

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, титомі 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 полотної 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].

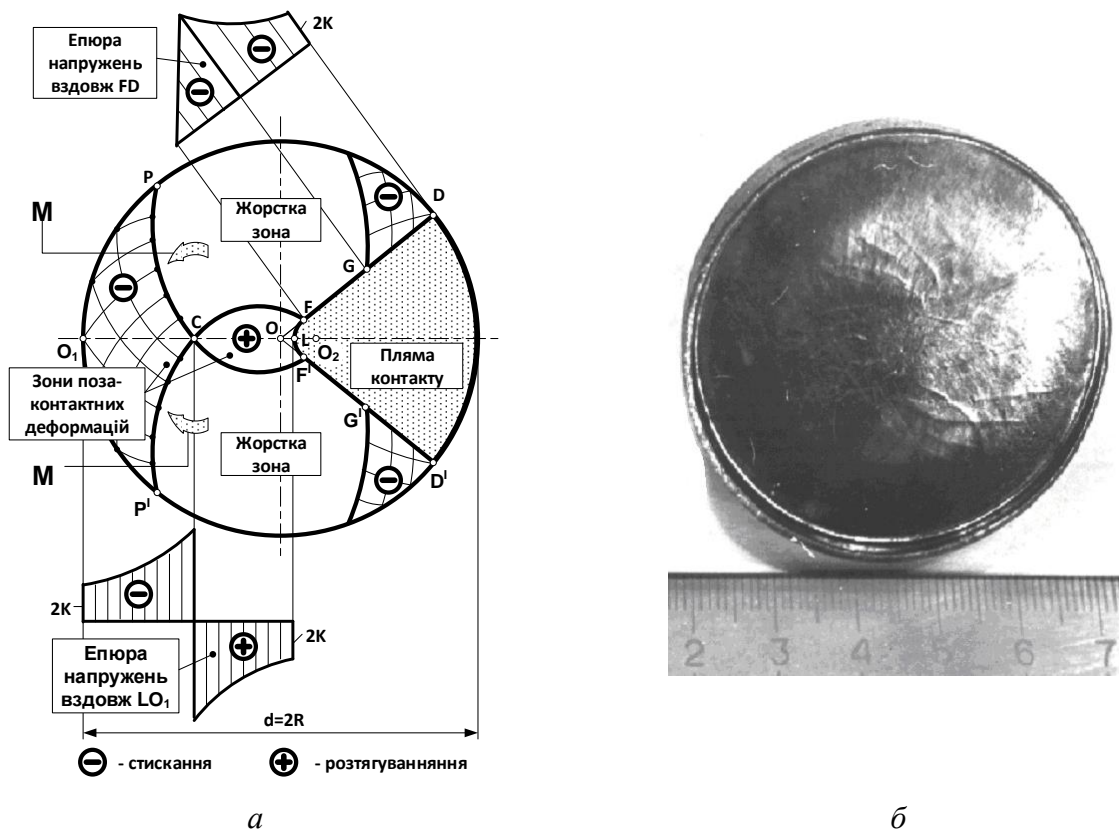


Рис. 1. Будова фізичної моделі напруженого стану і пластичних течій при осаджуванні циліндричної заготовки обкочуванням (M – моменти, що викликані тангенціальною течією металу з плями контакту та створюють стовщення в зоні поза контактної деформації):

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 чотирипроменею 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.

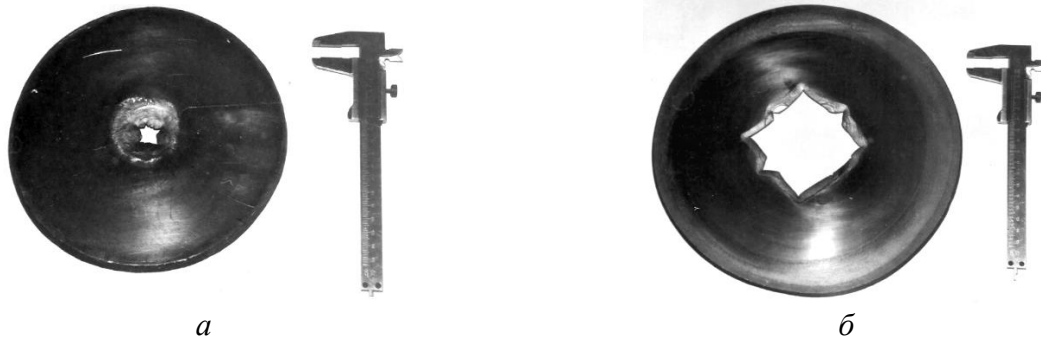


Рис. 2. Свинцевий циліндричний зразок після осаджування обкочуванням: а – на 87 % висотної деформації; б – на 95 % висотної деформації

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 унеможливіє 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.

