



УДК 621.91

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-3-5

**ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ДЕТАЛІ ПРИ
ДЕФОРМАЦІЙНОМУ ПРОТЯГУВАННІ**

Веселовська Наталія Ростиславівна д.т.н., професор
Паладійчук Юрій Богданович, к.т.н., доцент
Телятник Інна Анатоліївна, аспірантка
Вінницький національний аграрний університет

Nataliia Veselovska, Doctor of Technical Sciences, Full Professor
Yuriy Paladiychuk, Ph.D., Associate Professor
Inna Telyatnuk, postgraduate
Vinnytsia National Agrarian University

Відомо, що при обробці пластичних матеріалів різанням серйозною проблемою є подрібнення стружки. Утворення стійкої міцної зливної стружки є ознакою низької оброблюваності матеріалу деталі і вимагає застосування спеціальних засобів та методів, які забезпечували б поділ стружки чи припуску, що зрізується.

Особливо актуальним це питання постає при різальному протягуванні як низькошвидкісному процесі, який відзначається інтенсивним наростоутворенням і високим коефіцієнтом усадки стружки, а отже і міцністю останньої. На сьогодні існує ряд оригінальних розробок кількох наукових шкіл, де реалізується ідея попереднього поділу припуску при протягуванні шляхом створення мережі технологічних стружкоподільчих канавок.

Процес внутрішнього протягування, зокрема протягування круглих глибоких отворів, обов'язково повинен відбуватися в умовах примусового поділу стружки або припуску. При цьому так званий поперечний поділ стружки тобто поділ по периметру отвору, як правило, здійснюється за рахунок конструктивних елементів на зубцях протяжки і на сьогодні не є надто складною проблемою. Проте і в цьому напрямку є певні резерви, зокрема такі, що стосуються підвищення стійкості інструменту.

В даній статті розглядалось технологічна функція рельєфів, що полягає у примусовому поділі зрізуваного припуску контурними канавками. Проведений аналіз переваг та недоліків найбільш розповсюджених процесів отримання круглих отворів у порожнистих заготовках та деталях. Описано сутність групової (прогресивної, змінної) схеми протягування.

Розглянуто типові комбіновані протяжні інструменти. Наведенні формули для розрахунку розмірів стружкових канавок. Охарактеризована перша складова δ_r зміни діаметра отвору і зовнішнього діаметру заготовки після кожної із операцій комбінованого протягування.

Ключові слова: деталь, стружкоутворення, мікротвердість, рельєфоутворення, деформаційне протягування.

Ф. 9. Рис. 15. Літ. 9.

1. Постановка проблеми

При обробці пластичних матеріалів різанням серйозною проблемою є подрібнення стружки. Утворення стійкої міцної зливної стружки є ознакою низької оброблюваності матеріалу деталі і вимагає застосування спеціальних засобів та методів, які забезпечували б поділ стружки чи припуску, що зрізується.

Особливо актуальним це питання постає при різальному протягуванні як низькошвидкісному процесі, який відзначається інтенсивним наростоутворенням і високим коефіцієнтом усадки стружки, а отже і міцністю останньої. На сьогодні існує ряд оригінальних розробок кількох наукових шкіл, де реалізується ідея попереднього поділу припуску при протягуванні шляхом створення мережі технологічних стружкоподільчих канавок [1-3].

Технологічна функція рельєфів полягає у примусовому поділі зрізуваного припуску контурними канавками в процесах механічної обробки глибоких отворів, зокрема при протягуванні

пластичних металів і сплавів, коли утворюється міцна стійка зливна стружка. Нерідко лише завдяки цьому заходові стає можливим здійснення операції різального протягування.

Метод примусового поділу сумарного припуску шляхом перерізання останньою гвинтовою канавкою трикутного профілю та великого кроку глибиною до 0,8 товщини припуску за кінематичною схемою точіння. Проте цей метод є непридатним для рельєфоутворення на поверхнях отворів порожнистих деталей, оскільки обробка здійснюється недостатньо жорстким інструментом (розточувальним різцем) з низькою продуктивністю [1].

Спільними недоліками методів отримання поздовжніх або нахилених під кутом до 12° канавок, призначених для поперечного поділу стружки при протягуванні і отримуваних за допомогою холодного пластичного деформування при схемі ковзання, є обмежені можливості цих методів по глибині канавок (до 0,5 мм), жорсткості деталей (лише корпусні деталі), геометричних характеристиках мережі канавок ($\eta = 0^\circ \dots 12^\circ$), марках оброблюваних матеріалів (лише високопластичні матеріали) та небезпеці інтенсивних адгезійних процесів у зоні обробки [1].

В основу процесу отримання канавок для поздовжнього поділу стружки методом дискретного протягування покладено наступне контактне явище, що супроводжує деформуюче протягування

Після зупинки і наступного відновлення процесу на поверхні отвору утворюється кільцеподібна канавка, яка відтворює профіль деформуючого елемента в області його циліндричної стрічки.

При протягуванні разом з інструментом уздовж деталі рухається кільцеподібне вогнище деформації, яке зникає при зупинці процесу. Під дією момента, утвореного силами від тангенційних напружень, матеріал деталі охоплює циліндричну стрічку і поверхню заднього конуса інструмента, позаконтактна зона зникає і відбувається явище, аналогічне заглибленню індентора. При цьому на поверхні отвору утворюється кільцеподібна залишкова канавка, яка використовується для поділу припуску при роботі зубців комбінованої протяжки [1,2].

На рисунку 1 подано принципіальну схему дискретного протягування. Комбінована протяжка, яка оснащена деформуючим елементом 1 і зубом 2, рухається в отворі деталі 3 (позиція а). Разом з інструментом рухаються вогнище деформації та хвилеподібна позаконтактна зона. Зубом формується валик стружки 4. Через відрізок шляху довжиною L_{z1} відбувається короткочасова зупинка процесу протягування, в результаті якої виникає канавка 5 (позиція б). Проходження зуба через канавку супроводжується завершенням формування валика стружки 4 і початком утворення нового валика 6. Дослідження показали, що за допомогою дискретного протягування

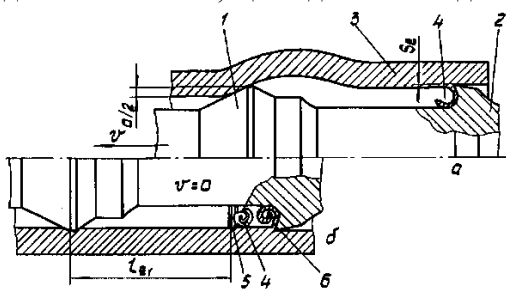


Рис. 1. Схема дискретного протягування [2]

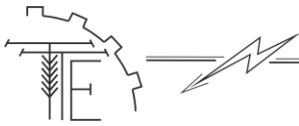
При заглибленні деформуючого елемента можна отримати канавки глибиною лише до 0,03 мм. При удосконаленні методу, між деформуючим елементом 1 та зубом 2 (рис.1) інструменту було розміщено спеціальний ділильний елемент з профілем, який має забезпечувати оптимальні умови заглиблення (індентування) для кожної марки оброблюваного матеріалу при зупинках процесу [2].

