

**В. В. Савуляк, канд. техн. наук, доц.; Т. І. Молодецька, канд. техн. наук;
В. О. Білостечний**

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВИРУБУВАННЯ З ЛИСТА НА ЗОНУ ПОШКОДЖЕННЯ ЗАГОТОВОК ТОНКОСТІННИХ ВТУЛОК

Підтримання виробництва на конкурентоздатному рівні вимагає створення відповідних підходів до виробництва, створення найефективніших рішень. Одним з напрямків покращення конкурентоздатності виробів є забезпечення стабільної високої якості виробів, впровадження принципів бездефектності, що передбачає уточнене визначення параметрів технологічних процесів на всіх етапах проєктування та виробництва.

В роботі реалізовано системний підхід до забезпечення якості тонкостінних деталей з листового матеріалу на етапі їх пластичного формоутворення з врахуванням потреб ресурсу пластичності для подальших технологічних операцій. Уточнено та систематизовано показники якості деталей типу втулок. Зроблено аналіз впливу виробничих факторів на забезпечення показників якості виробів. Здійснено аналіз впливу параметрів і складу технологічного процесу на формування показників якості деталей, отриманих методами пластичного деформування та механічної обробки. Обґрунтовано, що основною проблемою якості виготовлення деталі є питання досягнення балансу вимог до конструкції та використаного матеріалу. Для аналізу причин появи дефектів деталі типу втулка в процесі її виготовлення застосовано причинно-наслідкову діаграму. Серед вимог до виготовлення втулок найважливішими є мінімізація матеріаломісткості, забезпечення хорошої зварюваності деталі з корпусом (конструктивом), відсутність макродефектів, забезпечення герметичності, достатній залишковий ресурс пластичності матеріалу, що необхідно для кожного наступного етапу технологічного процесу. З метою визначення параметрів процесу деформування листової заготовки розроблена та реалізована комп'ютерна модель із застосуванням пакету Deform. Моделювання дозволило визначити розподілення пошкоджень в матеріалі заготовки під час вирубування. Встановлено, що на ширину пошкодженої зони в заготовці деталі найбільший вплив чинять такі фактори: діаметр пуансона, товщина листа, комбінація товщини листа і зазору між матрицею та пуансоном.

Ключові слова: *холодне пластичне деформування, моделювання, ресурс пластичності, граничні деформації, вирубування, витягування.*

Вступ

Підтримання виробництва на конкурентоздатному рівні вимагає створення відповідних підходів до виробництва, створення найефективніших рішень. Одним з напрямків покращення конкурентоздатності виробів є забезпечення стабільної високої якості виробів, впровадження принципів бездефектності, що передбачає уточнене визначення параметрів технологічних процесів на всіх етапах проєктування та виробництва [1, 2, 3, 4, 5].

Широке розповсюдження у виробництві деталей з листових матеріалів отримали методи холодного пластичного деформування. Проблемам визначення параметрів технологічних процесів (ТП) холодного пластичного деформування листових матеріалів присвячена низка публікацій [7, 8, 9]. Застосування тих чи інших ТП різняться і значно залежить від класу деталей, що виготовляються. Наприклад, для виробів типу втулка, яка виготовляється з листового матеріалу, класичний технологічний процес передбачає вирубування та відбортовування в отворі циліндричної частини. При цьому, залежно від конкретних геометричних особливостей втулки і матеріалу для її виготовлення, можливі різні способи реалізації технологічного процесу [7, 10].

В загальному випадку, за геометричною формою, втулки можна поділити на фланцеві і безфланцеві, які розділяються на три основні групи: з суцільним дном, з отвором у дні, без дна.

В цій статті, на прикладі виготовлення втулки з фланцем і без дна, проаналізуємо фактори впливу на пошкодження матеріалу, як критерію ймовірності появи макропошкоджень, що є однією з основних ознак появи браку [11,12].

Заготовку втулок попередньо вирубують з листового матеріалу. На наступній операції формоутворення усталеним оснащенням є матриця, пуансон та притискне кільце, яке запобігає складкоутворенню на фланці [13]. З метою обмеження появи макропошкоджень під час відбортовування циліндричної частини отворів геометричні характеристики деталей ставлять у відповідність до показників пластичності матеріалу. Однією з таких характеристик є граничні деформації, які часто обмежують за рекомендаціями, що ґрунтуються на емпіричних залежностях та довідкових матеріалах, отриманих під час реалізації подібних ТП в промисловості [10]. Недоліком такого емпіричного підходу є відсутність можливості прогнозування пошкодження матеріалу після пластичного формоутворення, що не дозволяє проектувати наступні операції обробки, складання виробу та подальшу експлуатацію з мінімальною кількістю браку.

