**Руткевич В. С.**

к.т.н., ст. викладач

**Вінницький національний  
аграрний університет****Rutkevych V.****Vinnitsia National Agrarian  
University****УДК 621.9.048.6****DOI: 10.37128/2306-8744-2020-3-4****РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ  
ПРОЦЕСІВ ВИДАВЛЮВАННЯ  
РІЗИ З НАКЛАДАННЯМ  
УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ  
НА ІНСТРУМЕНТ**

Розглянуто можливість підвищення якості різи за рахунок направленої дії різних видів ультразвукових коливань, з метою формування максимальних стискаючих залишкових напружень, що дозволить в кінцевому випадку, підвищити працездатність різевого з'єднання при змінних навантаженнях.

Досліджено процес різенарізання з використанням вимушених ультразвукових коливань. При складанні математичної моделі процесу видавлювання різи з накладанням ультразвукових коливань на інструмент було прийнято припущення, що явище поверхневого зміцнення мало впливає на величину контактного тиску і силу тертя при пластичному деформуванні. Дане припущення дозволяє спростити математичну модель, шляхом не врахування даного фактору.

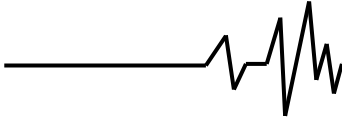
Запропоновано нові методики розрахунку контактного тиску і питомої сили тертя при видавлюванні різи з накладанням осьових, радіальних та крутильних коливань.

Опис процесів деформування з накладанням ультразвукових коливань був здійснений на основі реологічної моделі деформування ідеального пружно-пластичного тіла. У роботі розроблені нелінійні математичні моделі для дослідження процесів пластичного деформування, що складаються з рівнянь переміщення інструмента і рівнянь, що враховують пружно-пластичні властивості оброблюваного матеріалу. Дана структура математичної моделі найбільш повно відображає процеси, що протікають при накопчуванні різи з накладанням ультразвукових коливань.

В результаті досліджень встановлено, що використання примусових ультразвукових коливань при механічній обробці інструментом дозволить суттєво підвищити продуктивність, стійкість інструмента і якість оброблюваної поверхні, особливо при обробці матеріалів з особливими фізико-механічними властивостями.

При дослідженні контактної взаємодії інструмента з деталлю з накладанням ультразвукових коливань осьовому і радіальному напрямках, а також при накладанні крутильних коливань, встановлено, що застосування осьових коливань у середньому на 50 % є ефективнішим.

**Ключові слова:** деталь, внутрішня різь, видавлювання, інструмент, видавлюючий мітчик, ультразвук, точність, продуктивність, амплітуда коливань, частота.



**Вступ.** В сучасному машинобудуванні все більш широке використання займають високоефективні технологічні методи обробки [1]. Технічний прогрес в машинобудуванні багато в чому визначається технологією виготовлення різних деталей і складальних одиниць виробів. При цьому в технологічному циклі виготовлення деталей домінуюча роль належить механічній обробці.

Різеви з'єднання займають значну долю у деталях, що використовуються у машинобудуванні. Але, процес різенарізання характеризується низькою продуктивністю, недостатньою стійкістю інструмента, а також незадовільною якістю отриманих різей і навіть браком відповідальних деталей [2,3].

Одним із напрямків підвищення ефективності механічної обробки є використання вимушених ультразвукових коливань [3]. Використання ультразвукових коливань при нарізанні різі дозволяє підвищити продуктивність процесу, точність виготовлення деталей, а отже і якість та надійність виробів.

В даний час при складанні різних вузлів і агрегатів машин застосовуються різеві з'єднання, від експлуатаційних характеристик яких залежить роботоздатність всієї складальної одиниці. Тому в ряді випадків до відповідальних різевих деталей ставлять підвищені вимоги. Особливо ефективним виявилось застосування ультразвуку при нарізанні різі у важкооброблюваних і високоміцних матеріалах, що дозволило підвищити продуктивність праці, стійкість різенарізного інструменту та змінити якісні характеристики поверхневого шару. Разом з тим, незважаючи на широке використання ультразвукових коливань при нарізанні різі, в даний час практично відсутні дослідження по вивченню впливу різних параметрів ультразвукової дії, зокрема напрямів вимушених ультразвукових коливань, на формування залишкових напружень в різевих деталях, які роблять значний вплив на працездатність при експлуатації в умовах змінних навантажень [1, 3].

Таким чином, актуальність проблеми в науковому плані полягає у визначенні закономірностей формування якості різі безпосередньо в процесі обробки і розробці технології керування процесом ультразвукового різенарізання для забезпечення високих експлуатаційних показників виробів. В практичному плані актуальним є розробка способів і пристроїв для підвищення якості різі при обробці з використанням різних за напрямком і впливу ультразвукових коливань.

**Мета та задачі дослідження.** Метою даної роботи є підвищення ефективності

ультразвукової обробки і якості внутрішніх різей деталей шляхом керування параметрами ультразвукових коливань при нарізанні різі.

Для реалізації поставленої мети були поставлені наступні задачі дослідження:

1. Розробити математичні моделі і методики для розрахунку залишкових напружень, утворюючих в процесі нарізання різі з вимушеними ультразвуковими коливаннями.

2. Виконати дослідження контактної взаємодії інструмента з деталлю при видавлюванні внутрішніх різей з накладанням на інструмент вимушених ультразвукових коливань.

3. Дослідити вплив осьових і крутильних коливань на контактний тиск, питому силу тертя та крутий момент.