Як правило, це був профіль трикутника з кутом робочої частини $45^\circ \dots 90^\circ$. Для найбільшої ефективності методу діаметр ділильного елемента повинен перевищувати діаметр деформуючого на величину пружного відновлення поверхні отвору деталі, а сам елемент слід розміщувати у районі максимуму хвилі позаконтактної деформації, що завжди супроводжує процес деформуючого протягування. У цьому випадку радіальна сила, що діє з боку деталі, має максимальне значення.

Удосконалений метод дозволяє отримувати кільцеподібні канавки глибиною до 0,07 мм. При статичному довантаженні ділильного елемента з боку інструменту за допомогою вузла механічного довантаження глибину канавки можна підвищити до 0,2 мм, що, очевидно, є межею можливостей методу дискретного протягування. Іншим обмежуючим фактором цього методу є його можливості формувати лише кільцеподібні канавки, що недостатньо для повноцінного рельєфоутворення [2].

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз переваг та недоліків найбільш розповсюджених процесів отримання круглих отворів у порожнистих заготовках та деталях дозволяє зауважити наступне. Частина цих процесів не може бути



використана для підготовки отворів під різальне протягування та рельєфоутворення, оскільки відзначається недостатньою точністю (лиття, гаряче прокатування труб, чорнове розточування, об'ємне штампування, свердлення та чорнове зенкерування).

В свою чергу, інші процеси, або вимагають введення підготовчих операцій, або складні за кінематикою чи малопродуктивні (розвертання, глибоке свердлення, внутрішнє шліфування, хонінгування, чистове розточування, різальне протягування) [3].

Сутність групової (прогресивної, змінної) схеми протягування (рис. 2) полягає у наступному.

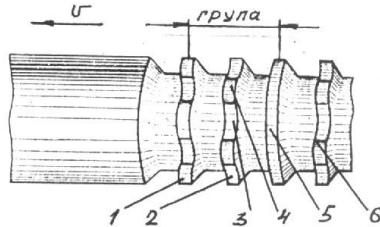


Рис. 2. Секція протяжки з груповою схемою різання [3]

Основну частину загального припуску (90...95%) видаляють зубці чорнкової та напівчистої секцій, які об'єднані у групи по 3...5 зубців у кожній. Перші зубці 1 і 2 мають однаковий діаметр, причому кожен з них працює з товщиною зрізу, який дорівнює величині припуску для всієї групи.

За рахунок стружкоподільчих викружок 3, розміщених у шаховому порядку навпроти різальних окрайок 4, здійснюється поперечний поділ припуску на поздовжні стрічки шириною 5...15 мм.

Окремий елемент стружки має майже прямокутний переріз без ребра жорсткості і добре згортається у валик, що раціонально заповнює стружкову канавку. Усе сказане дозволяє з несуттєвими допущеннями класифікувати роботу окремої різальної окрайки зуба при груповій схемі протягування як процес низькошвидкісного квазивільного ортогонального різання [3,4].

Останній зачисний зуб 5 виготовляється без викружок і, з метою запобігання утворення при його роботі суцільної кільцевої стружки, виконується на 0,01...0,02 мм меншим по діаметру, ніж інші зубці секції. Найуразливішим місцем інструменту при груповій схемі протягування є задня поверхня зуба в районі точки 6, яка розмежовує головну різальну окрайку 4 і допоміжну різальну окрайку викружки 3.

У перехідній зоні інтенсивність спрацювання зубців протяжки у 2...3 рази вища, ніж на інших ділянках задньої поверхні, і саме тому слугує критерієм затуплення. При різальному протягуванні переважають механічні види спрацювання (абразивний та адгезійний), що пояснюється низькими температурами різання [3].

Ще однією особливістю різального протягування як низькошвидкісного, а отже і низькотемпературного ($\Theta = 120^\circ \dots 250^\circ\text{C}$) процесу є обов'язкове наростоутворення.

Згідно з сучасними уявленнями, протягом усього циклу протягування тіло наросту має стабільні форму і об'єм, зазнає дії лише пружних деформацій і фактично є додатковим різальним клином із власними геометричними параметрами (γ , α , ρ та інші.), які значно відрізняються від геометричних параметрів інструменту, отриманих при заточуванні [3-5].

Наріст генерується системою «інструмент-деталь» при адаптуванні останньої до заданих умов різання. Наріст слід розглядати як явище, яке суттєво змінює напружено-деформований стан зони стружкоутворення і, як результат, впливає на усадку (товщину) стружки, силу P_z , діаметр валика стружки і допустимий ступінь заповнення стружкової канавки. Із ряду кількісних характеристик тіла наросту з метою оцінки контактних явищ на передній поверхні слід враховувати співвідношення між радіусом округлення ρ_n і довжиною підшви C_n з довжиною дільниці пластичного контакту C_1 [3]:

$$\rho_n = 0,2 \cdot C_1; \quad C_n = 1,1 \cdot C_1 \quad (1)$$

Важлива закономірність процесу стружкоутворення в умовах існування наросту полягає в тому, що в межах останнього дотичні напруження визначаються умовою пластичності, а не законом зовнішнього тертя, тобто інтенсивність дотичних напружень дорівнює межі текучості матеріалу деталі [3].

У той же час за межами тіла наросту, тобто на дільниці пружного контакту стружки з передньою поверхнею інструменту, дотичні напруження змінюються саме за законом зовнішнього тертя.

На процес різання суттєво впливає холодне деформаційне зміцнення матеріалу деталі різноманітними методами, яке передуює механічній обробці.

Типові комбіновані протяжні інструменти

Сучасне інструментальне виробництво використовує оптимальні конструкції інструменту для певних конкретних умов машинобудування та металообробки [4].

До такого виду інструментів, очевидно, слід віднести також комбіновані протяжки та інші складні інструменти, що працюють за кінематичною схемою протягування, надзвичайно висока

продуктивність якого забезпечується одночасною експлуатацією багатьох робочих окrajок загальною довжиною від кількох сотень до кількох тисяч міліметрів.

Комбіновані протяжки можуть стати базою для створення рельєфоутворювальних інструментів, розглянемо найбільш відомі конструктивні схеми таких протяжок [4].

Деформуюче-різальна протяжка (рис. 3.) складається з переднього хвостовика 1, деформуючих елементів 2, розмежованих між собою дистанційними втулками 3, і посаджених на оправку 4, та різальної частини 5, що з'єднується з останньою за допомогою зварювання.

Протяжка має такі частини:

Різальна секція виготовляється із швидкорізальної сталі Р6М5 за групою схемою з урахуванням попереднього холодного деформаційного зміцнення оброблювального матеріалу (ОМ) та параметрів хвилі позаконтактної деформації, а також поздовжнього ділення стружки у випадку протягування глибоких отворів [4].



Рис. 3. Деформуюче-різальна протяжка: передня напрямляюча – А; деформуюча секція – Б; проміжна напрямляюча – В; чорнова – Г; допоміжна – Д; чистова – Е; калібруюча – Ж частина різальної секції 5; задня напрямляюча – З

Профілі стружкових канавок нормальної довжини (а) та видовженої (б) комбінованої протяжки показано на рис. 4 [4].

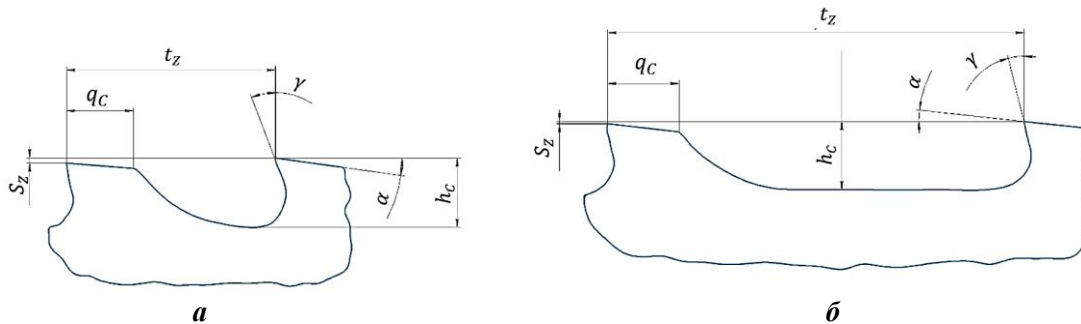


Рис. 4. Профілі стружкових канавок комбінованої протяжки

Для розрахунку розмірів стружкових канавок використовують наступні співвідношення [4]:

$$h_c \geq 1,13 \sqrt{S_z l_z K}; \quad (2)$$

$$r_c = 0,5 h_c; \quad R_c = 2 h_c; \quad g_c = h_c; \quad (3)$$

$$t_z = 0,5 h_c (6,4 - tg \gamma); \quad (4)$$

де l_z – довжина шляху різання; $1/K$ – допустимий ступінь заповнення стружкової канавки, який для більшості оброблюваних матеріалів знаходиться в межах 0,2...0,6.

При протягуванні глибоких отворів, коли використання протяжок зі стружковими канавками нормальної довжини неможливе через недостатню міцність інструменту на розтяг, слід використовувати видовжені канавки, глибину яких слід визначати із умов міцності протяжки по небезпечному перерізу, який проходить по основі канавки першого зуба. Далі, здійснивши обчислення за залежностями (2-4), слід знайти величину кроку зубців для видовженої канавки [5].

$$t_z = 0,5 h_c (4,4 - tg \gamma + 2 l_0 / l_z); \quad (5)$$

де l_0 – довжина деталі; l_z – допустима довжина протягування для умов формування одного валика стружки.

Дана протяжка, придатна для обробки отворів діаметром 20...100 мм з пластичних матеріалів (переважно сталей) твердістю НВ 100...400 при значеннях $1/K = 0,2...0,6$, завдяки чому може стати базовою при розробці інструменту для рельєфоутворення. Однак, це може бути перспективним лише у випадку вирішення проблеми поділу припуску при протягуванні глибоких отворів, а також при умові послаблення інтенсивності спрацювання головних різальних окrajок зубців на їх границі зі стружкоподільними викружками [5].



Для протягування круглих отворів застосовують метод комбінованого протягування за допомогою збірного інструменту, оснащеного твердосплавними елементами з виступами на периферії, які при пересуванні протяжки видавлюють поздовжні пази на поверхні деталі на всю глибину припуску.

Розміщені слідом зубці мають суцільну різальну окрайку і видаляють стружку шириною 5...12 мм. Перевагою методу є підвищення стійкості інструменту і деяке укорочення довжини різальної секції. Проте, оскільки між працюючою і непрацюючою частинами різальної окрайки виникають граничні явища, подібні відомому ефекту утворення “вусів” на задній поверхні різця, проблему рівностійкості зубця в даному випадку вирішити також не вдалось. Крім того, метод є непридатним для виготовлення деталей малої та середньої жорсткості, тобто некорпусних [5,6].

Стружкоподільний деформуючий елемент розміщують на підшипникові ковзання з можливістю повертання при протягуванні. В результаті припуск під наступну обробку різанням суцільним зубцем ділиться нахиленими до осі деталі канавками, кут нахилу яких розраховується таким чином, щоб кожна точка передньої поверхні здійснювала роботу різання на однаковій довжині, яка повинна бути меншою, ніж задана довжина протягування. Завдяки цьому підвищується рівномірність спрацювання зубців і, як наслідок, продуктивність протягування на 20...25%. У всьому іншому даний метод має спільні недоліки з попереднім також закладені в ньому обмеження співвідношення ширини одиначної частини припуску до довжини протягування не дозволяють використовувати кути нахилу робочих окрайок деформуючих елементів понад 12° [5].

Використання для обробки отворів діаметром понад 50 мм збірної різальної секції комбінованих протяжок. Кожен зуб цієї секції виконується із суцільною робочою окрайкою із зносостійкого матеріалу і розміщується на оправці, спільній для усіх робочих елементів. Розрахунок жорсткості клина зубців, який дозволяє визначити радіальні пружні переміщення різальної окрайки під навантаженням для заданих умов обробки: точності і шорсткості поверхні отвору деталі, механічних властивостей матеріалу деталі і геометричних параметрів зуба. Розрахунок дає можливість знаходити значення переднього кута інструмента, які є оптимальними за оброблюваністю пластичних матеріалів при протягуванні. Для більшості матеріалів ці значення знаходяться в межах $\gamma = 30^\circ \dots 40^\circ$. Недоліком описаної конструкції є її складність і можливість використання лише для протягування отворів значного діаметру [5].

Висока стійкість різальної протяжки, забезпечується за рахунок зміщення зубців із суцільною окрайкою відносно осі інструменту та їх нахилу до цієї осі.

Сутність методу протягування, який реалізується за допомогою такого інструменту, полягає в наступному.

Оскільки діаметр кожного зубця D_z в різальній секції менший від діаметра отвору деталі на подвійну величину зміщення $2e$, то при парній кількості зубців сусідні з них працюють діаметрально протилежними окрайками. При цьому суміжні пари повинні розміщуватись таким чином, щоб проекції ліній, які з'єднують центри зубців кожної пари, на площину, перпендикулярну осі протяжки, були повернуті одна відносно одної на кут $\varphi_c = 2\pi/n$, де n – число зубців.

У секціях з непарним n центр кожного наступного зубця зміщується по дузі кола в одному напрямку відносно центра попереднього на кут $\varphi_c = \pi(n-1)/n$. Завдяки цій особливості конструкції протяжки кожен зуб працює лише частиною своєї суцільної різальної окрайки.

При цьому стружка має сегментоподібну форму у перерізі, а найбільша розрахункова висота поздовжнього залишкового гребінця h_d визначається за формулою [5]:

$$h_d = 0,5D_z + \left(1 - \cos \frac{\varphi_c}{2}\right) - \sqrt{0,25D_z^2 - e^2 \sin^2 \frac{\varphi_c}{2}}; \quad (6)$$

Залишкові гребінці видаляються чистовим зубцем (зубцями), які установлені на протяжці без зміщення. Нахил зубців відносно осі дозволяє поліпшити геометричні параметри інструмента і плавність роботи.

Головна ж перевага запропонованого методу полягає в тому, що після затуплення робочої частини зубця шляхом повороту останнього на осі на кут $2\pi(1-n)$ можна включити в роботу нову гостру частину різальної окрайки, повторивши цю процедуру $(n-1)$ раз до першої переточки.

Проте недоліки методу і конструкції протяжки (незбалансованість сили різання P_z уздовж різальної окрайки, стрибки сили P_z на початку та в кінці роботи кожного зубця, складність конструкції і обслуговування) є причиною того, що дане технічне рішення не знайшло широкого використання [5, 6].

3. Мета та завдання дослідження

Метою даного дослідження є визначення мікротвердості поверхні циліндричної деталі при деформаційному протягуванні

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати такі завдання:

- Визначити сутність групової (прогресивної, перемінної) схеми протягування.
- Дослідити механіку руйнування (поділу) стружки за допомогою попередньо сформованої системи технологічних канавок (регулярних макрорельєфів);
- З врахуванням отриманої інформації, зробити висновки.

4. Виклад основного матеріалу

Дослідження процесів внутрішнього протягування є складною технічною проблемою, оскільки зона обробки, як правило, недоступна для прямих спостережень.

Основою експериментальних стендів є тензометричний метод фіксування деформації і переміщень від дії сил, що виникають в процесах протягування, стругання, вільного точіння та рельєфоутворення. В подальшому сигнал від тензодатчиків підсилювався та фіксувався за допомогою шлейфового осцилографа, ПЕОМ чи візуально. Експерименти по виявленню закономірностей механіки процесу різання проводять на стендах, створених на базі горизонтально-протяжного, поперечно-стругального, вертикально-фрезерного та токарного універсального верстатів з використанням вимірювального модуля, що складається з трьохкомпонентного динамометра УДМ-600, підсилювача сигналів тензодатчиків ТОПАЗ 3-02 та шлейфового осцилографа Н 071.2. Один з таких стендів показано на рис. 5.

На даному стенді динамометр закріплено на столі верстата, а зразок ОМ зафіксовано на столику динамометра. Оправка з інструментом прикріплюється до шпинделя верстата, причому шпиндель застопорюється від обертання. Головний рух зі швидкістю $V=0,02$ м/с здійснюється механізмом прискореного руху стола верстата, а товщина зрізу S_z устанавлюється за допомогою вертикального переміщення останнього [7].

На рис. 5 показано також тензостанцію і осцилограф, які разом з динамометром утворюють мобільний вимірювальний модуль, який є універсальним, оскільки може використовуватись для досліджень на інших верстатах. Це видно із рис. 6, де показано експериментальний стенд на базі токарного універсального верстата, зокрема зону обробки в момент тарирування трьохкомпонентного динамометра за допомогою еталонного динамометра ДОСМ-0,5.

На цьому стенді, на відміну від стенда, показаного на рис. 6, швидкість обробки регулюється ступінчасто в широкому діапазоні ($V = 0,02 \dots 0,2$ м/с), а товщина зрізу устанавлюється рухом поперечної подачі супорта, на якому замість різцетримача устанавлено динамометр із експериментальним інструментом. Зразок досліджуваного матеріалу закріплюється в патроні або у центрах верстата. На стенді, створеному на базі поперечно-стругального верстата, швидкість різання регулювалась безступінчасто [7].



Рис. 5. Експериментальний стенд на базі вертикально-фрезерного верстата з вимірювальним модулем [7]

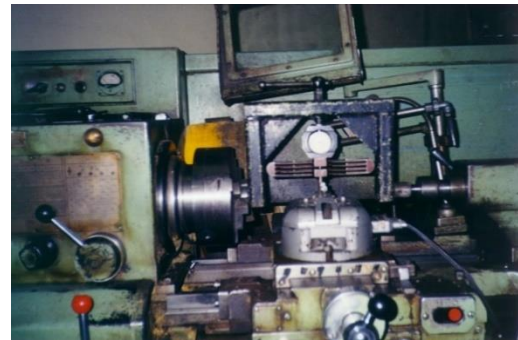
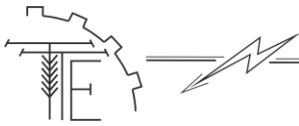


Рис. 6. Експериментальний стенд на базі токарного універсального верстата (тарування динамометра УДМ-600) [7]

Зразки для досліджень було виготовлено із наступних матеріалів:

- сталь 10 вуглецева конструкційна ферритно-перлітна, у стані поставки (круглий прокат діаметром 100 мм); механічні характеристики: $\sigma_b = 365$ МПа, $\sigma_{0,2} = 235$ МПа, $\delta = 35\%$, $\psi = 51\%$, $HV = 1150$ МПа;



- сталь 35 вуглецева конструкційна ферритно-перлітна, у стані повного відпалу (круглий прокат діаметром 80 мм); механічні характеристики: $\sigma_b = 510$ МПа, $\sigma_{0,2} = 320$ МПа, $\delta = 21\%$, $\psi = 46\%$, $HV = 1600$ МПа;
- сталь 45 вуглецева конструкційна ферритно-перлітна якісна, у стані повного відпалу (круглий прокат діаметром 80 мм); механічні характеристики: $\sigma_b = 610$ МПа, $\sigma_{0,2} = 355$ МПа, $\delta = 14\%$, $\psi = 38\%$, $HV = 1850$ МПа;
- сплав АК6 деформований алюмінієвий у стані скороченого відпалу (круглий прокат діаметром 60 мм); механічні характеристики: $\sigma_b = 260$ МПа, $\sigma_{0,2} = 155$ МПа, $\delta = 14\%$, $\psi = 38\%$, $HV = 640$ МПа;
- сталь 35 у вигляді гарячекатаної труби перерізом 95x12 і 95x10, у стані повного відпалу (механічні властивості відповідали характеристикам круглого прокату для сталі 35, які наведено вище).

На рис. 7 подано криві течії досліджуваних матеріалів. Усі матеріали для виявлення впливу деформаційного зміцнення на процеси обробки різанням зміцнювались за допомогою деформуючого протягування з деформаціями до $\varepsilon = 0,35$ чи одноосного стискування. При цьому було досягнуто збільшення мікротвердості у 1,1...2,1 рази.

Моделювання процесу вільного ортогонального різання зміцненого матеріалу в умовах змінної ширини зрізування виконувалось на круглих або призматичних зразках з макрорельєфом, попередньо нанесеним на поверхню з потрібними розмірами a , b , η елементарної площадки (рис. 8).

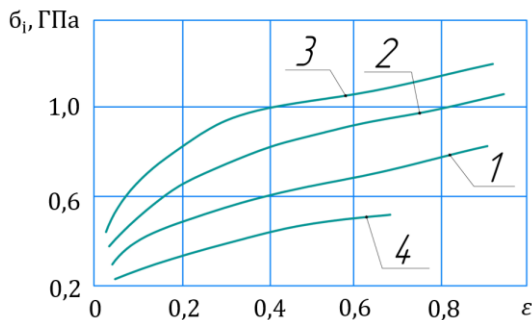


Рис. 7. Криві течії сталей 10 (1), 35 (2) і 45 (3) та алюмінієвого сплаву АК6 (4)

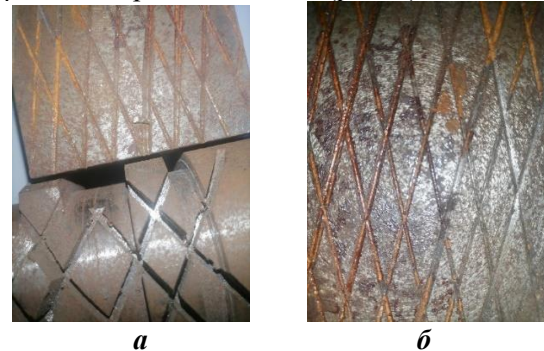


Рис. 8. Круглі (а) та призматичні (б) зразки ОМ для досліджень з попередньо нанесеним макрорельєфом

Частину лабораторних досліджень та виробничі випробування було проведено на заготовках із стандартних гарячекатаних труб із сталі 35.

Інструменти для дослідів було виготовлено із швидкорізальної сталі марки Р6М5 (процеси рельєфоутворення та різання) та із спеченого твердого сплаву марки ВК15 (деформуюче протягування). Сплав ВК15 після спікання досліджувався на міцність, на згин і твердість. Ці характеристики мали наступні значення: $\sigma_{зг} \geq 1950$ МПа; $HRA \geq 85$ [7, 8].

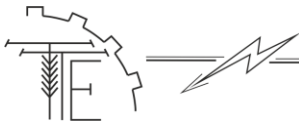
Розміри і форма твердосплавного інструмента забезпечувались за допомогою шліфування і полірування кругами та пастами із синтетичних алмазів. Основні фізико-механічні характеристики сталі Р6М5, якими визначались функціональні характеристики різців з плоскою передньою поверхнею для моделювання протягування струганням, двохзубих різців зі стружковими канавками, деформуючих елементів та зубців самообертальних рельєфоутворювальних секцій, були наступними: $HRC 64...65$, $\sigma_{зг} = 360$ МПа [7].

Заточка і переточка усіх видів швидкорізального інструменту здійснювалась за допомогою абразивного інструменту із кубічного нітриду бору. У той же час видалення слідів контакту стружки на передній поверхні після чергового експерименту при дослідженні механіки різання, а також підтримання значень радіуса округлення інструмента на рівні початкових значень здійснювалось за допомогою алмазної пасту зернистістю 1/0 на чавунних пластинах-притирах.



Рис. 9. Експериментальний інструмент для дослідження процесу примусового стружкоутворення ($\gamma = 15^\circ$; $\alpha = 1^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $h_c = 5$ мм) [7]

На рис. 9 показано експериментальний інструмент, за допомогою якого моделювались процеси примусового стружкоутворення при різальному протягуванні.



На стенді, поданому на рис. 5, оправка з інструментом закріплюється в шпинделі верстата.

Явище позаконтактної деформації при чорновому деформуючому протягуванні може суттєво впливати, як на процес рельєфоутворення, так і на розміри і точність отвору деталі взагалі. Методика вимірювання, що ґрунтується на поздовжньому скануванні профілю хвилі позаконтактної деформації за допомогою спеціального шупа, оснащеного тензодатчиком [7].

Ці вимірювання здійснюються за допомогою спеціального пристрою, що спочатку рухається разом з інструментом, а потім у потрібний момент зупиняється, при цьому деформуючий елемент разом з хвилею позаконтактної деформації в цей момент продовжує рухатись.

З метою спрощення процесу отримання інформації про основні розміри хвилі позаконтактної деформації (l_2 , l_3 , h_2 або U_0) необхідно використовувати рельєфоутворювальні елементи, тобто здійснювати необхідні вимірювання безпосередньо в процесі комбінованого протягування. При цьому про розміри хвилі можна судити, маючи фактичні розміри контурної канавки рельєфу і вагу стружки.

Для визначення дійсної глибини контурної канавки рельєфу при відомій масі G стружки застосовуємо рівняння [8]:

$$h = \frac{2G}{\pi d n \gamma_m t g \varphi \sqrt{1 + t g \eta}}; \quad (7)$$

де n – повне число обертів зуба рельєфоутворювального елемента; γ_m – густина оброблюваного матеріалу.

Величина радіального переміщення оброблюваної поверхні U_x на будь-якій ділянці хвилі позаконтактної деформації може бути знайдена як різниця глибини канавок макрорельєфу при розташуванні зуба за межами хвилі (h) і в зоні дії останньої (h_x) [8, 9].

$$U_x = h - h_x; \quad (8)$$

З метою забезпечення однакових оптимальних значень переднього кута уздовж усієї різальної окрайки, передню поверхню складних інструментів для нарізання різьби, нахилених шлиців, зубців шестерень тощо слід виконувати гвинтовою.

Очевидно, це стосується також комбінованих деформуюче-різальних блоків для отримання глибоких канавок складного профілю повного регулярного макрорельєфу (ПРМ).

Кут ω нахилу передньої поверхні у цьому випадку визначається із залежності [8]:

$$\omega = \frac{\pi}{2} - \eta; \quad (9)$$

В цілому напружено-деформований стан зони стружкоутворення для усіх досліджених оброблюваних матеріалів при різальному протягуванні в умовах змінного припуску характеризується невеликою різницею між максимальними та мінімальними значеннями дотичних напружень (в межах 15%...30%), кутами зсуву $\varphi = 25^\circ \dots 35^\circ$ та коефіцієнтами усадки стружки по довжині і товщині $\xi = 2,2 \dots 3,2$ при несуттєвому збільшенні її ширини (до 2%), причому сама зона звужується до розмірів, які дозволяють без суттєвих похибок апроксимувати її площиною.

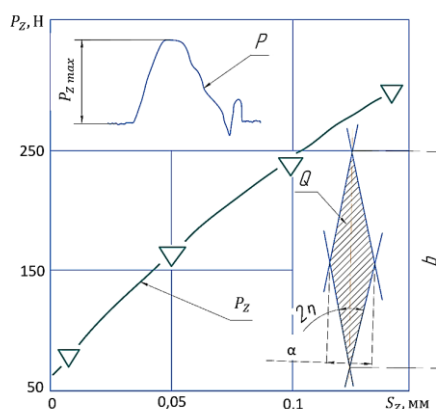


Рис. 11. Залежність сили різання P_z від товщини зрізування S_z при протягуванні сталі 35 після деформаційного зміцнення ($HV=2100$ МПа): P – осцилограма сили різання; Q – одинична частина припуску, яка оконтурена гвинтовими канавками: $a = 0 \dots 12$ мм; $V = 0,13$ м/с; $S_z = 0,05$ мм;

PI – сталь Р6М5, $\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 2^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $\rho = 7$ мкм; середовище – сульфозфрезол-Р

Закони розподілу дотичних напружень уздовж контакту стружки з передньою поверхнею подібні для зміцненої та незміцненої сталі. На ділянці пластичного контакту їх величина постійна,

оскільки визначається пластичністю оброблювального матеріалу. Тому дотичні напруження для сталі після деформаційного зміцнення вищі на цій ділянці.

В умовах пружного контакту, де немає наросту, дотичні напруження поступово знижуються по усій довжині контакту аж до границі відриву стружки від передньої поверхні інструменту. Закон зміни коефіцієнта тертя уздовж контакту визначається сумісним впливом дотичних напружень і контактної тиску. Починаючи з ділянок, що безпосередньо межують з різальною окрайкою інструмента, цей коефіцієнт збільшується і на границі пластичного та пружного контакту зростає в 2...2,5 рази. Далі досягнуті значення залишаються практично незмінними [9].

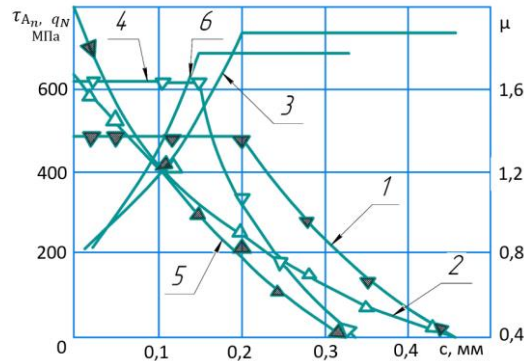


Рис. 12. Контактні характеристики на передній поверхні інструменту при вільному ортогональному різанні сталі 35 (1, 2, 3 - $HV=1600$ МПа; 4, 5, 6 $HV=2100$ МПа): qN – контактний тиск (2, 5); τF_n – дотичні напруження (1, 4); μ – коефіцієнт тертя (3, 6); $a_l = 6,3$ мм (1, 2, 3); 6,7 мм (4, 5, 6); $V = 0,13$ м/с; $S_z = 0,05$ мм; PI – сталь Р6М5, $\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 20^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $\rho = 7$ мкм

Дослідження процесу вільного формування валика стружки інструментом з плоскою передньою поверхнею показали, що на цей параметр впливають товщина зрізу, марка оброблюваного матеріалу, а також ступінь деформаційного зміцнення. Розміри валика стружки, а також здатність останньої формувати плоску чи просторову спіраль мають велике значення для тих процесів різання, кінематика яких не дає можливості для вільної евакуації стружки із зони стружкоутворення.

В першу чергу це стосується внутрішнього протягування, оскільки діаметр валика стружки є визначальним фактором для допустимого ступеня заповнення стружкової канавки протяжком. Наші дослідження, результати частини яких подано на рис. 13, підтверджують сказане. Збільшення твердості оброблюваного матеріалу на 50...60% за допомогою деформаційного зміцнення із середніми значеннями деформації ($\varepsilon = 10...50\%$) призводить до зменшення діаметра валика стружки на 40...50%, що в свою чергу, забезпечує поліпшення умов заповнення стружкової канавки [9].

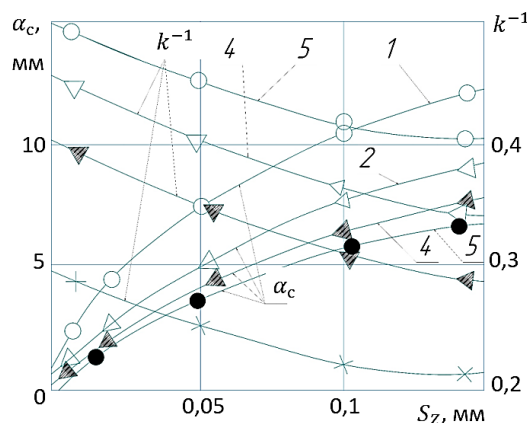


Рис. 13. Залежності діаметра валика стружки d_c , що формувався вільно, та допустимого ступеня заповнення стружкової канавки K^{-1} глибиною 5 мм від товщини зрізування S_z при протягуванні сталі 10 (1 - $HV=1150$ МПа; 2 - $HV=1900$ МПа); сталі 35 (4 - $HV=2100$ МПа) і сталі 45 (5 - $HV=2300$ МПа): $V = 0,13$ м/с; PI – сталь Р6М5, $\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 2^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $\rho = 7$ мкм; середовище – сульфозфрезол-Р

Так, для сталі 10 допустимий ступінь заповнення канавки збільшується з 0,2...0,25 до 0,3...0,35. Подібна тенденція спостерігається також і при підвищенні вмісту вуглецю у конструкційних феритно-

перлітних сталях, яке супроводжується збільшенням твердості. Ряд цих сталей у порядку поліпшення оброблюваності виглядає так: сталь 10, сталь 35, сталь 45. Збільшення товщини зрізу в межах $S_z = 0,01 \dots 0,14$ призводить до зростання діаметра валика стружки від $d_c = 1 \dots 2$ мм до $7 \dots 12$ мм з одночасним погіршенням умов заповнюваності стружкової канавки, що характеризується зниженням параметра K^{-1} на $10 \dots 30\%$.

Експерименти показали, що для усіх досліджених марок сталей єдиним значущим і універсальним фактором, який впливає на діаметр валика стружки, є її товщина, яка залежить від сумісного впливу коефіцієнта усадки і товщини зрізу.

Дослідження стану поверхні деталей після комбінованого протягування дало наступні результати. Точність отворів за кривизною твірної знаходилась в межах $0,1 \dots 0,15$ мм/м, а по діаметру – Н7...Н9. Профіль контурних канавок макрорельєфу практично не відрізняється від профілю рельєфоутворювальних елементів, що працюють за деформуючою, різальною і деформуюче-різальною схемами. Вивчення фотознімків макрорельєфу у плані показало практичне співпадання характеристик останнього з характеристиками запроєктованого рельєфу [9].



Рис. 14. Фрагмент макрорельєфу, одержаний на гільзі ($d = 50$ мм; $L = 500$ мм) із алюмінієвого сплаву АК-6 ($\sigma_B = 270$ МПа; $\sigma_{0,2} = 160$ МПа; $\delta = 13\%$) комбінованою протяжкою з гвинтовими рельєфоутворювальними елементами. Характеристики ПРМ: $h = 1,5$ мм; $a \times b = 18 \times 18$ мм; $\eta = 45^\circ$; $2\phi = 60^\circ$; $r = 0,1$ мм; $T_p = 92\%$

На рис.14, де показано один із фрагментів ПРМ, видно, що контурні канавки перетинають під кутом η нахилу елемента поздовжні мікрориски, характерні для протягування.

Таким чином, кінематика, режими протягування і параметри комбінованого інструменту дозволяють точно відтворити на поверхні деталі запроєктовані рельєф, опорну поверхню і мережу контурних канавок.

При особливо високих вимогах до шорсткості поверхні деталі, процес комбінованого протягування доцільно доповнити окремою фінішною операцією на основі холодного пластичного деформування, наприклад, розкатуванням [9].

Дослідженнями за методом індентування поверхневого шару на мікротвердомірі після кожної складової комбінованого протягування (деформуючого протягування, рельєфоутворення

та різального протягування) установлено, що поверхневі шари опорної площі і контурних канавок отримують деформаційне зміцнення у $1,3 \dots 2$ рази.

При цьому найбільші значення мікротвердості спостерігаються у поверхневому шарі товщиною до $0,05 \dots 0,1$ мм, на який діють усі робочі елементи комбінованої протяжки. У той же час, більш глибокі шари і серцевина деталі отримують зміцнення до 30% лише від наскрізної деформації роздавання при деформуючому протягуванні (рис. 15).

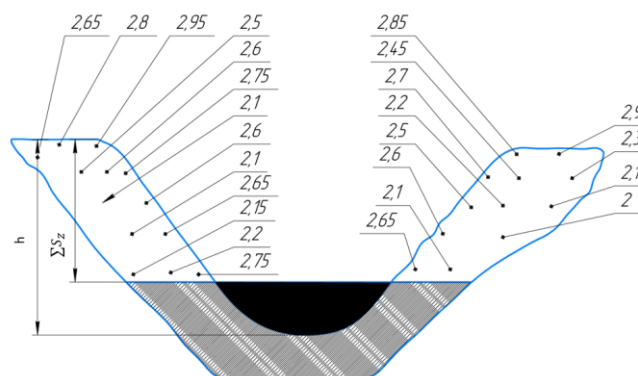


Рис. 15. Розподіл мікротвердості (ГПа) по профілю канавки (х90), отриманій за допомогою комбінованої протяжки. На мікрофотографії показано залишкову частину канавки після видалення припуску ΣS_z різальною секцією

Дослідження залишкових напружень було оцінюючим і мало на меті визначити їх знак і порядок значень. Визначалась лише перша складова δ_r зміни діаметра отвору і зовнішнього діаметру заготовки після



кожної із операцій комбінованого протягування. Це дозволило зробити висновок про утворення результуючого поля стискуючих тангенціальних залишкових напружень, максимальна величина яких сягає $(0,5 \dots 0,9) \sigma_T$.

5. Висновки

Найбільш відомі технологічні методи формування канавок, призначених для поліпшення процесу різання зокрема протягування, відзначаються низькою продуктивністю (розточування з великим кроком), вузьким діапазоном характеристик канавок (протягування за допомогою деформуючих елементів фасонного профілю), обмеженою глибиною канавок (до 0,2 мм, – дискретне протягування), жорсткими вимогами до матеріалу деталі та високою напруженістю процесу (редукування на фасонних оправках), складністю реалізації та співрозмірністю глибини канавки з амплітудою коливань (процеси, інтенсифіковані ультразвуком), недостатньою дослідженістю (метод отримання гвинтових канавок самообертальними деформуючими елементами за схемою ковзання).

Для проведення експериментів вибрані пластичні конструкційні сталі марок 10, 35, 45, а також деформівний алюмінієвий сплав АК-6, з яких виготовлялись круглі, призматичні та трубчасті зразки у стані поставки, зміцнені холодною пластичною деформацією та з попередньо нанесеним макрорельєфом. Експериментальні інструменти та комбіновані протяжки для дослідно-виробничих випробувань були виготовлені із твердого сплаву BK15 та швидкорізальної сталі Р6М5.

Досліджено механіку руйнування стружки при зрізуванні припуску, попередньо поділеного технологічними канавками, і показано зв'язок між профілем та глибиною останніх і характеристиками НДС в зоні стружкоутворення (відносним зсувом, усадкою стружки, кутом зсуву, переднім кутом, контактними процесами на передній поверхні).

Список використаних джерел

1. Серeda Л. П., Паладійчук Ю. Б., Будяк Р. В. Вплив дисипативних властивостей матеріалів протяжного інструменту на якість обробки гільз гідроциліндрів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2012. № 2 (66). С. 87 – 89.
2. Paladiichuk Y. Study of characteristics of growth formation after deformation strength during deforming strength. *Architecture Medical sciences Technical science Physics and mathematics*. 2021. №2 (89). P. 30–35.
3. Шейкін С. Є., Студенець С. Ф., Мельниченко В. В., Мельниченко Я. В. Технологія відновлення карданих валів з застосуванням градієнтного деформаційного зміцнення. *Високі технології в машинобудуванні*. 2016. Вип. 1 (26). С. 118–125.
4. Posviatenko E., Posviatenko N., Budyak R., Shvets L., Paladiichuk Y., Aksom P., Rybak I., Sabadach B., Hryhorychen V. Influence of a material the technological factors on improvement of operating properties of machine parts by reliefs and film coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5/12 (95). P. 48–56.
5. Паладійчук Ю. Б., Кордонський В. А. Обґрунтування механіки руйнування стружки при протягуванні циліндричних поверхонь з припуском. *Вібрації в техніці та технології*. 2020. № 4 (99). С. 73–84.
6. Paladiichuk Y. Forming of makrorelief is at reaching of internal surfaces of cylinder purveyance of power hydrocylinders. *Modern engineering and innovative technologies*. 2019. Issue 10. Part 1. P. 74–79.
7. Скоркін А. О., Кондратюк О. Л., Шелковий О. М., Пермяков О. А. Підвищення ефективності протягування за рахунок косокутного різання в зоні деформування. *Машинобудування*. 2017. 20. С. 41–47.
8. Nemyrovskiy Ya., Shepelenko I., Posviatenko E., Tsekhanov Yu., Polotnyak S., Sardak S., Paladiichuk Y. Desining the structures of solid-alloy elements for broaching the holes of significant diameter based on the assessment of their strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 3.(7-105), P. 57–65.
9. Бандура В. М., Будяк Р. В. Дослідження фізико-механічних властивостей поверхні гільз після протягування. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. № 1.5 (67). С. 38–40.

References

- [1] Sereda, L.P., Paladiichuk Yu.B., Budyak R. V. (2012). Vpliv disparativnih vlastivostej materialiv protyazhnogo instrumentu na yakist obrobki gilz gidrocilindriv. *Vibrations in engineering and technology*, 2 (66). 87 – 89. [in Ukrainian].
- [2] Paladiichuk, Y. (2021). Study of characteristics of growth formation after deformation strength during deforming strength. *Architecture Medical sciences Technical science Physics and mathematics*. 2 (89). 30–35. [in English].
- [3] Shejkin, S.Ye., Studenec, S.F., Melnichenko, V.V., Melnichenko, Ya.V. (2016). Tehnologiya vidnovlennya kardannih valiv z zastosuvannyam gradiyentnogo deformacijnogo zmichnennya. *Visoki tehnologiyi v mashinobuduvanni*, 1 (26). 118–125. [in Ukrainian].
- [4] Posviatenko E., Posviatenko N., Budyak R., Shvets L., Paladiichuk Y., Aksom P., Rybak I., Sabadach B., Hryhorychen V. (2018). Influence of a material the technological factors on improvement of operating



- properties of machine parts by reliefs and film coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/12 (95). P. 48–56. [in English].
- [5] Paladiychuk, Yu.B., Kordonskij, V.A. (2020). Obruntuvannya mehaniki rujnuvannya struzhki pri protyaguvanni cilindrichnih poverhon z pripuskom. *Vibrations in engineering and technology*, 4 (99). 73–84. [in Ukrainian].
- [6] Paladiichuk, Y. (2019). Forming of makrorelefov is at reaching of internal surfaces of cylinder purveyance of power hydrocylinders. *Modern engineering and innovative technologies*, 10 (1). 74–79. [in English].
- [7] Skorkin, A.O., Kondratyuk O.L., Shelkovij O.M., Permyakov O.A. (2017). Pidvishennya efektyvnosti protyaguvannya za rahunok kosokutnogo rizannya v zoni deformuvannya. *Mashinobuduvannya*, 20. 41–47. [in Ukrainian].
- [8] Nemyrovskiy, Ya., Shepelenko, I., Posvitenko, E., Tsekhanov, Yu., Polotnyak, S., Sardak, S., Paladiichuk, Y. (2020). Desining the structures of solid-alloy elements for broaching the holes of significant diameter based on the assessment of their strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7-105). 57–65. [in English].
- [9] Bandura, V.M., Budyak, R.V. (2014). Doslidzhennya fiziko-mechanichnih vlastivostej poverhni gilz pislya protyaguvannya. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 1.5 (67). 38–40. [in Ukrainian].

RESEARCH OF THE MICROHARDNESS OF THE SURFACE OF A CYLINDRICAL PART DURING DEFORMATION

It is known that when processing plastic materials by cutting, chip grinding is a serious problem. The formation of a stable, strong draining chip is a sign of low machinability of the material of the part and requires the use of special means and methods that would ensure the separation of the chip or allowance that is cut.

This issue is especially relevant in the case of cutting drawing as a low-speed process, which is characterized by intensive overgrowth and a high coefficient of chip shrinkage, and therefore the strength of the latter. Today, there are a number of original developments of several scientific schools, which implement the idea of preliminary division of the allowance during drawing by creating a network of technological chip-splitting grooves.

The process of internal drawing, in particular drawing of round deep holes, must necessarily take place under conditions of forced chip separation or allowance. At the same time, the so-called transverse division of the chips, i.e., division along the perimeter of the hole, is usually carried out due to structural elements on the broach teeth and today is not too difficult a problem. However, there are certain reserves in this direction as well, in particular those related to increasing the stability of the tool.

This article considered the technological function of the reliefs, which consists in the forced division of the cut allowance with contour grooves. An analysis of the advantages and disadvantages of the most common processes for obtaining round holes in hollow blanks and parts is carried out. The essence of the group (progressive, variable) stretching scheme is described.

Typical combined extension tools are considered. Given formulas for calculating the dimensions of chip grooves. The first component δ_p of the change in the diameter of the hole and the outer diameter of the workpiece after each of the combined drawing operations is characterized.

Key words: detail, banding, microhardness, relief formation, deformation drawing.

F. 9. Fig. 15. Ref. 9.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Веселовська Наталія Ростиславівна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: wnatalia@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9399-6721>).

Паладійчук Юрій Богданович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Агроінженерії та технічного сервісу» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: rewet@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4257-9383>).

Телятник Інна Анатоліївна – аспірантка, Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: inna201098@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2998-1506>).

Nataliia Veselovska – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Machines and Equipment of Agricultural Production of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: wnatalia@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9399-6721>).

Yuriy Paladiychuk – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Agroengineering and Technical Service of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: rewet@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4257-9383>).

Inna Telyatnik – postgraduate of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnychna st., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: inna201098@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2998-1506>).