Поява значної кількості браку першопричиною має проблеми, що закладаються вже під час операції вирубування та проявляються під час формування геометрії деталі та наступних операцій механічної обробки [14]. Для зменшення кількості браку доцільним є визначення параметрів операцій та інструментів для пластичного деформування – матриці, пуансона, які дозволять отримати заготовки з допустимими пошкодженнями та потоншенням на циліндричній частині деталі, яке утворюється на операції відбортовування. При цьому слід враховувати коливання товщини листа, розмірів матриці і пуансона та зміну зазорів між ними на розділювальній операції, а також відхилення від співвісності матриці і пуансона на формувальній операції.

Метою роботи є визначення факторів впливу на пошкодження матеріалу в зоні навколо отвору у вирубаній з листа заготовці з урахуванням його впливу на наступні операції відсортовування та утворення циліндричної частини.

Результати дослідження

Загальний вигляд деталі "Втулка" та типові дефекти виготовлення показані на рис. 1. Найнебезпечнішими дефектами є тріщини та недостатня товщина відбортованої частини, на якій нарізається різь.

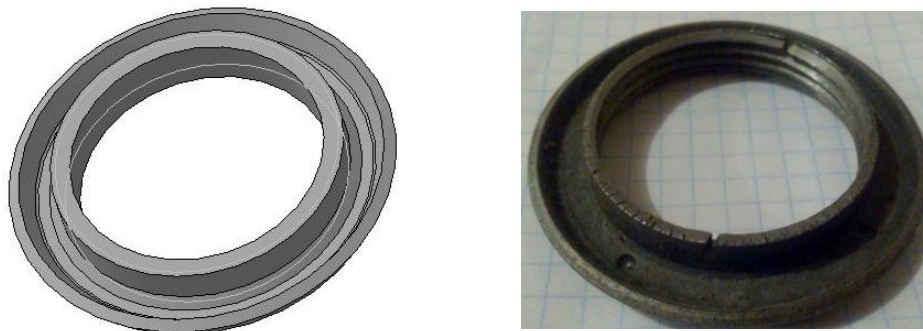


Рис. 1. Загальний вигляд та типові дефекти деталі "Втулка"

Кількість дефектних деталей в партії може досягати значної величини, а сам технологічний процес є недостатньо надійним. Виявлені під час контролю дефекти та їх відносний розподіл показано у таблиці 1.

Таблиця 1

Дефекти втулок після операції відбортовування

Вид дефекту	Відсоток у бракованих деталях, %
Тріщини	67
Недостатня товщина відбортованої стінки	28
Порушення допусків на розміри	3
Інші	2

Найбільша кількість дефектів проявляється у вигляді тріщин на циліндричній частині деталі, отриманій методом пластичного деформування на операції відбортовування. Інша

причина браку проявляється у вигляді наднормативного зменшення товщини циліндричної відбортованої стінки, яка не дозволяє нарізати на ній різь з необхідними параметрами. Доцільно розглянути механізми появи цих дефектів та першочергово вжити заходів для запобігання їх виникненню. Одним з варіантів вирішення проблеми високого відсотку браку з утворенням тріщин та проблем з нарізанням різі можливе за рахунок збільшення товщини вихідного листа для деталі та її маси. Але цей варіант розв'язання проблеми з браком тягне за собою виникнення труднощів у реалізації технології контактного приварювання під час складання виробу (тонша деталь прогрівається сильніше і прогоряє); збільшується зусилля вирубування заготовки з листа та для деформування, що вимагає пресів з більшим зусиллям або штампів з більшою енергією удару.

У роботі [15] показано, що під час обробки тиском мікротріщини виникають переважно у випадках, коли ресурс пластичності практично вичерпаний або накопичено критичну кількість пошкоджень в матеріалі деталі. Поява мікротріщин в навантаженій зоні стимулює розвиток макропошкоджень за значно менших навантажень і деформаціях. Потрібно також врахувати, що товщина листа і його механічні властивості коливаються в певних межах, що викликає розсіювання параметрів пластичності матеріалу [16, 17, 18]. У виробничих умовах величини допустимої деформації матеріалу знаходять шляхом випробувань.