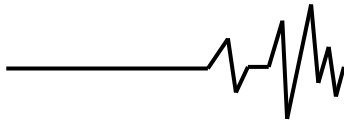
**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даному етапі широке поширення отримала енергія ультразвуку [4, 5]. Використання ультразвукових коливань виявилось особливо ефективним при механічній обробці самих різноманітних матеріалів. Стрімкому розвитку даного напрямку ультразвукової технології в значній мірі сприяли фундаментальні дослідження основоположника даного методу ультразвукової обробки д.т.н., професора А.І. Маркова, запропонувавшего в 1956 році спосіб різання металів з накладанням на інструмент ультразвукових коливань.

А.І. Марковим встановлено, що ефективність дії ультразвуку визначається амплітудою, частотою коливань, їх напрямком, а також фізико-механічними властивостями оброблюваних матеріалів і режимів механічної обробки [6].

На основі представлених досліджень А.І. Марковим запропоновано механізм дії ультразвуку на процес різання, оснований на термічному ефекті ультразвуку і зв'язаного з ним зміни властивостей контактних поверхонь. Він вперше виявив, що ведення у зону різання ультразвукових коливань призводить до зменшення вібрацій технологічної системи і стабілізації процесу різання.

На основі глибокого теоретичного аналізу загального експериментального матеріалу А.І. Марковим було встановлено, що накладання на інструмент ультразвукових коливань показує вплив практично на всі основні характеристики процесу механічної обробки лезовим інструментом, а саме [6, 7]:

- сили різання і тертя на контактуючих поверхнях інструменту і деталі;
- параметри зрізаного шару і процес стружки утворення;
- величину і напрямок дійсної швидкості різання;



- теплові явища в зоні різання;
- якісні характеристики поверхневого шару;
- шорсткість оброблюваної поверхні;
- точність обробки;
- працездатність інструмента.

Істотний внесок в розвиток і дослідження процесу нарізання різи із застосуванням ультразвукових коливань внесли В.А. Волосатов, В.В. Головкін, А.А. Горбунов, В.Н. Захаров, Б.А. Кравченко, Д. Кумабе, В.Д. Мартинов, Е.Н. Михайлюк, М.С. Нерубай, Р.Д. Іскович-Лотоцький, В.І. Шевченко, Е.К. Посвятенко, В.В. Турич, Н.Р. Веселовська та інші вчені [1, 3, 7-9]. У роботах цих авторів представлені результати дослідження впливу вимушених ультразвукових коливань на сили різання і крутний момент, процес стружкоутворення, температуру в зоні різання, стійкість інструменту, шорсткості оброблюваної поверхні і точність нарізаємої різи. У дослідженнях, присвячених вивченню впливу різних за направленням вимушених ультразвукових коливань на формування залишкових напружень в поверхневому шарі при різних видах механічної обробки, зазначено, що напрямок ультразвукових коливань в значній мірі змінює розподіл і величину залишкових напружень. Разом з тим в літературі практично відсутні дані про вплив напрямів вимушених ультразвукових коливань на формування остаточних напружень в поверхневому шарі різевих деталей, а також про вплив цього параметра на граничну амплітуду циклу [1, 4, 6].

На підставі проведеного аналізу поставлена мета роботи і визначено завдання дослідження.

#### **Основні результати досліджень.**

Аналіз існуючих методів отримання внутрішніх різей [3, 6] показує, що одним із перспективних методів, який має значні технологічні можливості, високу продуктивність і створює якість поверхні різи, яка покращує експлуатаційні характеристики різевих з'єднань, є метод пластичного формоутворення (видавлювання) різей безстружковими мітчиками. Однак, є багато факторів, які обмежують його застосування: межа міцності матеріалу заготовки не повинна перевищувати 500 МПа; цим способом важко отримати різь підвищеного ступеня точності для окремих матеріалів; необхідність прикладання значних крутних моментів приводить до руйнування мітчиків малих діаметрів; неможливість використання при виготовленні різевих отворів у деталях із неіржавіючих і жаростійких сталей [6]. На наш погляд ці недоліки можливо усунути

шляхом інтенсифікації процесу видавлювання різи ультразвуком.

В цьому напрямку раніш було проведено багато досліджень [1, 3, 6, 7], однак ні в одному з них не вивчалась контактна взаємодія інструмента з деталлю і не визначались силові параметри процесу, що не дає можливості ефективно використовувати цей метод.

Найбільше застосування ультразвук отримав при обробці внутрішньої різи малого і середнього діаметрів в деталях з жароміцних і титанових сплавів. При наданні різальному інструменту - мітчику ультразвукових коливань (частотою 18–44 кГц) малої амплітуди крутний момент і осьова сила знижуються на 25 – 30 %, поліпшується якість різи. Застосування ультразвуку дозволяє підвищити продуктивність нарізування різи до 3 разів (за рахунок зменшення кількості мітчиків в комплекті) і стійкість інструменту до 1,5–2 рази, а також усунути випадки поломки мітчиків [3, 4, 6].

Ультразвукові коливання дозволяють отримати хорошу якість різи навіть у таких в'язких матеріалах, як мідь. Для ультразвукового нарізання різи мітчиками розроблені спеціальні верстати, а також ультразвукові головки [7]. Останні можна встановлювати на вертикально-свердлильних та радіально-свердлильних верстатах.

Можливе накладання декількох видів ультразвукових коливань на інструмент або деталь: осьових, крутильних, радіальних і комбінованих. Нижче розглянемо ці випадки [6-9].

При виготовленні різи з накладанням ультразвуку одночасно з головним рухом і рухом подачі інструменту надаються коливання в осьовому напрямку з частотою близькою до 20–22 кГц і невеликою амплітудою [1, 5, 6].

Рівняння руху мітчика вздовж вісі деталі при обертанні мітчика з кроком різи  $P_t$  і коловою швидкістю  $V$  та одночасному коливанню його в напрямку вісі деталі з частотою  $f$  і амплітудою  $\zeta$  можна описати наступною залежністю.

Переміщення мітчика повздовж вісі деталі призводить до впровадження його зубців у внутрішню поверхню деталі по нормалі до твірної профілю різи.

