



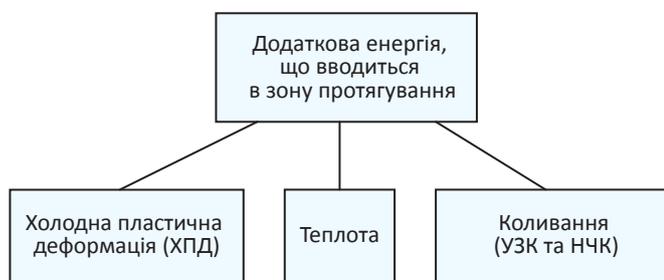
## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРОТЯГУВАННЯ ДОДАТКОВОЮ ЕНЕРГІЄЮ

Інтенсифікація процесу протягування додатковою енергією є перспективним методом, який розширює його технологічні можливості процесу протягування і створює умови для розробки нових технологічних процесів: комбінованого протягування, протягування з використанням ультразвукових коливань та протягування з використанням низькочастотних коливань

Обробка отворів деформуючими, різальними та комбінованими протяжками (протягування) є високопродуктивним процесом. Між тим, його можна інтенсифікувати додатковими видами енергії. Це дозволить розширити можливості операції стосовно деталей із практично усіх конструкційних та інструментальних матеріалів у будь-якому стані та вирішити проблеми, що ставить інженерія поверхні (модифікування поверхні, поверхневого шару й основного металу деталі) перед механічною обробкою.

Види додаткової механічної енергії, що вводяться в зону протягування, показані на рис. 1.

Розглянемо вплив попередньої холодної пластичної деформації на процес обробки матеріалу різанням. Зміцнення оброблюваного матеріалу холодною пластичною деформацією, що передує іншим



↑ Рис. 1. Види додаткової енергії, що вводяться в зону протягування



### Автори статті

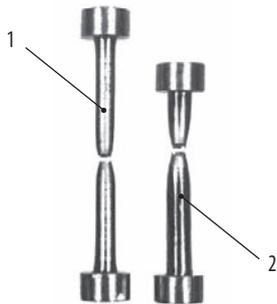
Посвятенко Е. К., Немировський Я. Б.,  
Чернявський О. В.,  
Національний транспортний університет (м. Київ),  
Центральноукраїнський національний технічний університет  
(м. Кропивницький)

процесам обробки, зокрема різанню, дозволяє знизити напруженість останнього. При цьому спостерігається зміна інтенсивності наросту утворення, сил і температури різання, звуження пластичної зони і збільшення кута зсуву, зменшення усадки стружки, а також зниження інтенсивності зношування різального інструменту і поліпшення якості обробки. Найбільший ефект попереднього холодного пластичного деформування проявляється при низьких і середніх швидкостях різання (1–60 м/хв), що робить його надзвичайно перспективним для використання різального протягування. Якщо при цьому застосовувати деформуюче протягування, як джерело додаткової механічної енергії, та об'єднати ці два процеси, то протягування можна виконувати одним інструментом — комбінованою деформуюче-різальною протяжкою. Процес у цьому випадку слід називати комбінованим деформуюче-різальним протягуванням.

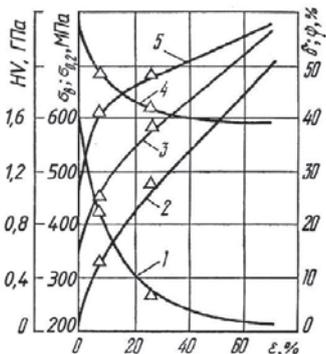
Природа впливу попередньої холодної пластичної деформації (ХПД) оброблюваного матеріалу на подальшу обробку різанням така. При різанні незміцненого матеріалу вся робота пластичної деформації

ції буде виконуватись різальним зубцем. При комбінованій обробці частина цієї роботи виконується деформуючим елементом.

Нижче наведено наші експериментальні результати стандартних випробувань на розрив зразків п'ятикратної довжини, вирізаних зі стінок втулок із сталі 12Х18Н10Т у початковому стані — 1 та зміцнених ХПД з деформацією  $\varepsilon = 25\%$  — 2 (рис. 2) і сталі — 10 (рис. 3) при одночасному деформаційному стиску (лінії) та деформуючим протягуванням ДП (точки).