На рис. 2 показані основні фактори впливу на появу дефектів деталей, отриманих обробкою тиском. Їх можна розділити на дві групи: – пов'язані з матеріально-технічним забезпеченням (зображені у верхній половині) і пов'язані з технологічним процесом (зображені у нижній половині).

Вищу ефективність забезпечують заходи, які забезпечують вдосконалення технологічного процесу (ТП), оскільки не вимагають великих капітальних затрат. Тому дослідження основних причин появи тріщин та напрацювання рекомендацій з їх усунення зосередимо на технологічних проблемах обробки.

Другою великою групою дефектів є недостатня товщина заготовки на ділянці для нарізання різі. Це може бути пов'язане з потоншенням листового матеріалу під час витягування, а також похибками встановлення заготовок на операції нарізання різі мітчиком на токарному верстаті.

Основними ознаками, які впливають на вибір способу виготовлення є: конфігурація деталі та її габарити, механічні властивості і товщина матеріалу, точність деталі тощо. Усталено для виготовлення деталей класу, до якого входить наша деталь, є застосування таких операцій: вирубування; відбортовування; формування. Ескіз заготовки після операції вирубування з листа показано на рис. 3, а маршрутна технологія, яка застосовується на виробництві, в таблиці 2.

Таблиця 2

Технологія виготовлення заготовки деталі "Втулка" з використанням пластичного деформування

№ операції	Назва операції	Зміст операції
005	Заготівельна	Розрізати лист на смуги
010	Комбінована	Пробити отвір під відбортовування і вирубати контур деталі
015	Формувальна	Формувати деталь, отвір під різь за розмірами
020	Формувальна	Формувати 4 пуклі за 1 удар
025	Контрольна	Перевірити розміри та наявність макропошкоджень

