

В.В. Отаманський

Державний університет «Житомирська політехніка»

УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРИ ДЕФОРМУЮЧОМУ ПРОТЯГУВАННІ З НАСКРІЗНОЮ ПЛАСТИЧНОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ

У статті проведено глибокий літературний аналіз та розглянуто можливість керування параметрами формоутворення в процесі деформуючого протягування заготовок з пластичних матеріалів. На сьогодні даний процес є затребуваний, адже може використовуватися не тільки при виготовленні нових деталей, але і для відновлення зношених, при цьому він має ряд вагомих переваг перед іншими методами відновлення. Зважаючи на зростаючі вимоги до точності та якості продукції, актуальним є пошук технологічних рішень, що забезпечують контрольовану пластичну деформацію у зношені ділянки деталі з необхідним припуском під послідовну обробку. Метою статті є дослідження можливості управління параметрами формоутворення при наскрізному деформуючому протягуванні деталей з пластичного матеріалу та отримання її розмірів з припуском під послідовну обробку шляхом вибору геометрії деформуючого елемента та режимів обробки. В ході літературного аналізу виявлено, що крім загально прийнятих деформацій у вигляді утонення стінки, збільшення зовнішнього діаметра та укорочення деталі після обробки, бувають випадки, коли деталь подовжується, а це у свою чергу може бути використано для компенсації зносу по торцям осесиметричних деталей. Для підтвердження даного факту було здійснено чисельне моделювання процесу з використанням методу скінченних елементів (FEM). Результати моделювання показали, що дійсно на напрямок деформації можуть впливати геометричні параметри деформуючого елемента та режими протягування. У висновках запропоновано рекомендації щодо вибору параметрів, які можуть бути використані для проектування технології обробки з контрольованими вихідними розмірами та визначені напрямки для подальших досліджень.

Ключові слова: деформуюче протягування, осередок деформації, метод скінченних елементів, точність.

V.V. Otamanskyi

CONTROL OF FORMING PARAMETERS IN DEFORMATION BROACHING WITH THROUGH PLASTIC DEFORMATION

The article presents an in-depth literature review and examines the possibility of controlling forming parameters in the process of deforming broaching of workpieces made of ductile materials. Currently, this process is in demand, as it can be used not only for manufacturing new parts but also for restoring worn ones, offering several significant advantages over other restoration methods. Given the increasing requirements for product accuracy and quality, it is relevant to search for technological solutions that ensure controlled plastic deformation in worn areas of parts with an allowance for subsequent machining. The aim of this study is to investigate the possibility of controlling the forming parameters during through-deforming broaching of ductile material parts, and to obtain dimensions with a machining allowance by selecting the geometry of the deforming tool and processing parameters. The literature analysis revealed that, in addition to the commonly observed deformations such as wall thinning, outer diameter expansion, and part shortening after processing, there are cases where the part elongates. This effect can potentially be used to compensate for end-face wear in axisymmetric parts. To confirm this phenomenon, numerical modeling of the process was conducted using the Finite Element Method (FEM). The simulation results showed that the deformation direction can indeed be influenced by the geometric parameters of the deforming element and the broaching conditions. The conclusions provide recommendations for selecting parameters that can be used in the design of processing technologies with controlled final dimensions, and directions for further research are outlined.

Keywords: deforming broaching, deformation zone, finite element method, accuracy.

Постановка проблеми. Обробка деформуючим протягуванням є актуальним методом відновлення зношених осесиметричних деталей, особливо тих, виробництво яких має масовий або крупносерійний характер, адже даний метод відноситься до безвідходних технологічних процесів, який дозволяє забезпечити необхідний рівень параметрів якості робочої поверхні виробів.

Використання пластичного деформування при відновленні зношених осесиметричних деталей має вагомі переваги, які зазначені у літературі [1,2]. До 80% порожнистих осесиметричних деталей, які зношені в процесі експлуатації по зовнішньому діаметру, можна відновлювати та використовувати повторно, причому собівартість відновлення значно нижча за вартість нових і не перевищує 60% [3].

Але для досягнення позитивного результату у вигляді розробки технологічних процесів відновлення деталей необхідно глибоке вивчення процесів деформування, які мають місце при цьому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Деформуюче протягування – це процес пластичного деформування при якому деформуючі елементи інструменту переміщуються з натягом

вздовж твірної оброблюваного отвору по кінематичній схемі ковзання. При відновленні зношених по зовнішньому циліндру осесиметричних деталей використовується наскрізне вільне деформуюче протягування, адже пластичні деформації маю вийти на зовнішню поверхню для компенсації зносу і припуску під подальшу обробку.

Деформуючий елемент має такі основні геометричні параметри: d_d – діаметр по циліндричній стрічці деформуючого елемента, b_d – ширина стрічки, α – кут нахилу твірної робочого конуса, α_1 – кут нахилу твірної зворотного конуса (рис. 1.2).