← Рис. 2. Зразки зі сталі 12Х18Н10Т після випробувань на розрив:  
1 – сталь у початковому стані;  
2 – сталь у зміцненому ХПД стані



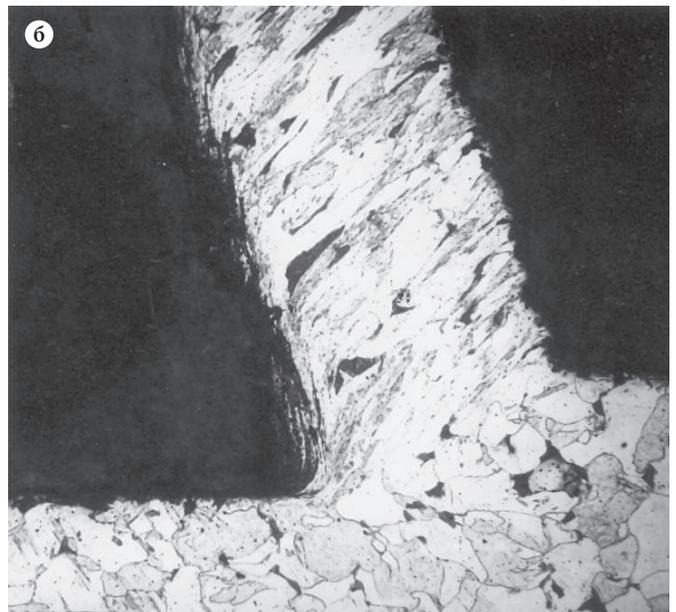
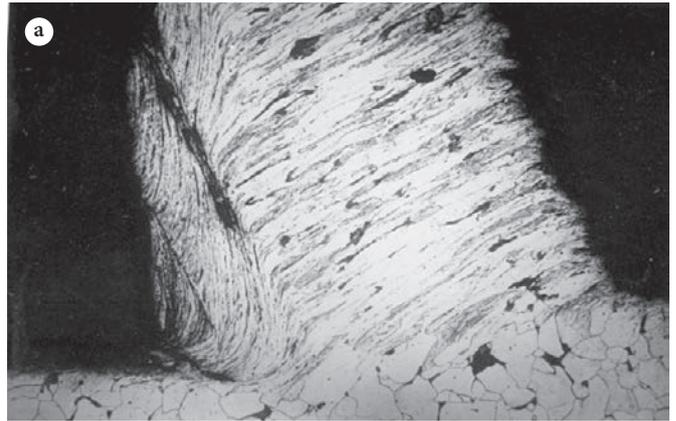
← Рис. 3. Залежності механічних характеристик сталі 10 від ступеня деформації  $\varepsilon$  при одноосному стиску (лінії) і деформуючому протягуванні (точки):  
1 – відносне видовження  $\delta$ ;  
2 – межа текучості  $0,2 \sigma_{0,2}$ ;  
3 – межа міцності в  $\sigma_n$ ;  
4 – відносне звуження  $\psi$ ;  
5 – твердість HV

Із результатів експериментів витікає, що виконання попереднього пластичного деформування змінює механічні характеристики оброблюваного матеріалу, виконуючи частину роботи при його деформуванні. Тому оброблюваність попереднього деформованого матеріалу покращується.

Сказане підтверджується також мікрофотографіями коренів стружки, отриманих при різальному протягуванні сталі 10 у незміцненому (рис. 4а) та зміцненому ДП стані (рис. 4б).

Із наведених порівняльних мікрофотографій витікає, що дія ХПД на оброблюваний матеріал позитивно впливає на оброблюваність останнього. Зокрема, знижується інтенсивність наросту оутворення та поліпшується якість обробленої поверхні. Це дає підстави для обробки деталей деформуюче-різальним протягуванням і створення комбінованих деформуюче-різальних протяжок.