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

де  $\varphi$  – кут твірної забірного конуса мітчика;  $\alpha$  – кут профілю різи.

Рух мітчика (1) повздовж вісі деталі при контактуванні зубців мітчика та поверхні заготовки викликає контактні тиски  $p$  (рис. 1).

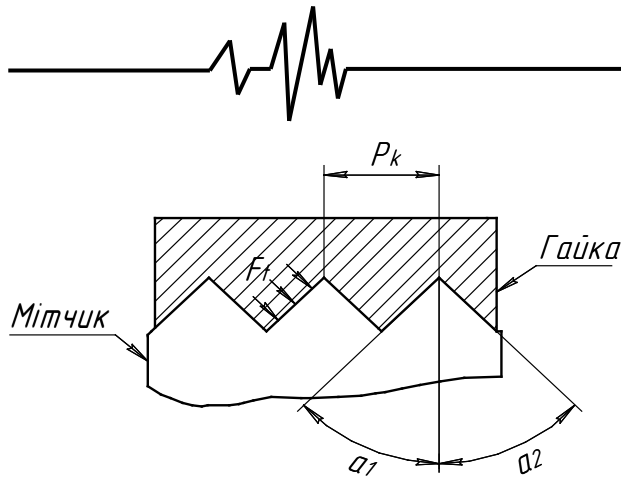


Рис. 1. Схема контактних тисків, що діють на виток забірної частини мітчика

В процесі видавлювання різі з накладанням ультразвукових коливань на інструмент функція (1) має періодичний характер, що призводить до трьох періодів деформації, а саме: пружної і пластичної та період розвантаження [10, 11].

Схему процесу видавлювання різі з повздовжніми коливаннями показана на рис. 2.

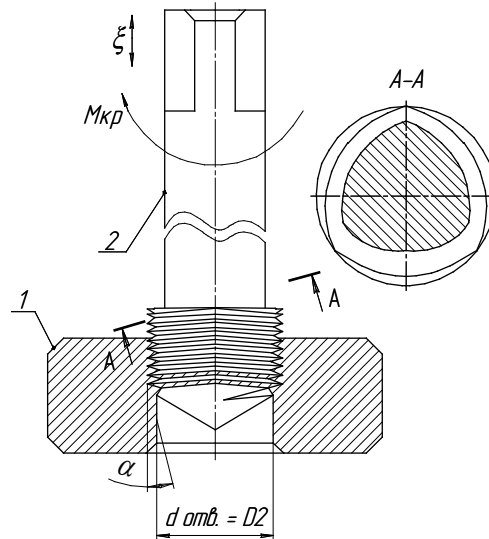


Рис.2. Схема процесу видавлювання різі з повздовжніми коливаннями: 1 – деталь; 2 – мітчик

Характеристику навантаження матеріалу деталі інструментом з ультразвуковим коливанням, який рухається по закону (1), можна виразити виразом:

$$p(u_n, \dot{u}_n) = \begin{cases} 0 & u_n \leq \delta_n & \dot{u} \geq 0 \\ k_n(u_n - \delta_n) & \delta_n \leq u_n \leq \delta_n + p/k_n & \dot{u} \geq 0 \\ p & \delta_n + p/k_n \leq u_n \leq u_{nm} & \dot{u} \geq 0 \\ p + k_n(u_n - u_{nm}) & u_{nm} - p/k_n \leq u_n \leq u_{nm} & \dot{u} \leq 0 \\ 0 & u_n \leq u_{nm} - p/k_n & \dot{u} \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

де  $u_{nm}$  – максимальна швидкість переміщення тіла.

Дана швидкість визначається на протязі

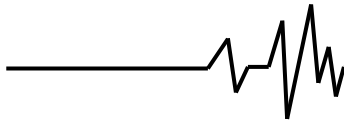
періоду значення функції (2) та визначається за наступною залежністю

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

де  $\delta_n$  – початкова координата взаємодії поверхні інструмента з деталлю.

Контактний тиск при видавлюванні різі з

накладанням ультразвукових коливань має вигляд періодичної функції згідно виразу (2)



$$p(t) = \begin{cases} k_n \left[ \left( \frac{V \cdot P_t \cdot t}{\pi \cdot D} + \zeta \cdot \sin \omega \cdot t \right) \operatorname{tg} \phi \cos \frac{\alpha}{2} - \delta_n \right] & t_1 \leq t \leq t_2 \\ p & t_2 \leq t \leq t_3 \\ p + k_n \left[ \left( \frac{V \cdot P_t \cdot t}{\pi \cdot D} + \zeta \cdot \sin \omega \cdot t \right) \operatorname{tg} \phi \cos \frac{\alpha}{2} - u_{nm} \right] & t_3 \leq t \leq t_4 \end{cases} \quad (3)$$

Для отримання співвідношення, яке пов'язує постійний статичний тиск  $p$  з параметрами руху інструмента й характеристиками матеріалу, що обробляється, скористаємося теоремою імпульсів [12].

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

Після підстановки виразу (3) у (4) та обчисливши його отримуємо:

$$p_c = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} p(t) dt, \quad (4)$$

$$p_c = \frac{k_n}{2 \cdot \pi} \left[ \delta \tau_1 - \left( \delta + \frac{p}{k_n} \right) \tau_2 + u_{nm} \tau_3 - \left( u_{nm} - \frac{p}{k_n} \right) \tau_4 + \zeta \cdot \operatorname{tg} \phi \cos \frac{\alpha}{2} (\cos \tau_1 - \cos \tau_2 + \cos \tau_3 - \cos \tau_4) + (\tau_2^2 - \tau_1^2 + \tau_4^2 - \tau_3^2) \frac{V \cdot P_t \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot \omega} \right], \quad (5)$$

Схема процесу видавлювання різи з накладанням крутильних коливань показана на рис. 3.