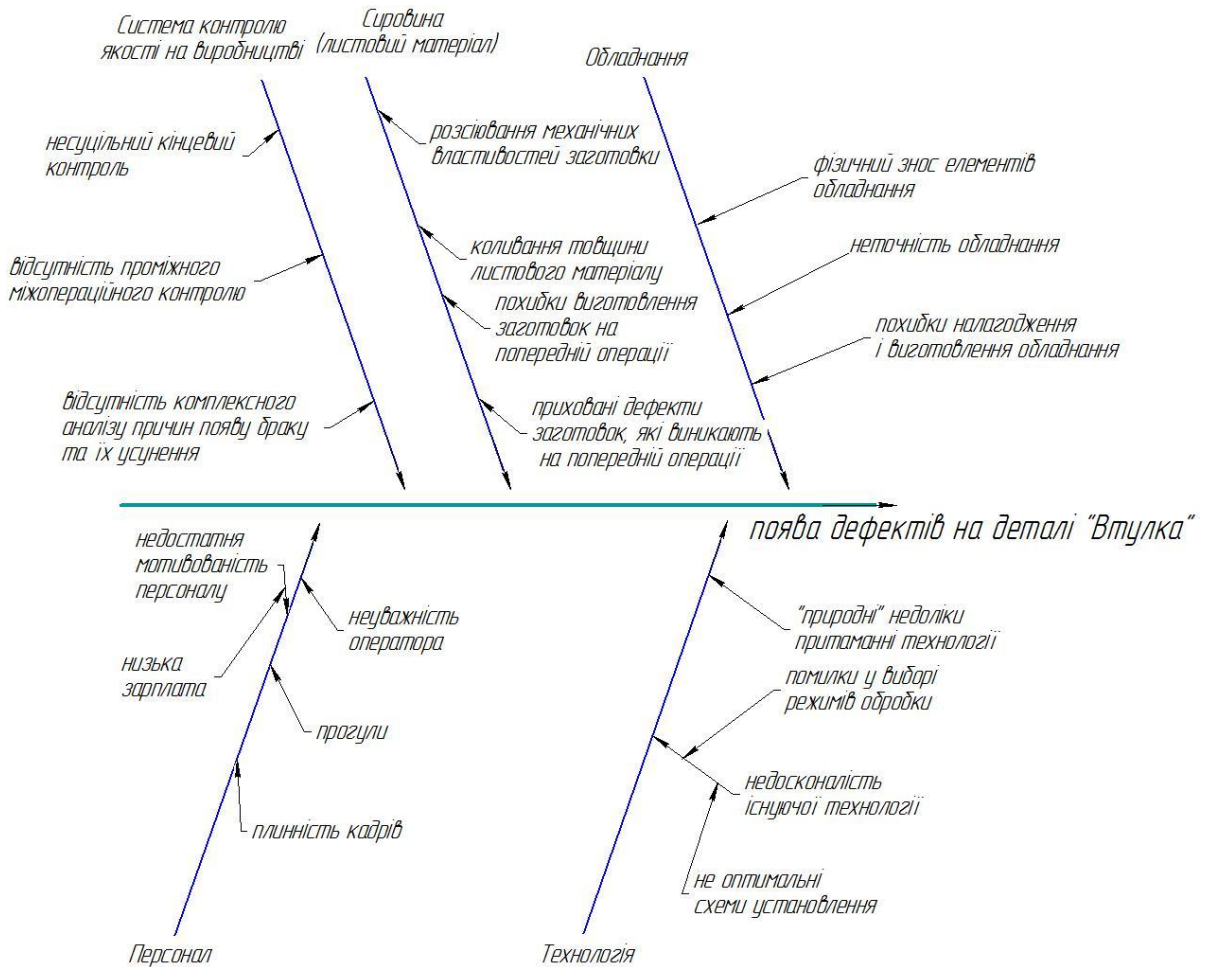


Рис. 2. Причинно-наслідкова діаграма аналізу появи дефектів на заготовці деталі "Втулка"

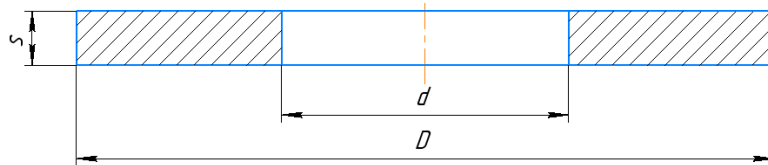


Рис. 3. Ескіз заготовки після операції вирубування з листа

Відповідно до рис. 2 та таблиці 2 визначальними, з точки зору виникнення дефектів, є операції 010 і 015, які за своєю структурою відповідають одноопераційному вирубуванню та одноопераційному витягуванню. За результатами статистичних досліджень (табл. 1) основними дефектами є тріщини та наднормове потоншення на циліндричній частині, отриманій відбортовуванням. Розглянемо процес формоутворення цієї ділянки деталі "Втулка". Наведені в роботі [18] дослідження встановили, що найважливішим фактором, який впливає на пошкодженість матеріалу і появу тріщин, є величина внутрішнього отвору, пробитого на попередній операції 010, та зазор між матрицею і пуансоном на формувальній операції 015. Після операції 015 на циліндричній частині заготовки деталі "Втулка", починаючи з торця, проявляються тріщини, які є наслідком накопичених на переходах операції 010 пошкоджень матеріалу. Оскільки густина пошкоджень збільшується під час кожної формозміни матеріалу, то заходи щодо зменшення швидкості їх накопичення на цьому відрізьку ТП дозволить зменшити відсоток браку, спричиненого появою тріщин.

Розглянемо фактори, які сприяють виникненню пошкоджень матеріалу на операції 010 пробивання отвору під відбортовування з вирубуванням заготовки з листа.

Задовільна якість заготовок, отриманих на операції 010, забезпечується оптимальними

засорами та паралельністю різальних крайок пуансона з матрицею. Для забезпечення якості поверхні зрізу бажано мати такі значення зазору, за яких тріщини, що йдуть від різальних крайок пуансона і матриці, зустрічаються своїми вершинами, утворюючи єдину поверхню отвору.

За менших від оптимального значення зазорах, вершини тріщин сколювання не збігаються. Матеріал, що знаходиться між тріщинами в кінці робочого ходу пуансона, руйнується. Під час чого утворюються два або кілька блискучих пояски, розділені між собою зонами сколювання. Ці пояски погіршують якість поверхні розділення і є концентраторами напружень. При зменшенні зазорів зростає концентрація нормальних напружень біля робочих крайок пуансона і матриці. Це викликає швидке затуплення робочих крайок і, отже, зниження стійкості штампів.

Зі зменшенням зазору (порівняно з оптимальним) згинальний момент, що діє на заготовку, зменшується. При цьому напруження розтягу, що діють в металі в радіальному напрямку, зменшуються і майже не впливають на пружні деформації у заготовці, що вирубується. Але зростають в заготовці напруження стискання, в результаті чого після вирубки виникають зворотні за знаком пружні деформації розтягу. Ці деформації призводять до збільшення зовнішніх розмірів вирубаного деталі і до зменшення пробитого отвору. Внаслідок цього деталь та відходи застрягають в штампі, що збільшує тертя та знос його деталей під час їх примусового виштовхування.

