



Я. Б. Немировський /к. т. н./

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

## Управління точністю виробів, оброблених деформуючим протягуванням (повідомлення 1)

Ya. B. Nemyrovskiy /Cand. Sci. (Tech.)/

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnyts'kyi, Ukraine

## Accuracy control for products manufactured by deforming broaching (Message 1)

**Мета.** Розробка науково обґрунтованих технологічних методів управління параметрами точності деталей, оброблених деформуючим протягуванням.

**Методика.** Теоретичне та експериментальне дослідження механіки процесу, що дозволило встановити основні причини формування похибок при деформуючому протягуванні та визначити шляхи управління параметрами точності.

**Результати.** Створено наукове підґрунтя технологічного управління параметрами точності деталей, оброблених деформуючим протягуванням, що полягає у визначенні особливостей деформування різнотовщинних заготовок та деталей, оброблених з малими натягами, а також у розробці науково обґрунтованих схем, способів протягування інструмента і технологічних рекомендацій, що забезпечують необхідну точність обробки.

**Наукова новизна.** Створено наукове підґрунтя технологічного управління параметрами точності при деформуючому протягуванні, що полягає в розробці математичних моделей та експериментальних досліджень механіки процесу, що забезпечує визначення причин утворення геометричних похибок в осередку деформації та розробку шляхів технологічного управління параметрами точності.

**Практична значущість.** Можливість розробки технологічних процесів на основі деформуючого протягування, а саме обробки отворів різнотовщинних деталей, відновлення геометричної точності зношених поршневих пальців, обробка внутрішньої порожнини гільз ДВС із сірого чавуну. (Іл. 10. Бібліогр.: 14 назв).

**Ключові слова:** деформуюче протягування, точність, осередок деформації, ділянка контакту, позаконтактні зони, деформування, різнотовщинність, геометрична похибка.

**Постановка проблеми.** Одним з основних завдань у сучасному машинобудуванні є розробка та впровадження ресурсозберігаючих технологій і підвищення якості виробів. Деформуюче протягування (ДПР) застосовується як чорнова, так і чистова операція, включаючи в себе процеси формоутворення та деформаційного зміцнення.

Заготовки труб, які виробляються на вітчизняних металургійних заводах, мають досить значні відхилення граничних розмірів зовнішнього діаметру та товщини стінки, які регламентуються ГОСТ 8732-70 для гарячекатаних труб та ГОСТ 8734-75 для холоднотягнутих труб. Ці ГОСТ передбачають досить значні відхилення товщини стінки від +12,5 до -15 % для гарячекатаних труб та  $\pm 12,5$  % для холоднотягнутих. Це призводить до наявності значних вихідних похибок у заготовках трубного виробництва.

Враховуючи те, що труби в більшості випадків поставляються по зовнішньому діаметру та товщині стінки, такі значні відхилення останньої

призводять до значних вихідних похибок отвору заготовки. Його профіль може мати еліптичну багатокутну форму, що призводить до значних втрат матеріалу при обробці отвору різанням.

Обробка заготовок трубного виробництва чорновим деформуючим протягуванням приводить до пластичної зміни геометричних розмірів частоти заготовки без зняття стружки. Це забезпечує зниження некрутості отвору заготовки на 1-2 порядки і локалізацію його поверхневого дефектного шару металургійного походження, що включає збіднений на вуглець метал раковини, поверхневі відшарування тощо. При цьому розміри заготовки за рахунок її пластичної деформації змінюються і наближаються до потрібних розмірів деталі, що дозволяє віднести процес деформуючого протягування до надзвичайно ресурсоощадних по металу, продуктивності та енергозбереженню.

У наш час детально вивченні такі показники якості, що забезпечуються цим процесом: шор-

сткість, глибина та ступінь наклепу, ресурс використаної пластичності [1; 2; 3]. Одним з найменш вивчених параметрів якості є точність. У більшості праць, що стосуються цього питання, розглядалося тільки статистичне опрацювання експериментальних даних, а деякі питання з керування параметрами точності мали вузько-спрямований характер і використовувалися при дослідженні окремих випадків обробки.

Зупинимося на цьому питанні більш детально. Історія розвитку деформуючого протягування свідчить про те, що питання забезпечення точності спочатку не було актуальним. Справа в тому, що цей процес виконувався деформуючими елементами із загартованих інструментальних сталей. При цьому мали місце незначні пластичні деформації отвору, що дозволяло знизити шорсткість обробленої поверхні та збільшити її твердість. Стійкість таких елементів була незначна (декілька десятків погонних метрів труб). У результаті їх низької зносостійкості та можливого зчеплення з поверхнею оброблюваних отворів розміри їх мали значні відхилення. Тому й вивчення точності зводилося тільки до статистичного опрацювання вимірів оброблених отворів з подальшим визначенням допустимих відхилень. Можливості ДПР були незначними. Цей процес використовувався для обробки з малими пластичними деформаціями маловідповідних деталей, наприклад втулок сільськогосподарських машин [4].

З широким впровадженням у виробництво алмазного інструмента з'являється можливість виготовлення та використання твердосплавних деформуючих елементів. У міру вдосконалення їх конструкцій і технології виготовлення розширювалася область використання деформуючого протягування. З'явилася можливість виконувати значні (наскрізні) пластичні деформації, що змінювали розміри оброблюваних заготовок, деформувати товстостінні деталі з різних матеріалів при значних силових навантаженнях. Висока зносостійкість та міцність твердосплавних деформуючих елементів дозволяла обробляти десятки кілометрів труб без помітного зносу [5; 6; 7]. Це значно поліпшувало точність оброблюваних отворів.