Рівняння руху у випадку накладання

$$u(t) = P_t (Vt + \zeta \sin \omega t) / (\pi D) \quad (6)$$

Рух по нормалі до твірної профілю різи:

$$u_n(t) = \frac{P_t}{\pi \cdot D} \operatorname{tg} \phi \cos \frac{\alpha}{2} (Vt + \zeta \cdot \sin \omega \cdot t) \quad (7)$$

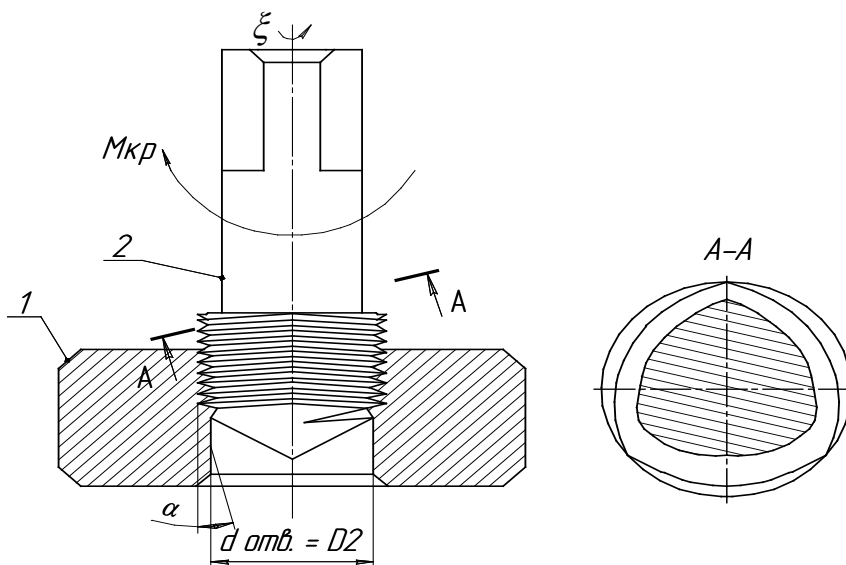
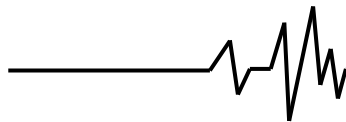


Рис. 3. Схема видавлювання різи з крутильними коливаннями: 1 – деталь; 2 – мітчик



Аналогічно (3), вираз для визначення крутильних коливань має вигляд контактного тиску при різних стадіях навантаження у випадку накладання

$$p(t) = \begin{cases} k_n \left[ \frac{P_t \cdot \text{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2}{\pi \cdot D} (Vt + \zeta \cdot \sin \omega \cdot t) - \delta_n \right] & t_1 \leq t \leq t_2 \\ p & t_2 \leq t \leq t_3 \\ p + k_n \left[ \frac{P_t \cdot \text{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2}{\pi \cdot D} (Vt + \zeta \cdot \sin \omega \cdot t) - u_{nm} \right] & t_3 \leq t \leq t_4 \end{cases} \quad (8)$$

Для випадку крутильних коливань максимальне значення функції (6) визначається наступною залежністю:

$$u_{nm} = \frac{\zeta \cdot P_t \cdot \text{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2}{\pi \cdot D} \left[ \sqrt{1 - (V / (\zeta \cdot \omega))^2} + \frac{V}{\zeta \cdot \omega} \arccos(-V / (\zeta \cdot \omega)) \right]. \quad (10)$$

Значення  $\delta_n$  визначається наступним рівнянням:

$$\delta_n = u_{nm} - p / k_n - 2\pi V / \omega \quad (11)$$

Для режимів імпульсного деформування, які реалізуються при наступній умові

$$\frac{\zeta \cdot P_t \cdot \text{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2}{\pi \cdot D} \geq \frac{p}{k_n} \quad (12)$$

так само, як і для повздовжніх коливань, моменти перемикання характеристики навантаження  $\tau_1$  визначаються наступними рівняннями:

$$\sin \tau_1 = \frac{1}{\zeta} \left( \frac{\pi \cdot D \cdot \delta_n}{P_t \cdot \text{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2} - \frac{V}{\omega} \tau_1 \right) \quad (13)$$

$$\sin \tau_2 = \frac{1}{\zeta} \left( \frac{(\delta_n + p/k_n)\pi D}{P_t \cdot \text{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2} - \frac{V}{\omega} \tau_2 \right) \quad (14)$$

$$\tau_3 = \arccos(-V / (\zeta \cdot \omega)) \quad (15)$$

Для режимів безперервного деформування при умові

$$\frac{\zeta \cdot P_t \cdot \text{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2}{\pi \cdot D} \leq \frac{p}{k_n} \quad (17)$$

моменти перемикання характеристики навантаження визначаються за наступними залежностями:

$$\tau_1 = -\tau_3 = -\arccos(-V / (\zeta \cdot \omega)) \quad (18)$$

$$\tau_4 = 2\pi + \tau_1 \quad (19)$$

Величина  $\tau_2$  визначається залежністю (13).

Вираз для розрахунку питомої сили тертя отримаємо аналогічно (6)

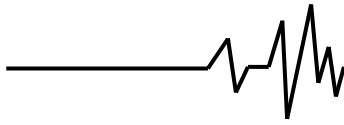
$$F_m = \eta \frac{k_n}{2\pi} \left\{ \delta_n \tau_1 - \left( \delta_n + \frac{p}{k_n} \right) \tau_2 + u_{nm} \tau_3 - \left( u_{nm} - \frac{p}{k_n} \right) \tau_4 + \frac{P_t \cdot \text{tg} \phi \cdot \cos \alpha / 2}{\pi \cdot D} \left[ \zeta (\cos \tau_1 - \cos \tau_2 + \cos \tau_3 - \cos \tau_4) + \frac{V}{2\omega} (\tau_2^2 - \tau_1^2 + \tau_4^2 - \tau_3^2) \right] \right\} \quad (20)$$

Виведений вираз (20) дає можливість розраховувати питому силу тертя як для режимів імпульсного, так і для режимів безперервного деформування.