Якщо зазори між матрецею та вирубним пуансоном більші оптимальних, то тріщини сколювання виходять на вільні поверхні листа на деякій відстані від різальних крайок інструменту і утворюють задирки. Ці тріщини можуть бути також зародками макропошкоджень на наступних операціях обробки тиском. За великих зазорів також спостерігається збільшення розтягу і вигину металу заготовки. Це призводить до втрати площинності деталі, спотворення її форми на переході вирубування. Крім того, в цьому випадку на вільних поверхнях поблизу зрізу матеріалу виникають утяжки, які також спотворюють форму вирубаного заготовки.

Для товщин листа від 0,3 до 20,0 мм оптимальний зазор між матрицею та пуансоном вибирається за довідниковими даними і змінюється в межах 5 – 12 % від товщини листа (менші значення відносяться до меншої товщини, більші – до більшої).

Вплив формувальної операції

Для визначення розмірів заготовки при витягуванні пустотілих тіл існує п'ять основних методів: три аналітичні та два графічні. Для встановлення розмірів заготовки, яку потрібно вирубати на першій операції, використовуємо метод рівної ваги, який полягає в припущенні про постійну вагу заготовки G і готового виробу G' . Для цього методу діаметр заготовки визначають за виразом:

$$D = \sqrt{\frac{1,28G'}{s\gamma}} = 1,128\sqrt{\frac{G}{s\gamma}}, \quad (1)$$

де γ – щільність матеріалу заготовки; s – товщина матеріалу.

Відповідно до виразу (1) та на основі вимірювання об'єму та маси деталі в програмі "SolidWorks" визначено деякі можливі зовнішні та внутрішні діаметри кільцевої заготовки під операцію витягування, які зведено у таблицю 3 (з урахуванням необхідності забезпечення витягуванням в готовій деталі центрального отвору діаметром 39,6 мм).

Деякі можливі зовнішні та внутрішні діаметри кільцевої заготовки під операцію витягування [18]

Внутрішній діаметр d, мм	10	15	20	25	30	35
Зовнішній діаметр D, мм	59	60	62	63	65	67,9
Зазори	4,24	4,28	4,35	4,38	4,45	4,55

В роботі [18] зазначено, що під час моделювання процесу пластичного деформування заготовок з сталевого листа для деяких комбінацій геометричних параметрів системи, деталь не вдалось сформувати в силу різних причин. Для зменшення пошкодження та забезпечення належного формоутворення «Втулки» на наступних операціях виготовлення рекомендовано обирати внутрішній діаметр заготовки 29 – 30 мм, а зовнішній – 62 – 63 мм [18].

Імітаційне моделювання процесу вирубування заготовок втулок з листа

Вище встановлено, що основними параметрами, які впливають на процес вирубування, а саме на ширину зони пластичної деформації та якість поверхні зрізу є: товщина листа, діаметр вирубного пуансону, величина зазору між пуансоном і матрицею, неспіввідношення пуансону та матриці. Відповідно до вимог технологічного процесу використано лист заготовки – Лист ВТ-2,0ДСТУ 8971:2019. Згідно цього стандарту товщина листа точності ВТ (високої точності), призначеного для дуже глибокого витягування, коливається в межах $2 \pm 0,08$ мм. Як показано вище, діаметр вирубного пуансона має знаходитись в межах 29 – 30 мм, а величина зазору Z на діаметр за різними джерелами має бути в межах від 5 до 12 % від товщини заготовки.

Для мінімізації кількості браку, в процесі виготовлення заготовки деталі "Втулка", необхідно вибрати такі параметри операції вирубування, щоб ширина зони пластичної деформації була мінімальною. За критерій досягнення початку пластичного деформування приймемо величину максимального напруження зсуву. Для сталі 08кп воно становить приблизно 175 МПа. Отже, ділянки, в яких максимальні напруження зсуву перевищують 175 МПа вважатимуться пластично zdeформованими. Приймаємо, що аналогом напружень зсуву, який має більш важливе значення для появи браку, є пошкодженість матеріалу заготовки. Цей параметр і будемо розглядати, як основний, під час дослідження.