Проте з розширенням областей використання деформуючого протягування все частіше починають виникати проблеми забезпечення геометричної точності обробки. Можливість здійснення наскрізних деформацій при обробці різнотовщинних заготовок завжди призводять до появи такого виду геометричної похибки, як викривлення осі обробленої деталі. Ефективні методи боротьби з цією похибкою відсутні. Автори [5] пропонують застосовувати додат-

кову операцію правки таких виробів, але відзначають появу після неї нового виду похибки «огранки».

Більш того, при деформуванні різнотовщинних труб має місце зменшення величини граничних деформацій, розрахованих за моделями, наведеними в праці [2], які не враховують значну величину гранично припустимих за ГОСТ відхилень розмірів товщини стінки. При роздачі такої труби спочатку деформується тонкостінна ділянка, а товстостінна може залишатися жорсткою, не деформованою. Це зменшує ресурс пластичності і може призвести до локального руйнування заготовки, або втрати стійкості деформування, тобто утворення шийки.

При розширенні областей використання деформуючого протягування виникає проблема забезпечення геометричної точності виробів, до яких ставлять вимоги по точності форми обробленого отвору, а саме: точність не вище 7-го квалітету, а викривлення осі не більше 1 мм на один метр довжини труби. До таких деталей потрібно віднести: гідроциліндри та пневмоциліндри, циліндри амортизаторів та нафтових насосів, шахтних стійок, карданні вали, хвилеводи, камери спеціального призначення, корпуси заглиблених насосів та інші.

Стає очевидним, що для ефективного впровадження та застосування в промисловості високопродуктивного процесу деформуючого протягування необхідне детальне вивчення питань забезпечення точності обробки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Насамперед розглянемо, які види геометричних похибок характерні для деталей, оброблених деформуючим протягуванням. Виходячи з аналізу праць, присвячених питанням вивчення форми деталей, оброблених ДПР, експериментальних даних [8] та рекомендацій [9; 10] нами систематизовано всі види геометричних похибок форми оброблених отворів. Згідно з рис. 1а такими похибками є: овальність отвору, ( $y_{ov} = d_{max} - d_{min}$ ), відхилення від циліндричності: конусність ( $y_{кон} = d_{1max} - d_{1min}$ ), діжкоподібність ( $y_{д} = d_{cp} - d_2$ ), корсетність ( $y_{кор} = d_{3x} - d_{cp}$ ), а також максимальна похибка обробленого отвору по його довжині ( $\Delta d_1 = d_3 - d_2$ ).

Крім цих видів існує такий вид похибки, як викривлення осі обробленої деталі (рис. 1б). Ця похибка завжди виникає при обробці різнотовщинних деталей зі значними наскрізними деформаціями.

Очевидним є те, що всі види похибок виникають у результаті пластичної обробки деталей. Тому без детального вивчення технологічної механіки їх деформування неможливо встановити корінні причини виникнення геометричних по-

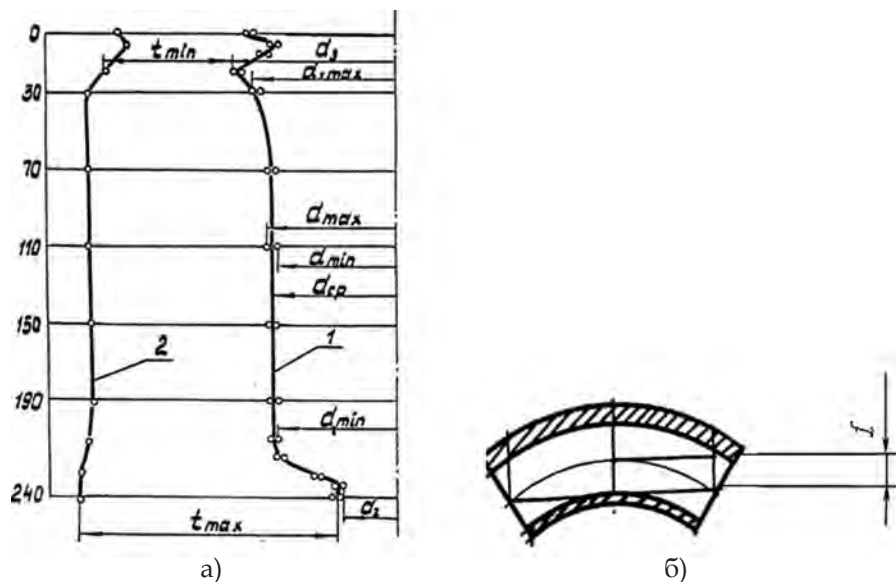


Рис. 1. Види геометричних похибок деталей, оброблених деформуючим протягуванням:  
 а) похибки форми отворів: зміна твірної: 1 – обробленого отвору; 2 – зовнішньої поверхні;  
 б) – викривлення осі деталі

хибок та визначити шляхи забезпечення точності обробки.

**Метою дослідження** є розробка науково обґрунтованих технологічних методів управління параметрами точності деталей, оброблених деформуючим протягуванням.

**Постановка завдання.** На підставі аналізу наукових публікацій [4; 7] встановлено, що найбільш точною є схема осередку деформації, яка складається з ділянки контакту та двох позаконтактних зон, сполучених з нею. Теоретичні моделі, що коректно описують осередок деформації, у розглянутих джерелах відсутні. Існуюча теоретична модель [8] з опису деформованого стану позаконтактної зони дозволяє тільки на якісному рівні прогнозувати перебіг процесу.