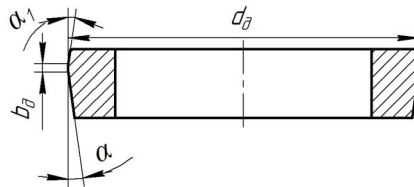


Рис. 1. Основні геометричні параметри деформуючого елемента

До основних параметрів процесу деформуючого протягування відносять: швидкість переміщення інструменту відносно заготовки – v_d , м/хв.; натяг – a , мм, який визначається різницею діаметра стрічки деформуючого елемента і отвору ($a = d_d - d$); відносний натяг – a/d_0 , який є відношенням натягу до розміру вихідного отвору.

При вивченні формоутворення заготовок при ДПР розглядають отримані розміри після її протягування зі значними наскрізними пластичними деформаціями, які характеризуються збільшенням внутрішнього і зовнішнього діаметрів, потоншенням товщини стінки та вкорочення деталі, тобто зменшення її вихідної довжини [1, 8]. Однак у роботах [4, 5, 9, 10] експерименти показують, що в деяких випадках має місце подовження деталі.

На параметри формоутворення впливає напружено-деформований стан (НДС) заготовки під час виконання ДПР, адже саме він визначає компоненти тензора напружень і деформації. Одним із найважливіших аспектів, які необхідні для об'єктивного аналізу НДС заготовок є схема взаємодії інструменту з оброблюваною поверхнею деталі, яка визначає осередок деформації. На практиці деформуюче протягування виконують одним, або декількома деформуючими елементами. У теоретичних дослідженнях зазвичай розглядають напружено-деформований стан оброблюваної заготовки при деформуючому протягуванні одним елементом [1, 5, 12], допускаючи, що обробка з декількома елементами буде рівноцінною обробці декількома проходками одного елемента, хоча дослідження [2, 9] показують що це не є дійсністю.

Найбільш повно осередок деформації при ДПР було експериментально вивчено в ІНМ НАН України і відображено в роботі [1]. Вона подібна до схем, застосованих у більшості робіт, що відносяться до області обробки металів тиском [13, 14, 15]. Схема осередку деформації представлено на рисунку 2.

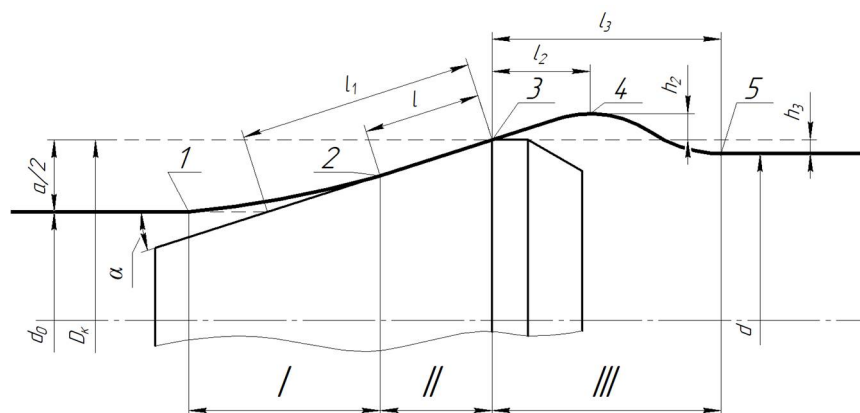


Рис. 2. Схема осередку деформації [1]

Запропонована схема (рис. 2) показує наявність контактної зони II, перед якою є позаконтактна зона I, та після якої слідує позаконтактна зона III. Слід зазначити, що деформування в різних зонах осередку деформації є єдиним процесом пластичного формоутворення заготовки і одночасно на всіх трьох ділянках визначає НДС деталі і параметри, що від нього залежать.

Разом з тим, дослідження розмірів та особливості складових осередку деформації, довжини контакту та позаконтактних зон є важливим питанням оскільки саме вони впливають на якість поверхні обробленої заготовки, залишкові напруження, шорсткість, форму та розміри, тобто знання умов протікання деформації допоможе раціонально обрати геометрію інструменту та режими обробки для досягнення необхідного вихідного результату.

Подальше уточнення схеми осередку деформації виконувалось авторами робіт [4, 5], в яких описано теоретичну модель осередку деформації для роздачі тонкостінних заготовок оболонкового типу $t_0/r_0 \leq 0,1$, де t_0 і r_0 – відповідно товщина стінки та радіус отвору заготовки. Ця модель дозволила визначити геометричні параметри осередку деформації, а саме: протяжність ділянок I, II та III (рис. 2).

Автори отримані розрахункові значення порівнюють з експериментальними даними отриманими у роботі [1] (рис. 3).