Для проведення імітаційних розрахунків в прикладній програмі була побудована модель взаємодії листової заготовки та вирубних матриці і пуансона (рис.4). Для запобігання гофроутворення на заготовці, у відповідності з кресленням вирубного штампу, передбачений притискач.

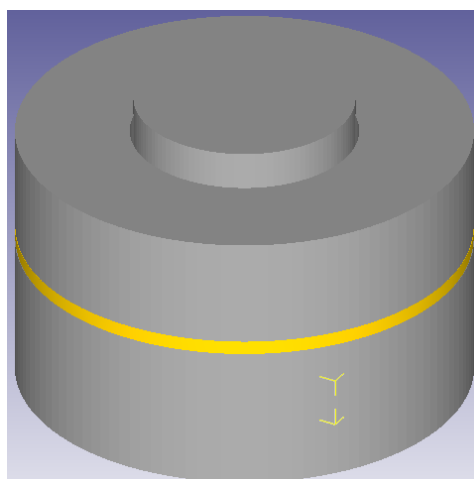


Рис. 4. Об'ємна спрощена модель вирубного штампу в програмі Deform 3D

В імітаційній моделі прийнято допущення, що коефіцієнт тертя між листовою заготовкою і поверхнями матриці, пуансона і притискача є величиною постійною і рівною 0,2. Величина переміщення вирубного пуансона – 6 мм, що цілком достатньо для цієї розділювальної операції.

Оскільки матриця, притискач і пуансон за своїми характеристиками суттєво міцніші за листову заготовку, то в розрахунках приймалось, що вони є абсолютно жорсткими тілами.

Вище показано, що основними факторами, які мають вплив на ширину зони пошкодження під час вирубання заготовки деталі "Втулка" є діаметр пуансона, товщина листа, зазор між пуансоном та матрицею. Всі вибрані фактори відповідають вимогам керованості, незалежності і сумісності по відношенню один до одного. Межі зміни параметрів моделювання вказані в таблиці 4.

Таблиця 4

Діапазони зміни факторів впливу

Рівні факторів	Діаметр пуансона, мм	Товщина листа s, мм	Зазор між пуансоном і матрицею Z, мм
	x_1	x_3	x_2
Номінальне значення	29.5	2	0.18
Інтервал варіювання	1	0.16	0.08
Верхнє граничне значення	30	2.08	0.22
Нижнє граничне значення	29	1.92	0.14

В результаті імітаційного моделювання було отримано розподіл пошкоджень та деформацій по об'єму заготовки на різних стадіях процесу (рис. 4). Зони з підвищеним рівнем пошкоженості позначено світлішими кольорами. В першу чергу це відноситься до матеріалу, що підлягає інтенсивній деформації зсуву (той, що попадає в зону зрізу). При цьому на різних стадіях процесу спостерігається наявність пошкоджень в матеріалі заготовки, який використовуватиметься в подальшій обробці.

З метою визначення ширини зони суттєвого пошкодження матеріалу прийнято допущення, що на подальші операції матиме вплив ділянка з пошкодженням понад 0,1 (ця зона поширюється від поверхні вирубного отвору, на якій рівень пошкодження рівний 1, до зони, в якій пошкоженість матеріалу знижується до 0,1). Максимальний діаметральний розмір цієї ділянки вимірювався з використанням ізоліній (рис. 5). При цьому блакитний колір ізоліній на рис. 5 відповідає рівню пошкодження 0,1, а синій колір – відсутності пошкоджень. Наявність нерівномірності ширини ізоліній пояснюється відносно великими розмірами кінцевих елементів, які використовувались для імітаційного моделювання. Аналогічна ситуація спостерігається і на рис. 4. Вимірювання розмірів відбувалось за допомогою вбудованого інструменту програми Deform 3D – лінійки. Після чого встановлювалась ширина ділянки з коригуванням на розмір пуансона.

Імітаційне моделювання з використанням регресійного аналізу дозволило встановити аналітичну залежність ширини зони суттєвого пошкодження матеріалу внаслідок вирубання заготовки (2):

$$\hat{y} = 7,88 + 0,22x_1 - 0,41x_2 - 0,31x_2x_3. \quad (2)$$

В формулі (2) використані позначення: x_1 – діаметр пуансона; x_2 – товщина листа; x_3 – зазор між пуансоном і матрицею; \hat{y} – ширина зони суттєвого пошкодження матеріалу (понад 0,1).