Вплив вихідної різнотовщинності на формування похибок відзначають більшість авторів. Вони вказують, що різнотовщинність заготовки викликає значне зниження величини граничних пластичних деформацій. Однак відсутність коректної моделі деформованого стану різнотовщинної заготовки не дозволяє визначити її вплив на погрішність заготовки а також на величину граничної деформації.

Подібні недоліки мають місце при розгляді питання про такий вид похибки, як викривлення осі обробленої деталі. Оцінити її величину не можливо без вивчення впливу режимів протягування геометрії інструмента і товстостінності на осьові деформації обробленої заготовки.

Практично кожен з авторів, що вивчає процес ДПР, намагається забезпечити точність, пропонуючи для цього різні інженерні методи. Вони стосуються поліпшення умов базування, розробки схем протягування, конструкції інструмента.

Однак відсутність досліджень, що пояснюють причини утворення похибок при пластичній деформації заготовки, не дозволяє науково систематизувати відомі методи керування параметрами точності, а також розробити нові.

**Результати досліджень.** Для визначення поставленої мети розроблено математичну модель осередку деформації при ДПР заготовок з невеликою товстостінністю. Для її побудови використовували енергетичний метод, який полягав у варіюванні функціоналу потужності всіх зовнішніх та внутрішніх сил деформування за допомогою параметрів кінематично можливих полів швидкостей деформації. Схема осередку деформації та відповідні їй основні геометричні та кінематичні параметри наведено на рис. 2.

Повний функціонал потужності внутрішніх  $W$  та зовнішніх  $QV_3$  сил відповідно до відомих варіаційних принципів:

$$W - QV_3 = \min, \quad (1)$$

де  $Q$  – сила протягування,  $V_3$  – швидкість течії матеріалу наприкінці осередку деформації.

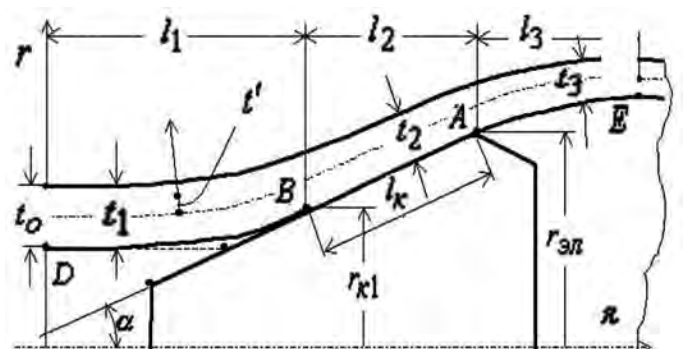


Рис. 2. Схема осередку пластичних деформацій

Повний функціонал потужності осередку деформації дорівнює сумі потужностей функціоналів потужностей формоутворення кожної з трьох ділянок осередку.

Нами побудовано кінематично можливе поле швидкостей для наведеної схеми осередку деформації. Згідно з цим, швидкість окружної деформації:

$$\xi_{\varphi} = V_z \frac{r'}{r}, \quad (2)$$

де  $V_z$  – проекція швидкості течії оброблюваного матеріалу на серединній поверхні заготовки в осьовому напрямку;  $r'$  – зміна радіусу серединної поверхні в осьовому напрямку.

Прийmemo для серединної поверхні відношення швидкості осьової деформації до швидкості окружної:

$$K = \frac{\xi_{z0}}{\xi_{\varphi 0}}, \quad (3)$$

де  $K$  – коефіцієнт осьової деформації, який у межах кожної ділянки має своє постійне значення  $K_1, K_2, K_3$ .

Швидкість осьової деформації з урахуванням виразу (3), для першої і третьої зон буде:

$$\xi_{1,3} = -V_z \left( K_1 \frac{r'}{r} + r''' t_1 \right) \quad (4)$$

де  $t_1$  – відстань від серединної поверхні для шару матеріалу товщини стінки на першій або третій ділянках.

Для другої зони:

$$\xi_{z2} = -V_z K_2 \frac{r'}{r}.$$

Геометрію серединної поверхні  $r = f(z)$  контактної ділянки опишемо рівнянням прямої, позаконтактних зон поліномами четвертого ступеня. При цьому враховувалися граничні умови кожної ділянки, а також умови кінематичного сполучення на границях ділянок.

Потужність пластичних деформацій ділянки контакту:

$$W_2 = 4\pi\tau_s \int_{-t_2/2}^{+t_2/2} dt'_2 \int_{l_1}^{l_2} V_z r' \sqrt{1 - K_2 + K_2^2} dz \quad (5)$$

а потужності позаконтактних зон 1 і 3:

$$W_{1,3} = 4\pi\tau_s \int_{-t_{1,3}/2}^{+t_{1,3}/2} dt'_{1,3} \int_0^{l_1} V_z r' \sqrt{\left(\frac{r'}{r}\right)^2 - \frac{r'}{r} \left( K_{1,3} \frac{r'}{r} + r''' t'_{1,3} \right) + \left( K_{1,3} \frac{r'}{r} + r''' t'_{1,3} \right)^2} dz \quad (6)$$

де  $V_z, t, r', r''', l, K$  для кожної із зон мають своє постійне значення.

Зміна швидкості осьової течії і товщини стінки на кожній ділянці осередку визначалися з умов нестискання та нерозривності деформації.

П'ять незалежних параметрів  $K_1, K_2, K_3, l_1$  і  $l_3$  є варійованими параметрами, які мають забезпечити функціоналу (1) мінімум. Основні вирази  $r = f(z), V_z, t$  для кожної з ділянок осередку деформації наведено в праці [11].

Розрахунок за розробленою моделлю здійснювався за допомогою алгоритму, побудованого за методом послідовних наближень [11]. За результатами останньої ітерації визначали геометричні, кінематичні та енергетичні параметри осередку деформації:  $l_1, l_3, K_1, K_2, K_3, l_2$  і  $l_n, W_1, W_2, W_3, W_{mp}, W$ .