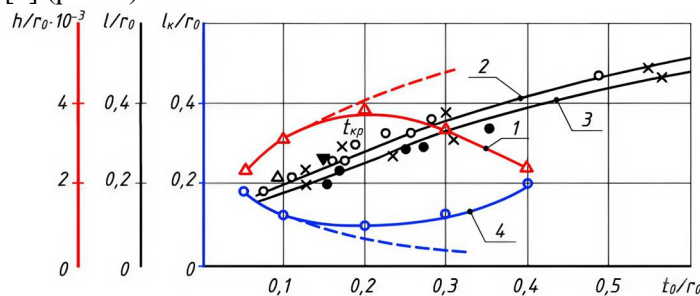


Рис. 3. Залежність висоти позаконтактної зони (h/r_0) за ділянкою контакту (крива 1); довжини позаконтактних зон: за ділянкою контакту (l_3/r_0) (крива 2), перед ділянкою контакту (l_2/r_0) (крива 3); довжини контактної зони (l_k/r_0) (крива 4) від товстостінності заготовки при використанні деформуючих елементів з кутами $\alpha = 2^\circ - 12^\circ$, натягів на елемент $a/r_0 = 0,025 - 0,075$ [4]; дані експерименту: $\circ$ – сталь 20; Δ – сталь 10; $\blacktriangledown$ – Ст3; $\bullet$ – сталь 30ХНМА; $\times$ – сплав АК6

Як видно з графіків зі збільшенням товщини стінки осьові розміри позаконтактних зон (криві 2 та 3) монотонно зростають і добре співпадають зі значеннями експериментальних даних (точки $\circ$, Δ , $\blacktriangledown$, $\bullet$, $\times$). Причому це співпадіння спостерігається навіть при значних товщинах стінки ($t_0/r_0 > 0,5$). Однак, співпадіння розрахункових та експериментальних результатів протяжності контактної зони та висоти позаконтактних зон залежно від товстостінності заготовки (рис. 3, криві 1, 4) спостерігається тільки для випадку обробки тонкостінних заготовок. При збільшенні товщини стінки експериментальні результати докорінно відрізняються від розрахункових, тобто розрахункова модель дає достовірні результати до деякої товщини стінки. Цю товщину стінки автори роботи [1] називають критичною товщиною стінки, вона забезпечує появу в зоні контакту критичного контактного тиску. Критичний контактний тиск за твердженням авторів [1] є фізичною константою оброблюваного матеріалу. При цьому, згідно даних [1, 2], значення цієї критичної товщини стінки змінюється в залежності від факторів, що впливають на контактний тиск, а саме кута нахилу твірної робочого елемента α і натягу на елемент.

Наявність таких невідповідностей розрахункових та експериментальних даних не дозволяє використовувати розроблену теоретичну модель осередку деформації при розрахунку геометричних характеристик осередку деформації у широкому діапазоні зміни товстостінності заготовки.

Стосовно визначення НДС в осередку деформації та в цілому заготовки при ДПР займалися автори роботи [2, 6, 7], але їхні дослідження стосувалися обробки заготовок з нескінченною товщиною стінки ($t_0/d_0 > 1$), тобто умов при яких пластична деформація не виходить на зовнішню поверхню заготовки. Дослідження проводили за допомогою шаруватих моделей і по волокнистій макроструктурі з наступним аналітичним визначенням швидкостей по отриманих лініях течії. І хоч отримані результати не можна порівнювати з обробкою заготовок наскрізною деформацією, але автори отримали ряд важливих висновків, а саме: кінематика ДПР не залежить від матеріалу заготовки. Також ними зазначається, що в контактній зоні матеріал знаходиться в умовах, близьких до всебічного стиску.

У роботі [11, 12] автори досліджують НДС кожної ділянки осередку деформації при обробці заготовок з малопластичного матеріалу – СЧ-20. Виконують вони це скінчено-елементним аналізом у програмному комплексі DEFORM 2D/3DTM V11.0. І хоча обробка чавуну проводилася з режимами, які викликали тільки деформацію поверхневого шару металу отвору, цікавим є те, що моделювання НДС показує, що оброблювальний матеріал на внутрішній поверхні при переході з позаконтактної зони у контакт і при виході з неї у другу позаконтактну зону знаходиться в умовах всебічного об'ємного стискання, що узгоджується з результатами роботи [12]. Це підтверджується отриманими результатами гідростатичного тиску на внутрішній поверхні (рис. 4, а), які отримані моделюванням, та розрахунком зміни коефіцієнта жорсткості (рис. 4, б).

