

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-90>
УДК 621.914.6:621.9.02

ПАЛАДІЙЧУК ЮРІЙ

Вінницький національний аграрний університет
<https://orcid.org/0000-0003-4257-9383>
e-mail: rewet@vsau.vin.ua

ТЕЛЯТНИК ІННА

Вінницький національний аграрний університет
<https://orcid.org/0000-0002-2998-1506>
e-mail: inna201098@gmail.com

ГОРОВИЙ АРТУР

<https://orcid.org/0009-0007-6177-6039>
Вінницький національний аграрний університет
e-mail: sartursukhopar5@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИМУСОВОГО ПОДІЛУ СТРУЖКИ ПРИ ПРОТЯГУВАННІ ГВИНТОВОЮ ПРОТЯЖКОЮ

У роботі досліджено проектування гвинтових шліцевих протяжок групового різання для оптимізації обробки. Проаналізовано методи поділу стружки, особливості побудови різальної секції та залежність параметрів протяжки від характеристик оброблюваного отвору. Визначено ключові аспекти проектування для підвищення ефективності та якості протягування.

Ключові слова: гвинтові шліцеві протяжки, групове різання, поділ стружки, різальна секція, ширина профілю, діаметр протяжки, ширина ріжучої кромки, подача на зуб, проектування інструменту.

PALADIYCHUK YURIY, TELYATNIK INNA, HOROVYI ARTUR

Vinnitsia National Agrarian University

RESEARCH ON FORCED SHRINKAGE OF CHIP DURING DRAWING WITH A STEEL BROACH

The paper considers the current problem of increasing the productivity and accuracy of machining of helical spline joints by using group cutting broaches. Existing approaches are analyzed and the advantages of using broaches with a group cutting scheme compared to traditional single cutting broaches are determined, in particular, regarding the possibility of increasing the feed per tooth and reducing the number of passes.

The main attention is paid to the study of key aspects of the design of the cutting part of helical spline broaches of group cutting. Various methods of chip separation between the teeth of the section (fillets, leaves, chamfers) and their feasibility depending on the geometric parameters of the tool, such as the ratio of the broaches profile width to its diameter and the width of the cutting edge of the tooth, are considered in detail.

The features of the construction of the cutting section are analyzed, including the shape of the first and second teeth, as well as the need to compensate for the elastic deformation of the metal by reducing the diameter of the second tooth. The dependence of the design parameters of the broach, in particular the width of the cutting edge, on the characteristics of the processed helical slotted hole was determined.

Based on the analysis, practical recommendations were formulated for the selection of optimal chip separation methods and the design of the cutting part of helical slotted broaches of group cutting, which will contribute to increasing the efficiency, accuracy and quality of the broaching process. The results of the study can be used in the development of new and improvement of existing designs of broaching tools for processing complex hole configurations in the mechanical engineering industry.

Keywords: helical spline broaches, group cutting, chip separation, cutting section, profile width, broach diameter, cutting edge width, feed per tooth, tool design.

Стаття надійшла до редакції / Received 22.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Постановка проблеми

У сучасному машинобудуванні одним із важливих завдань є підвищення продуктивності та точності обробки отворів складної конфігурації, зокрема шліцевих з'єднань. Традиційно для цієї мети використовуються протяжки одинарного різання, проте їх застосування часто пов'язане з обмеженнями щодо величини подачі на зуб та необхідністю багаторазових проходів для досягнення необхідної якості поверхні та розмірної точності [1-3].

Альтернативним та перспективним підходом є використання протяжок групового різання. Як зазначається у працях [1,2], ключовою відмінністю таких протяжок є поділ стружки на вузькі елементи без ребер жорсткості, що досягається спеціальною геометрією різальних кромки. Відсутність стружкорозділювальних канавок на ріжучих кромках створює сприятливі умови для призначення значно більших (порівняно з протяжками одинарного різання) подач на ріжучі зуби.

Використання підвищених подач у протяжках групового різання зумовлює низку потенційних переваг, серед яких:

- **Зменшення довжини протяжки:** Це, у свою чергу, відкриває можливість обробки отвору за один робочий прохід замість кількох, що є характерним для протяжок, спроектованих за генераторною схемою різання [2].
- **Оптимізація геометрії різання:** Зубці протяжки працюють у зоні позитивних передніх кутів, що сприяє зниженню сил різання та покращенню процесу стружкоутворення [2].

• **Підвищення стійкості інструменту:** Зменшення кількості проходів та оптимізовані умови різання можуть призвести до збільшення терміну служби протяжок [2].