Перевірка отриманих результатів виконувалася шляхом порівнянь розрахункових даних з експериментальними. Їх збіг свідчить про достовірність моделі та визначає умови її використання [11].

Розроблена модель дозволила встановити дуже важливе явище, яке стосується фізичної суті процесу деформування. Встановлено, що потужність пластичних деформацій у контактній зоні  $W_2$  має чітко виражений мінімум при  $K_2 = 0,5$  (рис. 3, крива 2), і течію матеріалу в цій зоні жорстко визначено формою інструмента. Тому процес деформування в ній має стійкий характер.

А от потужності в позаконтактних зонах такого явно вираженого мінімуму не мають. Їх мінімальне значення досягається в широкому діапазоні зміни параметра  $K = 0,4 - 2,3$  (рис. 3, криві 1, 3).

Тому в позаконтактних зонах, де до всього оброблюваний матеріал не контактує з інструментом, процес деформування має явно виражений нестійкий характер, оскільки кінематичні параметри в цих зонах мають більше число ступенів свободи. При цьому навіть невеликі зовнішні збурювання процесу (вихідна погрішність заготовки, погрішність її базування, неоднорідність властивостей матеріалу, вплив ваги інструмента та ін.) підсилюють явище нестійкості течії у позаконтактних зонах, що на практиці приводять до утворення істотних похибок обробки.

Розглянемо, як змінюються осьові деформації заготовки при її роздачі. Експерименти, проведені нами для вивчення цього питання, дозволили встановити, що залежно від товстостінності заготовки, натягу на елемент  $a$  та кута нахилу твірної робочого конуса  $\alpha$  осьові деформації де-

талей можуть бути 3 видів. Це укорочення, відсутність осьових деформацій та осьове подовження (рис. 4).

Тому при деформуванні різнотовщинних деталей кожна з повздовжніх ділянок поперечного

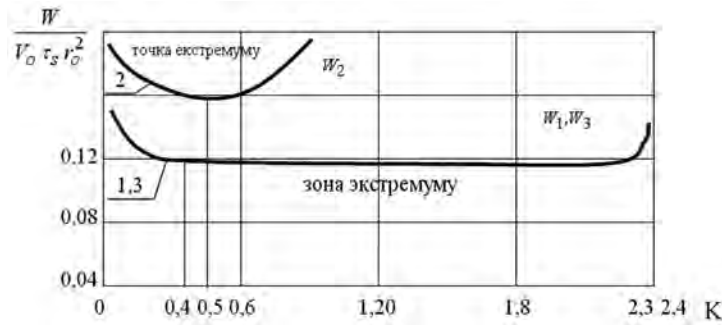


Рис. 3. Залежності потужності пластичної формозміни в контактній зоні (2) і в позаконтактних зонах (1, 3) від параметру осьової деформації  $K$  при куті  $\alpha = 2^\circ$ ,  $t_0/r_0 = 0,4$

перерізу змінює свою довжину по-різному. Варіація зміни осьових розмірів по поперечному перерізу різновтовщинної деталі показана на рис. 5. Вказаною причиною і викликана поява такого виду геометричної похибки, як викривлення осі обробленої деталі.

Для кількісної оцінки цієї похибки нами розроблено модель з визначення вигину осі  $f$  залежно від зміни довжини тонкостінної та товстостінної ділянок. Згідно з цією моделлю вигин осі визначається з виразу (7), отриманого з рис. 6.

$$f = \frac{[L_0 + 0,5(\Delta l_{max} + \Delta l_{min})]D}{\Delta l_{max} - \Delta l_{min}} \times \left[ 1 - \cos \frac{(\Delta l_{max} + \Delta l_{min})}{2D} \right]. \quad (7)$$

Значення  $\Delta l_{max}$  та  $\Delta l_{min}$ , що входять в залежність (7), – максимальна і мінімальна зміна довжини тонкостінної та товстостінної ділянок, використана з експериментів, приведених на рис. 4.

Виконані розрахунки з використанням цієї моделі показали, що впливати на вигин деталі можливо за рахунок зміни кута  $\alpha$  та натягу на елемент. Оптимальним з позиції мінімізації викривлення осі є використання деформуючих елементів з кутами  $\alpha = 1-2^\circ$  та максимально допустимими натягами  $a/d_0 \geq 0,0375$ .

Для визначення мінімально необхідної деформації при роздачі різновтовщинних труб розроблена математична модель роздачі труби для випадку, коли заготовка є різновтовщинною в окружному напрямку (рис. 7). Завдяки цьому отримано співвідношення між ступенем роздачі  $\epsilon$  і кутовим розміром пластичної області  $\varphi_0$ .

$$\epsilon = \frac{1}{\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{\sigma_T}{B} \right)^{\frac{1}{n}} \int_0^{\varphi_0} \left[ \frac{t_0(\varphi)}{t_0} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} d\varphi, \quad (8)$$

де  $\sigma_v$ ,  $B$ ,  $n$  параметри, апроксимуючі криву течії оброблюваного матеріалу.