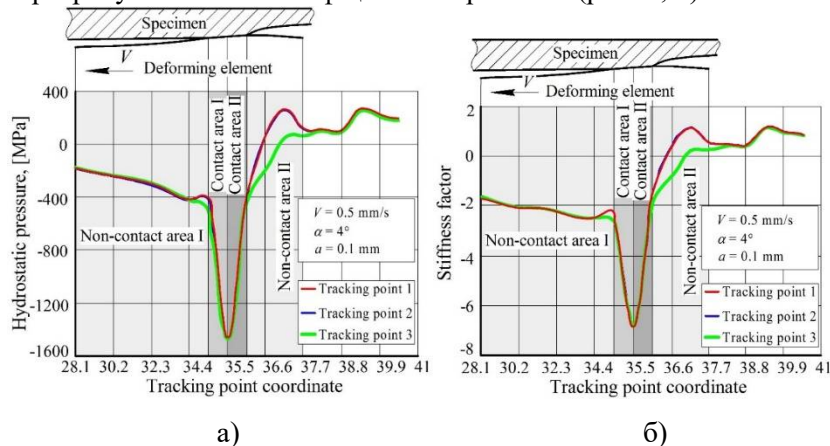


Рис. 4. Зміна гідростатичного тиску σ та коефіцієнта жорсткості напруженого стану η за координатою відстежуваних точок [12]

Останнім часом все більшого поширення набуває вивчення НДС під час виконання різних операцій саме за допомогою метода скінчених елементів у різних програмних продуктах. Про що свідчать велика кількість публікацій закордонними авторами у світових виданнях. Так, наприклад, ряд робіт [13, 14, 15, 16, 17] присвячених радіальному обтисканню трубних заготовок, операції яка має схожі риси з ДПР.

В роботі [13] досліджувалась течія матеріалів в сталевих трубних заготовках з різною товстостінністю при ротаційному обтисканні труб з осьовою подачею без оправки. Тобто реалізувався процес редукування трубної заготовки через штамп, який виконує періодичний радіальний обжим. Дослідження проводили у програмному забезпеченні ABAQUS на основі створеної в 2D осиметричній моделі кінцевих елементів. Процес має схожий характер з деформуючим протягуванням. Більш того, автори роботи виявили наявність зон локального пластичного деформування на виході і на виході із зони редукування (рис. 5). Вони зазначили, що деформація труби як зовнішньої так і внутрішньої поверхні залежить від товстостінності заготовки та коефіцієнта тертя.

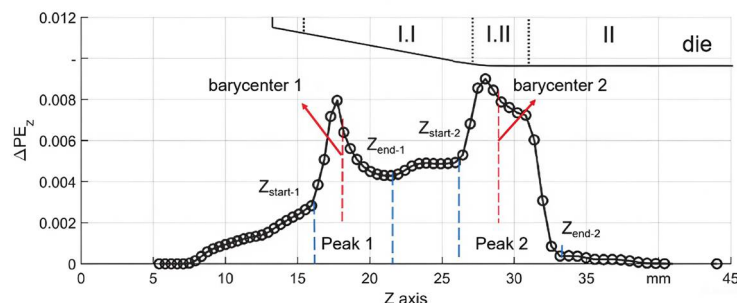


Рис. 5. Компонента пластичної деформації ΔPE_z [13]

Результати скінчено елементного аналізу зовнішнього обтискання труби без оправки проведеного у роботі [14] порівнювалися з експериментальними даними, і показали гарну відповідність. В ній автори рекомендують проводити операцію без оправки, особливо в тих випадках, коли внутрішня поверхня труби буде піддаватися послідовній обробці. Але при цьому слід звернути увагу, що осьові напруження розтягу на внутрішній поверхні труби можуть призвести

до утворення тріщин, при чому ймовірність виникнення тріщин у тонких трубах менша, ніж у товстих.

В цілому до недоліків робіт [13, 14, 15, 16, 17] по вивченню НДС при ротаційному обтисканні можна віднести те, що автори не звертають увагу на визначення схеми осередку деформації та її складових, тобто контактної ділянки та позаконтактних зон. Це не дає їм можливості в повному обсязі пояснити появу зон локального деформування та виявити ті технологічні фактори, які впливають на формоутворення заготовки та оптимізувати процес.

Що стосується деформацій, яку набуває заготовка після обробки ДПР, то О.О. Розенберг у роботі [1] наводить розрахункові залежності зміни розмірів отримані на основі експериментів при обробці деформуючим елементом з кутом $\alpha = 4^\circ$, які вказують на утонення стінки, збільшення зовнішнього діаметра та укорочення деталі після обробки.

Згодом у роботі [1] автори наводять результати досліджень, які свідчать про істотний вплив кута α на характер зміни розмірів, які виражаються у можливості подовження заготовки. Аналогічні результати були отримані і у роботах В.В. Кривошея [9], у яких при використанні кутів $\alpha > 6^\circ$, навіть при роздачі за схемою стиснення спостерігалось подовження заготовки, замість загально прийнятого укорочення.