Моделювання процесу контактної взаємодії інструмента з деталлю з накладанням

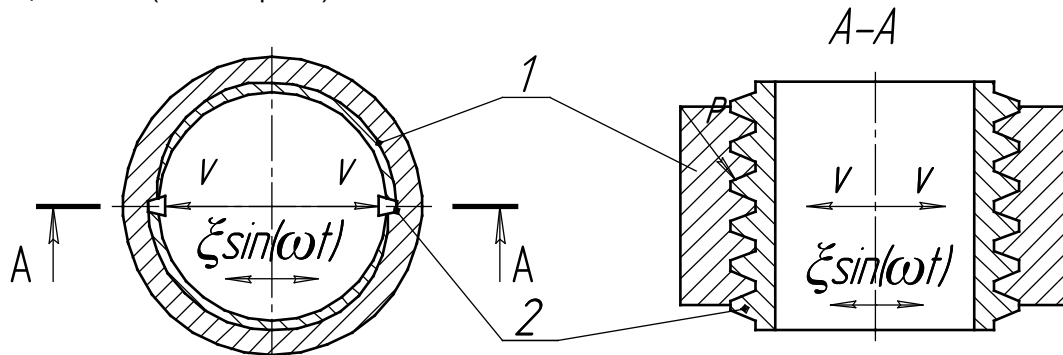
радіальних ультразвукових коливань.

Використання способів видавлювання різі (діапазону різей M24...M60) пов'язане з певними труднощами, а саме необхідністю підведення коливань великої потужності, яка обумовлена великими площами поперечного



перерізу інструмента. В роботі [13] запропонований спосіб видавлювання різі М24...М60 суть якого в наступному. В отвір гайки 1 (рис. 4) вільно вводять корпус інструмента з рівномірно розташованими в ньому деформуючими елементами 2, довжина яких дещо більша (на 4–5 кроків) висоти гайки.

До деформуючих елементів 2 прикладають рівні по величині сили, під дією яких деформуючі елементи рухаються із швидкістю  $V$  і впроваджуються в поверхню отвору гайки одночасно по всій довжині (висоті).



**Рис. 4. Схема видавлювання різі з радіальними коливаннями:**  
1 – гайка; 2 – деформуючі елементи

В той момент, коли робочі вершини деформуючих елементів починають дотикатися поверхні отвору гайки (або інструменту) надають обертовий і поступальний (по кроку різі) рухи. Впровадження деформуючих пластинок викликає виникнення контактних тисків  $p$ , які діють нормально до різеутворюючого профілю деформуючого елемента.

Цей спосіб має беззаперечні переваги перед накочуванням різі різенакочуваними головками, які призначені для виготовлення різі великих діаметрів. Однак виготовлення різі кроком більше 2 мм, а також в гайках із матеріалів твердістю більше НВ 200, цим способом неможливо. Тому для розширення технологічних можливостей цього способу запропоновано накладання ультразвукових

коливань в напрямку впровадження деформуючих елементів в поверхню гайки.

По аналогії з викладеним вище, запишемо рівняння повного руху інструмента

$$u(t) = Vt + \zeta \sin(\omega t). \quad (21)$$

Радіальний рух деформуючих елементів 2 є нормальним до твірної профілю різі

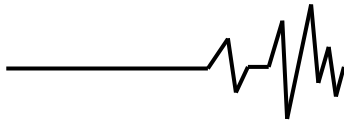
$$u_n(t) = u(t) \sin \frac{\alpha}{2} = (Vt + \zeta \sin \omega t) \sin \frac{\alpha}{2} \quad (22)$$

Характеристика навантаження для цього випадку виглядає аналогічно (2). Вираз для  $u_{nm}$  має наступне значення

$$u_{nm} = \zeta \sin(0.5 \cdot \alpha) \left[ \sqrt{1 - (V / (\zeta \cdot \omega))^2} + V / (\zeta \cdot \omega) \cdot \arccos(-V / (\zeta \cdot \omega)) \right] \quad (23)$$

В цій залежності не враховуються Залежність величини контактного тиску при взаємодії інструмента та деталі має вигляд періодичної послідовності імпульсів (24)

$$p(t) = \begin{cases} k_n \left[ (Vt + \zeta \sin \omega \cdot t) \sin \frac{\alpha}{2} - \delta_n \right] & t_1 \leq t \leq t_2 \\ p & t_2 \leq t \leq t_3 \\ p + k_n \left[ (Vt + \zeta \sin \omega \cdot t) \sin \frac{\alpha}{2} - u_{nm} \right] & t_3 \leq t \leq t_4 \end{cases} \quad (24)$$



Для режимів імпульсного деформування, які реалізуються при амплітуді коливань

$$\zeta \geq \frac{p}{k_n \sin \alpha/2}$$

наступними рівняннями:

$$\sin \tau_1 = \left( \zeta \sin \frac{\alpha}{2} \right)^{-1} \cdot \left( \delta_n - \frac{V \sin \frac{\alpha}{2}}{\omega} \tau_1 \right) \quad (25)$$

моменти перемикання  $t_i$  в (24) визначаються

$$\sin \tau_2 = \left( \zeta \sin \frac{\alpha}{2} \right)^{-1} \cdot \left( \delta_n + p/k_n - \tau_2 \cdot \left( V \sin \frac{\alpha}{2} \right) / \omega \right) \quad (26)$$

$$\tau_3 = \arccos \left( -\frac{V}{\zeta \omega} \right) \quad (27)$$

$$\sin \tau_4 = \left( \zeta \sin \frac{\alpha}{2} \right)^{-1} \cdot \left( u_{nm} - \frac{p}{k_n} - \frac{V \sin \frac{\alpha}{2}}{\omega} \tau_4 \right) \quad (28)$$

Виведені вирази (24)–(28) дають можливість розраховувати контактні тиски при видавлюванні різі з радіальними ультразвуковими коливаннями.

