченних елементів із використанням програмного комплексу для інженерного аналізу технологічних операцій обробки металів тиском DEFORM-3D. В результаті чисельного експерименту було отримано графік моментів, що виникають на валках. Також отримано розподіли напружень (інтенсивності напружень та середніх напружень в осередку деформування,) при максимальному моменті на валках та деформації (інтенсивності деформації та інших компонентів) в кінці деформування. Проведений аналіз накопичення пошкоджуваності, що встановлено моделюванням. В даній роботі при чисельному моделюванні пошкоджуваність металу розраховували по критерію руйнування Cockcroft & Latham. Також наведені результати експериментальних досліджень, в тому числі мікроструктури, після проведеного процесу прокатування. Встановлено, що після прокатування отримуємо зерно довжиною 100...200 мкм та шириною 10...20 мкм.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, метод скінченних елементів, моделювання, прокатування, інтенсивність напружень, інтенсивність деформації, середні напруження, середні деформації, крайові зони.

Прокатування – такий вид обробки металів тиском (ОМТ), під час якого заготовка силами тертя втягується у проміжок між обертальними валками, які її пластично деформують, при цьому зменшуючи площу поперечного перерізу і збільшуючи довжину. Цей процес належить до найпродуктивніших видів обробки завдяки безперервності процесу і великій швидкості руху заготовки між валками. Цим способом обробляють приблизно 90 % витоленої на металургійних заводах сталі та понад половину кольорових металів і їх сплавів [1]. На сьогодні застосування алюмінієвих сплавів є досить поширеним та має великі перспективи розвитку в подальшому. Ці сплави є основою багатьох конструкцій, використовуються в провідних галузях техніки – в авіації, ракетно-космічній і атомній техніці. Нові сплави створюють, спираючись на теоретичні відкриття й узагальнення, на результати вирішення численних технічних проблем, їх застосування зумовлює значний прогрес у різних галузях науки і техніки [2]. Алюмінієві зварювані та термічно не зміцнювальні сплави системи Al-Mg широко використовуються в якості легких конструкційних матеріалів в різноманітних галузях промисловості. Покращення питомих міцнісних характеристик таких сплавів за рахунок холодної пластичної деформації є однією із актуальних науково-технічних проблем. Раніше в роботах [3, 4] було розглянуто прокатування алюмінієвих сплавів системи Al-Mg.

Проте важливим питанням при розробці технологічних режимів пластичної формозміни алюмінієвих сплавів також є прогнозування руйнування, яке супроводжується розвитком та збільшенням кількості мікропор та мікротріщин. Їх відносний об'єм характеризує пошкоджуваність металу, яка не повинна перевищувати деякого критичного значення, так як при його перевищенні відбувається втрата міцнісних характеристик виробу. На сьогодні опубліковано достатньо багато моделей, за допомогою яких можна оцінювати пошкоджуваність металічних матеріалів при обробці тиском. При моделюванні процесів холодної ОМТ із використанням різноманітних сучасних програмних комплексів велике значення мають закладені в них умови руйнування. Як відмічає автор роботи [5], програмні комплекси, за рідким виключенням, задовільні в частині розрахунку руйнування металів. Програмний комплекс DEFORM-3D для прогнозування руйнування металу при пластичній деформації передбачає вибір моделі руйнування на розсуд дослідника. В даній роботі при чисельному моделюванні пошкоджуваність металу розраховували по критерію руйнування Cockcroft & Latham, згідно якої [6]:

$$C = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} \quad (1)$$

де σ_{max} – максимальне головне розтягувальне напруження; $\bar{\sigma}$ – інтенсивність напружень; $\bar{\varepsilon}$ – інтенсивність деформацій; C – граничне значення показника Cockroft & Latham, що відповідає моменту руйнування матеріалу.

В роботах [7, 8] представлена методика прогнозування руйнування металу при великій пластичній деформації із використанням енергетичної моделі Cockroft & Latham, згідно якої робота елементарної розтягувальної сили, що діє на матеріальну точку тіла в процесі деформації, характеризує пошкоджуваність металу. Руйнування відбувається при досягненні роботою критичного значення.

Метою роботи є чисельне моделювання та аналіз напружено-деформованого стану і пошкоджуваності алюмінієвого сплаву системи Al-Mg при холодному прокатуванні.

Чисельне моделювання процесу холодного прокатування (рис. 1) алюмінієвого сплаву 5056 системи Al-Mg виконували методом скінченних елементів із використанням програмного комплексу для інженерного аналізу технологічних операцій обробки металів тиском DEFORM-3D. Смуга товщиною 6 мм встановлюється між валками, в результаті на виході отримуємо прокат товщиною 4 мм.

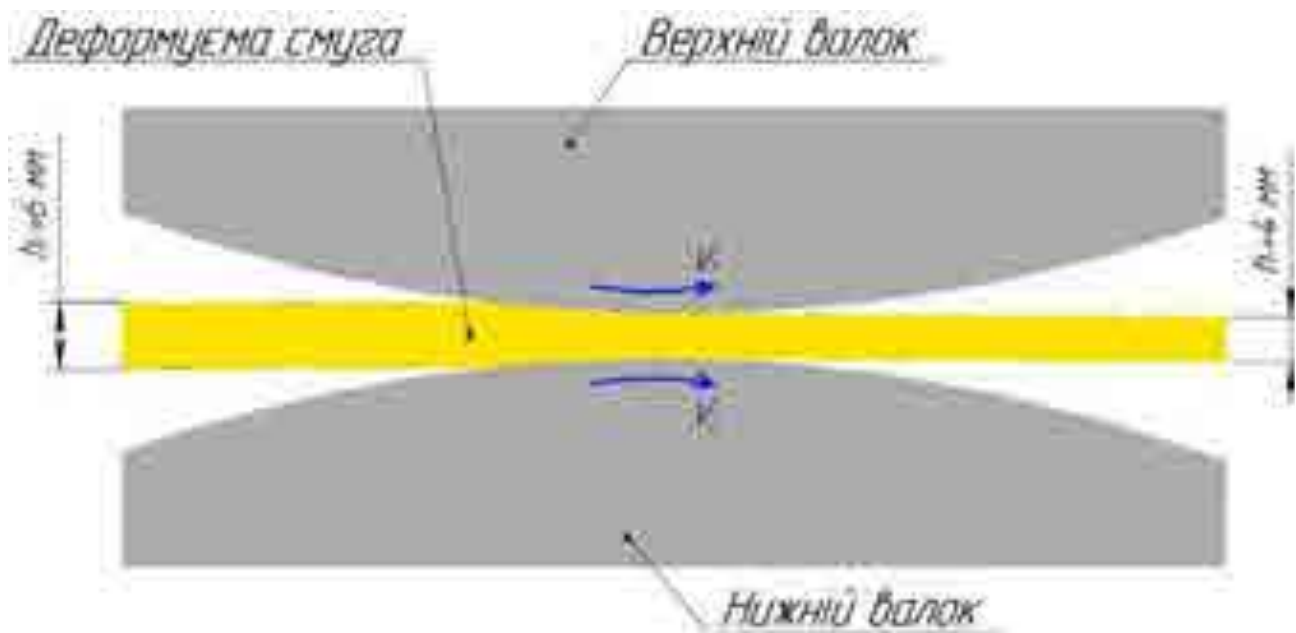


Рис. 1. Схема процесу прокатування в програмі DEFORM-3D

При моделюванні були прийняті наступні допущення: 1) деформуєма заготовка пластична; 2) робочі валки – абсолютно жорсткі; 3) закон контактного тертя – Кулона; 4) еволюцію мікроструктури не враховували.

Вихідною заготовкою для проведення чисельного моделювання першого переходу холодного прокатування була смуга товщиною 6 мм, шириною 35 мм та довжиною 170 мм, що отримана гарячим прокатуванням із пресованої штаби товщиною 12 мм. При моделюванні було задано наступні вихідні дані:

- коефіцієнт тертя по Кулону $\mu = 0,12$;
- кутова швидкість валків - $\omega_0 = 1,26$ рад/с (повний оберт валка за 5 с);
- температура заготовки та валків – 20 °C;
- матеріал – AL-5056 (аналог сплаву АМг5);
- діаметр валків 300 мм.

В результаті чисельного експерименту було отримано графік моментів, що виникають на валках, який показано на рис. 2. З графіка видно, що максимальний момент становить 2200000 Н·мм (2,2 кН·м).

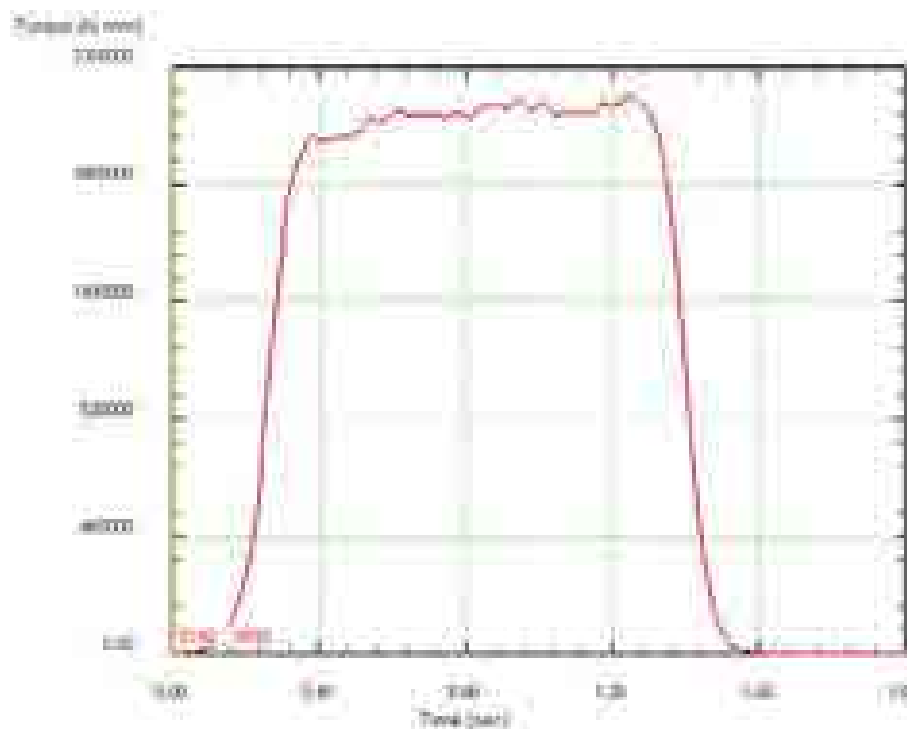


Рис. 2. Графік залежності моментів, що виникають на валках при холодному прокатуванні від часу

На рис. 3 показано розподіл інтенсивності напружень σ_i в осередку деформацій під час прокатування. Значення інтенсивності напружень становлять до $\sigma_i = 370$ МПа. По ширині смуги значення інтенсивності напружень не відрізняються.

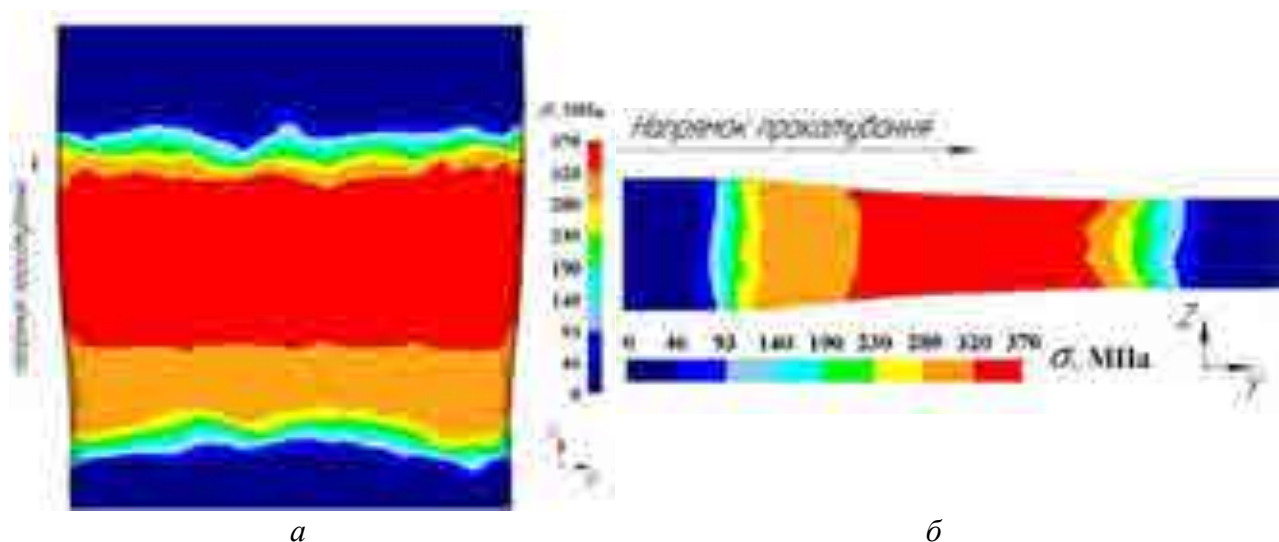


Рис. 3 Розподіл інтенсивності напружень в осередку деформацій під час прокатування:

а – на поверхні смуги в площині YX; *б* – в перерізі смуги в площині ZY

На рис. 4 показано розподіл середніх напружень $\sigma_{\text{сер}}$ в осередку деформацій під час прокатування. Їх значення знаходяться в межах $\sigma_{\text{сер}} = -400 \dots 150$ МПа. По центру смуги в осередку деформації виникають найбільш стискаючі середні напруження

$\sigma_{\text{сер}} = -400 \dots -260$ МПа. На вході та на виході смуги між валками виникають розтягувальні середні напруження $\sigma_{\text{сер}} = 13 \dots 150$ МПа.

Розподіл інтенсивності деформацій по Мізесу ε_i в здеформованій смузі показано на рис. 5. Їх значення досягають величини $\varepsilon_i = 0,5$. Практично по всьому об'єму прокатоної смуги значення інтенсивності деформацій знаходяться в межах $\varepsilon_i = 0,38 \dots 0,5$; на краях смуги $\varepsilon_i = 0,31 \dots 0,38$.

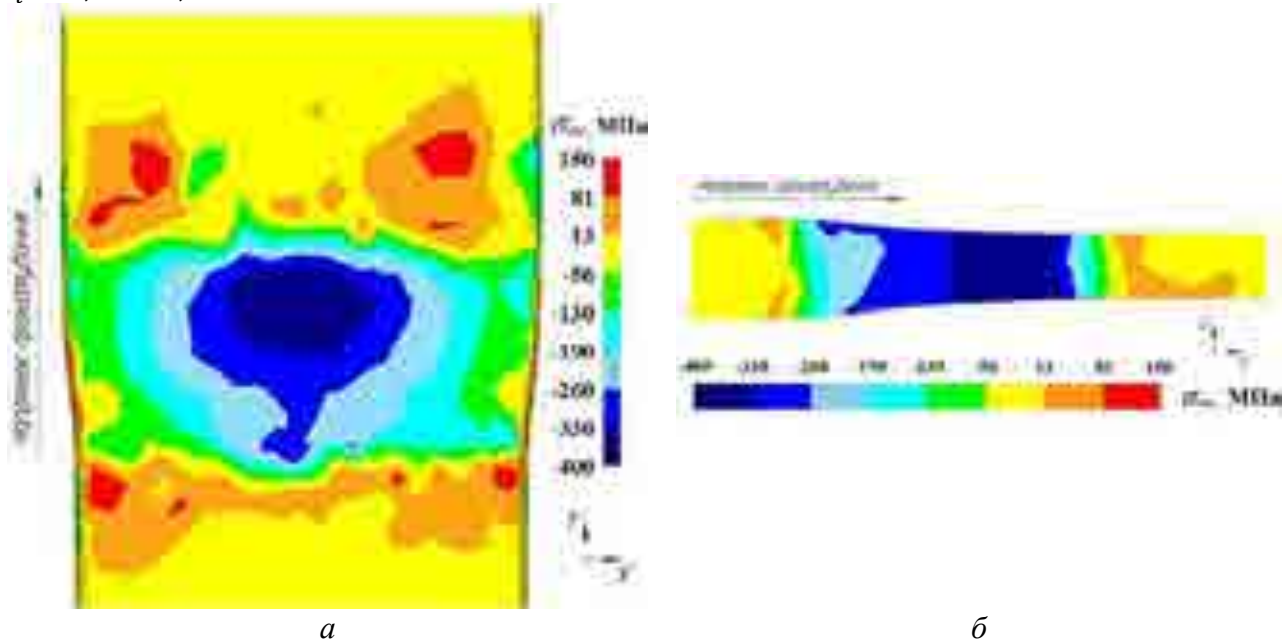


Рис. 4. Розподіл середніх напружень в осередку деформацій під час прокатування: *а* – на поверхні смуги в площині YX; *б* – в перерізі смуги в площині ZY

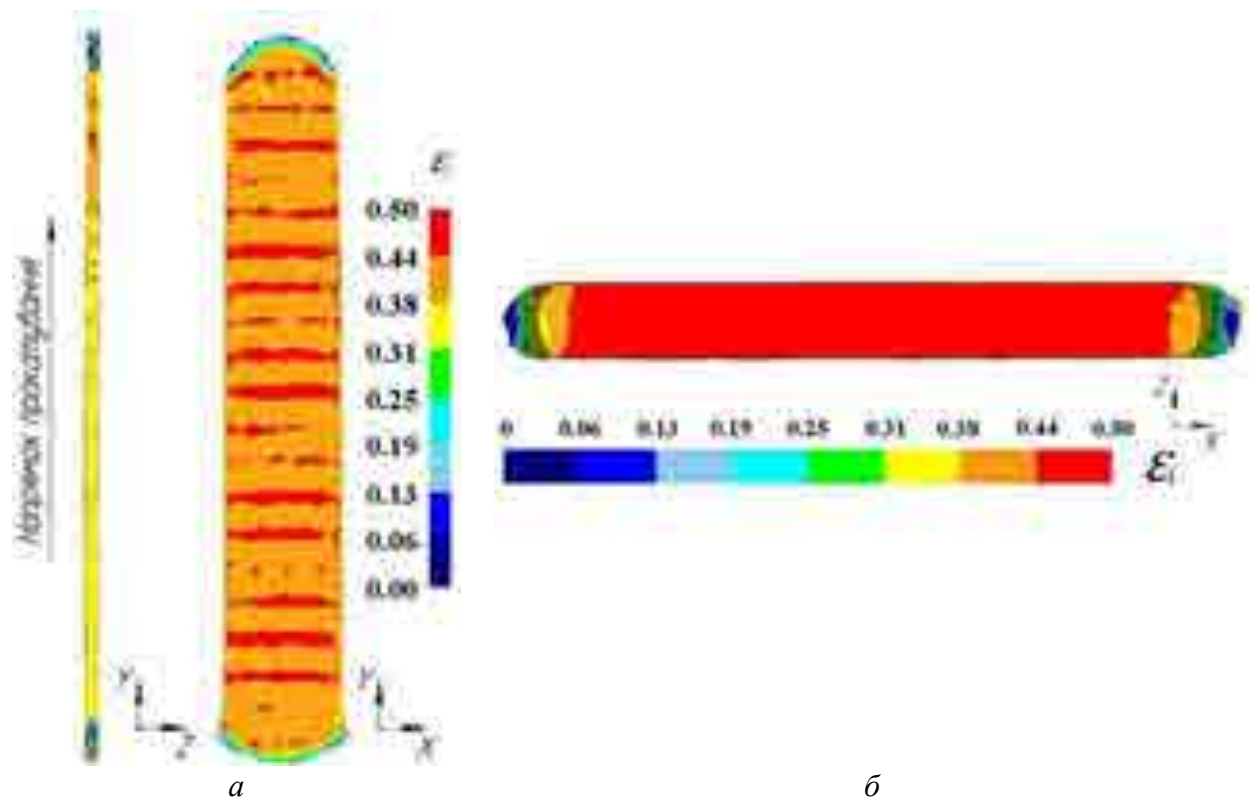


Рис. 5. Розподіл інтенсивності деформацій по Мізесу в здеформованій смузі: *а* – на поверхні смуги в площині YZ та YX; *б* – в перерізі смуги в площині ZX

На рис. 6 показаний розподіл пошкоджуваності металу в zdeформованій смузі після холодного прокатування. На краях смуги на глибину 2..3 мм значення пошкоджуваності досягають 0,2...0,3. В центрі ж смуги пошкоджуваність відсутня.

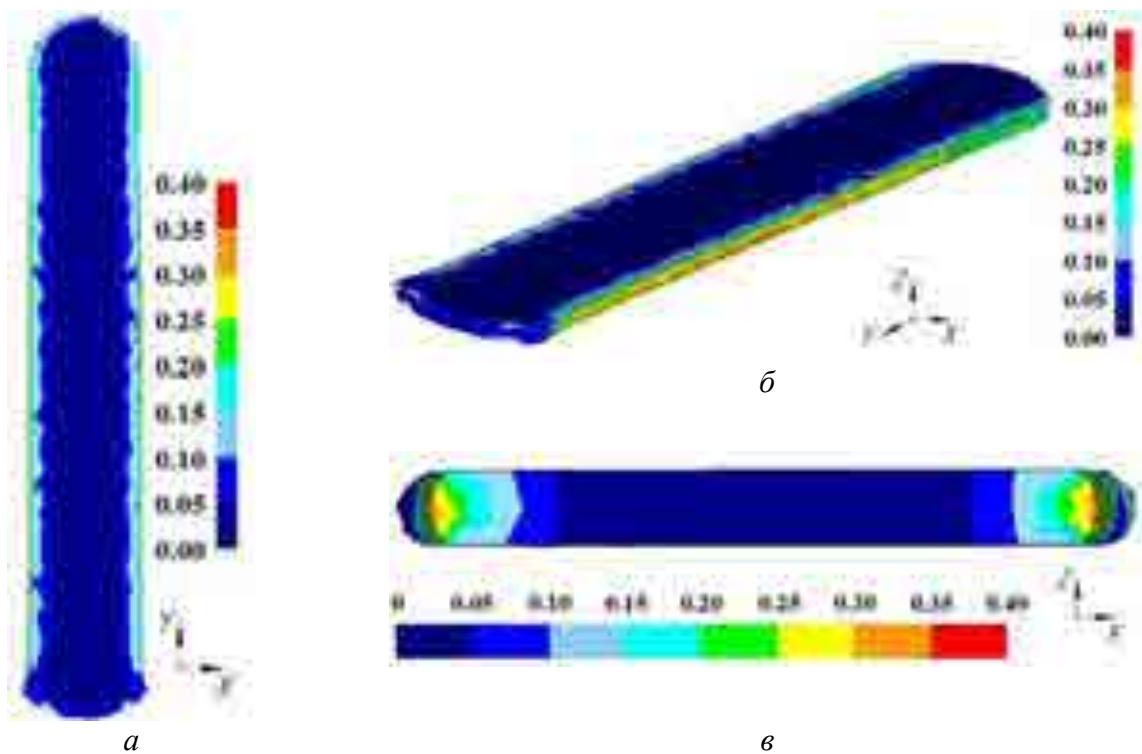


Рис. 6. Розподіл пошкоджуваності в zdeформованій смузі:
 а – на поверхні смуги в площині YX; б – на поверхні смуги в ізометрії; в – в перерізі смуги в площині ZX

На рис. 7 показано прокатані смуги товщиною 4 мм, що отримані в результаті експериментальних досліджень, а також мікроструктура в поперечному перерізі смуги. Після прокатування отримуємо зерно довжиною 100...200 мкм та шириною 10...20 мкм.

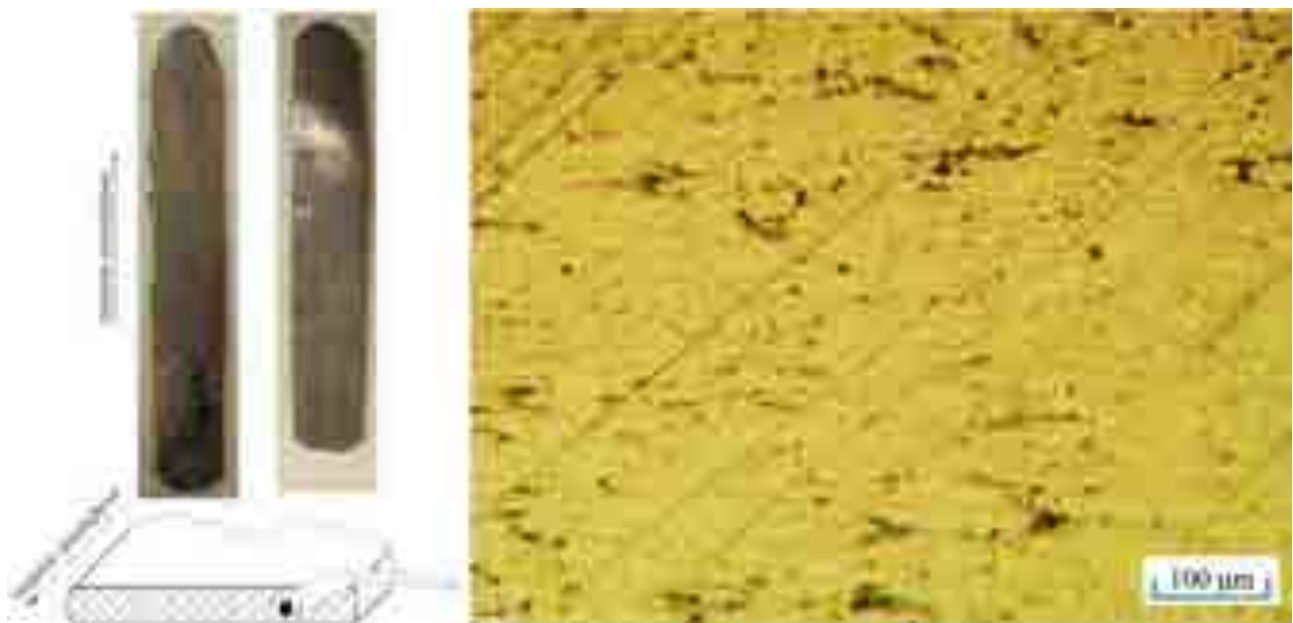


Рис. 7. Результати експериментальних досліджень холодного прокатування смуг та мікроструктура в поперечному перерізі

ВИСНОВКИ

В роботі виконано дослідження деформаційної обробки алюмінієвого сплаву 5056 системи Al-Mg холодним прокатуванням. В результаті чисельного експерименту було отримано графік моментів, що виникають на валках. Також отримано розподіли інтенсивності напружень та середніх напружень в осередку деформування при максимальному моменті на валках та інтенсивності деформацій по Мізесу в кінці деформування. Проведений аналіз накопичення пошкоджуваності, що встановлено моделюванням. При чисельному моделюванні пошкоджуваність металу розраховували по критерію руйнування Cockroft & Latham. Також наведені результати експериментальних досліджень, в тому числі мікроструктури, після проведеного процесу прокатування. Встановлено, що після прокатування отримуємо зерно довжиною 100...200 мкм та шириною 10...20 мкм.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ерисов Я. А., Гречников Ф.В., Гречникова А.Ф. Исследование влияния режимов прокатки и термообработки на структуру и свойства листов из алюминий-литиевого сплава В-1461. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2019. 5. С. 5–10.
2. Калініна Н.Є., Бондаренко О.В. Використання алюмінієвих сплавів в авіаційній та ракетно-космічній техніці: навч. посіб. Дніпро: РВВ ДНУ. 2011. 64 с.
3. Bintu A., Vincze G., Picu R.C., Lopes A.B. Effect of symmetric and asymmetric rolling on the mechanical properties of AA5182. *Mater. Des.* 2016. 100, pp. 151 – 156.
4. Gogaev K.A., Voropaev V.S., Podrezov Yu.N., Verbilo D.G., Koryak O.S. Effect of deformation conditions on the properties of powder material AMg5. *Powder Metall. Metal Ceram.* 2015. 54 (5-6), pp. 274 – 280.
5. Колмогоров В.Л. Численное моделирование больших пластических деформаций и разрушения металлов. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2003. 2. С. 4 – 16.
6. Cockcroft M. G., Latham D.J. Ductility and Workability of metals. *J. Inst. Metals.* 1968. 96, pp. 33 – 39.
7. Боткин А.В., Валиев Р.З. и др. Оценка поврежденности металла при холодной пластической деформации с использованием модели разрушения Кокрофта-Латама. *Деформация и разрушение материалов*. 2011. 7. С. 17–22.
8. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М. Оценка поврежденности металла при асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевого сплава 5083. *Качество в обработке материалов*. 2015. 2 (4). С. 63–67.

REFERENCES

1. Erisov Ya. A., Grechnikov F.V., Grechnikov A.F. Study of the influence of rolling and heat treatment modes on the structure and properties of sheets from aluminum-lithium alloy V-1461. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019. 5, pp. 5-10. (in Russian).
2. Kalinina, N.E., Bondarenko O.V. The use of aluminum alloys in aviation and rocket and space technology: training. manual. Dnipro: RVV DNU. 2011. 64 p. (in Ukrainian).
3. Bintu A., Vincze G., Picu R.C., Lopes A.B. Effect of symmetric and asymmetric rolling on the mechanical properties of AA5182. *Mater. Des.* 2016. 100, pp. 151 – 156.
4. Gogaev K.A., Voropaev V.S., Podrezov Yu.N., Verbilo D.G., Koryak O.S. Effect of deformation conditions on the properties of powder material AMg5. *Powder Metall. Metal Ceram.* 2015. 54 (5-6), pp. 274 – 280.
5. Kolmogorov V.L. Numerical modeling of large plastic deformations and destruction of metals. *Forging and stamping production*. 2003. 2, pp. 4 –16. (in Russian).
6. Cockcroft M. G., Latham D.J. Ductility and Workability of metals. *J. Inst. Metals.* 1968. 96, pp. 33 – 39.
7. Botkin A.V., Valiev R.Z., et al. Assessment of metal damage during cold plastic deformation using the Cockcroft-Latham fracture model. *Deformation and destruction of materials*. 2011. 7, pp. 17-22. (in Russian).
8. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Lokotunina N.M. Assessment of metal damage during asymmetric thin-sheet rolling of aluminum alloy 5083. *Quality in processing materials*. 2015. 2 (4), pp 63-67. (in Russian).

Koreva V. O. Cold rolling of Al-Mg system aluminum alloy

Aluminum weldable and thermally non-strengthening alloys of the Al-Mg system are widely used as light structural materials in various industries. Improving the specific strength characteristics of such alloys due to cold plastic deformation is one of the urgent scientific and technical problems. However, an important issue in the development of technological modes of plastic deformation of aluminum alloys is also the prediction of destruction, which is accompanied by the development and increase in the number of micropores and microcracks. In the work, the study of the deformation treatment of the aluminum alloy of the Al-Mg system by cold rolling was carried out. Numerical modeling of the process of cold rolling of aluminum alloy 5056 of the Al-Mg system was carried out by the finite element method using the DEFORM-3D software package for engineering analysis of technological operations of pressure metal processing. As a result of the numerical experiment, a graph of the moments occurring on the rolls was obtained. Distributions of stresses

(intensity of stresses and average stresses in the center of deformation) at the maximum moment on the rolls and deformations (intensity of deformations and other components) at the end of deformation were also obtained. An analysis of the damage accumulation established by simulation was carried out. In this paper, during numerical modeling, metal damage was calculated according to the Cockroft & Latham failure criterion. The results of experimental studies, including microstructures, after the rolling process are also given. It was established that after rolling we get a grain with a length of 100...200 microns and a width of 10...20 microns.

Keywords: aluminium alloy, finite element method, modeling, rolling, stress intensity, strain intensity, average stresses, average strains, edge zones.

Корева В. О. Холодная прокатка алюминиевого сплава системы Al-Mg

Алюминиевые сварные и термически не укреплёемые сплавы системы Al-Mg широко используются в качестве легких конструкционных материалов в различных отраслях промышленности. Улучшение удельных прочностных характеристик таких сплавов за счет холодной пластической деформации является одной из актуальных научно-технических проблем. Однако важным вопросом при разработке технологических режимов пластического формоизменения алюминиевых сплавов также является прогнозирование разрушения, которое сопровождается развитием и увеличением количества микропор и микротрещин. В работе выполнено исследование деформационной обработки алюминиевого сплава системы Al-Mg холодной прокаткой. Численное моделирование процесса холодной прокатки алюминиевого сплава 5056 системы Al-Mg выполняли методом конечных элементов с использованием программного комплекса для инженерного анализа технологических операций обработки металлов давлением DEFORM-3D. В результате численного эксперимента был получен график моментов, возникающих на валах. Также получены распределения напряжений (интенсивности напряжений и средних напряжений в очаге деформирования) при максимальном моменте на валах и деформациях (интенсивности деформаций и других компонентов) в конце деформирования. Проведен анализ накопления повреждаемости, установленной моделированием. В данной работе при численном моделировании повреждаемость металла рассчитывали по критерию разрушения Cockroft&Latham. Также приведены результаты экспериментальных исследований, в том числе микроструктуры после проведенного процесса прокатывания. Установлено, что после прокатки получаем зерно длиной 100...200 мкм и шириной 10...20 мкм.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, метод конечных элементов, моделирование, прокатка, интенсивность напряжений, интенсивность деформаций, средние напряжения, средние деформации, краевые зоны.

Корева Віталій Олегович – аспірант, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

Koreva Vitalii – PhD student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Корева Виталий Олегович – аспірант, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

E-mail: koreva85@gmail.com

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

Стаття надійшла до редакції 10.06.22 р.

Гожій С. П.
Мироненко В. А.

ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ОБЛАДНАННЯ ОРБІТАЛЬНОГО ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ

Наукові дослідження процесів і обладнання орбітального штампування обкочуванням проводяться на кафедрі технології виробництва літальних апаратів Науково-навчального механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» з 70 років минулого століття до теперішнього часу. За цей час накопчений достатній досвід створення енергоефективних технологій і обладнання для орбітального штампування обкочуванням. Всі наукові розробки створені на підставі якісних ефектів процесу та підкреслюють його унікальні можливості та перспективу застосування. Зважаючи на те, що сучасним інструментом дослідження процесів обробки металів тиском є комп'ютерні технології моделювання, які застосовують метод скінченних елементів, пріоритет залишається за експериментальними дослідженнями, завдяки яким і зафіксовано більшість якісних ефектів орбітального штампування, відображених в статті. Особлива увага приділялась ефективному позитивному застосуванню якісних ефектів штампування обкочуванням. Зокрема, такий ефект як виникнення зони дії напружень розтягування може енергоефективно використаний для утворення центральної порожнини. А ексцентричне прикладання зусилля деформування можливо ефективно урівноважити, що не тільки зменшить навантаження на обладнання, а і створить основу для низки оригінальних технологій. Відповідні технологічні і конструкторські рішення, що базуються на результатах наукових і експериментальних досліджень процесу, запроваджуються у виробництво і закладені в основу при написанні цієї статті.

Ключові слова: орбітальне штампування, штампування обкочуванням, модель пластичних деформацій, метод скінченних елементів, середні питомі зусилля, зусилля деформування, осередок деформації.

Розвиток процесів деформування інструментом, що локально деформує заготовку і сукупно призводить до об'ємної формозміни, постійно доповнює виробничу практику новими технологічними можливостями. Як правило характерні особливості штампування обкочуванням покладені в основу процесу базуються на особливостях процесу і вигідно відрізняються від традиційних методів обробки тиском з точки зору енергоефективності. Останнім часом запроваджені технологічні варіанти класичної схеми орбітального штампування як у напрямку розширення технологічних схеми деформування, так і спеціального обладнання [1, 2, 3, 4]. Відповідно, що ці особливості потребують наукового і технологічного узагальнення для широкого практичного застосування.

Мета статті – аналіз на конкретних прикладах технологічних переваг орбітального штампування; – виявлення фізичної сутності ефективності процесу одночасно з аналізом конструкторських рішень обладнання, що його реалізує; – виділення особливостей багатогранного протікання процесу та його застосування з точки зору енергоефективності.

Сутність методу орбітального штампування полягає в тому, що активний інструмент, який має конічну або більш складну формоутворюючу поверхню, шляхом багаторазової циклічної силової дії об'ємно формує заготовку. Деформування верхньої зони відбувається локально, але поступово охоплює поверхневий шар заготовки, товщина якого залежить від кінематичних характеристик процесу та геометрії деталі.

Спрощена схема процесу представлена на рис.1 на прикладі осаджування циліндричного зразка. Осаджування циліндричної заготовки 1 виконується між активним інструментом 2, що має конічну робочу поверхню, та опорним інструментом 3 з плоскою робочою поверхнею, але в разі виконання операції об'ємного штампування інструмент 3 має порожнину, що відповідає формі виробу і яка буде заповнюватись в результаті штампування. Активний інструмент 2 виконує орбітальний рух відносно вершини O . Найбільш простим в реалізації є круговий обертальний [1, 2] рух, при якому активний інструмент буде обкачуватися по заготовці 1. При цьому кут нахилу осі OZ_1 активного інструмента 2 відносно вертикальної осі OZ складає кут γ . Деформування заготовки проходить при осьовому зближенні інструментів 2 і 3 та орбітальному русі обкочування активного інструмента 2. Закон зміни кута γ та рух осі OZ_1

активного інструменту 2 можуть бути змінними, що забезпечить і різноманітний вид орбітального руху (від руху по колу до спірального або прямолінійного тощо). За таких умов контакт між активним інструментом 2 та заготовкою 1 відбувається по частині торцевої поверхні заготовки площею F , яка є плямою контакту (затемнена область на рис.1). Треба зауважити, вид орбітального руху задається відповідним механізмом обладнання [1, 2], який може бути доволі складним як в реалізації, так і в обслуговуванні. Багаторічний практичний досвід доводить, що найбільш затребуваним і простим в реалізації є механізм з постійним кутом γ та рухом по колу [3].

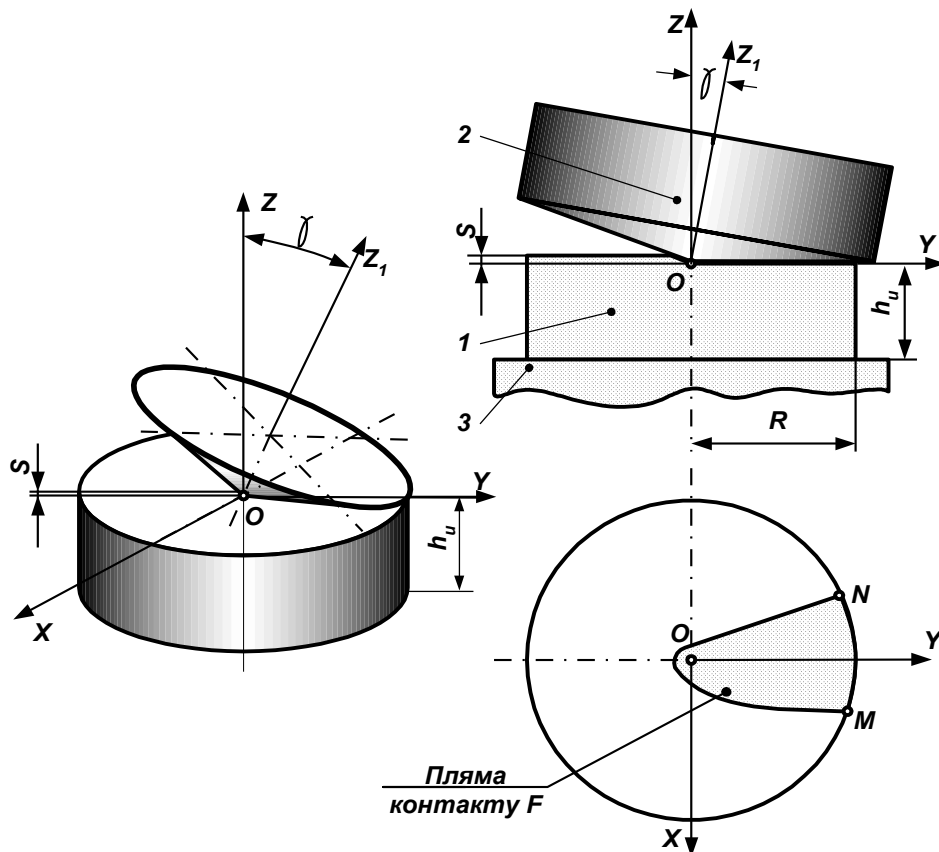


Рис. 1. Схема процесу осаджування обкочуванням циліндричного зразка:

(1 – заготовка; 2 – активний інструмент; 3 – опорний інструмент; h_u – поточна висота заготовки; R – поточний радіус заготовки; NM – дуга осередку контакту; інші позначення надані в тексті)

Для демонстрації наочності протікання процесу, застосовують коефіцієнт λ , який визначається співвідношенням площі плями контакту F до площі всього торця заготовки $F_T = \pi R^2$ та наглядно демонструє виграш по зусиллю. Коефіцієнт λ залежить від групи геометричних та кінематичних параметрів [4, 5]:

$$\lambda = \frac{F}{F_T} = \sqrt{\frac{s}{\pi^2 R \cdot \tan \gamma}}, \quad (1)$$

де v – швидкості вздовж осі заготовки;

n – частота обкочування;

S – узагальнений параметр – подача на оборот (рис. 1)

$$S = \frac{v}{n}. \quad (2)$$

Зона пластичної деформації при переміщенні плями контакту, зокрема по колу, охопить увесь верхній об'єм заготовки 1. Відповідно, що для проведення пластичного деформування, необхідно прикласти до інструментів 1 і 3 осьове зусилля P для їх зближення, та момент обкочування M до активного інструменту 2.

При цьому вісь активного інструменту нахилена на кут γ та виконує обертальний рух відносно осі заготовки з одночасним обертанням самого активного інструменту в протилежному напрямку. Швидкості обертання осі активного інструменту та самого інструменту, як правило, узгоджуються умовою мінімального тертя між активним інструментом і заготовкою на стільки, що виникає враження що інструмент обкочується по поверхні заготовки. Можлива ситуація, коли активний інструмент не має власного приводу, а обкочується лише завдяки контактним силам тертя. Така обробка має низку як позитивних, так і моментів, які, на перший погляд, зменшують ефективність протікання процесу, але можуть бути використані позитивно і впливати на енергоефективність процесу.

Однією з основних переваг штампування обкатуванням є 5...20-ти кратне зниження зусилля осьового навантаження, яке оцінюється коефіцієнтом λ , та впливом умов тертя на контактній поверхні.

В даному випадку під впливом умов тертя на контактній поверхні слід вважати вираховування енергетичних витрат на здолаття сил тертя при пластичній течії матеріалу в локалізованому осередку, що в кінцевому результаті визначає значення середніх питомих зусиль $p_{сер}$, та задає енергетичні переваги процесу. Необхідно зауважити, що енергетичний вигравш на здолаття сил тертя в локалізованому осередку робить процес орбітального штампування енергоефективним в порівнянні з традиційними.

Дійсно, за літературними даними значення середніх питомих зусиль $p_{сер}$ рекомендуються в широкому діапазоні значень [6, 7]. Не зважаючи на масове застосування комп'ютерних програм розрахунків параметрів процесів середні питомі зусилля залишаються серед основних характеристик, в тому числі, і при застосуванні цифрових технологій, і при виконання найпростіших технологічних розрахунків. Це стосується як аналітичних, так і експериментальних визначень. Така ж картина має місце і при конкретних моделюваннях напружено-деформованого стану. Окрім широкого діапазону підходів, спрощень, точності вимірювань, похибок тощо переважна більшість результатів достовірні, а відмінності в результатах пояснюються неповним врахуванням ефектів штампування обкочуванням. Зокрема, розбіг значень середніх питомих зусиль може пояснюється тим, що в кожному випадку діють відмінні схеми протікання пластичних деформацій та утворення напружено-деформованого стану [8].

В [9] запропоновано розглядати межі дії моделі пластичних течій при штампуванні обкочуванням в комплексній залежності від відносних розмірів заготовки, кінематичних параметрів, а головне, на підставі якісних ефектів. Умовно розглянуто два варіанти, які визначають приналежність до відповідної моделі, зокрема: - модель пластичних течій у «високому» зразку; - модель пластичних течій у «тонкому» зразку. При цьому визначення «високий» чи «тонкий» зразок залежить не від конкретних розмірів зразка і не від його відносних розмірів, а визначається зоною розповсюдження пластичних деформацій по висоті. Якщо пластична зона (h_b) не охоплює всю висоту зразка (h_u), то це «високий» зразок, якщо пластичні деформації по всій висоті – «тонкий». Надалі не будемо вживати лапки в цих назвах.

На рис. 2 представлено графічне відображення дії моделей пластичних течій в товстій (рис. 2, а) і тонкій (рис. 2, б) заготовках. Як зазначалось вище в основу будови моделі були покладені якісні моменти формоутворення, що спостерігались при обкатуванні.

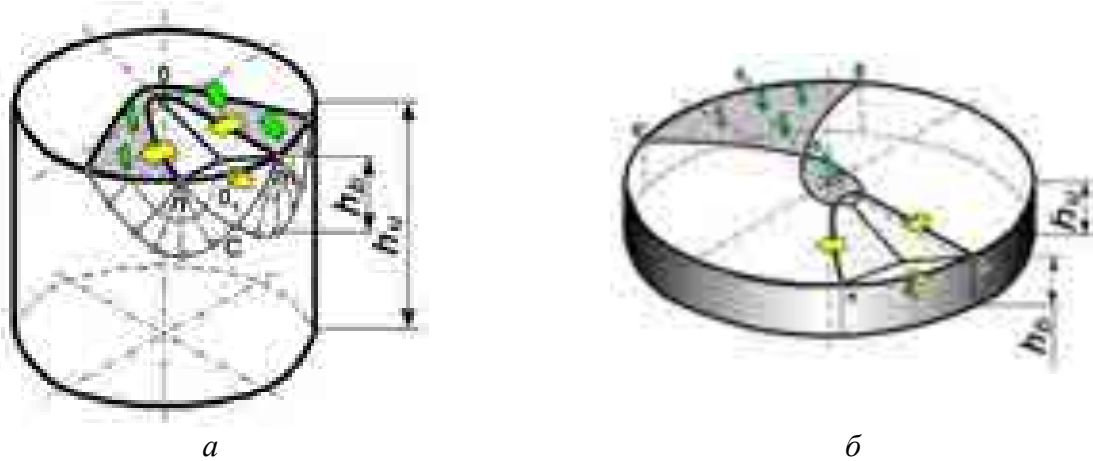


Рис. 2. Моделі пластичних течій в заготовках при осаджуванні обкочуванням циліндричного зразка (h_b – висота зони пластичних деформацій; h_u – висота зразка; nm – дуга пластичного осередку контакту):

a – для високої заготовки; b – для тонкої заготовки

Характерною ситуацією при обробці обкочуванням високої заготовки є набуття нею форми «гриба» (див. рис. 3, a) (стрижня із стовщенням), що є результатом пластичних деформацій в контактному осередку в тангенціальних і радіальному напрямках вздовж жовтих стрілок. І поза контактних деформацій (зелені стрілки) в осьовому напрямку. Шляхом утворення балансу робіт на здоляння зусиль перешкод в цій моделі знаходиться енергетичні витрати кожної складової та визначаються середні питомі контактні зусилля [9].



Рис. 3. Прояв характерних особливостей пластичних деформацій у вигляді радіального стовщення або стоншення і руйнування центральної частини заготовки при осаджуванні обкочуванням циліндричного зразка:

a – для високої заготовки; b – для тонкої заготовки

Характерною рисою при обкочуванні тонкої заготовки є утворення поза контактної порожнини та розривів центральної частини від дії напружень розтягу (це один з небагатьох випадків утворення схеми плоского розтягу при обробці металів тиском) (див. рис. 3, b). Така особливість пояснюється дією на поза контакту частину заготовки тангенціальної течії металу із контактного осередку. Поза контактна частина буде сприймати згинання відносно точки O_2 , відносно якої (як при згинанні) зовнішня половина тіла заготовки буде сприймати напруження стискування, а внутрішня – розтягування.

Зважаючи на характерні особливості проходження притаманних пластичних деформацій при штампуванні обкочуванням високої і тонкої заготовки можливо підвищити енергоефективність процесу шляхом закладання параметрів в ефективному інтервалі або застосуванні інших якісних ефектів. Зокрема, фланцева частина високої заготовці почне набувати грибоподібної форми ще до утворення контакту з формуючою порожниною штампу. Тому при

виготовлені фланцевого виробу треба застосовувати заготовку, яка спрямовано забезпечує параметри протікання процесу як для високої. На рис.4 представлені проміжні результати моделювання методом скінчених елементів осаджування (40% висотної деформації) циліндричної заготовки та розподіл напружень і деформацій. З формозміни видно, що циліндрична заготовка набуває фланцевої форми. Також треба виділити технічні рішення авторів [1] при розробці технологічного процесу виготовлення конічної шестерні.

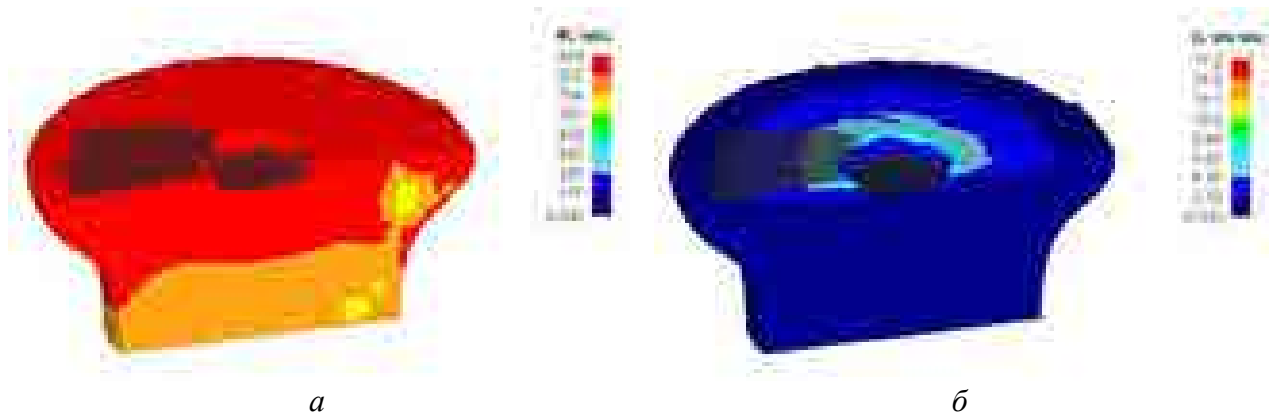


Рис. 4. Результати моделювання методом скінчених елементів осаджування високої заготовки на 40% висотної деформації:

а – розподіл інтенсивності напружень; *б* – розподіл інтенсивності деформацій вздовж вертикальної площини по лінії $\theta-\theta_1$ (див. рис. 2, *а*)

Моделювання підтверджує наступні якісні ефекти осаджування обкочуванням:

- постійність радіальних напружень вздовж осередку деформацій в залежності від величини контактної осередку;
- наявність поза контактної зони деформацій у вигляді шарніру пластичності, що протилежить контактній, та наявність в ній напружень розтягування;
- відповідність зовнішньої формозміни осаджування обкочуванням, що отримана експериментальним шляхом, в перше чергу це стосується початкової відсутності деформування нижньої частини заготовки та утворення специфічної грибоподібної форми.

Застосування другого якісного моменту, який характерний при осаджуванні тонкої заготовки, спрямовує на корисне використання цієї ситуації в якості варіанту формоутворення центральної порожнини або отвору. Для утворення порожнини потрібні зменшені зусилля і енергетичні витрати оскільки пуансон, що буде утворювати порожнину буде занурюватись в осередок, де діють напруження розтягування.

Лідером на ринку обладнання для обладнання для орбітального штампування є преси моделей T200, T400, T630 "SCHMID. Heinrich Schmid Maschinen-und Werkzeugbau AG. FEINTOOL GROUP", які мають універсальне призначення та широкі технологічні можливості. Відмінною особливістю є оснащення преса додатковим приводним пуансоном, розташованим в корпусі активного рухомого інструменту. З одного боку, це надає нові технологічні можливості по формоутворенню центральної порожнини, при вилученні деталі з штампу або при прошиванні центрального отвору. З іншої сторони, перелічені операції виконуються в положенні, коли рухомий активний інструмент займає суто вертикальне положення. Забезпечити одночасне штампування обкочуванням з нахилом осі на кут γ та центральне занурення пуансону на цьому обладнанні конструкційно неможливо.

Запропоновано оригінальний механізм обкочування [10]. Механізм (рис. 5, *а*) складається з корпусу 1, в якому встановлений на опорному 2 і радіальних підшипниках 3 пресувач 4. Пресувач 4 обертається від приводу (на рис. 5 не показаний). Пресувач 4 має внутрішню порожнину з нахилою, щодо зовнішніх поверхонь, віссю. У внутрішній порожнині пресувача 4 на опорному 5 і радіальному 6 підшипниках встановлений з можливістю обертання рухомий

активний інструмент 7, що має центральний наскрізний отвір. У корпусі 1 вздовж осі встановлений привод прошивного пуансону 8 (в даному випадку у вигляді гідравлічного циліндра) з можливістю забезпечення руху пуансону 9 вздовж осі механізму. Пуансон 9 проходить через центральний отвір активного інструменту 7, причому в неробочому стані, коли штампування не відбувається, пуансон 9 виступає за крайню робочу кромку рухомого інструменту 7 на величину m . Для забезпечення роботи пуансона 9 протягом періоду штампування величина його переміщення k вздовж осі повинна бути більшою ніж сумарна величина виступу пуансону за крайню робочу кромку рухомого пуансона m і робочого ходу інструменту 7 вздовж осі нерухомого штампу 10 за період висотної обробки заготовки 11.

Перед тим як рухомий інструмент 7 утворить контакт з заготовкою, пуансон 9, який виступає за робочу поверхню рухомого інструменту 7 на величину m , спочатку фіксує заготовку 11. Після притиснення заготовки 11 проходить процес пластичного деформування до кінцевих розмірів деталі 12 як із сторони рухомого інструменту 7, так і пуансону 9.

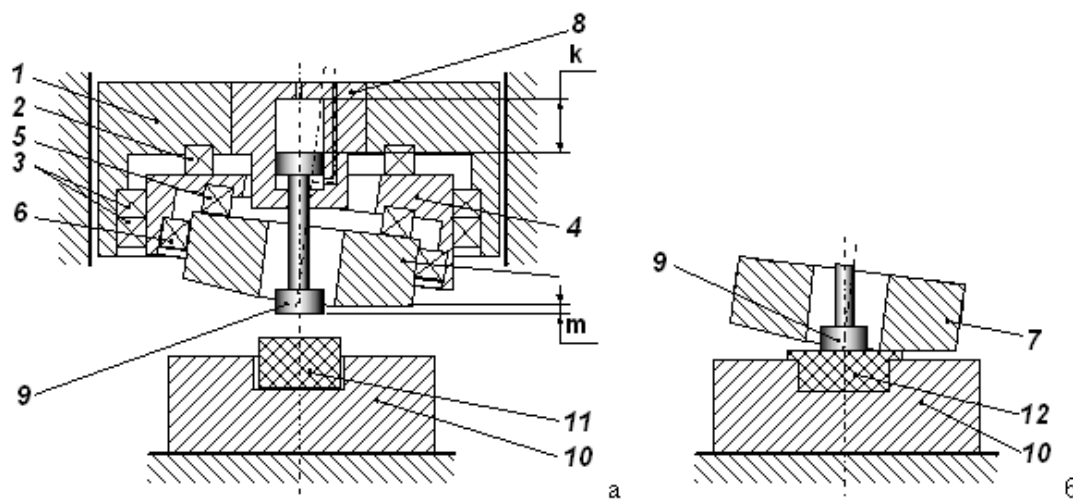


Рис. 5. Конструкція механізму обкочування з пристроєм для центральної фіксації та прошивання заготовки (1 – корпус; 2, 5 – опорний підшипник; 3, 6 – радіальний підшипник; 4 – пресувач; 7 – активний інструмент; 8 – гідравлічний циліндр; 9 – пуансон; 10 – нерухомий штамп; 11 – заготовка з початковими розмірами; 12 – виріб з кінцевими розмірами; m – регульована величина виступу пуансону):

a – початкова стадія обробки; *б* – кінцева стадія

Робота пристрою, що показано на рис.5 і сам технологічний процес змодельовані на прикладі об'ємного штампування обкочуванням деталі «шестерня насоса», яка показана на рис. 6. Схема процесу при моделюванні показана на рис. 7, *a*. Деталь має розвинуту фланцеву частину та крізний центральний отвір, матеріал 0,35 % вуглецю та 1 % хрому, використовується відокремлена від прутка циліндрична заготовка. За запропонованою технологією (див. рис. 7, *a*) отвір в заготовці 1 з розмірами D_0 та H_0 розташований на опорному інструменті 4 суміщено прошивається центральним приводним пуансоном 3 діаметром d на глибину 2 мм. На цей момент заготовка 1 надійно зафіксувала від зміщень відносно вертикальної осі в момент дотику активним інструментом 2. Далі занурення центрального пуансону 3 проводиться одночасно із штампуванням обкочуванням фланцевої частини під впливом активного інструменту 2.