Немировський Я.Б. розробив теоретичну модель осередку деформації при ДПР [5], яка дозволяє розрахувати інтегральні характеристики формозміни: e_r, e_φ, e_z і порівняв розрахункові значення з експериментальним. Порівняння показало, що модель може бути використана для визначення деформацій, але тільки при обробці деталей товстостінність яким менше критичної товщини стінки.

Також у роботі [5] наведені експериментальні дані по визначенню сумарної осьової деформації при обробці за схемою розтягнення та стиснення (рис. 6).

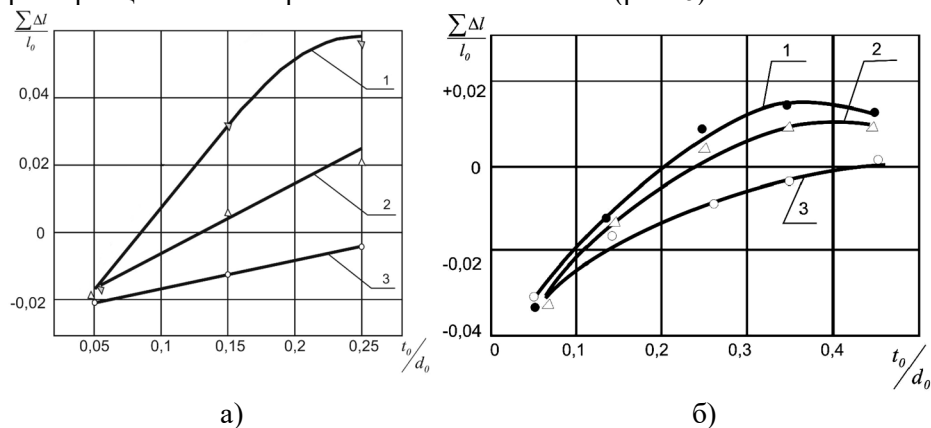


Рис. 6. Залежність осьової деформації від відносної товщини стінки: $d_0 = 40$ мм; $\frac{a}{d_0} = 0,025$; $\Sigma a/d_0 = 0,075$, кут α : 1 – 8° ; 2 – 4° ; 3 – 2° : а) за схемою розтягу, матеріал заготовки сталь 20; б) за схемою стиснення, матеріал сталь 12ХН3А [5]

Результати експериментів показують [5], що в залежності від товстостінності заготовки та кута нахилу твірної робочого конуса при обробці ДПР може утворюватися не тільки укорочення деталі, але і відсутність осьової деформації або наявність її подовження, причому при використанні схеми розтягу деформація може сягати 10% від вихідної довжини заготовки (рис. 6, а). Обробка за схемою стиснення також показує, що може утворюватися подовження, але з дещо меншою деформацією – 4% (рис. 6, б).

У роботі [15] присвяченій ротаційному обтисканню труб за допомогою методу скінченних елементів у програмі ABAQUS досліджували потік матеріалу вивчаючи історію компонентів пластичної деформації у різних напрямках. В результаті досліджень автори стверджують, що потік матеріалу можна контролювати через зміну умов тертя; найактивніші зони деформації знаходяться на початку і в кінці зони редукції, при чому в радіальному напрямку матеріал деформується нерівномірно.

Також розрахунок ділянок деформації в процесі радіального кування труби з використанням методу скінченних елементів проводився у роботі [16]. Під час аналізу результатів автори

використовують коефіцієнт неоднорідності деформації матеріалу (IF), який визначається співвідношенням:

$$IF = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{min}}{\varepsilon_{min}}$$

Надлишкова деформація може впливати на поведінку металу під час подальшого відпалу, впливаючи на кінетику рекристалізації, а також на кінцевий розмір зерна та текстуру. Неоднорідна мікроструктура призводить до неоднорідних фізичних та механічних властивостей готового виробу.

Автори [16] проводили дослідження з різними формами деформуючих матриць (рис. 7).

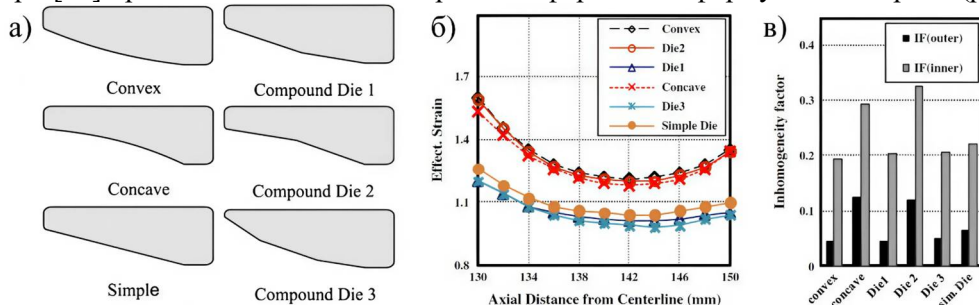


Рис. 7. Вплив форми матриці при радіальному куванні труби: а) форми матриць; б) розподіл деформації в радіальному напрямку; в) коефіцієнти неоднорідності [16]

На основі результатів (рис. 7) автори роблять висновок, що для досягнення продукту з мінімальною неоднорідністю деформації необхідно обирати опуклу форму або штамп з трьома похилими гранями. Найгірший варіант спостерігається при використанні матриць з увігнутою формою.