Контактні тиски при видавлюванні різі з накладанням осьових і крутильних коливань визначаються залежностями (5), (6) відповідно, а питома сила тертя залежностями (8), (19).

Результати розрахунків представлені на рис. 5–7. Як видно із розрахунків, осьові коливання суттєво знижують контактний тиск, а крутильні – незначно. В той же час, питома сила тертя значно знижується і в першому, і другому випадках, хоча осьові коливання більш ефективні.

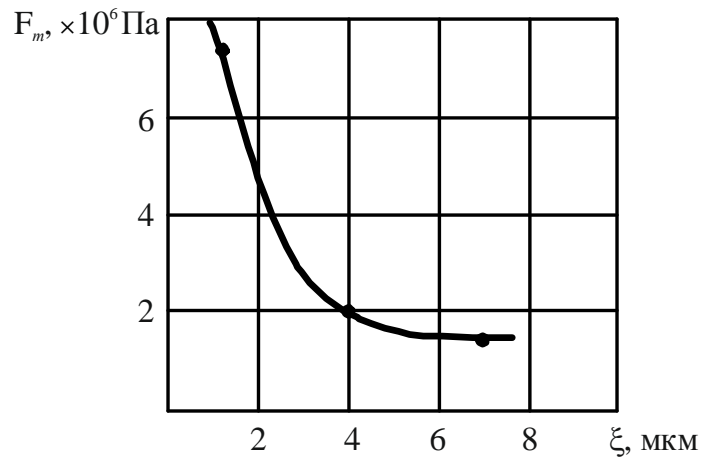


Рис.6. Залежність питомої сили тертя від амплітуди осьових коливань

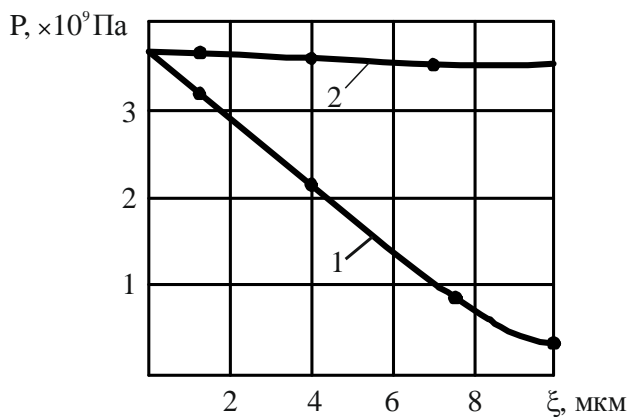


Рис.5. Залежність контактного тиску від амплітуди коливань: 1 – осьові коливання; 2 – крутильні коливання

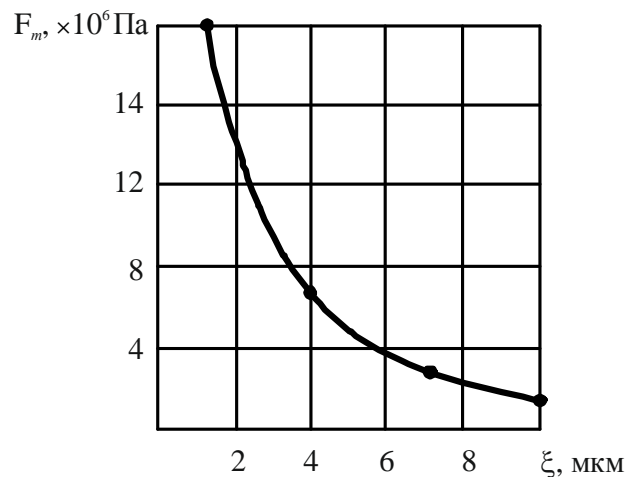
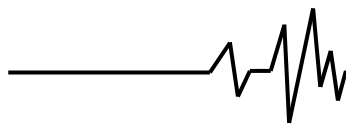


Рис.7. Залежність питомої сили тертя від амплітуди крутильних коливань





Крутний момент при видавлюванні різи складається із суми крутного моменту пластичного деформування, який витрачається на пружну і пластичну деформацію металу та крутного моменту тертя. Крутний момент тертя виникає внаслідок тертя різевої поверхні калібруючої частини мітчика по профілю видавленої різи. Оцінка впливу ультразвукових коливань на ці складові крутного моменту видавлювання різи проводилась в гайках, висота яких менша довжини забірної частини

так і більша цієї довжини. У першому випадку усувався вплив моменту тертя. Результати експериментів та розрахунків представлені в табл.1.

Причому, для визначення розрахункового крутного моменту розраховували  $P_y$ , за формулами (5), (6), а  $F_t$  за формулами (8), (19).

Для розрахунку крутного моменту використовували наступну залежність:

$$M_{кр} = p \cdot F \cdot r_{\mu} + \frac{1,55 \cdot p \cdot P_t \cdot d_3 \cdot E_2 \cdot E_1 \alpha}{(E_2 + p) \cdot (1,3 \cdot E_1 + 0,7 \cdot E_2)}, \quad (29)$$

У виразі (29) перша складова визначає крутний момент пластичного деформування, а друга – крутний момент тертя. Для визначення крутного моменту при видавлюванні різи в гайках з  $H < l$  використовували

першу складову. Замість  $p$  та  $\mu_r$  підставляли значення  $p_y$  та  $F_t$  розраховані з (5), (6), (8), (19).