Розглянемо вплив нагрівання на процес протягування. Нагрівання деформуючих протяжок у процесі обробки є важливим способом підвищення продуктивності операції за рахунок збільшення працездатності робочих елементів, а отже, стійкості останніх, тобто кількості оброблених деталей (збільшення шляху протягування). Для цього безпосередньо на початку роботи інструменту здійснюється рівномірне нагрівання оправки і деформуючого елемента до температури, яка зберігається протягом усього процесу. При закінченні операції протяжка охолоджується. Таким чином, відбувається компенсація напружень від робочого навантаження при русі протяжки, що дозволяє підвищити довговічність її робочих елементів.

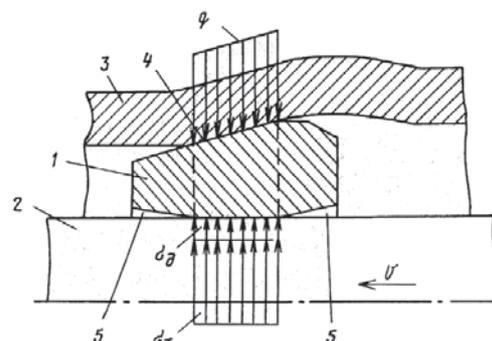


↗ Рис. 4. Мікрофотографії коренів стружки ( $\times 70$ ), отриманих при різальному протягуванні сталі 10 у незміцненому (а – HV 1,1 ГПа, коефіцієнт усадки стружки  $\zeta = 3,85$ ) та зміцненому холодною пластичною деформацією стані (б –  $\varepsilon = 95\%$ , HV 2,6 ГПа,  $\zeta = 1,9$ ). Швидкість протягування 9 м/хв

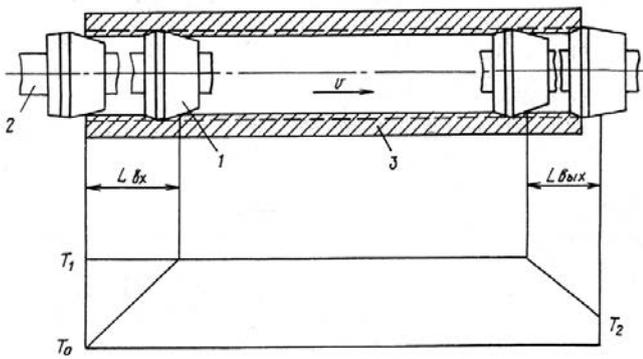
Навантаження на інструмент, етапи обробки отвору пластичним деформуванням та діаграма температур нагрівання й охолодження протяжки показано на рис. 5 і рис. 6.

Спосіб реалізується таким чином.

Деформуючий елемент 1, що посаджено на оправку 2 без зазору або з невеликим натягом, просувається в оброблюваній деталі 3 зі швидкістю  $V$  у осьовому напрямку, вказаному стрілкою. Посадка з натягом призводить до виникнення на посадковій площадці деформаційних розтягуючих напружень  $\sigma_d$ . Ці напруження не є небезпечними для деформуючого елемента, оскільки їх рівень на порядок нижчий від межі міцності на згин інструментального матеріалу.



← Рис. 5. Схема навантажень деформуючого елемента при обробці отвору деталі пластичним деформуванням



➤ Рис. 6. Етапи обробки отвору деталі пластичним деформуванням та діаграма температур нагрівання та охолодження інструменту

Для того, щоб посадка деформуючого елемента на оправку здійснювалась тільки під зоною 4 контакту останнього з деталлю, на поверхні отвору передбачені конусоподібні ділянки 5. У зоні 4 контакту деформуючого елемента з деталлю виникають контактні напруження  $q$ , для компенсації яких у процесі обробки створюються термічні радіальні напруження  $\sigma_T$ . Швидкість нагрівання  $V_{нагр.}$  та охолодження  $V_{ох.}$  інструменту, а також довжину ділянок  $L_{ex.}$  та  $L_{вых.}$ , на яких відбувається зміна температури інструменту від  $T_0$  до  $T_1$  та від  $T_1$  до  $T_2$ , визначають за такими експериментальними залежностями.