Отже, як видно у роботах присвячених деформуючому протягуванню залишаються відкритим питанням формоутворення обробленої заготовки після обробки. Складність математичного опису об'ємного процесу пластичного деформування товстостінних заготовок в даний час не дозволяє розробити теоретичну модель деформування. Тому для забезпечення єдності методологічного підходу і створення можливості для порівняльного аналізу у всьому діапазоні товстостінності зупинимось на дослідженні процесу деформування методом кінцевих елементів (МКЕ) з наступним аналізом результатів досліджень на феноменологічному рівні і побудові загальних аналітичних моделей. Це дозволить описати процес деформування і проаналізувати НДС деформованих заготовок. Як зазначалось в роботі [11] найбільш об'єктивно здійснювати моделювання НДС за допомогою програмного комплексу Deform при деформуванні оброблених заготовок в необхідних діапазонах натягу, геометрії інструменту та при варіюванні розмірів її поперечного перерізу.

Метою статті є дослідження можливості управління параметрами формоутворення при наскрізному деформуючому протягуванні деталей з пластичного матеріалу та отримання її розмірів з припуском під послідуєчу обробку шляхом вибору геометрії деформуючого елемента та режимів обробки.

Виклад основного матеріалу.

Методика проведення моделювання. Моделювання деформуючого протягування виконувались у програмі DEFORM 2D/3DTMV 11.0. Для визначення впливу натягу та кута забірного конуса було використано заготовку з наступними розмірами: внутрішній діаметр – $d_0 = 40$ мм, зовнішній діаметр – $D_0 = 56$ мм та довжина – $H = 100$ мм (рис. 8). Геометричні параметри інструменту (рис. 8): діаметр по стрічці дорна змінювався в межах від $d_0 + 0,25$ мм до $d_0 + 2,25$ мм з кроком 0,25 мм; кут нахилу твірної забірної конуса α приймалася: $2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$. Швидкість переміщення деформуючого елемента була не змінною і дорівнювала 0,5 мм/с.

У дослідженнях було використано сталь DIN 14NiCr14 з бібліотеки матеріалів DEFORM.

Результати досліджень. Перша група дослідів проводилася зі зміною діаметра деформуючого елемента, тобто натягу. Під час розрахунків було отримано графіки переміщення двох точок у радіальному напрямку, одна з яких розташовувалась посередині втулки на внутрішній стороні, а друга – на зовнішній (рис.8). Після виходу інструменту з втулки було побудовано графіки залежності зміщення точок в радіальному та осьовому напрямках (рис. 9).

З графіку зміщення точок в радіальному напрямку (рис. 9, а) видно, що залежність є майже лінійною. При необхідності отримання після обробки деталі певний зовнішній діаметр слід обрати, відповідний по графіку, натяг

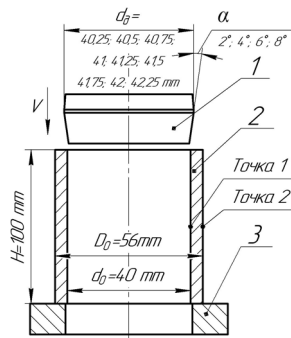


Рис. 8. Схема обробки деформуючим протягуванням:
1 – деформуючий елемент; 2 – втулка; 3 – основа

Більш цікавим є графік зміщення точок в осьовому напрямку (рис. 9, б), з якого слідує що при обробці заготовки з дуже малими натягами (приблизно до 0,3 мм) відбувається незначне укорочення деталі. При подальшому збільшенні натягу (приблизно від 0,3 до 1,3 мм) відстежувані точки починають зміщатися у додатному напрямку, тобто довжина вихідної деталі починає збільшуватися. З подальшим нарощуванням натягу – вихідна висота втулки зменшується.