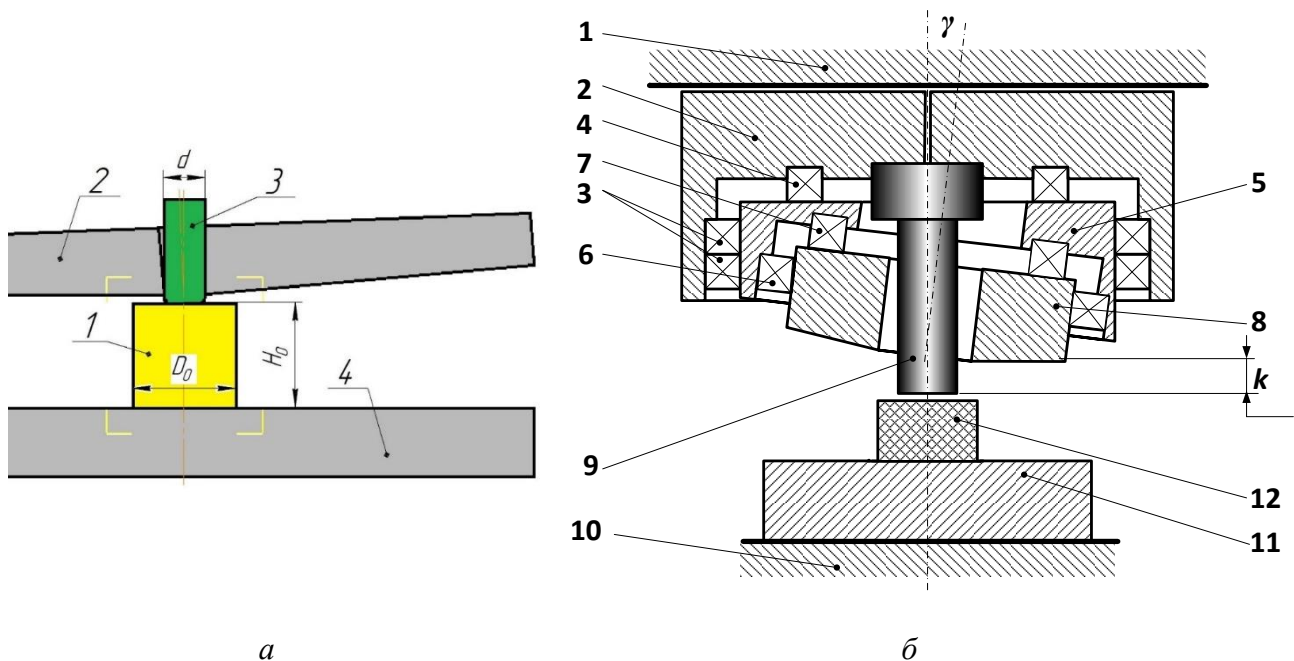


Рис. 3. Схема процесу та пристрою для суміщеного штампування обкочуванням та прошивання процесу (1 – заготовка; 2 – обкочувальна головка; 3 – центральний прошивний пуансон, що виступає на задану глибину порожнини $k=2\text{мм}$; 4 – нижня плита; H_0 та D_0 – висота та діаметр циліндричної заготовки; 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 приведене 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 термоэффекту 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 осового 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 $\lambda = 0,1$.

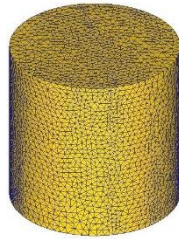


Рис. 4. Скінченно-елементна сітка на вихідній заготовці

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 центрального 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.