Аналіз формули (2) показує, що зазор між пуансоном і матрицею безпосередньо не впливає на ширину зони пошкодження. Разом з тим, зі збільшенням товщини листа і зазору між пуансоном та матрицею призводить до зменшення ширини зони пошкодження.

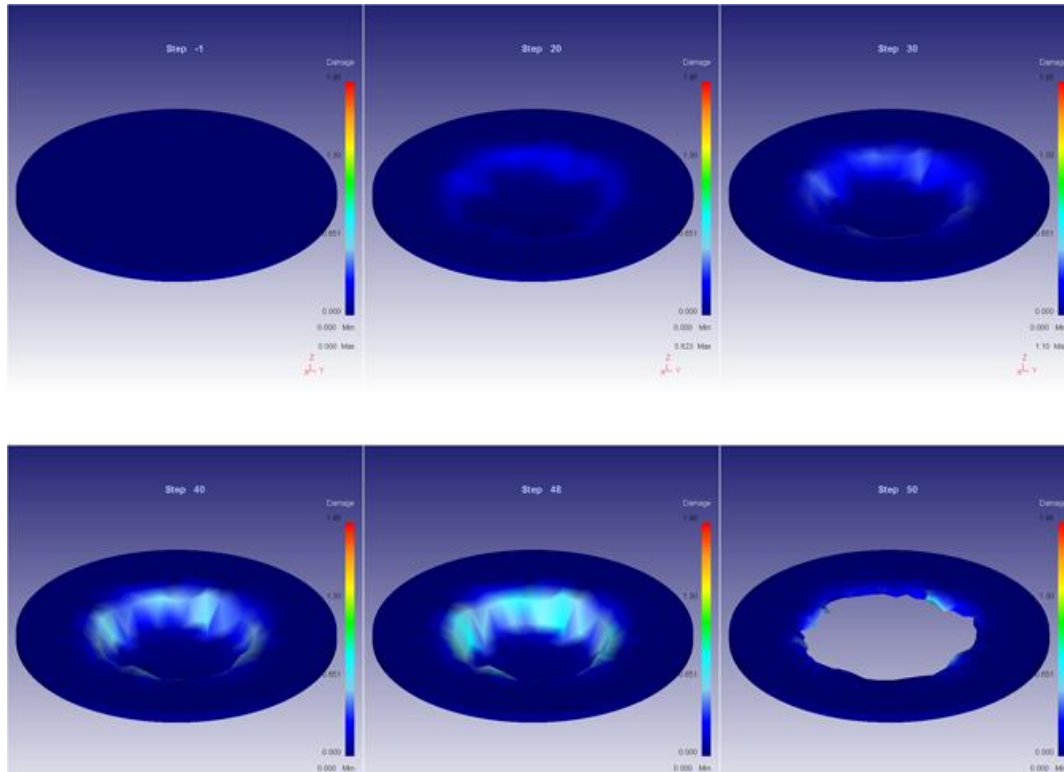


Рис. 5. Процес вирубування заготовки та розподіл концентрації пошкоджень

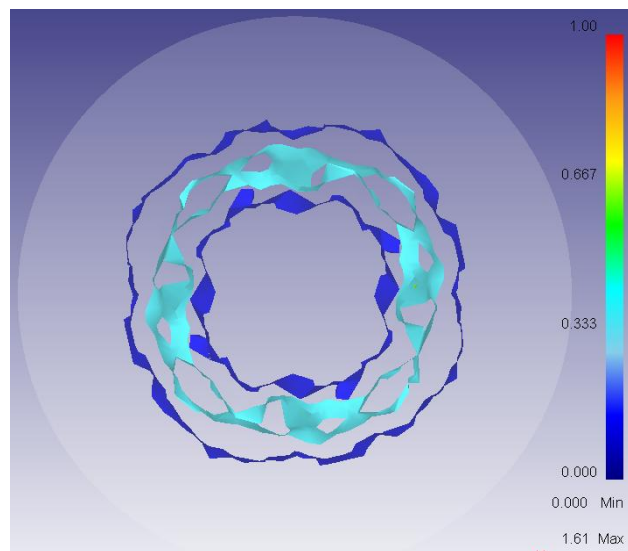


Рис. 6. Ізолінії пошкоджень на листовій заготовці

Висновки

1. Після вирубування заготовки з листа в зоні, яка безпосередньо прилягає до лінії розділення спостерігається утворення ділянки, яка деформована пластично з пошкодженнями матеріалу.