У результаті чисельних розрахунків для різних матеріалів та різновтовщинностей отримані

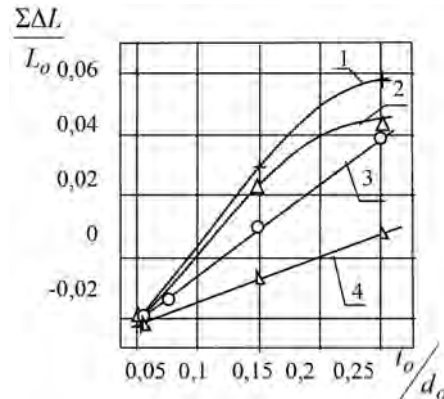


Рис. 4. Залежність сумарної зміни довжини деталі із сталі 20 від відносної товщини стінки  $d_0 = 40$  мм,  $a/d_0 = 0,125$ ,  $\Sigma a/d_0 = 0,075$ , кут  $\alpha: 12^\circ(1), 8^\circ(2), 4^\circ(3), 2^\circ(4)$

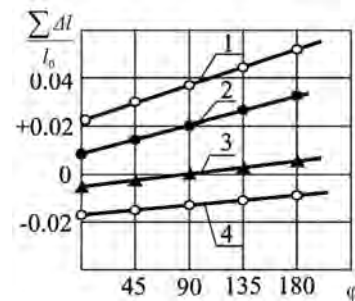


Рис. 5. Залежність варіації значень осьової деформації у поперечному перерізі обробленої заготовки при  $a/d_0 = 0,025$  від кута  $\alpha: t_{min} = 0,1, \varphi = 0; t_{max} = 0,15, \varphi = 180, \alpha: 1 - 12^\circ, 2 - 8^\circ, 3 - 4^\circ, 4 - 2^\circ$

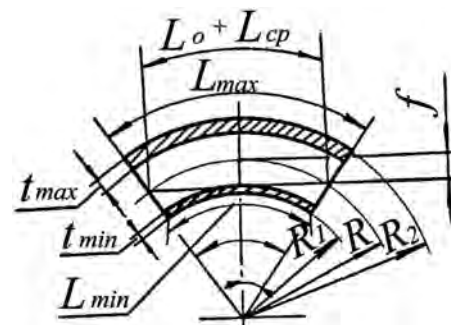


Рис. 6. Викривлення осі різновтовщинної заготовки

розрахункові залежності  $\varepsilon$  від  $\varphi_0$ , що дозволило розробити алгоритм використання отриманих результатів при визначенні мінімально необхідної деформації, що забезпечує деформування всього обсягу різновтовщинної заготовки.

Для мінімізації похибок при обробці деталей складної форми, що мають виступи, бонки, тобто значні перепади товщини стінки поперечного перерізу, розроблено новий спосіб гарантованої локалізації пластичної деформації за рахунок створення в таких заготовках недеформованих (жорстких) ділянок (рис. 8). Розроблено теоретичну модель роздачі труби, що має жорсткі та пластичні ділянки.

За її допомогою визначено допустиме співвідношення товщин стінок пластичної  $t_n$  та жорсткої  $t_j$  ділянок, що забезпечує гарантовану локалізацію деформацій на пластичних ділянках:

$$\left[ \frac{t_n}{t_j} \right] = \frac{\sigma_T e^{\frac{\varepsilon}{1-\beta}}}{K_{nl} \left[ \sigma_T + A \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^n \left( \frac{\varepsilon}{1-\beta} \right)^n \right]}, \quad (9)$$

де:  $K_{nl} > 1$ ;

Також нами розглянуто вплив вихідних похибок отвору на геометричні погрішності обробки. Встановлено, що при наскрізній пластичній деформації погрішність обробленого отвору практично не залежить від вихідної.

Однак при деформуванні заготовок з малими натягами та незначними сумарними деформаціями отвору (заготовки з товщиною стінки, яка близька до безкінечної або виготовлена з мало-пластичних матеріалів) має місце вплив вихідних похибок на точність обробленого отвору. Більш того, ефективне використання деформуючого протягування в цьому випадку можливе тільки при наявності високої точності отвору після попередньої обробки. Визначальним режимним параметром з позиції мінімізації похибок обробки є величина сумарної пластичної деформації отвору, яка обмежується:

- для пластичних матеріалів: необхідною точністю форми отвору;

- для напівкрихких матеріалів: необхідною точністю форми отвору та ресурсом пластичності оброблюваного матеріалу.

При цьому необхідно враховувати технічні вимоги щодо необхідної шорсткості та зміцнення оброблюваної поверхні.

Окремо необхідно зупинитися на похибках зовнішньої поверхні обробленої деталі. Вони в більшості випадків визначають припуск під подальшу обробку. У цьому випадку погрішності утворюються на ділянках, що прилягають до торців деталі завдяки нестационарності дефор-



Рис. 7. Схема деформування різновтовщинної труби

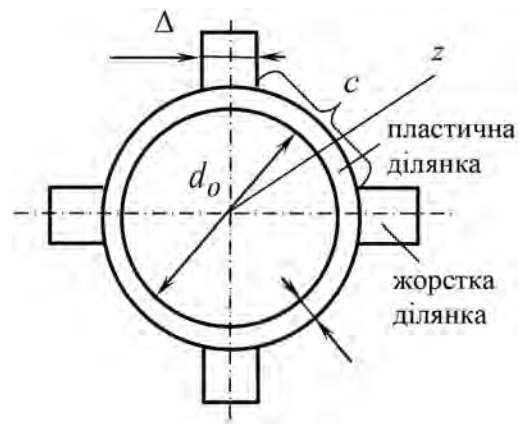


Рис. 8. Заготовка з жорсткими та пластичними ділянками

мування на вході та виході деформуючого елемента. Проведені експерименти показали, що найбільш значуще впливають на зростання цього виду похибки кут  $\alpha$  та натяг на елемент, а також конструктивні особливості заготовки та умови її базування.