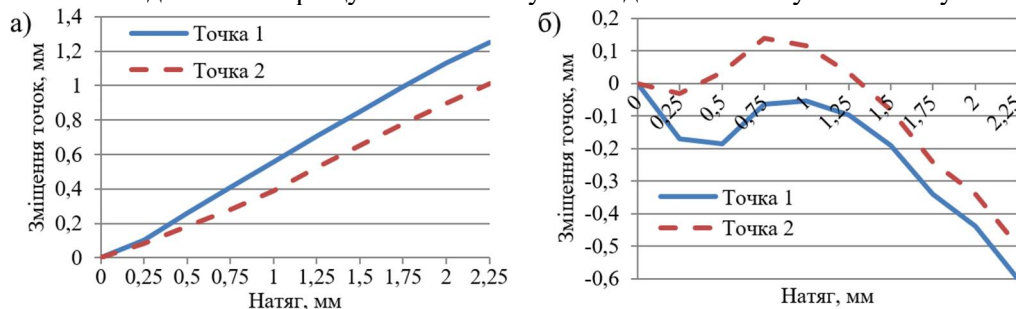


Рис. 9. Отримані результати залежності зміщення точок 1 та 2 від величини натягу: а) у радіальному напрямку, б) в осьовому напрямку

Як було вище сказано другим ваговим фактором, який впливає на вихідні розміри втулки є кут нахилу твірної забірного конуса інструменту. Тому у другому етапі було проведено дослідження впливу кута α при трьох різних натягах (0,75; 1,25; 1,75 мм) результати зміщення точок в радіальному напрямку представлені на рисунку 10 та в осьовому напрямку на рисунку 11.

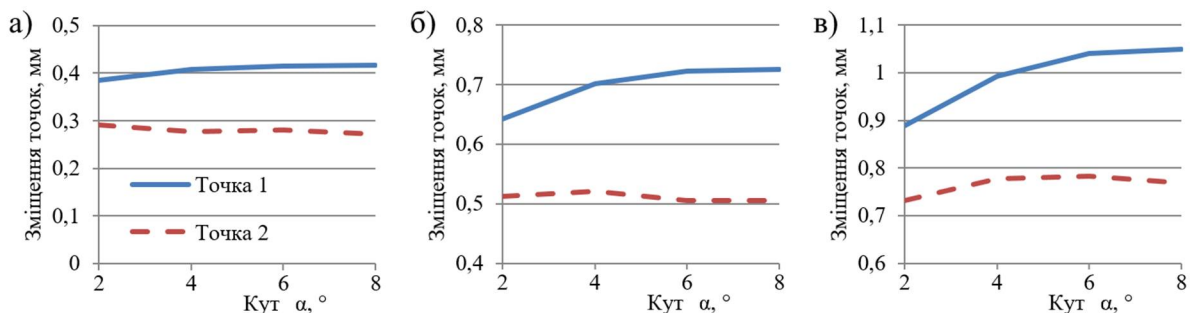


Рис. 10. Результати залежності зміщення точок 1 та 2 у радіальному напрямку від величини половини кута забірного конуса:
а) при натягу 0,75 мм, б) при натягу 1,25 мм, в) при натягу 1,75 мм

Отримані результати показали, що кут нахилу твірної забірного конуса має незначний вплив на зміщення точки на зовнішній поверхні втулки в радіальному напрямку. Що стосується зміщення точки на внутрішній поверхні, результати свідчать про те, що кут має не значний вплив на зміщення точки при малих натягах і набуває більш вагового впливу на більших натягах (рис. 10).

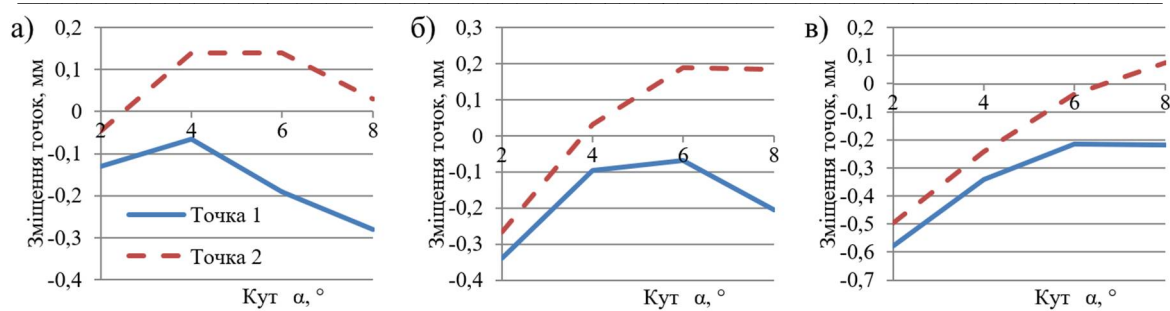


Рис. 11. Результати залежності зміщення точок 1 та 2 в осьовому напрямку від величини половини кута забірного конуса:
а) при натягу 0,75 мм, б) при натягу 1,25 мм, в) при натягу 1,75 мм

Результати зміщення точок в осьовому напрямку (рис. 11) показують, що кут нахилу твірної забірного конуса може суттєво впливати на зміщення точок. В поєднанні з натягом можливо отримувати як укорочення довжини втулки, так і її подовження.