Для деталей з кінцевою товщиною стінки:

$$L_{ex.} = 1,37t^{0,7}d^{0,22}, \text{ мм} \quad (1)$$

дет – товщина стінки деталі, мм;  $d$  – діаметр отвору деталі, мм.

$$L_{ex.} = L_{вих.} + a/2tg\alpha, \text{ мм} \quad (2)$$

де  $a$  – натяг на деформуючий елемент, мм;  $\alpha$  – кут нахилу твірної робочого конуса деформуючого елемента, град.

Для деталей з безкінечною товщиною стінки ( $t_0 = d_0$  в умовах високого тиску):

$$L_{ex.} = 17,4(\sum a)^{0,57}; \quad (3)$$

$$L_{ex.} = 18,6(\sum a)^{0,78}. \quad (4)$$

При відомій швидкості протягування  $V$ :

$$V_{нагр.} = [(T - T)V]/L_{ex.}; \quad (5)$$

$$V_{ох.} = [(T - T)V]/L_{вих.} \quad (6)$$

Залежності для визначення температур нагрівання та охолодження є придатними для всіх відомих інструментальних матеріалів, оскільки враховують їх фізико-механічні властивості, геометричні розміри та режими обробки. Якщо інструментальний матеріал задовільно працює на згин, тобто коли межа міцності на згин  $\sigma_{зг} \geq (1,5 - 2) \cdot 10^3$  МПа, а напруження  $q$  у зоні контакту деформуючого елемента з деталлю не перевищують  $q \leq (3 - 4) \cdot 10^3$  МПа, рівень термічних напружень  $\sigma_T$  допустимо вибирати меншим рівня  $q$ , тобто здійснювати часткову компенсацію  $q$ . У цих випадках температура нагрівання, що необхідна для створення термічних напруг, буде меншою температури  $T_1$ , а часом і температури  $T_2$ . У останньому випадку немає необхідності охолодження протяжки на виході із деталі.

Ще одним із методів інтенсифікації процесу протягування є введення коливань в зону обробки. Перш за все це стосується протягування важкооброблюваних матеріалів: аустенітних і високолегованих

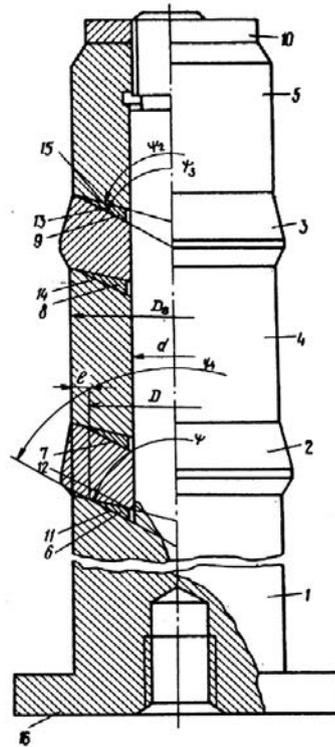
сталей, титану, нікелевих і молібденових сплавів тощо. При деформуючому протягуванні цих матеріалів є небезпека виникнення місточків схоплювання з інструментом (адгезії). Запобігання цьому явищу та руйнування джерел адгезії вирішується коливаннями інструменту.

Відома протяжка, що має кілька деформуючих елементів у вигляді тарілчастих пружин. Ці деформуючі елементи вільно установлені на оправці та можуть імпульсно стискатися упорним кільцем, яке жорстко з'єднане зі штоком, що розміщений усередині оправки. Шток може примусово коливально рухатися в осьовому напрямку, стискаючи деформуючі елементи, тобто збільшуючи їх зовнішній діаметр. Цим створюється імпульсна дія на оброблювану поверхню (А. С. СРСР № 671947). Недоліком протяжки є низька стійкість деформуючих елементів та високий рівень шуму при роботі.

Відома також інша протяжка (А. С. СРСР по заявці № 2698859/08), у якій частина деформуючих елементів має можливість вільно рухатися уздовж осі оправки, тим самим створюючи умови для УЗК-коливань. У цьому випадку процес накладення коливань супроводжується значними втратами на торцях деформуючих елементів та дистанційних втулок.