Аналіз вищенаведеного матеріалу показав, що похибки деталей оброблених ДПР, утворюються як у контактній, так і позаконтактних зонах осередку деформації, та обумовлені нестійкістю течії матеріалу в ньому, а також впливом вихідної похибки заготовки, погрішності її базування. Подано вплив цих факторів на геометричну точність у вигляді схеми (рис. 9).

Ці дані дають можливість визначити основні шляхи зниження геометричних похибок при деформуючому протягуванні. Ними є:

- вплив на деформування у позаконтактних зонах;
- вплив на деформування на ділянці контакту;
- усунення впливу зовнішніх факторів, що спотворюють віссиметричність деформування,

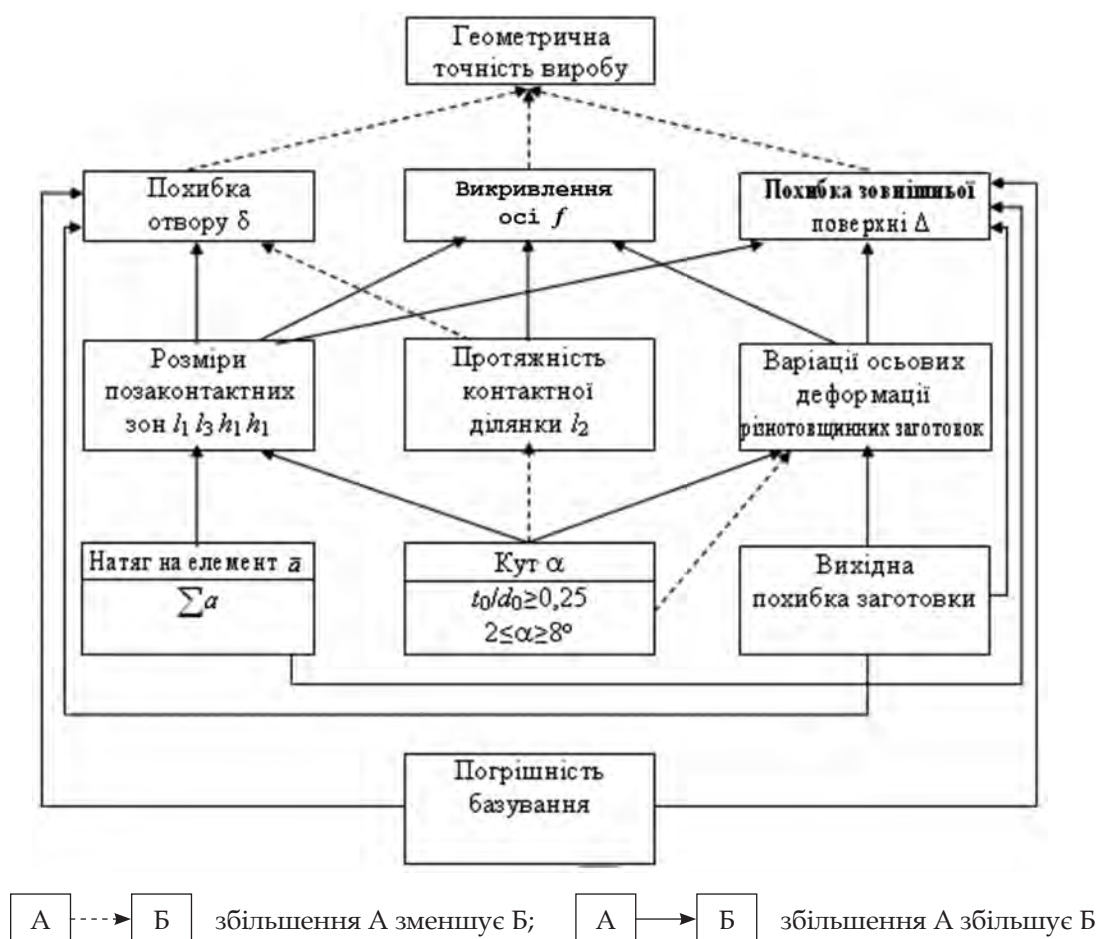


Рис. 9. Вплив технологічних факторів, похибок базування, вихідної погрішності заготовки на геометричну точність обробки

тобто вихідної погрішності заготовки та погрішностей її базування;

– усунення похибок зовнішньої поверхні.

Як відзначалося нами раніше, деформування в різних зонах осередку деформації становить єдиний процес пластичного формоутворення заготовки. Тому його збурювання у формі прояву нестійкості деформування в кожній із зон осередку деформації неминуче позначиться на формуванні геометричних похибок всієї деталі. Отже, запобігання нестійкості течії матеріалу необхідно здійснювати у всіх зонах осередку і насамперед у позаконтактних, де, як показано на рис. 3, має місце нестійкість течії навіть при відсутності зовнішніх збурюючих факторів.

Як слідує з відомих законів механіки і теорії стійкості, сам початок прояву або зникнення нестійкості руху в механічних системах дуже сильно залежить від найменших проявів збурюючих або стабілізуючих факторів. Стосовно нашого процесу виходить, що активний технологічний вплив, навіть незначний за величиною, на зони осередку деформації, особливо на позаконтактні, може істотно вплинути на стабільність усього процесу деформування і, природно, на зниження похибок обробки.

Розглянемо більш детально реалізацію шляхів зниження геометричних похибок. Впливати на процес деформування у позаконтактних зонах можна різноманітними конструкторсько-технологічними прийомами, в основу розробки яких покладені результати вищенаведених досліджень. Наприклад, вибором раціональних режимів роздачі та геометрії інструмента, що дозволяють зменшувати розміри позаконтактних зон.