Висновки. Аналіз літературних джерел показав, що відновлення зношених деталей деформуючим протягуванням є перспективним процесом обробки, але для повноцінного впровадження у виробництво залишається невирішеним питання формоутворення вихідної деталі, особливо це стосується тих умов обробки, при яких контактні напруження перевищують критичні. Виконане моделювання процесу ДПР методом скінчених елементів підтвердило результати експериментів проведених раніше іншими авторами та дозволило уточнити їх на предмет вибору оптимальної геометрії та режиму обробки, це дало можливість не тільки збільшувати зовнішній діаметр заготовки, але і її довжину, а також показало, що в залежності від геометрії деформуючого елемента та режимів обробки можливо отримувати не тільки перерозподілення матеріалу в зношені ділянки по зовнішній поверхні але і осьовому напрямку. Для повноцінного впровадження процесу ДПР у виробництво в подальшому планується більш глибоке дослідження напружено деформованого стану в осередку деформації з метою виявлення всіх факторів, які впливають на формоутворення.

Список використаних джерел:

1. Розенберг О.М. Механіка пластичного деформування в процесах різання та деформуючого протягування : монографія / О.М. Розенберг, О.О. Розенберг. – К. : Наук. думка, 1991. – 320 с.
2. Інженерія деталей, оброблених протягуванням : монографія / Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, С.Є. Шейкін, І.В. Шепеленко, О.В. Чернявський. – Кропивницький : Видавець Лисенко В.Ф., 2021. – 466 с.
3. Nemyrovskiy, Y. Technical- Economical aspects of the use of technological process of deforming broaching / Y. Nemyrovskiy, E. Posvyatenko, S. Sardak // InDesign, Simulation, Manufacturing: TheInnovation Exchange. Cham: SpringerInternationalPublishing. – 2019. – P. 238-247.
4. Немировський, Я.Б. Особливості розрахунку геометричних, кінематичних параметрів осередку деформації при деформуючому протягуванні / Я.Б. Немировський // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2013. Вип. 26. – С. 100-111.
5. Немировський Я.Б. Наукові основи забезпечення точності при деформуючому протягуванні : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. : 05.02.08 / Я.Б. Немировський. – Київ, 2018. – 40 с.
6. Issues about limit plastic deformations of deforming broaching of cast iron parts / Y. Nemyrovskyy, O. Chernyavskyy, P. Yeryomin, Y. Tsekhanov // Вісник ТНТУ, – Т. : ТНТУ, 2016. – Том 81. – № 1. – С. 88-97.
7. Закономірності локального деформаційного зміцнення трубчастих виробів з конструкційних сталей при формоутворенні пазів холодним пластичним деформуванням / С.Є. Шейкін, С.Ф. Студенець, І.Ю. Ростоцький та ін. // Технічна інженерія. 2024. – 1(93): – С. 96–104.

8. Грушко А.В. Визначення наклепу при деформуючому протягування товстостінних труб / А.В. Грушко // Науковий Вісник ДДМА. – 2014. – № 2(14Е). – С. 18-26.
9. Krivosheya S.M. Influence of the deformation angle on drawing of cylindrical holes: monograph / S.M. Krivosheya. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 136 p.
10. Немировський Я.Б. Відновлення поршневих пальців на основі деформуючого протягування / Я.Б. Немировський, Л.І. Деревець // Механізація та електрифікація сільського господарства : міжвідом. темат. наук. зб. НА-АН, Нац. наук. центр «Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва». – Гле-ваха: ННЦ «ІМЕСГ». – 2003. – Вип. 87. – С. 269–278.
11. Шепеленко І.В. Наукові основи технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. : 05.02.08 / І.В. Шепеленко. – Київ, 2021. – 45 с.
12. Plasticity resource of cast iron at deforming broaching / Y. Nemyrovskiy, I. Shepelenko, M. Storchak // Metals. – 2023. – №13(3):551. – 19 p. [Electronic resource]. – Access mode : <https://doi.org/10.3390/met13030551>
13. Material Flow in Infeed Rotary Swaging of Tubes / Y. Liu, J. Liu, M. Herrmann and other // Materials. – 2021. №14(1):58. – 18 p. [Electronic resource]. – Access mode : <https://doi.org/10.3390/ma14010058>
14. Ghaei A. Finite element modelling simulation of radial forging of tubes without mandrel / A. Ghaei, M.R. Movahhedy, A. Karimi Taheri // Materials & Design. – 2008. – № 29. – P. 867–872.
15. Plastic deformation components in mandrel free infeed rotary swaging of tubes / Y. Liu, M. Herrmann, C. Schenck and other // Procedia Manufacturing. – 2019. – №27. – P. 33-38.
16. Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test / M. Sanjari, P. Saidi, A. Karimi Taheri and other // Materials & Design. – 2012. – №38. – P. 147-153.
17. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process / Wu. Yunjian, Xianghuai Dong, Yu. Qiong // International Journal of Mechanical Sciences. – 2015. – №93. – P. 102-110.

Рецензент Шепеленко Ігор Віталійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету.