

**Руткевич В. С.**

к.т.н., ст. викладач

**Вінницький національний
аграрний університет****Rutkevych V.****Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.9.048.6****DOI: 10.37128/2306-8744-2020-2-7****МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ
КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ
ІНСТРУМЕНТА З ДЕТАЛЛЮ ІЗ
НАКЛАДАННЯМ ОСЬОВИХ
УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ**

Досліджено та змодельовано процес ультразвукового видавлювання різі з накладанням ультразвукових коливань. На основі реологічної моделі деформування ідеального пружно-пластичного тіла розроблені залежності для розрахунку контактних тисків і питомої сили тертя. При проведенні даного дослідження з метою спрощення математичної моделі, було прийнято припущення про те що, явище поверхневого зміцнення мало впливає на величину контактного тиску і силу тертя при пластичному деформуванні.

Дана математична модель описує складний рух інструмента (обертальний і коливальний рух мітчика). Система отриманих залежностей, що описує вплив амплітуди коливань, напрямку коливань, швидкості деформування та механічних властивостей оброблюваного матеріалу на величину контактного тиску, дозволяє розрахувати параметри процесу пластичного деформування із накладанням ультразвуку. Завдяки такому опису можна отримати значення контактного тиску та сил тертя для кожної ділянки діаграми навантаження.

При аналізі отриманих результатів було виявлено, що із зростанням амплітуди коливань зменшується час контакту інструменту з оброблюваною поверхнею, тому контактний тиск, питоме тертя осьових та крутильних коливань за період відповідно зменшується у межах зміни досліджуваних факторів.

Отримана залежність для визначення діаметра отвору при видавлюванні різі з накладанням осьових коливань, що враховує пружні властивості матеріалу заготовки. Дана залежність дозволить визначити діаметр отвору і допуск на його виготовлення в залежності від розмірів і конструкції мітчика, розмірів різі, механічних властивостей матеріалу заготовки, режимів обробки та величини ультразвукових коливань.

Перевагою даного дослідження є детальний аналіз контактної взаємодії інструмента із деталлю і врахування механічних властивостей оброблюваного матеріалу, що дає можливість обрати режими обробки і забезпечити максимальну продуктивність роботи.

Ключові слова: різь, амплітуда коливань, мітчик, частота, інструмент, ультразвук, деталь.

Постановка проблеми. В даний час перед машинобудівниками України поставлена задача зниження металоємності створюваного устаткування і машин, підвищення коефіцієнта

використання металу, комплексна механізація і автоматизація виробничих процесів. Вирішенню цього завдання значною мірою сприяє вдосконалення традиційних, а також



освоєння нових високопродуктивних методів обробки металів.

Для підвищення ефективності механічної обробки все більш широке застосування знаходять методи обробки засновані на комбінованому впливі декількох видів енергії. До одного з таких методів відноситься обробка із застосуванням вимушених ультразвукових коливань. В результаті численних досліджень було встановлено, що значний ефект застосування енергії ультразвуку виявляється при різанні багатолезовим інструментом, наприклад при різанні різними інструментами. Накладення на інструмент вимушених ультразвукових коливань при нарізанні різи дозволяє підвищити продуктивність праці, період стійкості різального інструменту, точність одержуваної різи, а також поліпшити якість поверхневого шару [1, 2].

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності отримання внутрішніх різей пластичним деформуванням за допомогою накладання ультразвукових коливань на інструмент. Це дасть можливість, на основі дослідження механіки процесу, виробити рекомендації по основних параметрах технологічного процесу.

Для реалізації даної мети необхідно розв'язати ряд задач:

– дослідити контактну взаємодію інструмента з деталлю при видавлюванні внутрішніх різей з накладанням на інструмент або деталь ультразвукових коливань;

– розробити методики розрахунку контактних тисків і питомої сили тертя при видавлюванні різи з накладанням ультразвукових коливань;

– визначити, який з факторів найбільше впливає на зниження контактного тиску та визначити вплив даного фактора на величину питомої сили тертя.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливістю процесу нарізування різи з ультразвуковими коливаннями є те, що при накладенні на різуючий інструмент осьових ультразвукових коливань відбувається ударно-циклічна взаємодія різальних кромки з бічною поверхнею профілю різальної деталі (рис. 1, а), а при накладенні на інструмент ультразвукових коливань в радіальному напрямку ударно-циклічному впливу піддаються додатково і западини різи (рис. 1, б). При цьому оброблювана поверхня піддається додатковому зміцнюючому впливу. При обробці з тангенціальними коливаннями така взаємодія не відбувається, так як напрямок коливань збігається з вектором швидкості різання [1, 3].

Значний внесок у дослідження процесу нарізування різи з накладанням на інструмент

ультразвукових коливань присвячені роботи наступних авторів: В.К. Асташева [1], В.І. Захарова, Б.А. Кравченка, А.М. Розенберга [4], А.І. Маркова [5], М.С. Нерубая, Д. Кумабе [6], В.В. Головкина [7], В.І. Шевченка, Е.К. Посвятенка, В.В. Турича [8], Н.Р. Веселовської, Р.Д. Ісковича-Лотоцького та інших українських та закордонних дослідників.

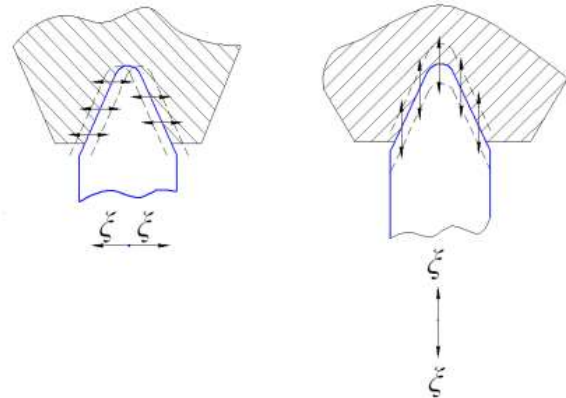


Рис. 1. Схема нарізування різи з накладанням ультразвуку:
а – осьові коливання, б – радіальні коливання

Найбільш детально цей процес досліджувався в роботах А.І. Маркова [4,5]. У представлених результатах досліджень показано, що при нарізуванні внутрішніх різьб мітчиками з осьовими ультразвуковими коливаннями змінюються такі параметри різання, як дійсна швидкість різання, перетин зрізаного шару, а також дійсні кути різання.

Основним позитивним фактором при нарізанні різи мітчиками є те, що застосування ультразвуку дозволяє зменшити крутний момент різання на 10-50 %. Основні дослідження проводилися для різьби М6-М20 з амплітудою коливань 5-10 мкм. Частота ультразвукових пристроїв перебувала в межах 18-22 кГц, тому, що пристрої працюють тільки на резонансній частоті (для кожного пристрою своя резонансна частота). При цьому позитивний ефект ультразвукового впливу встановлений для широкого гами досліджуваних матеріалів, а саме для конструкційної сталі 45, нержавіючих сталей 10X18H9T і X18H19, жароміцних сплавів EI654, EI867, EI835, а також титанових сплавів BT3-1, BT9 та інших. Крім зменшення значень крутного моменту різання вдалося підвищити продуктивність обробки (в 1,5-2 рази), зменшити число застосовуваних мітчиків в комплекті (як правило, на один мітчик), підвищити точність різьб і зменшити шорсткість обробленої поверхні. У зв'язку з високою ефективністю ультразвукового методу нарізування різи для умов серійного та масового



виробництва, були впроваджені спеціальні різьбонарізні верстати.

Ефективність ультразвукового впливу найбільш детально була вивчена при точінні і, відповідно, цьому процесу присвячено найбільшу кількість публікацій [3, 6, 10]. У цих роботах представлені дослідження впливу вимушених ультразвукових коливань різного напрямку, частоти і амплітуди на процес різання і формування поверхневого шару. Також встановлено вплив ультразвукових коливань на розмірну точність і зміну властивостей технологічного середовища. Всіма авторами відзначений позитивний ефект ультразвукового впливу при точінні, що виявляється в зменшенні усадки стружки і збільшенні її елементності, зниженні сил тертя на контактних поверхнях інструменту і, відповідно, сил різання в середньому в 1,5-2 рази. При аналізі якості поверхневого шару при точінні різних матеріалів встановлено зниження шорсткості оброблюваної поверхні на 20-30 %, зменшення розтягуючих залишкових напружень або збільшення стискаючих залишкових напружень майже в 2 рази.

Однією з виявлених переваг різання з ультразвуком є підвищення працездатності використовуваного ріжучого інструменту в кілька разів (в середньому 2-4 рази).

Японський дослідник Д. Кумабе також провів комплексне дослідження впливу вібраційного впливу (застосовувалися коливання в діапазоні 10-40 кГц) на процес точіння алюмінію, сталі і чавуну [6]. Автором досліджувався процес вільного різання, при якому було встановлено зниження сил різання, шорсткості обробленої поверхні, зникнення явища наросту на ріжучій кромці різця і т.д. При цьому був розроблений і виготовлений комплекс спеціальних ультразвукових пристроїв.

У роботах [4, 9] представлені результати дослідження застосування ультразвуку при фрезеруванні. Значна кількість досліджень присвячено фрезеруванню високоміцних матеріалів, обробка яких викликає серйозні труднощі. Введення в зону різання ультразвукових коливань амплітудою до 10 мкм дозволяє значно підвищити ефективність даного процесу. При цьому також відбувається зменшення сил різання, температури в зоні різання, шорсткості поверхні і т.д. Відзначено, що різні по напрямку ультразвукові коливання впливають по різному на напружено-деформований стан поверхневого шару, наприклад, при радіальних коливаннях стискаючі залишкові напруження збільшуються в 1,5-2 рази [9, 10].

Таким чином, актуальність проблеми в науковому плані полягає в визначенні

закономірностей формування якості різі безпосередньо в процесі обробки і розробці технології керування процесом ультразвукового різання для забезпечення високих експлуатаційних показників виробів. В практичному плані актуальним є розробка способів і пристроїв для підвищення якості різання при обробці з використанням різних за напрямком і впливом ультразвукових коливань.

Результати досліджень. Робочий процес виготовлення різі із накладанням ультразвуку полягає у наступному: одночасно з головним рухом (обертанням навколо осі) і рухом подачі інструменту надаються коливання в осьовому напрямку з частотою 20–22 кГц і невеликою (декілька мікрометрів) амплітудою [8,11, 12].

При обертанні мітчика з кроком різі P_t і коловою швидкістю V та одночасному коливанню його в напрямку осі деталі з частотою f і амплітудою ζ рівняння руху мітчика повздовж осі деталі описується наступною залежністю

$$u(t) = \frac{V \cdot P_t \cdot t}{\pi \cdot D} + \zeta \cdot \sin \omega \cdot t, \quad (1)$$

де V – колова швидкість; P_t – крок різі; t – поточний час; D – середній діаметр різі; ζ – амплітуда коливань; $\omega = 2\pi f$, де f – частота коливань.

Рух мітчика повздовж осі деталі призводить до впровадження його зубців у внутрішню поверхню деталі по нормалі до твірної профілю різі.

$$u_n(t) = \left(\frac{V \cdot P_t \cdot t}{\pi \cdot D} + \zeta \cdot \sin \omega \cdot t \right) \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \alpha / 2, \quad (2)$$

де φ – кут твірної забірної конуса мітчика; α – кут профілю різі.

Переміщення (2) при контактуванні зубців мітчика й поверхні заготовки викликає контактні тиски p (Рис.2).

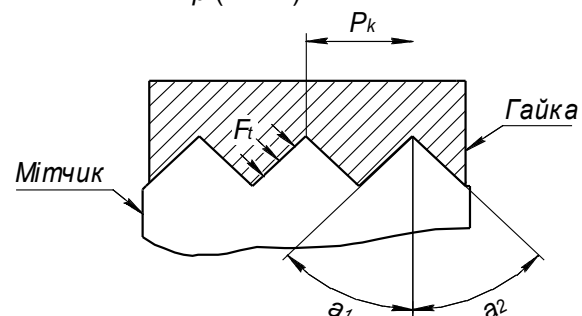


Рис. 2. Контактні тиски, які діють на виток забірної частини мітчика

Так як функція (2) має періодичний



характер, в процесі видавлювання різі будуть мати місце три періоди деформації, а саме: пружної, пластичної та період розвантаження.

По аналогії з [4, 8] розглянемо діаграму навантаження ідеального пружно пластичного тіла, яка дозволяє пов'язати контактний тиск p з переміщенням u і швидкістю u_{nm} інструменту (Рис. 3).

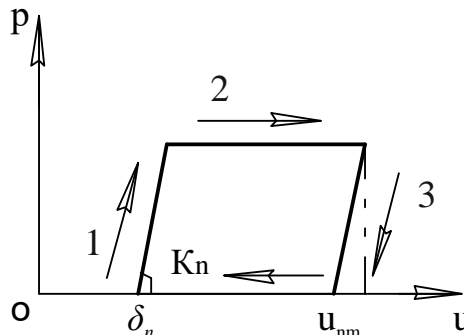


Рис. 3. Діаграма навантаження ідеального пружно пластичного тіла

На діаграмі (Рис. 3) показано: 1 – зона пружного навантаження; 2 – зона пластичної деформації; 3 – зона розвантаження; δ_n – координата початку контактування інструменту і деталі; K_n – жорсткість лінійної ділянки в напрямку нормальному до твірної зуба мітчика; u_{nm} – максимальна швидкість переміщення інструменту на протязі періоду коливань значення функції (2).

Схема процесу видавлювання різі з повздожніми коливаннями показана на Рис. 4.

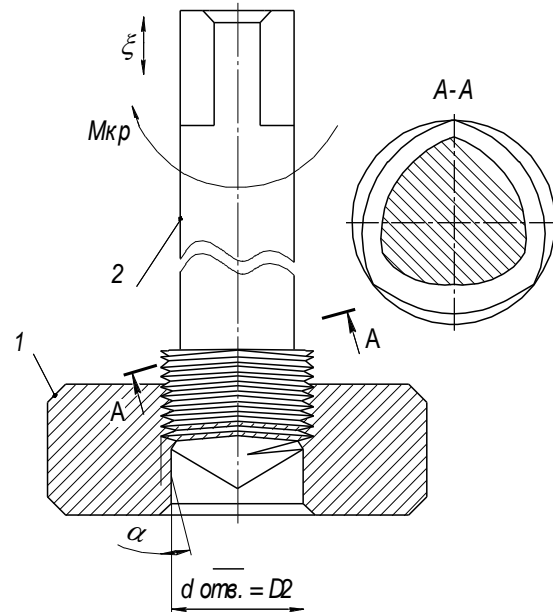


Рис. 4. Схема різевидавлювання з повздожніми коливаннями: 1 – виріб; 2 – мітчик

Вираз що описує характеристику навантаження матеріалу деталі інструментом, який рухається по закону (2), має вигляд:

$$p(u_n, \dot{u}_n) = \begin{cases} 0 & u_n \leq \delta_n & \dot{u}_n \geq 0 \\ k_n(u_n - \delta_n) & \delta_n \leq u_n \leq \delta_n + p/k_n & \dot{u}_n \geq 0 \\ p & \delta_n + p/k_n \leq u_n \leq u_{nm} & \dot{u}_n \geq 0 \\ p + k_n(u_n - u_{nm}) & u_{nm} - p/k_n \leq u_n \leq u_{nm} & \dot{u}_n \leq 0 \\ 0 & u_n \leq u_{nm} - p/k_n & \dot{u}_n \leq 0, \end{cases} \quad (3)$$

де u_{nm} – максимальна швидкість переміщення тіла на протязі періоду значення

функції (2), розраховується за наступною залежністю

$$u_{nm} = \zeta \cdot \text{tg} \varphi \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \left[\frac{V \cdot P_t}{\pi \cdot D \cdot \zeta \cdot \omega} \arccos \left(-\frac{V \cdot P_t}{\pi \cdot D \cdot \zeta \cdot \omega} \right) + \sqrt{1 - \left(\frac{V \cdot P_t}{\pi \cdot D \cdot \zeta \cdot \omega} \right)^2} \right]$$

де δ_n – координата початку контактування поверхні інструмента та деталі.

ультразвукових коливань контактний тиск згідно (3) має вигляд періодичної функції

При видавлюванні різі з накладанням



$$p(t) = \begin{cases} k_n \left[\left(\frac{V \cdot P_t \cdot t}{\pi \cdot D} + \zeta \cdot \sin \omega \cdot t \right) \operatorname{tg} \phi \cos \frac{\alpha}{2} - \delta_n \right] & t_1 \leq t \leq t_2 \\ p & t_2 \leq t \leq t_3 \\ p + k_n \left[\left(\frac{V \cdot P_t \cdot t}{\pi \cdot D} + \zeta \cdot \sin \omega \cdot t \right) \operatorname{tg} \phi \cos \frac{\alpha}{2} - u_{nm} \right] & t_3 \leq t \leq t_4 \end{cases} \quad (4)$$

За допомогою теореми імпульсів отримаємо співвідношення, яке пов'язує постійний статичний тиск p з параметрами руху інструмента й характеристиками матеріалу, що обробляється.

де t_1 – початковий період часу; T – період коливань.

Підставивши (4) у (5) і обчислив інтеграл отримаємо:

$$p_c = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} p(t) dt, \quad (5)$$

$$p_c = \frac{k_n}{2 \cdot \pi} \left[\delta \tau_1 - \left(\delta + \frac{p}{k_n} \right) \tau_2 + u_{nm} \tau_3 - \left(u_{nm} - \frac{p}{k_n} \right) \tau_4 + \zeta \cdot \operatorname{tg} \phi \cos \frac{\alpha}{2} (\cos \tau_1 - \cos \tau_2 + \cos \tau_3 - \cos \tau_4) + (\tau_2^2 - \tau_1^2 + \tau_4^2 - \tau_3^2) \frac{V \cdot P_t \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot \omega} \right], \quad (6)$$

де $\tau_i = \omega \cdot t_i$.

Моменти перемикання характеристики (4) t_i визначено із наступних міркувань: нехай за

час t_1 мітчик пройде шлях δ_n , тоді прирівнявши вираз (2) до δ_n , отримаємо:

$$\sin \omega t_1 = \frac{1}{\zeta \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2} \left(\delta_n - \frac{V \cdot P_t \cdot t_1}{\pi \cdot D} \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2 \right). \quad (7)$$

Підставивши значення ωt_1 в (2.7), отримаємо

$$\sin \tau_1 = \frac{1}{\zeta \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2} \left(\delta_n - \frac{V \cdot P_t \cdot \tau_1}{\pi \cdot D \cdot \omega} \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2 \right) \quad (8)$$

Аналогічно, прирівнявши відповідні моменти перемикання характеристики до (2), отримаємо

$$\sin \tau_2 = \frac{1}{\zeta \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2} \left(\delta_n + \frac{p}{k_n} - \frac{V \cdot P_t \cdot \tau_2}{\pi \cdot D \cdot \omega} \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2 \right) \quad (9)$$

$$\tau_3 = \arccos \left(- \frac{V \cdot P_t}{\pi \cdot D \cdot \omega \cdot \zeta} \right); \quad (10)$$

$$\sin \tau_4 = \frac{1}{\zeta \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2} \left(u_{nm} - \frac{p}{k_n} - \frac{V \cdot P_t \cdot \tau_4}{\pi \cdot D \cdot \omega} \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2 \right) \quad (11)$$

Рівняння (8)–(11) справедливі для режимів імпульсного деформування, які реалізуються при умові

$$\zeta \cdot \operatorname{tg} \phi \cos(0,5 \cdot \alpha) \leq p / k_n. \quad (13)$$

$$\zeta \cdot \operatorname{tg} \phi \cos(0,5 \cdot \alpha) \geq p / k_n. \quad (12)$$

значення τ_i визначаються наступними рівняннями:

$$\tau_1 = -\tau_3 = -\arccos \left(- \frac{V \cdot P_t}{\pi \cdot D \cdot \omega \cdot \zeta} \right); \quad (14)$$

Для режимів безперервного деформування, що реалізуються при умові

$$\tau_4 = 2\pi + \tau_1 \quad (15)$$



Для розрахунку контактної тиску необхідно мати значення δ_n , яке знайдемо із наступних міркувань [12]. Залишкова (пластична) деформація за період коливань визначається як:

$$h_o = u_{nm} - \delta_n - \frac{P}{k_n}. \quad (16)$$

Середню швидкість деформування за період коливань визначимо як відношення залишкової деформації (16) до періоду коливань:

$$V_{cp} = \frac{h_o}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \left(u_{nm} - \delta_n - \frac{P}{k_n} \right). \quad (17)$$

Підставивши у (17) величину $\frac{VP_t}{\pi D} \operatorname{tg} \phi \cos \frac{\alpha}{2}$ замість V_{cp} отримаємо:

$$\delta_n = u_{nm} - \frac{P}{k_n} - \frac{2 \cdot V \cdot P_t}{D \cdot \omega} \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \quad (18)$$

Для визначення k_n , яке входить в (6), слід відзначити, що під жорсткістю розуміють таке значення контактної тиску, яке викликає одиницю пружної деформації. Виходячи із цих міркувань, жорсткість визначається як

$$F_m = \eta \frac{k_n}{2\pi} \left[\delta \tau_1 - \left(\delta + \frac{P}{k_n} \right) \tau_2 + u_{nm} \tau_3 - \left(u_{nm} - \frac{P}{k_n} \right) \tau_4 + \right. \\ \left. + \zeta \cdot \operatorname{tg} \phi \cos(0.5 \cdot \alpha) (\cos \tau_1 - \cos \tau_2 + \cos \tau_3 - \cos \tau_4) + \right. \\ \left. (\tau_2^2 - \tau_1^2 + \tau_4^2 - \tau_3^2) \frac{V \cdot P_t \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot \omega} \right] \quad (22)$$

Перевагою даного дослідження є детальний аналіз контактної взаємодії інструмента із деталлю і врахування механічних властивостей оброблюваного матеріалу, що дає можливість обрати режими обробки і забезпечити максимальну продуктивність роботи.

Однією з основних умов, що забезпечує високу якість і точність різевих отворів є

$$k_n = \frac{P}{\varepsilon_{np}} \quad (19)$$

де ε_{np} – пружна деформація різі. У [11] приводиться вираз для визначення пружної деформації

$$\varepsilon_{np} = \frac{P_t p}{4(E + p)} \cos \frac{\alpha}{2} \quad (20)$$

де E – модуль пружності матеріалу деталі.

Підставивши залежність (20) у (21), отримаємо:

$$k_n = 4(E + p) / (P_t \cos(\alpha/2)) \quad (21)$$

Значення контактної тиску p згідно [12, 14] дорівнює $7\sigma_m$ матеріалу, що обробляється. Отже користуючись виведеним співвідношенням (6) можливо розрахувати контактні тиски при видавлюванні різі з осьовими ультразвуковими коливаннями. Вираз для розрахунку питомої сили тертя отримаємо як добуток контактної тиску (6) на коефіцієнт тертя η .

правильний вибір номінального діаметра отвору під різевидавлювання. Більшість відомих емпіричних залежностей, що призначені для визначення діаметра отвору під видавлювання різі, без ультразвукових коливань. В роботі [1] приведена залежність для визначення діаметра отвору при видавлюванні різі з накладанням осьових коливань:

$$d_{oms} = \sqrt{d_3^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{2d_3}{3Ptg\alpha} + \frac{d_{cp}}{Ptg\alpha} + \frac{2A}{P} \right) + d_1^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{2d_1}{3Ptg\alpha} - \frac{d_{cp}}{Ptg\alpha} - \frac{2A}{P} \right)} \quad (23)$$

В цій залежності не враховуються властивості матеріалу заготовки, а також кінематика руху мітчика при накладанні ультразвукових коливань. В формулі (23) осьове переміщення мітчика за рахунок осьових коливань враховується амплітудою

коливань A . На наш погляд такий підхід невірний тому, що сумарний підхід мітчика складається із коливального і поступального рухів.



Рівняння руху мітчика повздовж осі деталей при накладанні осьових коливань описується такою залежністю

$$U(t) = \frac{V \cdot P_t \cdot t}{\pi D} + \xi \sin \omega t, \quad (24)$$

а рівняння руху мітчика при накладанні крутильних коливань

$$U(t) = \frac{P_t}{\pi D} (Vt + \xi \sin \omega t), \quad (25)$$

$$U_{mn} = \frac{V \cdot P_t}{\pi D \omega} \arccos \left(-\frac{V \cdot P_t}{\pi D \xi \omega} \right) + \xi \sqrt{1 - \left(\frac{V \cdot P_t}{\pi D \xi \omega} \right)^2}, \quad (26)$$

$$U_{mk} = \frac{P_t}{\pi D} \left(\frac{V}{\omega} \arccos \left(-\frac{V}{\xi \omega} \right) + \xi \sqrt{1 - \left(\frac{V}{\xi \omega} \right)^2} \right), \quad (27)$$

При накладанні ультразвукових коливань в процесі видавлювання різи спостерігається додаткове видавлювання металу із западин різи на величину U_m .

В роботі [7] виведені залежності для визначення діаметра отвору під видавлювання різи при роботі мітчика з закритим і відкритим контуром, які враховують механічні властивості матеріалу заготовки. Використовуючи їх виведемо залежності для розрахунку діаметра отвору при видавлюванні різи з накладанням осьових і крутильних коливань.

Розрахункова схема для визначення діаметра отвору при обробці різи мітчиком з закритим контуром приведена на рис. 5.

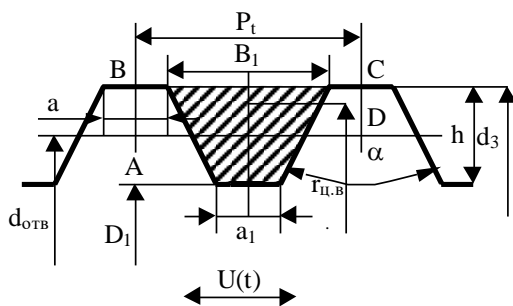


Рис.5. Схема для розрахунку діаметра отвору при обробці різи з ультразвуковими коливаннями мітчиком з закритим контуром

З врахуванням рівності об'ємів видавленого металу і впровадженої в заготовку частини інструмента маємо:

- об'єм кільця з перерізом ABCD

$$V_K = \frac{\pi}{4} (d_3^2 + d_{oms}^2) P_t;$$

де V – швидкість різьвидавлювання; P_t – крок різи; t – поточний час; D – середній діаметр різи; ξ – амплітуда коливань; $\omega = 2\pi f$ – колова частота, де f – частота коливань.

За період коливань мітчик переміщується на величину, яка дорівнює максимальному значенню функції (24), (25).

Вирази для максимального значення функцій (24), (25) мають такий вигляд відповідно:

- об'єм трапеції з основами a_1, b_1 і висотою h
-

$$V_{mpan} = \frac{a_1 + b_1}{2} h \cdot 2\pi r_{u.e.}$$

Прирівнюючи об'єм кільця до об'єму трапеції маємо

$$d_{oms} = \sqrt{\frac{d_3^2 P_t - 4r_{u.e.} h (a_1 + b_1)}{P_t}}, \quad (28)$$

З врахуванням кінематики руху мітчика

$$a_1 = \frac{P_t}{2} - (d_{cp} - D_1) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - U_m;$$

$$b_1 = \frac{P_t}{2} + (d_3 - d_{cp}) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - U_m;$$

$$r_{u.e.} = \frac{d_3}{2} + \left(\frac{d_3 - D_1}{6} \right) \cdot \frac{b_1 + 2a_1}{b_1 + a_1};$$

$$h = \frac{d_3 - D_1}{2}.$$

Для врахування пружних властивостей матеріалу заготовки в формулу (29) замість D_1 слід підставити значення

$$D_1 = d_3 - \frac{2h(E + P)}{E},$$

де $P \approx (7 \dots 8) \sigma_T$ – контактний тиск; E – модуль пружності матеріалу заготовки.

Тоді формула (28) буде мати наступний вигляд



$$d_{ome} = \sqrt{\frac{d_3^2 P_t - 4r_{ц.с.} \cdot \frac{h(E+P)}{E} \cdot (a_1 + b_1)}{P}}, \quad (29)$$

де $a_1 = \frac{P}{2} - \left(d_{cp} + \frac{2h(E+P)}{E} - d_3 \right) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2};$

$$r_{ц.с.} = \frac{d_3}{2} - \frac{h(E-P)}{3E} \cdot \frac{b_1 + 2a_1}{b_1 + a_1}.$$

Однак формулу (29) можна використовувати для визначення мінімального діаметру отвору при роботі мітчиками з закритим контуром.

При видавлюванні різі мітчиками з відкритим контуром в кінцевій стадії процесу течія металу не обмежується внутрішнім діаметром мітчика, тому на вершині різі утворюється кратер глибиною h_1 (Рис.6).

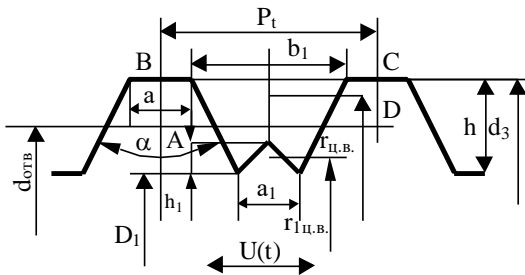


Рис.6. Схема для розрахунку діаметра отвору при обробці різі ультразвуковими коливаннями мітчиком з відкритим контуром

Очевидно, що наявність кратера не дозволяє проводити розрахунок діаметра отвору за формулою (29). В осьовому перерізі площа кратера дорівнює площі трикутника з висотою h_1 і основою a_1 , а його об'єм тоді:

$$V_{кр} = \pi r_{ц.с.} \cdot a_1 \cdot h_1,$$

$$V_{ABCD} = V_{тран} - V_{кр}$$

З врахуванням пружних властивостей матеріалу заготовки, діаметр отвору під різь з відкритим контуром та накладанням ультразвукових коливань, складатиме:

$$d_{ome} = \sqrt{\frac{d_3^2 P_t - 4r_{ц.с.} \cdot \frac{h(E+P)}{E} \cdot (a_1 + b_1) + 4r_{ц.с.} \cdot a_1 \cdot h_1}{P}}, \quad (30)$$

де $h_1 = \frac{mh}{1+m}; m=0,351$ (при $\alpha=60^\circ$);

$$r_{ц.с.} = \frac{D1 - 2h \frac{P}{E}}{2} + \frac{1}{3} h_1.$$

При розрахунку $a_1, b_1, r_{ц.с.}$ значення U_m для поздовжніх коливань береться із (26), а для крутильних коливань із (27).

Підставляючи в формули (29) і (30) граничні значення h , знаходимо граничні розміри отворів.

Таким чином вирази (29) і (30) дозволяють визначити діаметр отвору і допуск на його виготовлення в залежності від розмірів і конструкції мітчика, розмірів різі, механічних властивостей матеріалу заготовки, режимів обробки та величини ультразвукових коливань.

Висновок. В результаті проведених досліджень встановлено, що в разі застосування ультразвукових коливань в радіальному або осьовому напрямку поверхневий шар піддається зміцненню і зі збільшенням амплітуди коливань збільшуються (по модулю) залишкові напруження і деформація поверхневого шару.

Отже, підвищити якість різі можливо за рахунок спрямованого впливу різних видів ультразвукових коливань з метою формування максимальних стискаючих напружень, що дозволить, в кінцевому підсумку, підвищити працездатність різевого з'єднання при змінних навантаженнях.

Розроблена нелінійна математична модель для дослідження процесів пластичного деформування, що складаються із рівнянь переміщення інструмента і рівнянь, що враховують пружно-пластичні властивості оброблюваного матеріалу. Дана структура математичної моделі найбільш повно відображає процеси, що протікають при накочуванні різі із накладанням ультразвукових коливань. Дана математична модель описує складний рух інструмента (обертальний і коливальний рух мітчика). В цих моделях не враховується зміцнення матеріалу гайки в процесі видавлювання тому, що для врахування даного фактору необхідні широкі дослідження процесів зміцнення поверхневого шару при малих пластичних деформаціях.

Отримана залежність для визначення діаметра отвору при видавлюванні різі з накладанням осьових коливань, що дозволяють визначити діаметр отвору і допуск на його виготовлення в залежності від розмірів і конструкції мітчика, розмірів різі, механічних властивостей матеріалу заготовки, режимів обробки та величини ультразвукових коливань.

На даному етапі досліджень даний фактор вважався незмінним, тому в подальшому необхідно проведення додаткових досліджень.



Список використаних джерел

1. Асташев В. К. Влияние ультразвуковых колебаний резца на процесс резания. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 1992. №3. С.81–86.

2. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Калетник Г. Н., Куценко А. Г. Использование прямого метода граничных элементов при исследовании стационарных колебаний пластин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. №1(84). С. 8–14.

3. Берник П. С., Паламарчук І. П., Липовий І. Г. Развитие конструктивных та технологических схем машин для обработки виробів в условиях вільного кинематического зв'язку між деталями та рабочим инструментом. *Вібрації в техніці та технологіях*. 1998. № 2 (6). С. 21–29.

4. Розенберг А. М., Розенберг О. А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания: учебник. К. : Наук. думка, 1990. 320 с.

5. Марков А. И. *Ультразвуковая обработка материалов*. М.: Машиностроение, 1980. 237 с.

6. Кумабэ Д. *Вибрационное резание*. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.

7. Головкин В. В., Трусов В. Н. Исследование работоспособности метчиков при нарезании резьб с применением ультразвуковых колебаний. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2009. № 3. 69–78.

8. Посвятенко Е. К., Турич В. В., Шевченко В. І. Модифікування поверхні деталей машин ультразвуковим методом. *Вісник НТУ*. 2003. № 8 С. 28–33.

9. Асташев В. К. О влиянии высокочастотных вибраций на процессы пластического деформирования. *Машиноведение*. 1983. № 2. С. 3–12.

10. Zhu Z. Q., Lee B., Huang L., Chu W. "Contribution of current harmonics to average torque and torque ripple in switched reluctance machines," *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017. Vol.53, No.3, P.1–9.

11. Turych V., Rutkevych V., Goncharuk N., Ogorodnichuk G. Investigation of the process smoothing with ultrasonic. *Eastern-European Journal of Enterprise technologies*. 2018. Vol. 3/1(93). P. 22–33.

12. Веселовська Н. Р., Турич В. В., Руткевич В. С. Контактна взаємодія інструмента з деталлю у процесах поверхневого пластичного деформування з ультразвуком. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. №2(85). С. 51–58.

13. Турич, В. В., Руткевич В. С. Контактна взаємодія інструмента з деталлю в процесі деформуючого протягування з ультразвуком. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2016. №4(54). С. 71–76.

14. Пат. КМ 101967 Україна. Пристрій для вимірювання параметрів ультразвукових коливань. Опубл. 12.10.2015.

References

1. Astashev, V. K. (1992). Vliianie ultrazvukovykh kolebaniy reztsa na protsess rezaniia [The influence of ultrasonic vibrations of the cutter on the cutting process]. *Problemy mashynostroeniia i nadezhnosti mashin – Problems of mechanical engineering and machine reliability*, 3, 81–86 [in Russian].

2. Adamchuk, V. V., Bulhakov, V. M., Kaletnyk, H. N., Kutsenko, A. H. (2017). Ispolzovanye priamoho metoda hranychnikh elementov pri issledovanii statsyonarnikh kolebaniy plastin [The use of the direct method of boundary elements in the study of stationary oscillations of the plates]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh, Vibration in engineering and technology*, 1(84), 8–14. [In Ukrainian].

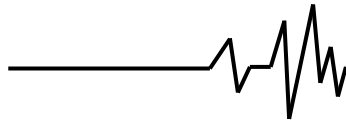
3. Bernyk, P. S., Palamarchuk, I. P. & Lypovyi, I. H. (1998). Rozvytok konstruktyvnykh ta tekhnolohichnykh skhem mashyn dlia obrobky vyrobiv v umovakh vilnoho kinematychnoho zv'iazku mizh detaliamy ta robochym instrumentom [Development of design and technological schemes for processing products in conditions of a free kinematic connection between the parts of the working tool]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh, Vibration in engineering and technology*, 2(6), 21–29 [in Ukrainian].

4. Rozenberh, A. M., Rozenberh, O. A. (1990). *Mekhanika plasticheskoho deformirovaniia v protsessakh rezaniia i deformiruiushcheho protiahivaniia [The mechanics of plastic deformation in cutting and deformation pulling processes]*. K.: Nauk. Dumka. [in Russian].

5. Markov, A. I. (1980). *Ultrazvukovaia obrabotka materialov [Ultrasonic processing of materials]*. Mashinostroenie. [in Russian].

6. Kumabe, D. (1985). *Vibratsionnoe rezanie [Vibration cutting]*. M: Mashinostroenie [in Russian].

7. Holovkin, V. V., Trusov, V. N. (2009). Issledovaniie rabotosposobnosti metchikov pri narezanii rezb z primeneniem ultrazvukovykh kolebaniy [The study of the performance of taps when threading using ultrasonic vibrations]. *Vestnik Samarskoho gosudarstvennogo aerokosmicheskoho universiteta [Bulletin of the Samara State Aerospace University]*, 3, 69–78. [in Russian].



8. Posviatenko, E. K., Turych, V. V., Shevchenko, V. I. (2003). *Modyfikuvannya poverkhni detalei mashyn ultrazvukovym metodom* [Modification of surface of machine parts by ultrasonic method]. *Visnyk NTU [Bulletin of NTU]*, 8, 28–33. [in Ukrainian].

9. Astashev, V. K. (1983). *O vliianii vysokochastotnykh vibratsii na protsessy plasticheskoho deformivaniia* [On the effect of high-frequency vibrations on plastic deformation processes]. *Mashinovedeniie [Machine science]*, 2, 3–12. [in Russian].

10. Zhu, Z. Q., Lee, B., Huang, L., Chu, W. (2017). Contribution of current harmonics to average torque and torque ripple in switched reluctance machines, *IEEE Transactions on Magnetics*, 3, 1–9. [in English].