Впливати на течію матеріалу в цих зонах також можливо за рахунок накладення додаткових стабілізуючих зв'язків, що наближають деформування у позаконтактних зонах до умов деформування у зоні контакту. Це реалізується за рахунок сполучення зон позаконтактних деформацій сусідніх деформуючих елементів у групі, які здійснюють деформацію одночасно. В цьому випадку залежність максимальної похибки обробленого отвору ( $\delta$ ) від взаємного розташування деформуючих елементів ( $L - l_0$ ) має екстремальний характер з мінімумом при  $L - l_0 = l_1$ , де  $l_1$  – довжина позаконтактної зони до її максимуму,  $L$  – віддаль між циліндричними стрічками сусідніх деформуючих елементів,  $l_0$  – геометрична довжина контакту. Причому такий характер цієї залежності має місце при обробці заготовок з різною товстостінністю,

при використанні різних кутів  $\alpha$  та натягів на елемент.

Однак і при сполученні зон позаконтактної деформації групи елементів за останнім деформуючим елементом виникає позаконтактна зона, яка призводить до виникнення похибок. Впливати на неї збоку внутрішньої поверхні дозволяє новий спосіб деформуючого протягування. На рис. 10 показано роздачу отвору згідно з цим способом. Деформування виконується інструментом 2, у якого робочий конус 3 сполучений з додатковою криволінійною ділянкою 4. Параметри твірної цієї ділянки розраховані за результатами математичного моделювання осередку деформації [11] і повністю відповідають позаконтактній зоні за деформуючим елементом.

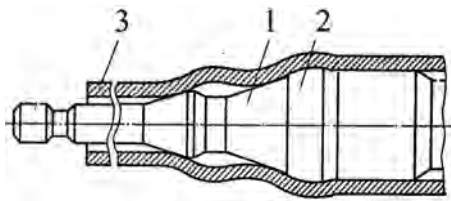


Рис. 10. Обробка новою конструкцією деформуючого елемента, що підвищує точність деталей

Згідно з цим моделюванням рівняння твірної ділянки 4 має такий вигляд:

$$r_y = r_{эм} + \text{tg } \alpha z - \frac{\text{tg } \alpha}{2l_3^2} z^3 + \frac{\text{tg } \alpha}{8l_3^3} z^4 \quad (10)$$

При використанні такого інструмента енергетика процесу порівняно з роздачею звичайним елементом практично не змінюється, а нестабільність деформування в осередку деформації зникає, що значно знижує максимальну похибку обробленого отвору.

Схема протягування по-своєму впливає на точність обробки. Оскільки вона практично не впливає на розміри позаконтактних зон, то підвищення точності при переході від схеми стиснення до схеми розтягнення обумовлено появою в стінці деталі осьових розтягуючих напружень. Наявність їх стабілізує течію матеріалу в осередку деформації, зменшує збурення окружної деформації, що зумовлює зменшення геометричних похибок обробленого отвору.

Схема з обмеженням осьової деформації [6] є вдосконаленою схемою протягування на розтягнення і, як показали експерименти, дозволяє управляти рівнем осьових напруг у процесі обробки. Слід зазначити, що зміна рівня осьових напруг по довжині оброблюваної деталі є збурюючим фактором, який негативно впливає на течію матеріалу в осередку деформації та викликає формування істотних похибок оброблених дета-

лей. Ця схема дає можливість управляти рівнем осьових напруг по довжині заготовки, стабілізує процес її деформування, що, в свою чергу, дозволяє уникнути появи істотних похибок обробки.

### Бібліографічний список / References

1. Качество поверхности, обработанной деформирующим протягиванием / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг, Э. И. Гриценко, Э. К. Посвятенко. – К.: Наук. думка, 1977, 188 с.

Rozenberg A. M., Rozenberg O. A., Gritsenko E. I., Posvyatenko E. K. *Kachestvo poverkhnosti, obrabotannoy deformiruyushchim protyagivaniem*. Kyiv, Nauk. dumka, 1977, 188 p.

2. Цеханов Ю. А. Механика формообразования заготовок при деформирующем протягивании / Ю. А. Цеханов, С. Е. Шейкин; М-во образования Рос. Федерации. Воронеж гос. Техн. акад. – Воронеж, 2001. – 200 с.

Tsekhanov Yu. A., Sheykin S. E. *Mekhanika formoobrazovaniya zagotovok pri deformiruyushchem protyagivani*. Voronezh, 2001, 200 p.

3. Проскуряков Ю. Г. Объемное дорнование отверстий / Ю. Г. Проскуряков, В. Н. Романов, А. Н. Исаев. – М.: Машиностроение, 1984. – 223 с. – (Б-ка технолога).

Proskuryakov Yu. G., Romanov V. N., Isaev A. N. *Ob'emnoe dornovanie otverstiy*. Moscow, Mashinostroyeniye, 1984, 223 p.

4. Проскуряков Ю. Г. Дорнование отверстий / Ю. Г. Проскуряков. – М.; Свердловск: Mashgiz [Урало-сиб. отд-ние], 1961. – 192 с.

Proskuryakov Yu. G. *Dornovanie otverstiy*. Moscow, Sverdlovsk, Mashgiz Uralo-sib. otd-nie, 1961, 192 p.

5. Розенберг А. М. Твердосплавные протяжки для обработки отверстий методом пластического деформирования / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг, Д. А. Сирота; УкрНИКТИССМИ. – К., 1968. – 37 с.

Rozenberg A. M., Rozenberg O. A., Sirota D. A. *Tverdosplavnyye protyazhki dlya obrabotki otverstiy metodom plasticheskogo deformirovaniya*. Kyiv, 1968, 37 p.