Протікання формоутворення за схемою на рис. 7, *a* має характерні ознаки, що притаманні штампуванню обкочуванням, про що свідчать графіки розподілу зусиль деформування по ходу переміщення на прошивному пуансоні 3 та активному інструменті 2. Графіки зусилля-переміщення представлені на рис. 8. Для з'ясування закономірностей залежності енерго-силових параметрів процесу від відносних розмірів циліндричної заготовки проводилась група

моделювань для різних співвідношень розмірів заготовки. В представлених результатах моделювання проводилось для випадку $H_0/D_0 = 0,5$; $d/D_0 = 0,4$. При таких конкретних співвідношеннях заготовки має місце неповне заповнення порожнини опорного інструменту (виділено червоною лінією на рис. 7, б), що вказує на інтенсивні радіальні деформації з під прошивного пуансону, але при інших співвідношеннях H_0/D_0 та d/D_0 спостерігається вже повне заповнення порожнини. З іншої сторони інтенсивні радіальні напрями течії матеріалу в майбутньому доречно використати для формування зубців колеса.

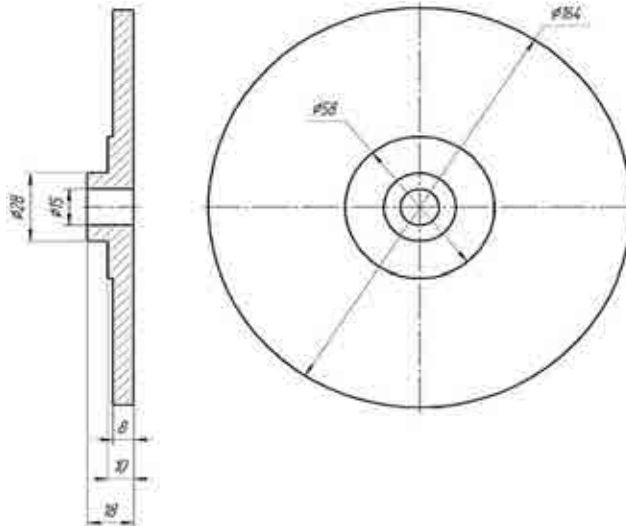


Рис. 6. Креслення деталі «шестерня насосу»

На графіку (рис.8) можна виділити п'ять характерних зон: 1 – початковий момент прошивання, коли зусилля на пуансоні стрімко зростає; 2 – стала фаза прошивання, при якій зусилля прошивання приблизно постійне; 3 – початковий момент формування фланця штампування обкочуванням, коли зусилля на активному інструменті зростає; 4 – стала фаза штампування обкочуванням з одночасним прошиванням; 5 – кінцева стадія процесів штампування обкочуванням та прошивання, коли зменшуються товщини заготовки та зростає робота по здолянню сил тертя.

Практично всі графічні залежності відповідають класичним закономірностям обробки металів тиском, але, на перший погляд, дивним здається падіння зусилля на пуансоні починаючи з зони 3 (лінія синього кольору на графіку). Цьому є фізичне пояснення, яке базується на врахуванні дії якісних моментів моделі пластичних течій в тонкій заготовці (див. рис. 2, б). Річ в тім, що коли починається процес штампування обкочуванням (зона 3) в центральній частині заготовки утворюється осередок дій напружень розтягування, що і викликає зменшення зусилля прошивання.

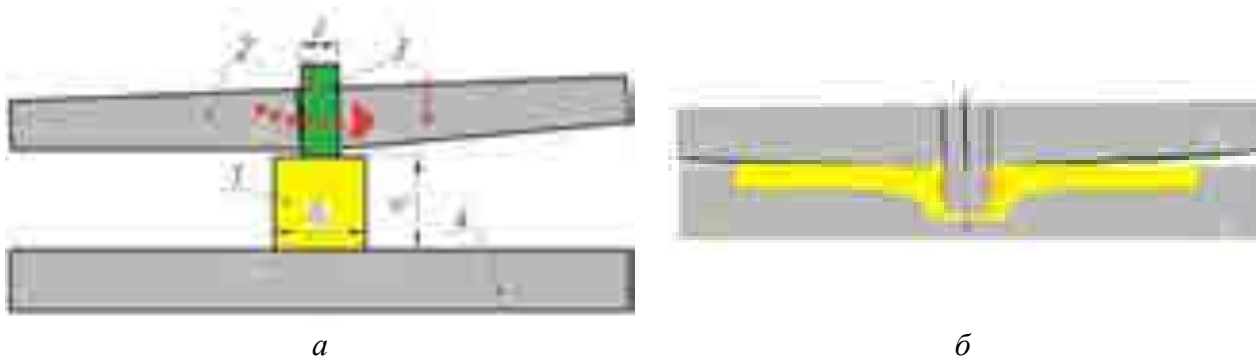


Рис. 7. Схема процесу та результати формування деталі «шестерня насосу»:

а – схема процесу моделювання; б – результати формування деталі «шестерня насосу»

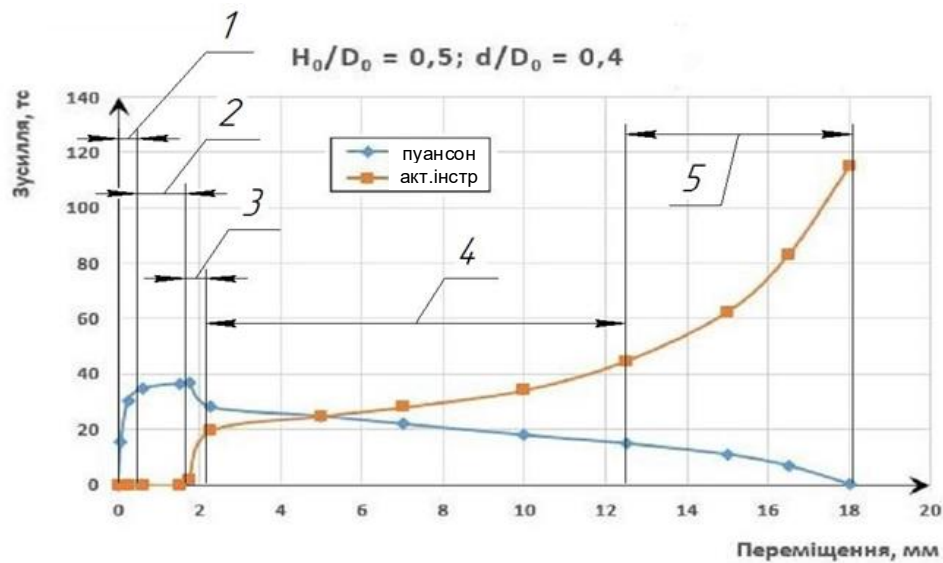


Рис. 8. Графіки зусилля-переміщення на пуансоні при прошиванні заготовки та на активному інструменті при штампуванні обкочуванням за результатами моделювання процесу

Таким чином спрямоване утворення в центральній частині заготовки напружень розтягування при штампуванні обкочуванням, що в деяких випадках може привести до браку та навіть до руйнувань центру деталі, можливо корисно використати з метою утворення порожнини. Енергетичні витрати формування порожнини в зоні утворення напружень розтягування є меншими.

Одним з недоліком орбітального штампування є ексцентричне прикладання зусилля, що накладає додаткові умови на закладання міцності при проєктуванні і виготовленні спеціалізованого обладнання, що, не зважаючи, на зменшення зусилля деформування впливає на зростання його матеріалоемності. Це питання вирішується використанням при штампуванні обкочуванням симетричних схем навантаження із задіянням декількох активних інструментів [11, 12]. Наприклад, в [12] розглянутий механізм обкочування, який має два приводних активних інструменти (рис. 9, а). Активні інструменти мають діаметрально протилежне розташування і при виконанні орбітальних рухів утворюють дві плями контакту з поверхнею заготовки, яка розміщується на опорному інструменті. Результатом такої подвійної дії є взаємне урівноваження технологічних зусиль відносно центру заготовки (осі обладнання) по кожній плямі контакту. Серед особливостей такої конструкції слід відзначити, що кут нахилу осі обкочування $\gamma \approx 45^\circ$, що може бути недостатнім для виконання деяких операцій штампування обкочуванням та створенням випадків аналогічних до прокатування від дії недостатніх сил тертя.

Другий механізм має всі атрибути механізму обкочування класичної конструкції та рекомендовані значення кута γ . Заготовка 1 розміщується на опорному інструменті 2 та обкочується одночасно як активним внутрішнім інструментом 3, так і зовнішнім активним інструментом 4. На радіальних підшипниках 5, 6 встановлений з можливістю обертання ротор 9, який має дві діаметрально протилежні ексцентрикові розточки, в яких закріплені два сферичні підшипники 7, 8. Від дії обертального руху ротора 9 на активні інструменти 3, 4 утворюється їх орбітальний рух обкочування. Механізм подвійного обкочування змонтований в корпусі 10, який є опорою для активних інструментів 3, 4, що спитаються один на одного. Таким чином утворюються два деформуючі зусилля 11, 12 від дії кожного з активних інструментів. Внутрішнє зусилля 11 від активного інструменту 3 з утворенням плями контакту 13 та периферійне зусилля 12 від активного інструменту 2 з утворенням плями контакту 14. Як видно зусилля 11, 12 взаємно урівноважують одне одного відносно центру заготовки (осі обладнання) по кожній

плямі контакту 13, 14. Серед особливостей такого технологічного процесу є можливість формування на межі дії активних інструментів 2, 3 висотного виступу на торцевій поверхні деталі 1, що значно розширює технологічні можливості пристрою.

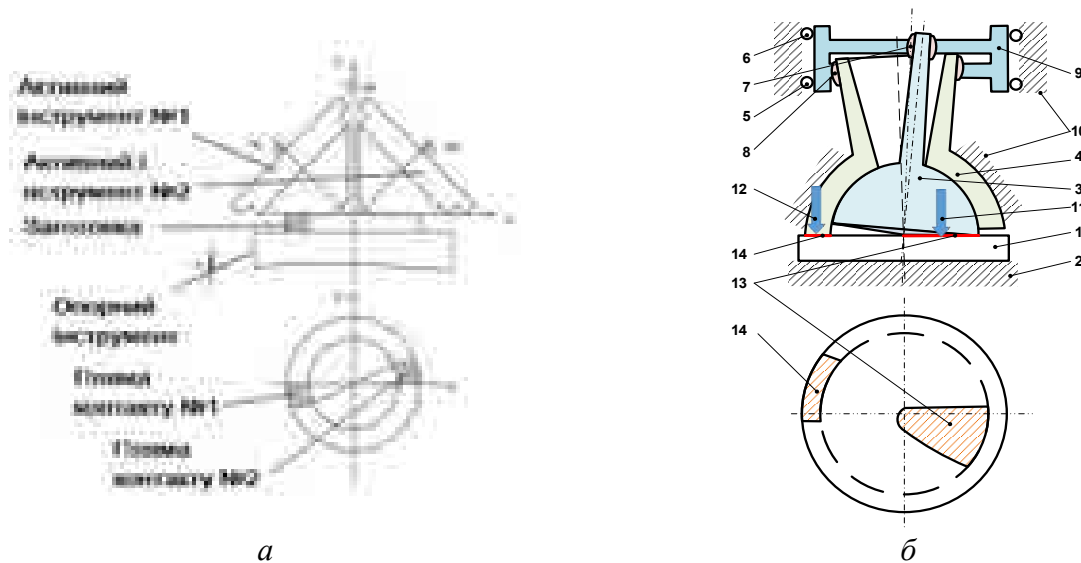


Рис. 9. Механізми обкочування, які мають два приводних активних інструменти, що створюють врівноважені деформуючі зусилля (1 – заготовка; 2 – опорний інструмент; 3 – внутрішній активний інструмент; 4 – зовнішній активний інструмент; 5, 6 – підшипники; 7, 8 – сферичні підшипники; 9 – ротор; 10 – корпус; 11, 12 – деформуючі зусилля; 13, 14 – плями контакту):

a – за [12]; *б* – авторська розробка

Другий механізм має всі елементи механізму обкочування класичної конструкції та рекомендовані значення кута γ . Заготовка 1 розміщується на опорному інструменті 2 та обкочується одночасно як зовнішнім активним інструментом 3, так і внутрішнім активним інструментом 4. На радіальних підшипниках 5, 6 встановлений з можливістю обертання ротор 9, який має дві діаметрально протилежні ексцентрикові розточки, в яких закріплені два сферичні підшипники 7, 8. Від дії обертального руху ротора 9 на активні інструменти 3, 4 утворюється їх орбітальний рух обкочування. Механізм подвійного обкочування змонтований в корпусі 10, який є опорою для активних інструментів 3, 4, що спитаються один на одного. Таким чином утворюються два деформуючі зусилля 11, 12 від дії кожного з активних інструментів. Внутрішнє зусилля 11 від активного інструменту 3 з утворенням плями контакту 13 та периферійне зусилля 12 від активного інструменту 2 з утворенням плями контакту 14. Як видно зусилля 11, 12 взаємно урівноважують одне одного відносно центру заготовки (осі обладнання) по кожній плямі контакту 13, 14. Серед особливостей такого технологічного процесу є можливість формування на межі дії активних інструментів 2, 3 висотного виступу на торцевій поверхні деталі 1, що значно розширює технологічні можливості пристрою.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуті в статті варіанти застосування технологій і обладнання операцій орбітального штампування обкочуванням запроваджені чи можуть бути використані на виробництві з метою подальшого підвищення його енергоефективності.

2. Такий ефект як утворення зони дії напружень розтягування може енергоефективно використаний для утворення центральної порожнини, при цьому операція прошивання центрального отвору протікають суміщено і при зусиллях в 1,5...2 менших ніж при традиційному процесі.

3. Ексцентричне прикладання зусилля деформування, що притаманне штампуванню обкочуванням, можливо ефективно урівноважити безпосередньо конструкцією обладнання,

що не тільки зменшить навантаження на станину, а і створить основу для низки оригінальних технологій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. G. Samołyk. Investigation of the cold orbital forging process of an AlMgSi alloy bevel gear. *Journal of Materials Processing Technology* 213 (2013) 1692–1702. journal home page: www.elsevier.com/locate/jmatprotec. 1+1. ASM Handbook, Volume 14A: Rotary Forging Metalworking: Bulk Forming S.L. Semiatin, editor, pp. 179–182. DOI: 10.1361/asmhba0003990.
2. Chou A.C.P., Chou P.C., Rogers H.C., Rotary forging, forming and forging, Vol 14, ASM Handbook formerly Metals Handbook, 9th ed., ASM International. 1988, pp. 176–179. www.asminternational.org.
3. Гожій С. П., Ландар Р.М., Носенко А.І. Класифікація обладнання для штампування обкочуванням. *Обробка металів тиском*. 2011. 1 (26). С. 209–214.
4. Yu, Z.; Chen, M.; Ma, C.; Luo, S.; Zhu, C. Numerical model simulation of the double-roll rotary forging of large diameter thin-walled disk. *Metals*. 2021. 11, p. 1767. <https://doi.org/10.3390/met11111767>.
5. Гожій С.П. Геометричні параметри штампування обкочуванням. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Випуск 4. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь. 2006. Том 33. С. 117–123.
6. Тітов В., Гожій С., Мироненко, В. Універсальна дослідна установка для пресування трубних заготовок. *Механіка та новітні технології*. 2022. 6 (1). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.260002>.
7. Han X., Hua L. Effect of size of the cylindrical workpiece on the cold rotary-forging process. *Materials and Design. Elsevier*. 2009. 30, pp. 2802 – 2812.
8. Гожій С.П. Модель деформацій при осаджуванні обкочуванням високого циліндричного зразка. *Машинознавство*. 2009. 7 (145). С. 34–37.
9. Гожій С.П., Кліско А.В. Визначення роботи контактних сил тертя при штампуванні обкочуванням з врахуванням розподілу контактних напружень та зони приставання. *Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*. 2010. 59. С. 83–87.
10. Пат. 15245, Україна, МПК B21D 37/00. Спосіб виготовлення деталей. Кривда Л.Т., Гожій С.П. № u20512822; заявл. 29.12.2005; опубл. 15.06.2006.
11. Wang Qi, Zhu Chun-dong, Liu Xin, Ma Rong-fei. Research on plastic deformation law and forming technology of rotary forging with multi-cone rolls. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. 13(4), pp. 1–15.
12. Shi Lei, Zhu Chun-dong, Liu Xin, Zhang Yi. Optimum design of the double roll rotary forging machine frame. *Mech. Sci.* 2020.11, pp. 101–114, <https://doi.org/10.5194/ms-11-101-2020>.

REFERENCES

1. G. Samołyk. Investigation of the cold orbital forging process of an AlMgSi alloy bevel gear. *Journal of Materials Processing Technology* 213 (2013) 1692–1702. journal home page: www.elsevier.com/locate/jmatprotec. 1+1. ASM Handbook, Volume 14A: Rotary Forging Metalworking: Bulk Forming S.L. Semiatin, editor, pp. 179–182. DOI: 10.1361/asmhba0003990.
2. Chou A.C.P., Chou P.C., Rogers H.C., Rotary forging, forming and forging, Vol 14, ASM Handbook formerly Metals Handbook, 9th ed., ASM International. 1988, pp. 176–179. www.asminternational.org.
3. Gozhii S.P., Landar R.M., Nosenko A.I. Classification of rolling stamping equipment. *Processing of Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2011. 1 (26), pp. 209–211. (in Ukrainian).
4. Yu, Z.; Chen, M.; Ma, C.; Luo, S.; Zhu, C. Numerical Model Simulation of the Double-Roll Rotary Forging of Large Diameter Thin-Walled Disk. *Metals* 2021, 11, 1767. <https://doi.org/10.3390/met11111767>.
5. Gozhii S.P. Geometric parameters of rolling stamping. *Proceedings of the Tauri State Agricultural Technical Academy. Issue 4. Applied geometry and engineering graphics*. Melitopol. 2006. 33, pp. 117–123. (in Ukrainian).
6. Titov, V., Gozhii, S., Myronenko, V. Universal experimental installation for pressing pipe blanks. *Mechanics and New Technologies*. 2022. 6 (1). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.260002>. (in Ukrainian)
7. Han X., Hua L. Effect of Size of the Cylindrical Workpiece on the Cold Rotary-Forging Process. *Materials and Design. Elsevier*. 2009. 30, pp. 2802 - 2812.
8. Gozhii S.P. Model of deformations during rolling deposition of a tall cylindrical sample. *Mechanical engineering*, 2009. 7 (145), pp. 34–37. (in Ukrainian).
9. Gozhii S.P., Klisko A.V. Determination of the operation of frictional contact forces during stamping by rolling, taking into account the distribution of contact stresses and the sticking zone. *Journal of Mechanical Engineering. NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*. 2010. 59, pp. 83–87. (in Ukrainian).
10. Pat. 15245. Ukraine. B21D 37/00. The method of manufacturing parts. Kryvda L.T., Gozhii S.P. Bull. 6, 15.06.2006.
11. Wang Qi, Zhu Chun-dong, Liu Xin, Ma Rong-fei. Research on plastic deformation law and forming technology of rotary forging with multi-cone rolls. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. 13(4), pp. 1–15.
12. Shi Lei, Zhu Chun-dong, Liu Xin, Zhang Yi. Optimum design of the double roll rotary forging machine frame. *Mech. Sci.* 2020.11, pp. 101–114, <https://doi.org/10.5194/ms-11-101-2020>.

Gozhii S., Myronenko V. Prerequisites for the creation of energy-efficient technologies and equipment for orbital stamping by rolling.

Scientific studies of the processes and equipment of orbital rolling stamping are conducted at the Department of Aircraft Production Technology of the Scientific and Educational Mechanics and Mechanical Engineering Institute of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" from the 70s of the last century to the present. During this time, sufficient experience has been accumulated in the creation of energy-efficient technologies and equipment for orbital stamping by rolling. All scientific developments are created on the basis of qualitative effects of the process and emphasize its unique possibilities and perspective of application. Given the fact that the modern tool for researching metal pressure processing processes is computer modeling technology that uses the finite element method, the priority remains experimental research, thanks to which most of the qualitative effects of orbital stamping reflected in the article were recorded. Special attention was paid to the effective positive application of the qualitative effects of rolling stamping. In particular, such an effect as the formation of a zone of action of tensile stresses can be energy-efficiently used for the formation of a central cavity. And the eccentric application of the deformation force can be effectively balanced, which will not only reduce the load on the equipment, but also create the basis for a number of original technologies. Appropriate technological and design solutions, based on the results of scientific and experimental research of the process, are introduced into production and laid as a basis for writing this article.

Keywords: orbital stamping, rolling stamping, plastic deformation model, finite element method, average specific forces, deformation forces, deformation center.

Гожий С. П., Мироненко В. А. Предпосылки создания энергоэффективных технологий и оборудования орбитальной штамповки обкатыванием.

Научные исследования процессов и оборудования орбитальной штамповки обкатыванием проводятся на кафедре технологии производства летательных аппаратов Научно-учебного механико-машиностроительного института Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» с 70-х годов прошлого века до настоящего времени. За это время накоплен достаточный опыт создания энергоэффективных технологий и оборудования для орбитальной штамповки обкатыванием. Все научные разработки созданы на основе качественных эффектов процесса и подчеркивают его уникальные возможности и перспективу применения. Учитывая, что современным инструментом исследования процессов обработки металлов давлением являются компьютерные технологии моделирования, применяющие метод конечных элементов, приоритет остается за экспериментальными исследованиями, благодаря которым и зафиксировано большинство качественных эффектов орбитальной штамповки, отраженных в статье. Особое внимание уделялось эффективному положительному применению качественных эффектов штамповки обкатыванием. В частности, такой эффект, как образование зоны действия напряжений растяжения, может энергоэффективно использоваться для образования центральной полости. А эксцентричное приложение усилия деформирования возможно уравновесить, что не только снизит нагрузку на оборудование, но и создаст основу для ряда оригинальных технологий. Соответствующие технологические и конструкторские решения, основанные на результатах научных и экспериментальных исследований процесса, вводятся в производство и заложены в основу при написании настоящей статьи.

Ключевые слова: орбитальная штамповка, штамповка обкатыванием, модель пластических деформаций, метод конечных элементов, средние удельные усилия, усилия деформирования, область деформации.

Гожий Сергій Петрович – д-р техн. наук, доц., проф. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

Gozhii Serhii – Doctor of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Гожий Сергей Петрович – д-р техн. наук, доц., проф. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»

E-mail: s.godzyi@kpi.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2276-1225>

Мироненко Віталій Анатолійович – аспірант, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

Myronenko Vitalii – Praduate student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Мироненко Виталий Анатольевич – аспирант, НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»

E-mail: il671563@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6624-3564>

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

НТУУ «КПИ им. И. Сикорского» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

Стаття надійшла до редакції 05.06.22 р.

ЗМІСТ

<i>Sokolov Lev Nikolaevich (for 100th anniversary)</i>	3
--	---



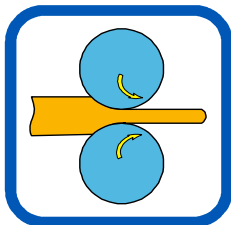
РОЗДІЛ І МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ТИСКОМ

<i>Aliieva L. I., Levchenko V. M., Aliiev I. S., Kartamyshev D. O.</i>	
The development of triangular kinematic module to calculate the deformation pressure in the extrusion processes.....	10
<i>Бейгельзимер Э. Е., Бейгельзимер Я. Е.</i>	
Простой способ оценки производной эмпирической функции по ее значениям в неравноотстоящих точках	21
<i>Грушко О. В., Кириця І. Ю.</i>	
Критерії деформовності з врахуванням властивостей матеріалу в параметрі напруженого стану	30
<i>Грудкіна Н. С., Левченко В. М., Абхари П., Коцюбівська К. І., Малій Х. В.</i>	
Особливості проектування процесів точного об'ємного штампування видавлюванням на основі енергетичних моделей розрахунку	38
<i>Калюжний В. Л., Левченко В. М., Ярмоленко О. С., Таган Л. В.</i>	
Вплив швидкості деформування на гаряче зворотне видавлювання осесиметричного порожнистого виробу	46
<i>Тітов В. А., Назарук Т. О.</i>	
Розробка методу розрахунку кривих деформування волокнистих композиційних матеріалів з металевою матрицею	55



РОЗДІЛ II ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ ТИСКОМ У МАШИНОБУДУВАННІ

- Марков О. Є., Хващинський А. С., Мусорін А. В., Лисенко А. А., Молодецький В. В.**
Дослідження нового способу кування великих злитків на основі осадження заготовок з уступами 61
- Гожій С. П., Мироненко В. А.**
Перспективний напрям локального формоутворення – суміщене штампування обкочуванням 71
- Медведєв М. І., Бобух О. С., Кузьміна О. М., Самсоненко А. А.**
Удосконалення технології кування трубних заготовок з титанових сплавів в умовах ТОВ "Дніпропрес Сталь" 80
- Михалевич В. М., Матвійчук В. А., Колісник М. А.**
Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому видавлюванні методом штампування обкочуванням 87
- Тараненко М. Є., Наріжний О. Г.**
Керування параметрами ЕГ-навантаження для штампування листових деталей з мінімальним жолобленням..... 98
- Орлюк М. В., Піманов В. В.**
Використання програмного комплексу DEFORM для оптимізації операцій листового формування 110
- Драгобецький В. В., Савєлов Д. В., Молоштан Д. В.**
Резонансні явища в процесах вібраційного ущільнення порошкових заготовок 117



РОЗДІЛ III ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ ТИСКОМ У МЕТАЛУРГІЇ

- Карнаух С. Г.**
Підвищення якості заготовок, отриманих способом ломки згином при статико-динамічному навантаженні на прес-молоті 123
- Кухар В. В., Горностаї В. М., Курпе О. Г.**
Енергоспоживання та витрати емульсолу при холодній прокатці смуг з вуглецевої сталі на безперервному 4-х клітьовому стані 1680 134

Kulik T. A.

Investigation of the temperature factor on the formation of a strip surface micro-relief during warm rolling 141

Корева В. О.

Холодне прокатування алюмінієвого сплаву системи AL-MG..... 147



РОЗДІЛ IV ОБЛАДНАННЯ ТА УСТАТКУВАННЯ ОБРОБКИ ТИСКОМ

Алієв І. С., Марков О. Є., Карнаух С. Г.

Розробка та дослідження конструкцій штампів для розділення профілів складної конфігурації на мірні заготовки 154

Гождій С. П., Мироненко В. А.

Передумови створення енергоефективних технологій і обладнання орбітального штампування обкочуванням 166

Тарасов О. Ф., Касьянюк О. С., Грибков Е. П., Бабаши А. В., Коваленко А. К.

Проектування системи керування експериментальною установкою для процесу кручення під високим тиском порожнистих заготовок 177

Карнаух С. Г., Чоста Н. В.

Розробка допоміжних пристроїв до штампів для відрізки сортового прокату зсувом з диференційним затиском..... 188

Гринь О. Г., Трембач І. О.

Багатокритеріальний аналіз наплавочних матеріалів для відновлення і зміцнення деталей..... 196

Сухов В. В., Кабанячий В. В.

Оцінка ресурсу деталей на стадії проектування та аналіз ефективності технологічних процесів заготівельно-штампувального виробництва 204

Алтухов О. В., Тарасов О. Ф.

Розробка програмних компонентів для моделювання інтенсивного пластичного деформування на основі параметричної моделі оснащення 214

Anniversary of the Department of Metal Forming DSEA 224

ВИМОГИ
ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛІКАЦІЇ У ЗБІРНИКУ
«ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ»

До публікації у збірнику приймаються статті обсягом **від 6 до 12 повних сторінок**. Усі матеріали надсилаються в електронному вигляді на адресу: igramaliiev@gmail.com, herald@dgma.donetsk.ua з позначкою теми <прізвище автора, місто> (Ivanov Kiev).

До статті додаються:

– акти експертизи (для авторів з України);

– **рецензія**, підписана рецензентом звичайним або цифровим електронним підписом, виписка із засідання кафедри або відділу.

Стаття має відповідати тематиці збірника та сучасному стану науки та техніки, містити новий науковий результат. **Структура статті** повинна містити такі необхідні елементи:

• **анотації** (обсягом **1800–2300 знаків, 17–18 рядків розміром 10 пт**), українською, англійською та російською мовами (анотація має відображати актуальність, мету, завдання, методи, висновки, перспективи даного дослідження, ключові моменти, результати та новизну роботи);

• **ключові слова** (**5–10 слів**) українською, англійською та російською мовами;

• **постановка проблеми**, завдання у загальному вигляді, її актуальність та зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;

• **аналіз останніх досліджень та публікацій** (не менше 3-х статей, що вийшли за останні 10 років), у яких розпочато вирішення даної проблеми та на які спирається автор;

• виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується ця стаття;

• **формулювання мети статті** та постановка приватних завдань, які вирішені у статті (**3 нового рядка – «Метою роботи є»**);

• **викладення основного матеріалу дослідження** з обґрунтуванням отриманих наукових результатів;

• **висновки** з отриманих наукових результатів з конкретними рекомендаціями та перспективи подальших робіт у даному напрямку (із заголовком **ВИСНОВКИ**, розташованим по центру рядка).

Текст розмістити на білому папері формату А4 (210 × 297 мм) із полями 20 мм з усіх боків. Листи не нумерувати. Орієнтація сторінки розміщення тексту – книжкова. Для розміщення табличних даних, графіків, схем, малюнків за необхідності допускається альбомна орієнтація сторінки. **Текст статті** оформити у редакторі Word 7.0-10.0 шрифтом Times New Roman Cyr (звичайний) розміром 12 пунктів; між рядками – одинарний інтервал; абзацний відступ – 1,25 см; вирівнювати по ширині сторінки із переносами.

Текст анотацій оформити шрифтом Times New Roman Cyr (курсив) розміром 10 пт; між рядками – одинарний інтервал. У тексті статті не допускається вирівнювання пробілами.

Ілюстративний матеріал монтується у тексті. Встановлюється *обтікання малюнків у тексті*. За потреби допускається використання кольорових малюнків. Всі рисунки, особливо скановані (*роздільна здатність – не менше 200 dpi*), повинні бути чіткими, без стиснення. Рисунок у статті повинен бути розміщений після посилання на нього у тексті. Кожен рисунок забезпечується підписом, що містить номер малюнка та його назву. Підпис починається з нового рядка (відступ 1,25 см), вирівнювання по ширині.

Таблиці виконують відповідно до вимог стандарту та розміщуються у тексті статті або на окремих сторінках у тій послідовності, в якій вони наводяться у статті. Обов'язково у тексті мають бути посилання на таблиці. Графічний матеріал та таблиці не повинні виходити за поля сторінки. Сумарний обсяг малюнків та таблиць **не повинен перевищувати 50 %** обсягу статті.

Формули набираються в редакторі Microsoft Equation з параметрами: стандартний - 12 пунктів; великий індекс - 10 пунктів; дрібний індекс – 8 пунктів; великий символ – 14 пунктів; дрібний символ – 8 пунктів, вирівнювання по центру сторінки без абзацного відступу. Нумерацію формул виконують з вирівнюванням номера по правому полю.

Структура оформлення статті: на першій сторінці статті у першому рядку з абзацу набирається УДК. У наступному рядку праворуч з абзацу – прізвища та ініціали авторів. Нижче з абзацу шрифтом Times New Roman Cyr (простий) розміром 12 пунктів **ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ** – назва статті. **Анотація** – з абзацу мовою статті, обсягом 1800–2300 знаків (17–20 рядків). Після анотації – **ключові слова**.

Анотації та ключові слова двома іншими мовами (обсягом 1800–2300 знаків кожного) наводяться після розділу REFERENCES. Текст анотацій та ключові слова (укр., англ., рус.) оформити шрифтом *Times New Roman Cyr (курсив)* розміром 10 пунктів; між рядками – одинарний інтервал.

Далі розмістити **основний текст статті**, що закінчується розділом **ВИСНОВКИ**.

Розділ **ВИСНОВКИ** починається з нового рядка, озаглавлюється словом **ВИСНОВКИ** (шрифт Times New Roman (звичайний)), розмір 12 пунктів, великі літери, вирівнювання по центру). Вирівнювання основного тексту висновків по ширині сторінки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ, набраний шрифтом Times New Roman Cyr (звичайний) розміром 12 пт великими літерами, розмістити по центру сторінки через рядок від **ВИСНОВКІВ**. Список літератури оформити згідно з **ДСТУ 8302:2015** шрифтом Times New Roman розміром 10 пт; між рядками – одинарний інтервал. **REFERENCES** оформлюється після **СПИСКУ ЛІТЕРАТУРИ**: латиницею транслітерація прізвищ авторів; назви статей, журналів, конференцій, власні імена, видавництва, місце видання перекласти на англійську мову. Після **REFERENCES** наводяться анотації та ключові слова двома іншими мовами (обсягом 1800–2300 знаків кожна).

Відомості про авторів вказуються наприкінці всього поданого матеріалу українською, англійською та російською мовами: повністю вказати ПІБ, вчений ступінь та вчене звання, місце роботи, посада, електронну адресу кожного автора (e-mail) для листування, ORCID.

Як приклад з оформлення можна розглядати статті цієї збірки.

Наукове видання

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ

Збірник наукових праць

MATERIALS WORKING BY PRESSURE

Collection of science papers

Технічне редагування, коректування, макетування:
Катюха О. Л.

Формат 60 × 90/8.
Ум. друк. арк. 27,9.
Тираж 100 прим.

Адреса редакції:
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, каб. 1322,
тел.: (0626) 41-69-42, 41-67-88,
e-mail: herald@dgma.donetsk.ua, elenakel12@gmail.com

Видавець і виготівник
Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72
Свідокство про внесення до Державного реєстру
серія ДК № 1633 від 24.12.03