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

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

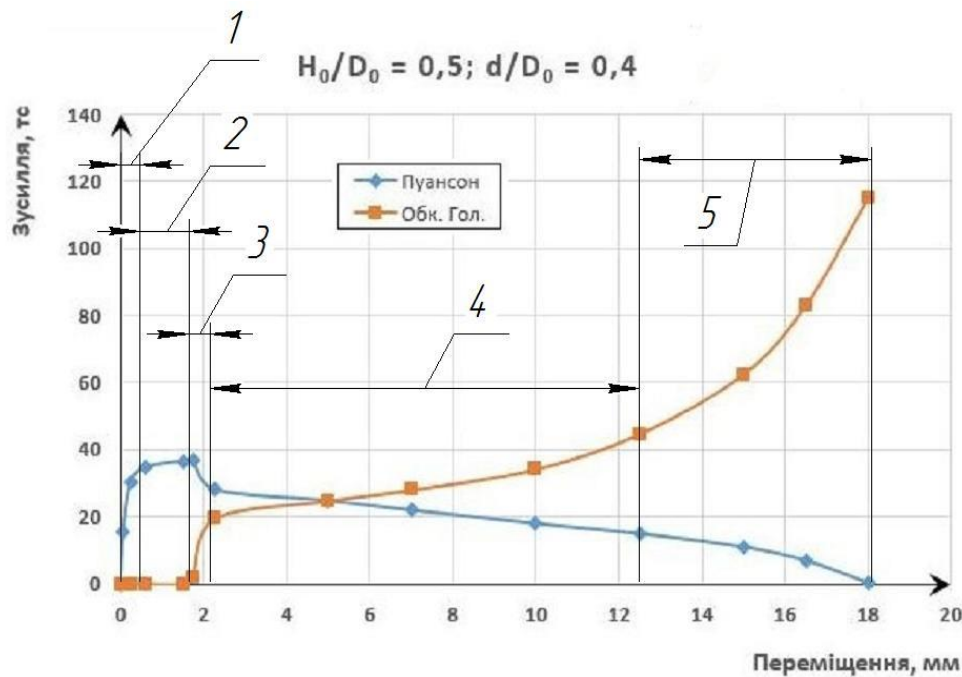


Рис. 6. Графік співвідношення «Зусилля – Переміщення» за результатами моделювання та характерні зони (H_0 та D_0 – висота та діаметр циліндричної заготовки; d – діаметр прошивного пуансону: 1, 2, 3, 4, 5 – характерні зони на графіку)

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.

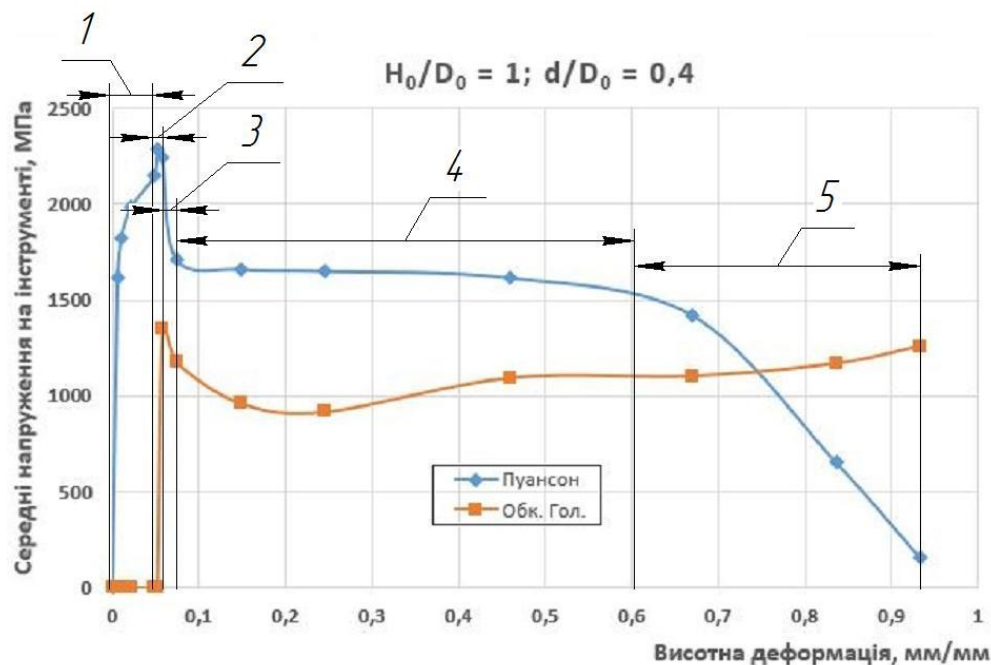


Рис. 7. Графік співвідношення «Середні напруження на інструменті – Висотна деформація» за результатами чисельного моделювання та характерні зони (H_0 та D_0 – висота та діаметр циліндричної заготовки; d – діаметр прошивного пуансону: 1, 2, 3, 4, 5 – характерні зони на графіку)

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. В21D 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 Sikorskyi 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 дунки. 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.

Гожий 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.godzyi@kpi.ua

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

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

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

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

E-mail: ll671563@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