6. Расчет и проектирование твердосплавных деформирующих протяжек и процесса протягивания / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг, Э. К. Посвятенко и др.; АН УССР. ИСМ. – К.: Наук. думка, 1978. – 256 с.

Rozenberg A. M., Rozenberg O. A., Posvyatenko E. K. *Raschet i proektirovaniye tverdosplavnykh deformiruyushchikh protyazhek i protsessy protyagivaniya*. Kyiv, Nauk. dumka, 1978, 256 p.

7. Розенберг О. А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании / О. А. Розенберг; АН УССР. ИСМ. – К.: Наук. думка, 1981. – 288 с.



Rozenberg O. A. *Mekhanika vzaimodeystviya instrumenta s izdeliem pri deformiruyushchem protyagivaniy.* Kyiv, Nauk. dumka, 1981, 288 p.

8. Немировский Я. Б. Исследование процесса деформирующего протягивания отверстий с целью оптимизации инструмента с групповым расположением рабочих элементов / Я. Б. Немировский; Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР. – К., 1981. – 24 с.

Nemirovskiy Ya. B. *Issledovanie protsessy deformiruyushchego protyagivaniya otverstiy s tsel'yu optimizatsii instrumenta s gruppovym raspolozheniem rabochikh elementov.* Kyiv, 1981, 24 p.

9. Палей М. А. Отклонения формы и расположения поверхностей / М. А. Палей. – М.: Изд-во стандартов, 1965. – 118 с.

Paley M. A. *Otkloneniya formy i raspolozheniya poverkhnostey.* Moscow, Izd-vo standartov, 1965, 118 p.

10. Рыжов Э. В. Технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами поверхностей / Э. В. Рыжов, О. А. Горленко; М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР. Тульский политех. инст. – Тула, 1980. – 97 с.

Ryzhov E. V., Gorlenko O. A. *Tekhnologicheskoe upravlenie kachestvom i ekspluatatsionnymi svoystvami poverkhnostey.* Tula, 1980, 97 p.

11. Немировский Я. Б. Применение вариационных принципов для анализа энергетических и кинематических параметров процесса деформирующего протягивания / Я. Б. Немировский, Ю. А. Цеханов // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. научн.-техн. сб. – Харьков: НТУ Украины «ХПИ», 2001. – Вып. 60. – С. 154–159.

Nemirovskiy Ya. B., Tsekhanov Yu. A. *Primeneniye variatsionnykh printsipov dlya analiza energeticheskikh i kinematicheskikh parametrov protsessy deformiruyushchego protyagivaniya. Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh.* Khar'kov, NTU Ukrainy "KhPI", 2001, issue. 60, pp. 154-159.

12. Єр'омін П. М. Підвищення ефективності обробки отворів у деталях із чавунів комбінованим протягуванням: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Єр'омін Павло Миколайович; КНТУ. – Кіровоград, 2015. – 20 с.

Yer'omin P. M. *Pidvishchennya efektyvnosti obrobki otvoriv u detalyakh iz chavuniv kombinovanim protyagivanniam: avtoref. Dis. ... kand. tekhn. nauk:* 05.03.01. Kirovograd. 2015, 20 p.

13. Опора к протяжному станку: а. с. 606692 СССР : МКИ В 23 Д 41/02 / А. М. Розенберг,

О. А. Розенберг, Э. И. Гриценко и др. – № 2426255/25-08; заявл. 03.12.76; опубл. 15.05.78, Бюл. № 8. – 3 с.

Rozenberg A. M., Rozenberg O. A., Gritsenko E. I. *Opora k protyazhnomu stanku:* a. s. 606692 SSSR: MKI V 23 D 41/02. No. 2426255/25-08; zayavl. 03.12.76; opubl. 15.05.78, Byul. No. 8, 3 p.

14. Опора для деформирующего протягивания: а.с. 761172 СССР: В23Д41/04 / О. А. Анпилогов, Ю. Ф. Бусел, А. Д. Крицкий и др. – № 1836811/25-27; заявл. 16.10.78; опубл. 07.09.80, Бюл. № 33. – 5 с.

Anpilogov O. A., Busel Yu. F., Kritskiy A. D. *Opora dlya deformiruyushchego protyagivaniya:* a.s. 761172 SSSR: V23D41/04. No. 1836811/25-27; zayavl. 16.10.78; opubl. 07.09.80, Byul. No. 33, 5 p.

**Purpose.** Development of scientifically grounded technological methods of controlling the accuracy of parts processed by deforming stretching.

**Methodology.** Theoretical and experimental study of process mechanics, which allowed to identify the main causes of error formation during deformation, and to determine the ways of controlling the accuracy parameters.

**Findings.** The scientific bases of technological control of the parameters of precision of parts processed by deforming stretching are created, which consist in the determination of the features of deformation of multi-tiered billets and parts processed with small tensions, as well as in the development of scientifically grounded schemes, methods of gripping the tool and technological recommendations that provide the required precision of machining.

**Originality.** The scientific basis of technological control of accuracy parameters in deforming stretching is created, which consists in the development of mathematical models and experimental studies of process mechanics, which provides determination of the causes of the formation of geometric errors in the deformation cell and the development of ways of technological control of accuracy parameters.

**Practical value.** Possibility of working out of technological processes on the basis of deforming dragging, namely processing of openings of various-thickness parts, restoration of geometric accuracy of worn piston fingers, processing of internal cavity of casings of internal combustion engines from gray cast iron.

**Key words:** deforming broaching, accuracy, deformation center, contact area, non-contact zones, deformation, different thickness, geometric error.

Рекомендована к публикации  
д. т. н. Э. К. Посвятенко

Поступила 25.12.2017