Введення додаткової енергії ультразвукових коливань (УЗК) в зону обробки підвищує «фіктивну» жорсткість деталі.

На рис. 7 зображено загальний вигляд одного з варіантів УЗК-прошивки, запропонованого нами технічного рішення.



➤ Рис. 7. Прошивка для використання ультразвукових коливань при обробці отворів

Прошивка складається з оправки 1, на якій розміщені деформуючі елементи 2 і 3, а також дистанційна втулка 4. Між торцями деформуючих елементів, дистанційною втулкою, передньою напрямною 5 і буртом оправки установлені шайби 6–9 із пластичного металу, наприклад із відпаленої міді товщиною 1–3 мм. Оправка і передня напрямна виготовлені зі сталі однієї марки. Деформуючі елементи 2 і 3, дистанційна втулка 4 і тарілчасті шайби 6–9 затиснуті на оправці 1 передньою напрямною 5 і контррайкою 10. Бокові поверхні шайб 6–9 утворені зрізаними конусами, які мають спільні великі основи, й обернені меншими основами від передньої напрямної 5. Шайби кон-

тактують без зазору з торцем бурта 11, опорними торцями 12 і протилежними опорними торцями 13 деформуючих елементів, торцями 14 дистанційної втулки і торцем 15 передньої напрямної.

Зовнішні діаметри  $D$  шайб менші за зовнішній діаметр  $D_6$  дистанційної втулки на подвійну ширину пояска  $l$ . На площі шириною цього пояска забезпечується безпосередній контакт торця бурта 11 оправки з опорним торцем 12 деформуючого елемента 2, протилежного опорному торцю цього елемента з торцем дистанційної втулки і т. д. Це захищає гострі кромки твердосплавних деформуючих елементів від викришування. Опорні торці 12 твердосплавних деформуючих елементів, які встановлено, наприклад, із твердого сплаву ВК15, утворені зрізаним конусом з кутом конусності  $\psi$ , що знаходиться в межах  $90-170^\circ$ . Цей торець контактує по ширині пояска  $l$  з торцем бурта оправки 1 або дистанційної втулки 4. Решта поверхні торця 11 бурта оправки або торця 14 дистанційної втулки виконані у вигляді зрізаного конуса з кутом конусності  $\psi_1$ , що менша кута  $\psi$  на величину, що визначається залежністю:

$$\operatorname{tg} \frac{\psi_1}{2} - \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} = \frac{(2-6)}{D-d}, \text{ мм} \quad (7)$$

де  $\psi$  – кут конусності зовнішнього конуса шайби, град;  $\psi_1$  – кут конусності внутрішнього конуса шайби, град;  $D$  – зовнішній діаметр шайби, мм;  $d$  – діаметр отвору шайби, мм.

Простір між цими конусами заповнено матеріалом шайб 6 і 8. Протилежні опорні торці деформуючих елементів утворені двома зрізаними конусами: перший — з кутом конусності  $\psi_3$ , що дорівнює  $90-170^\circ$ , а другий – з кутом конусності  $\psi_2$ . Ці кути конусності пов'язані між собою залежністю (7). Другий конус контактує з торцем дистанційної втулки або передньої напрямної. Між протилежними опорними торцями 13 деформуючих елементів і торцем 15 передньої напрямної або дистанційної втулки розміщені шайби 7 і 9.

Працює прошивка таким чином. Прошивка за допомогою різьбової шпильки приєднується торцем 16 до концентратора ультразвукових коливань. На прошивку подаються коливання. Практика показала, що основною перевагою прошивки є те, що трудомісткість її виготовлення у 1,5–2 рази знижується порівняно з відомою УЗК-прошивкою, оскільки немає необхідності притирання торців її складових частин. Крім того, завдяки відсутності осьових зазорів зменшуються втрати енергії, що підвищує ефективність обробки.

Застосування прошивки дозволяє знизити на 40–70% залишкові напруження першого роду в оброблюваних деталях. Це дозволяє використати деформуюче протягування для обробки деталей тривалого зберігання.