11. Turych, V., Rutkevych, V., Goncharuk, N., Ogorodnichuk, G. (2018). Investigation of the process smoothing with ultrasonic. *Eastern-European Journal of Enterprise technologies*, 3/1(93), 22-33. [in English].

12. Veselovska, N. R., Turych, V. V., Rutkevych, V. S. (2017). *Kontaktna vzaiemodiia instrumenta z detalliu u protsesakh poverkhnevoho plastychnoho deformuvannya z ultrazvukom* [Contact of the tool with the part in the processes of surface plastic deformation with ultrasound]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh [Vibrations in technology and technology]*, 2, 51–58. [in Ukrainian].

13. Turych, V. V., Rutkevych, V. S. (2016). *Kontaktna vzaiemodiia instrumenta z detalliu v protsesi deformuiuchoho protyahunnia z ultrazvukom* [Contact of the tool with the part in the process of deforming stretching with ultrasound]. *Promyslova hidravlika i pnevmatyka [Industrial hydraulics and pneumatics]*, 4, 71–76 [in Ukrainian].

14. Pat. KM 101967 Ukraina. (2015). *Prystrii dlia vymiriuvannya parametriv ultrazvukovykh kolyvan* [Device for measuring the parameters of ultrasonic vibrations]. *Publ.* 12.10.2015 [in Ukrainian].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА С ДЕТАЛЬЮ С НАЛОЖЕНИЕМ ОСЕВЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Исследован и смоделирован процесс ультразвукового выдавливания рези с наложением ультразвуковых колебаний. На основе реологической модели деформирования идеального упруго-пластического тела разработаны зависимости для расчета контактных давлений и удельной силы трения. При проведении данного исследования с целью упрощения

математической модели, было принято предположение о том, что явление поверхностного упрочнения мало влияет на величину контактного давления и силу трения при пластическом деформировании.

Данная математическая модель описывает сложное движение инструмента (вращательное и колебательное движение метчика). Система полученных зависимостей, описывающий влияние амплитуды колебаний, направления колебаний, скорости деформирования и механических свойств обрабатываемого материала на величину контактного давления, позволяет рассчитать параметры процесса пластического деформирования с наложением ультразвука. Благодаря такому описанию можно получить значение контактного давления и сил трения для каждого участка диаграммы нагрузки.

При анализе полученных результатов было выявлено, что с ростом амплитуды колебаний уменьшается время контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, поэтому контактное давление, удельное трение осевых и крутильных колебаний за период соответственно уменьшается в пределах изменения исследуемых факторов.

Полученная зависимость для определения диаметра отверстия при выдавливании рези с наложением осевых колебаний, учитывающий упругие свойства материала заготовки. Данные зависимости позволяют определить диаметр отверстия и допуск на его изготовление в зависимости от размеров и конструкции метчика, размеров рези, механических свойств материала заготовки, режимов обработки и величины ультразвуковых колебаний.

Преимуществом данного исследования является детальный анализ контактного взаимодействия инструмента с деталью и учета механических свойств обрабатываемого материала, что позволяет выбрать режимы обработки и обеспечить максимальную производительность работы.

Ключевые слова: резь, амплитуда колебаний, метчик, частота, инструмент, ультразвук, деталь.

MODELING THE PROCESS OF CONTACT INTERACTION OF A TOOL WITH A PART WITH A SUPPLEMENT OF AXIAL ULTRASONIC OSCILLATIONS

The process of ultrasonic extrusion of rubber with superposition of ultrasonic vibrations is investigated and modeled. Based on the rheological model of deformation of an ideal elastic-plastic body, dependences have been developed for calculating contact pressures and



specific friction. When conducting this study in order to simplify the mathematical model, the assumption was made that the phenomenon of surface hardening has little effect on the magnitude of the contact pressure and the friction force during plastic deformation.

This mathematical model describes the complex movement of a tool (rotational and oscillatory movement of a tap). The system of obtained dependences, which describes the influence of the amplitude of oscillations, the direction of oscillations, the strain rate, and the mechanical properties of the processed material on the value of the contact pressure, allows one to calculate the parameters of the plastic deformation process with the application of ultrasound. Thanks to this description, it is possible to obtain the value of contact pressure and friction forces for each section of the load diagram.

When analyzing the results, it was found that with an increase in the amplitude of the oscillations, the contact time of the tool with the machined surface decreases, therefore, the

contact pressure, the specific friction of axial and torsional vibrations during the period, respectively, decrease within the limits of the studied factors.

The obtained dependence for determining the diameter of the hole when extruding the rubber with superposition of axial vibrations, taking into account the elastic properties of the workpiece material. These dependences make it possible to determine the diameter of the hole and the tolerance for its manufacture, depending on the size and design of the tap, the size of the rubber, the mechanical properties of the workpiece material, processing conditions and the magnitude of ultrasonic vibrations.

The advantage of this study is a detailed analysis of the contact interaction of the tool with the part and taking into account the mechanical properties of the processed material, which allows you to select processing modes and ensure maximum performance.

Key words: *thread, vibration amplitude, tap, frequency, tool, ultrasound, detail.*

Відомості про авторів

Руткевич Володимир Степанович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: v_rut@ukr.net).

Руткевич Владимир Степанович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры машин и оборудования сельскохозяйственного производства Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечна, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: v_rut@ukr.net).

Rutkevych Volodymyr – Ph.D., Senior lecturer of the Department of Machinery and Equipment for Agricultural Production of Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna Str., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: v_rut@ukr.net).