2. На ширину пошкодженої ділянки матеріалу суттєво впливають: діаметр пуансону, товщина листа та комбінація товщин листа і зазорів між пуансоном та матрицею.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дощечкіна І. В. Зменшення браку листових заготовок зі сталі 08Ю призначених для холодного штампування виробів. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2021. Вип. 94. С. 47-54. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vhad_2021_94_10.
2. Yang C., Li P., Fan L. Blank Shape Design for Sheet Metal Forming based on Geometrical Resemblance. *Procedia Engineering*. 2014. №81. P. 1487-1492. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.178.
3. Altinbalik T., Tonka A. Numerical and experimental study of sheet thickness variation in deep drawing processes. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*. 2012. IV № 2. P. 9-16.
4. Choi, M. K., Huh H. Effect of Punch Speed on Amount of Springback in Ubending Process of Auto-body Steel Sheets. *Procedia Eng.* 2014. №81. P. 963-968. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.125.
5. Numerical and experimental study of new cold precision forging technique of spear gears / G. Wang et al. *Trans. Nonferrous Metal Soc. China*. 2003. 13, №14. P. 798-802.
6. Wang X. Y. FEM analysis of drawing-thickening technology in stamping-forging hybrid process / X. Y. Wang, K. Ouyang, J. C. Xia. *Forging & Stamping Technology*. 2009. №34 (4). P. 73-78. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3940.2009.04.017.
7. Liu Y. Q., Wang J. C., Hu Ping. The numerical analysis of anisotropic sheet metals in deep-drawing processes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. №120. P. 45-52.
8. Numerical prediction of the limiting draw ratio for aluminum alloy sheet / E. Harpell et al. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000. №100. P. 131-141.
9. Experimental Study of the Process of Radial Rotation Profiling of Wheel Rims Resulting in Formation and Technological Flattening of the Corrugations / R. Puzyr et al. *Manufacturing Technology*. 2018. №18 (1). P. 106-111. DOI:10.21062/ujep/61.2018/a/1213-2489/mt/18/1/106.
10. Anisotropic Sheet Forming Simulations Based on the ALAMEL Model: Application on Cup Deep Drawing and Ironing / Euyckens Philip et al. *AIP Conference Proceedings*. 2011. №1383. P. 330-336.
11. Numerical prediction of the limiting draw ratio for aluminum alloy sheet / E. Harpell et al. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000. №100. P. 131-141.
12. Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims / R. Puzyr et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. №4 (1(82)). P. 52-60.
13. Артемчук О. Ю., Савуляк В. В. Підвищення якості виготовлення деталей холодним листовим штампуванням. *Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 27-28 квітня 2020 р.* 2020. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2020/paper/view/9915>.
14. Аргат, Р. Г., Пузир Р. Г., Вакуленко Р. А. Вплив анізотропії і зміцнення металу на втрату стійкості фланця при витягуванні циліндричної деталі без складко утримувача. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії». Харків: НТУ «ХПІ». 2018. №31 (1307). С. 3-7.
15. Огородніков В. А., Музичук В. І., Нахайчук О. В. Механіка процесів холодного формозмінювання з однотипними схемами механізму деформації: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. 179 с.
16. Microstructure, Mechanical, and Magnetic Properties of Cold-Rolled Low-Carbon IF Steel / Siuli Dutta et al. *Structural Integrity Assessment*. 2020. P. 201-208.
17. Dasappa P., Inal K., Mishra R. The effects of anisotropic yield functions and their material parameters on prediction of forming limit diagrams. *Int J Solids Struct.* 2012. №49. P. 3528-3550. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.04.021.
18. Підвищення якості виготовлення холодною пластичною деформацією на прикладі вісесиметричної деталі / В. В. Савуляк та ін. *Матеріали L Науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 10-12 березня 2021 р.* 2021. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2021/paper/view/12480>.

Стаття надійшла до редакції 29.10.2024.

Стаття пройшла рецензування 21.11.2024.

Савуляк Віктор Валерійович – канд. техн. наук, доцент кафедри технології та автоматизації машинобудування, e-mail: vvsav81@gmail.com.

Молодецька Тетяна Ігорівна – канд. техн. наук, доцент кафедри опору матеріалів, теоретичної механіки та інженерної графіки.

Білоствечний Володимир Олександрович – аспірант кафедри технології та автоматизації машинобудування.

Вінницький національний технічний університет.