При протягуванні з УЗК глибина зміцненого шару зменшується порівняно з глибиною цього шару після протягування без УЗК, а твердість серцевини деталі в обох випадках однакова.

Таким чином, механізм дії УЗК на процес деформуючого протягування полягає в накопиченні малих пластичних деформацій, котрі збільшуються від періоду до періоду за рахунок поступального та коливального рухів, а також у зниженні сил тертя за рахунок зміни кінематики ковзання інструменту. Отже, протягування з накладенням УЗК має також перевагу в запобіганні адгезійних явищ у зоні обробки, тобто в заміні процесу внутрішнього тертя на зовнішнє і, відповідно, зниження коефіцієнта тертя.

Додаткові поздовжні коливання протяжки можуть бути також низькочастотними (НЧК), тобто звуковими. Такий процес деформуючого протягування було перевірено на стенді на базі серійного горизонтально-протяжного верстата, на напрямних якого було розміщено механічний генератор НЧК ексцентрикового типу. У процесі деформуючого протягування робочий орган НЧК здійснював рух, що складався з поздовжнього переміщення з частотою  $f$  та амплітудою  $A$ . Сумарний рух робочого органу НЧК передавався до оправки протяжки, на якому жорстко кріпився деформуючий елемент. Генератор НЧК забезпечував безступінчасте регулювання частоти коливань у діапазоні  $f = 10-100$  Гц та ступінчасте регулювання амплітуди  $A = 0,4-1,2$  мм. Натяг на деформуючий елемент знаходився в межах  $a = 0,02-0,5$  мм. Досліджувались конструкційні вуглецеві низьколеговані сталі та алюмінієвий сплав АК6.

Досліди показали, що процес із накладенням НЧК може бути ефективним лише тоді, коли амплітуда коливальної швидкості  $2\pi fA$  є вищою, ніж швидкість протягування. У цьому випадку деформуючий елемент періодично зупиняється відносно оброблюваної поверхні. У момент цієї зупинки відбувається перехід контакту інструменту з виробом з робочого конуса на циліндричну стрічку деформуючого елемента. Натяг на деформуючий елемент у момент його зупинки не перевищує величину пружної деформації оброблюваної поверхні, тобто матеріал деталі перебуває у пружному напружено-деформованому стані.

На величину контактного тиску в момент зупинки деформуючого елемента відносно оброблюваної поверхні впливають: механічні характеристики матеріалу виробу, зокрема модуль пружності та межа текучості; товщина стінки деталі; натяг на деформуючий елемент; довжина циліндричної стрічки останнього. Максимальний контактний тиск у момент зупинки виникає при деформуючому протягуванні з натягами, що є рівними або наближаються до величини пружної деформації оброблюваної поверхні. Цей тиск може перевищувати потрібну межу текучості матеріалу, що обробляється.

Виникнення в момент зупинки високого тиску викликає зміну властивостей поверхневого шару, що інтенсифікує процес деформуючого протягування. При цьому для досягнення мінімальної шорсткості та зміцнення цього шару оптимальними є: частота коливань — 30–50 Гц; амплітуда коливань — 0,5–1,2 мм; швидкість протягування — 2–5 м/хв; довжина циліндричної стрічки деформуючого елемента — 0,3–0,5 мм.

Шорсткість обробленої поверхні знижується до значень  $Ra = 0,08-0,16$  мкм, а твердість поверхні конструкційних сталей зростає до 3 ГПа. При цьому товщина зміцненого поверхневого шару досягає величин 0,15–0,2 мм. У цьому шарі виникають залишкові напруження стиску.

Таким чином, деформуюче протягування з накладенням НЧК приводить до принципово нового механізму формування обробленої поверхні за рахунок відносної зупинки інструменту і виробу, а не за рахунок відносного переміщення останніх при звичайному деформуючому протягуванні. З огляду на зміну механіки контактної взаємодії рекомендується використовувати цей процес для застосування зміцнювальної обробки тільки поверхневого шару точних отворів без зміни розмірів деталі, за виключенням мінімального збільшення розмірів отвору за рахунок зниження висотного параметра шорсткості. Це значно розширює технологічні можливості деформуючого протягування. 