Табл.1. Вплив методу обробки на крутний момент  $M_{кр}$

| Матеріал заготовки | Метод обробки            | Крутний момент вимірний, Н·м |       | Крутний момент розрахунковий, Н·м |      |
|--------------------|--------------------------|------------------------------|-------|-----------------------------------|------|
|                    |                          | H<l                          | H>l   | H<l                               | H>l  |
| Сталь 10           | Без УЗК                  | 5,20                         | 10,00 | –                                 | –    |
| АЛ4                | Без УЗК                  | 2,88                         | 5,10  | –                                 | –    |
| Сталь 10           | УЗК, осьові коливання    | 2,61                         | 2,70  | 2,33                              | 2,38 |
| Сталь 10           | УЗК, крутильні коливання | 4,80                         | 5,60  | 4,93                              | 5,45 |
| АЛ4                | УЗК, осьові коливання    | 1,90                         | 2,00  | 1,96                              | 1,97 |
| АЛ4                | УЗК, крутильні коливання | 2,80                         | 3,20  | 2,84                              | 3,07 |

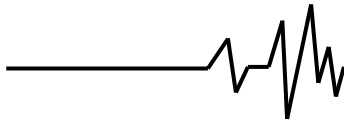
Результати експериментів та розрахунків показали, що при видавлюванні різи з накладанням ультразвуку значно знижується крутний момент [14]. Більш ефективно з точки зору зменшення крутного моменту застосування осьових коливань.

Застосування осьових коливань майже зовсім усуває вплив тертя на калібруючій частині мітчика. Порівняння експериментальних та розрахункових даних показало, що розрахункові дані відрізняються від експериментальних не більше ніж на 10 %, тому можливо використовувати залежності (5), (6), (8), (9) для практичних розрахунків при призначенні режимів видавлювання різи.

**Висновки:**

1. При дослідженні контактної взаємодії інструмента з деталлю із накладанням ультразвукових коливань осьовому і радіальному напрямках, а також при накладанні крутильних коливань, встановлено, що застосування осьових коливань у середньому на 50 % є ефективнішим. Зменшення контактного тиску є найбільшою при накладанні осьових коливань. Час контакту інструмента із деталлю у імпульсному режимі є мінімальним, тому середнє значення, за період коливань силових факторів, відповідно є мінімальним. Це встановлено завдяки розв'язку аналітичних залежностей.

2. Запропоновано нові методики



розрахунку контактної тиску і питомої сили тертя при видавлюванні різи з накладанням осьових, радіальних та крутильних коливань. Система отриманих залежностей, що описує вплив амплітуди коливань, напрямку коливань, швидкості деформування та механічних властивостей оброблюваного матеріалу на величину контактної тиску, дозволяє розрахувати параметри процесу пластичного деформування із накладанням ультразвуку. Завдяки такому опису можна отримати значення контактної тиску та сил тертя для кожної ділянки діаграми навантаження.

3. Як впливає із отриманих результатів дослідження, найбільше на величину контактної тиску впливає амплітуда коливань та їх напрямки. Доцільним є застосовувати осьових коливань. Значення амплітуди коливань залежить від діаметру різи, що підлягає обробці.

#### Список використаних джерел

1. Посвятенко Е.К., Турич В.В., Шевченко В.І. Модифікування поверхні деталей машин ультразвуковим методом. *Вісник НТУ*. 2003. № 8, С. 28–33.
2. Берник П.С., Паламарчук І.П., Липовий І.Г. Розвиток конструктивних та технологічних схем машин для обробки виробів в умовах вільного кінематичного зв'язку між деталями та робочим інструментом. *Вібрації в техніці та технологіях*. 1998. № 2 (6). С. 21–29.
3. Головкин В.В., Трусов В.Н. Исследование работоспособности метчиков при нарезании резьбы с применением ультразвуковых колебаний. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2009. № 3. 69–78.
4. Асташев В.К. Влияние ультразвуковых колебаний резца на процесс резания. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 1992. №3. С.81–86.
5. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания: учебник. К. : Наук. думка, 1990. 320 с.
6. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов: учебник. М.: Машиностроение, 1980. 237 с.
7. Кумабэ Д. Вибрационное резание: учебник. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
8. 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.
9. 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.

10. 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.

11. Руткевич В.С. Моделирование процесса контактной взаимодействия инструмента с деталлю из накладанням осьових ультразвуковых колебаний. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. №2(97). С. 61–71.

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

13. Любін М. В., Токарчук О. А. Вплив хіміко-термічної обробки інструменту на процес виготовлення метричних різей у важкооброблюваних сталях. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця ВНАУ, 2019. № 1 (92). С. 48–55.

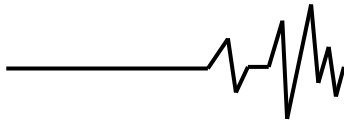
14. Токарчук О. А. [Аналіз впливу форми і розмірів поперечного перерізу безстружкових мітчиків на процес видавлювання різьби](#). *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця ВНАУ, 2020. № 2(97). С. 108–122

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

16. Пристрій для вимірювання параметрів ультразвукових коливань: пат. 101967 Україна: МПК G01H 1/08. № u 2015 03351; заявлн. 10.04.2015; опубл. 12.10.2015, Бюл.№19.

#### References

1. Posviatenko, E. K., Turych, V.V., Shevchenko, V.I. (2003). *Modyfikuvannia poverkhnii detalei mashyn ultrazvukovym metodom* [Modification of surface of machine parts by ultrasonic method]. *Visnyk NTU – Bulletin of NTU*, 8, 28-33 [in Ukrainian].
2. Berynyk, 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]. *Vibraciyi v tekhnici ta tekhnologiyah – Vibration in engineering and technology*, 2(6), 21-29 [in Ukrainian].
3. 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 hosudarstvennoho aerokosmicheskoho universiteta – Bulletin of the Samara State Aerospace University*, 3, 69-78 [in Russian].

4. 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].

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

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

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

8. 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].

9. Veselovska, N.R. & Turych, V.V. & Rutkevych, V.S. Kontaktna vzaiemodiia instrumenta z detalliu u protsesakh poverkhnevoho plastychnoho deformuvannia 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].

10. Adamchuk, V.V., Bulhakov, V.M., Kaletnyk, H.N., Kutsenko, A.H. (2017). Ispolzovanye priamoho metoda hranychnikh elementov pri issledovanii statsyonarnykh 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].

11. Rutkevych, V.S. Modeliuvannia protsesu kontaktnoi vzaiemodii instrumenta z detalliu iz nakladanniam osvykh ultrazvukovykh kolyvan [Modeling of the process of contact interaction of the tool with the part with the application of axial ultrasonic vibrations]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibrations in technology and technology*, 2, 61-71 [in Ukrainian].

12. 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].

13. Lyubin, M. V., Tokarchuk, O. A. (2019). Vpliv khimiko-termichnoyi obrobki ĩnstrumentu na proczes vigotovlennya metrichnykh rizej u vazhkoobroblyuvanikh stalyakh [Influence of chemical-thermal treatment of the tool on the process of manufacturing of metric cuts in hard-machined steels]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibrations in technology and technology*, 1(92), 48–55. [in Ukrainian].

14. Tokarchuk, O. A. (2020). Analysis of the influence of the form and dimensions of the cross-section of cleanless tapers on the process of extracting threads. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibrations in technology and technology*, 2(97), 108–122. [in Ukrainian].

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

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

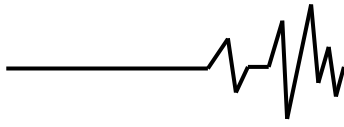
### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ВЫДАВЛИВАНИЯ РЕЗИ С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ИНСТРУМЕНТ

Рассмотрена возможность повышения качества рези за счет направленного действия различных видов ультразвуковых колебаний, с целью формирования максимальных сжимающих остаточных напряжений, позволит в конечном, повысить работоспособность ризевого соединения при переменных нагрузках.

Исследован процесс ризенаризанння с использованием вынужденных ультразвуковых колебаний. При составлении математической модели процесса выдавливания рези с наложением ультразвуковых колебаний на инструмент было принято предположение, что явление поверхностного упрочнения мало влияет на величину контактного давления и силу трения при пластическом деформировании. Данное предположение позволяет упростить математическую модель, путем не учета данного фактора.

Предложены новые методики расчета контактного давления и удельной силы трения при выдавливании рези с наложением осевых, радиальных и крутильных колебаний.

Описание процессов деформирования с наложением ультразвуковых колебаний был



осуществлен на основе реологической модели деформирования идеального упруго-пластического тела. В работе разработаны нелинейные математические модели для исследования процессов пластического деформирования, состоящие из уравнений перемещения инструмента и уравнений учитывающие упруго-пластические свойства обрабатываемого материала. Данная структура математической модели наиболее полно отражает процессы, протекающие при накатки резьбы с наложением ультразвуковых колебаний.

В результате исследований установлено, что использование принудительных ультразвуковых колебаний при механической обработке инструментом позволит существенно повысить производительность, стойкость инструмента и качество обрабатываемой поверхности, особенно при обработке с особыми физико-механическими свойствами.

При исследовании контактного взаимодействия инструмента с деталью с наложением ультразвуковых колебаний осевой и радиальной направлениях, а также при наложении крутильных колебаний, установлено, что применение осевых колебаний в среднем на 50 % эффективнее.

**Ключевые слова:** деталь, внутренняя резьба, выдавливание, инструмент, выдавливающий метчик, ультразвук, точность, производительность, амплитуда колебаний, частота.

#### RESULTS OF RESEARCH OF PROCESSES OF EXTRACTION OF CUT WITH IMPLEMENTATION OF ULTRASOUND OSCILLATIONS ON THE INSTRUMENT

The possibility of improving the quality of rubber due to the directional action of various types of ultrasonic vibrations, with the aim of forming the maximum compressive residual stresses, will

ultimately improve the performance of the rize joint under variable loads.

The process of rizenization using forced ultrasonic vibrations has been investigated. When compiling a mathematical model of the process of extrusion of rubber with the imposition of ultrasonic vibrations on the tool, it was assumed that the phenomenon of surface hardening has little effect on the magnitude of the contact pressure and the friction force during plastic deformation. This assumption allows us to simplify the mathematical model by not taking into account this factor.

New methods of calculating the contact pressure and specific frictional force during rubber extrusion with the imposition of axial, radial and torsional vibrations are proposed.

The description of the deformation processes with the superposition of ultrasonic vibrations was carried out on the basis of the rheological model of deformation of an ideal elastic-plastic body. The work developed nonlinear mathematical models for the study of plastic deformation processes, consisting of equations of tool displacement and equations taking into account the elastic-plate properties of the processed material. This structure of the mathematical model most fully reflects the processes occurring during thread rolling with the imposition of ultrasonic vibrations.

As a result of the research, it has been established that the use of forced ultrasonic vibrations during machining with a tool will significantly increase the productivity, tool durability and quality of the processed surface, especially when processing with special physical and mechanical properties.

In the study of the contact interaction of the tool with the part with the imposition of ultrasonic vibrations in the axial and radial directions, as well as in the imposition of torsional vibrations, it was found that the use of axial vibrations is on average 50 % more effective.

**Key words:** part, internal thread, extrusion, tool, extrusion tap, ultrasound, precision, productivity, vibration amplitude, frequency.

#### Відомості про автора

**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](mailto: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](mailto: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](mailto:v_rut@ukr.net)).