• **Ефективне стружкоутворення та видалення:** Товста стружка, що утворюється при підвищених подачах, легше відокремлюється від ріжучих кромки та безперешкодно видаляється зі стружкових канавок [2].

Однак, при проектуванні різальної частини гвинтових шліцевих протяжок групового різання необхідно враховувати їхні специфічні конструктивні особливості, які можуть впливати на технологічність виготовлення та експлуатаційні характеристики [1,2]:

• **Обмеження щодо конструкції:** Такі протяжки, як правило, виконуються лише зі шліцевою частиною.

• **Вимоги до секціонування:** Ріжуча частина повинна складатися з секцій з однаковими значеннями подачі (підйому).

• **Складність формування фасок:** Технологічно ускладнюється виконання фаскових зубців на ріжучій частині протяжок.

Таким чином, незважаючи на очевидні переваги протяжок групового різання, питання їхнього оптимального проектування та застосування, особливо для обробки гвинтових шліцевих з'єднань, потребує подальшого глибокого дослідження. Зокрема, актуальним є вивчення впливу підвищених подач та конструктивних особливостей на точність обробки, якість поверхні та стійкість інструменту. Розв'язання цих науково-технічних задач сприятиме підвищенню ефективності та конкурентоздатності виробничих процесів у машинобудівній галузі.

Аналіз досліджень та публікацій

Проектування різальної частини гвинтових шліцевих протяжок із застосуванням групової схеми різання є принципово відмінним від аналогічного процесу для протяжок, призначених для обробки прямих шліцевих профілів (таких як евольвентні шліци, прямокутні пази, лиски або фаски). Традиційні методи формування профілю різальних секцій, що використовуються для звичайних шліцевих протяжок, є неприйнятними для інструментів гвинтового типу [1-3].

Для розуміння особливостей побудови різальної частини гвинтової шліцевої протяжки доцільно розглянути розгорнуту на площину ділянку її різальної частини (рис. 1, що є типовим для спеціалізованої літератури з проектування протяжного інструменту, наприклад, [2]). Аналіз розгорнутої поверхні демонструє, що стружкові канавки протяжки розташовуються вздовж гвинтової лінії, утворюючи кілька окремих заходів, кожен з яких нахилений до осі інструмента під певним кутом ψ .

З геометричної побудови різальної частини гвинтової протяжки чітко простежується, що кожен окремий захід ріжучих зубів функціонує як самостійний зуб у складі різальної секції. Це фундаментальне спостереження формує першу ключову умову побудови групової схеми різання для гвинтових шліцевих протяжок: кількість зубів у різальній секції має бути кратною числу заходів стружкових канавок (n) [3].

Математично це можна виразити наступним чином:

$$\frac{n}{z_c} = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

При проектуванні протяжок групового різання для гвинтових шліців оптимальним є включення до секції двох зубів. Збільшення їхньої кількості, по-перше, значно ускладнює виробництво протяжок [2]. По-друге, враховуючи типову ширину гвинтових пазів (до 28 мм), ефективне стружкоподрібнення досягається і при використанні двозубої секції [2,3]. Це підтверджується практичним досвідом та сприяє зниженню сил різання та покращенню якості обробки [2-4].

Відповідно до цієї концепції, кожен захід стружкових канавок формує окремий ріжучий зуб у складі секції. Наприклад (рис. 1), перший захід (1) стає першим зубом першої секції, другий захід (2) – другим зубом першої секції, третій (3) – першим зубом другої секції, і так далі [2-4].

Таким чином, при двозубій схемі загальна кількість заходів стружкових канавок (n) на протяжці має бути парною [3]:

$$n=2 \cdot m \quad (2)$$

де m – число різальних секцій на протяжці.

Отже, для ефективного проектування та виготовлення гвинтових шліцевих протяжок групового різання доцільно використовувати двозубу схему формування секцій.

Суть полягає в тому, що ефективність протяжок, які знімають матеріал групами зубів, напряму залежить від того, як саме стружка ділиться між цими групами в межах однієї секції. Важливо, щоб цей поділ забезпечував легке різання, особливо боковими кромками, запобігав потовщенню стружки та дозволяв ефективно її відводити.

Існують три основні способи поділу стружки [3,4]:

1. Викружки: Спеціальні заглиблення на зубах для розділення стружки.
2. Листки (стружкороздільники): Тонкі виступи, що розрізають стружку на вузьчі частини.
3. Фаски: Скошені задні поверхні зубів, що сприяють розділенню стружки.

Для звичайних шліцевих протяжок вибір способу поділу стружки залежить від розміру отвору та кількості шліців [3]. Але цей підхід не підходить для гвинтових шліцевих протяжок, оскільки діаметр отвору та кількість заходів гвинта (аналог кількості шліців) не пов'язані так просто [3,4].

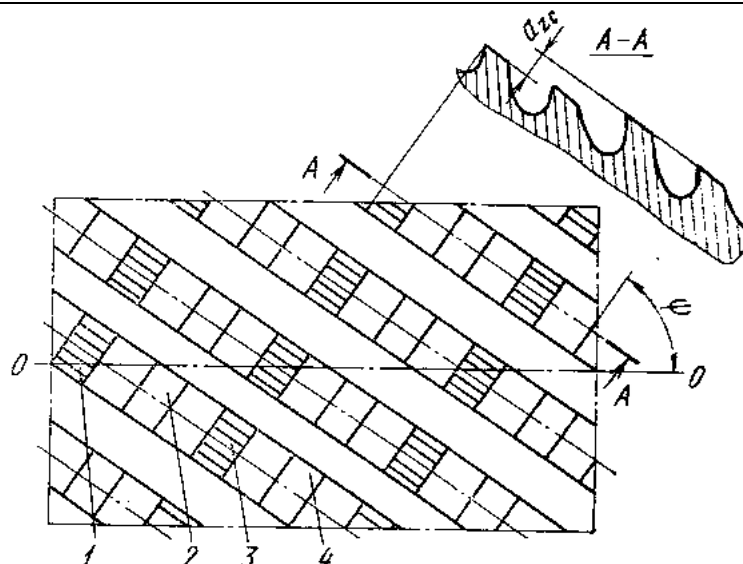


Рис. 1. Групова обробка гвинтових шліців: поетапне зняття матеріалу секціями зубів з гвинтовими ріжучими кромками

Дослідження та виробничий досвід з виготовлення гвинтових шліцевих протяжок групового різання показали, що доцільність призначення способу поділу стружки між групою зубців секції найкраще виражається відношенням ширини профілю протяжки $Ш_n$ до її найбільшого діаметру d_2 та $\frac{Ш_n}{d_2}$ [3,4].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: підвищення ефективності та точності обробки гвинтових шліцевих з'єднань шляхом дослідження та обґрунтування оптимальних параметрів проектування різальної частини протяжок групового різання.

Виклад основного матеріалу

Визначення ширини профілю ($Ш_n$) є важливим параметром для розрахунку зусиль різання та вибору оптимального способу поділу стружки, що безпосередньо впливає на якість обробленої поверхні та стійкість інструменту [3,4].

На рисунку 2 представлений фрагмент аспект групового різання гвинтових шліців, де кілька зубів одного заходу спільно обробляють матеріал, забезпечуючи підвищену продуктивність.

Визначення ширини профілю ($Ш_n$) гвинтових шліцевих протяжок є ключовим етапом їхнього проектування, оскільки цей параметр безпосередньо впливає на процес різання, розподіл навантажень та якість оброблюваної поверхні [4-6].

Для практичного застосування, ширина профілю може бути розрахована з достатньою точністю на основі конструктивних параметрів гвинтових шліцевих отворів. Залежність ширини профілю від цих параметрів описується рядом аналітичних формул, що враховують геометрію гвинтових канавок, їх крок та глибину [5].

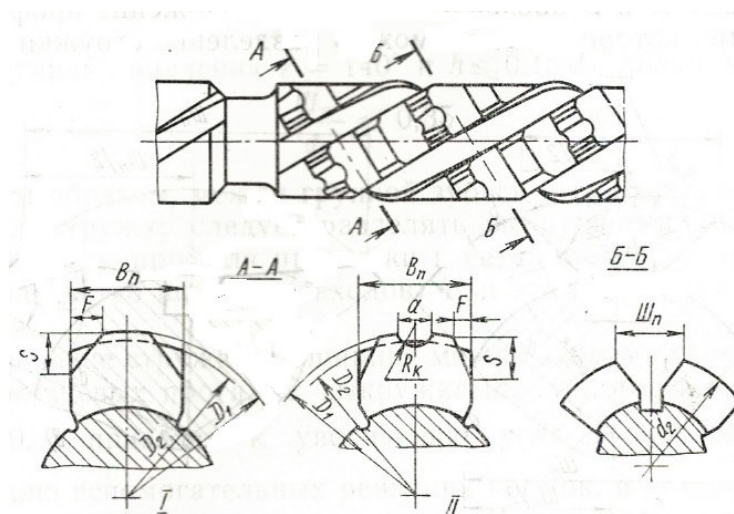


Рис. 2. Співвідношення ширини профілю та ширини різальної кромки гвинтової шліцевої протяжки

Ці формули базуються на принципах геометрії різання та дозволяють інженерам-технологам точно визначати необхідні розміри протяжки для забезпечення заданих параметрів шліцевого з'єднання [5]:

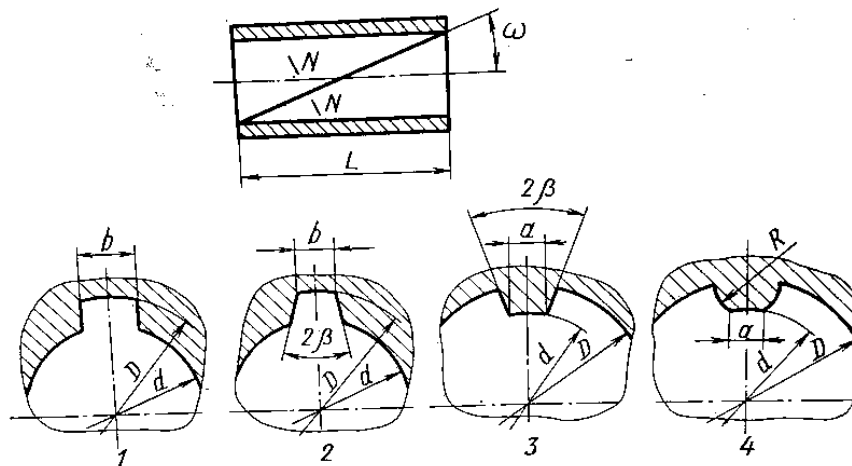


Рис. 3. Профілі гвинтових шліцевих отворів

- у разі протягування отворів, показаних на рисунку 3 (поз. 1 та 2):

$$Ш_n = \frac{\pi d_2}{\cos \omega_{cp} K} - B_n \quad (3)$$

- б) у разі протягування отворів, показаних на рисунку (поз. 3 та 4):

$$Ш_n = \alpha + \left(\frac{d_2 - d_1}{2 \cos \omega_{cp}} \right) \operatorname{tg} 2\beta \quad (4)$$

де B_n — ширина ріжучої кромки зуба протяжки; α — ширина гвинтового виступу отвору, що простягається; 2β — кут профілю винтового паза або гвинтового виступу.

Для практичного визначення ширини профілю протяжки за допомогою формул (3) та (4), замість безпосередніх розмірів ріжучої частини протяжки (d_2 та d_1), допускається використання відповідних діаметрів оброблюваного гвинтового шліцевого отвору – зовнішнього (D) та внутрішнього (d) [5].

Аналогічно, розмір ширини профілю протяжки (B_n) може бути замінений на ширину гвинтового паза отвору (б) [5-7].

Розглянемо граничний випадок поділу стружки між зубами однієї секції за допомогою викружок (рис. 4, а). З цією метою, поперечний переріз протяжки по ріжучих кромках (січення Б-Б на рис. 2) умовно спрощується до кола, що дозволяє виконати геометричні побудови, представлені на рисунку 4.

На цьому рисунку точки А та Б позначають крайні положення профілю протяжки, за яких поділ стружки викружками ще залишається можливим без її заклинювання або значного погіршення процесу різання [6].

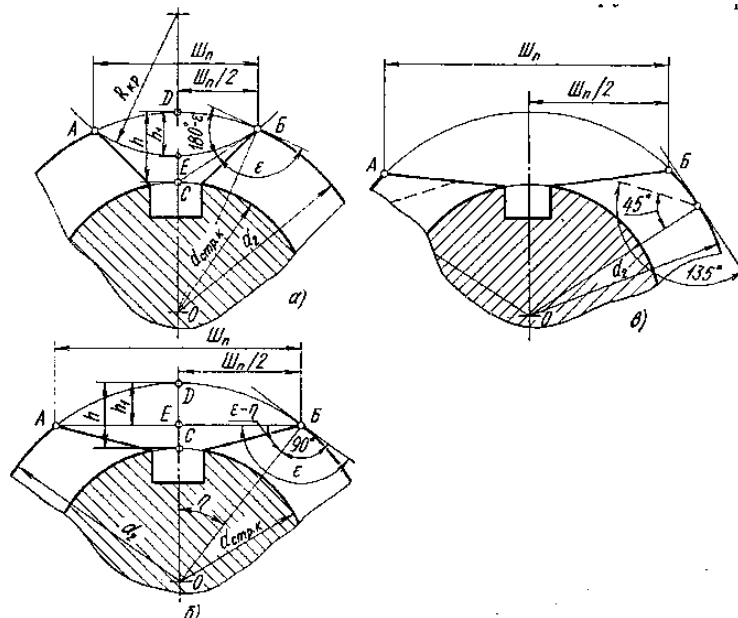


Рис. 4. Поділ стружки між групою зубів у гвинтових шліцевих протяжках групового різання.

Це положення визначає кут ε — кут між проекціями головної та допоміжної ріжучих кромки на основну площину. При цьому мається на увазі, що положення допоміжної ріжучої кромки визначається після шліфування викружки. Оптимальні умови різання на бічних ріжучих кромках та надійний поділ стружки, за даними [6], будуть при куті $\varepsilon = 110^\circ \div 160^\circ$.

В розрахунок візьмемо середнє значення кута $\varepsilon = 140^\circ$. Радіус шліфувального кола $R_{кр}$ при шліфуванні викружки повинен вписатися в $\frac{3}{4}h$ — глибини стружкової канавки [6].

Подальше збільшення радіусу шліфувального кола дещо «розсуне» точки А і Б, та збільшить кут ε .

Найбільша глибина стружкових канавок h , для звичайних шліцевих протяжок немає перевищувати 0,17 діаметра останніх її ріжучих зубів $h \leq 0,17 d_2$. Для гвинтових шліцевих протяжок на підставі виробничого досвіду та досліджень, залежність можна записати так: $h \leq 0,15 d_2$.

У побудові рисунку 4, α зробимо такі припущення: точку Е - перетину шліфувального кола з віссю протяжки перенесемо в точку С; трикутник СБД розгорнемо на площину та запишемо:

$$\frac{h}{\frac{\Pi_n}{2}} = \operatorname{tg}(180^\circ - \varepsilon) \quad (5)$$

Підставляючи значення $\varepsilon = 140^\circ$ і $h \leq 0,15 d_2$, отримаємо:

$$\frac{\Pi_n}{d_2} \leq 0,35 \quad (6)$$

Для гвинтових шліцевих протяжок існує важливе правило щодо розділення стружки між зубами. Якщо відношення ширини профілю протяжки до її діаметра становить не більше ніж 0,35, то для розділення стружки між групами зубів слід використовувати спеціальні кружки [4-6]. При цьому кількість шліців (заходів) не впливає на цей вибір [5].

Однак, використання кружків для поділу стружки по ширині між зубами в секції таких протяжок (де відношення $\leq 0,35$) може мати негативні наслідки. Це призводить до збільшення кута та небажаного подовження допоміжних ріжучих кромки, що в свою чергу погіршує процес стружкоутворення [5,6]. Існує ризик, що в певний момент стружка взагалі не буде розділятися по ширині між зубами.

Тому для таких протяжок (з відношенням $\leq 0,35$) стружку слід розділяти за допомогою лисок. На рисунку 4, б показано граничний випадок такого поділу. Крайні точки профілю протяжки, позначені як А і Б, розташовуються таким чином, що пряма, яка їх з'єднує, проходить через певну точку на відстані . Ця пряма відображає слід руху шліфувального кола під час формування лисок.

Шліфувати лиски нижче цієї точки є небажаним, оскільки це може призвести до пошкодження напрямних канавок протяжки та збільшення довжини допоміжних ріжучих кромки.

З побудови на рисунку 4, б можна зробити певні висновки:

$$\Pi_n = AB = 2 \sqrt{2h_1 \frac{d_2}{2} - h_1^2} ; \quad (7)$$

$$h_1 = \frac{3}{4}h; \quad h = 0,15d_2; \quad h_1 = 0,112d_2. \quad (8)$$

Підставивши значення h , отримаємо:

$$\frac{\Pi_n}{d_2} \leq 0,632, \quad (9)$$

при цьому $\varepsilon = 90^\circ + (90^\circ - \eta)$;

$$\sin \eta = \frac{\Pi_n}{d_2}. \quad (10)$$

Виразивши значення Π_n , через d_2 , з рівності (9), визначимо: $\sin \eta = 0,632$, а $\eta = 40^\circ$. Кут $\varepsilon = 140^\circ$, що задовольняє умов нормального поділу стружки між групою зубів секції.

Таким чином, поділ стружки листками у гвинтових шліцевих протяжок слід проводити за умови:

$$0,35 < \frac{\Pi_n}{d_2} < 0,632. \quad (11)$$

Якщо відношення ширини профілю протяжки до її діаметра перевищує певне значення (рис. 4, в) [4], для поділу стружки між зубами однієї секції рекомендується використовувати фаски. На рисунку 4, в штриховими лініями показано траєкторію шліфувального круга під час формування фаски. Хоча поділ стружки фасками є найбільш ефективним, симетричне їх виконання з обох боків зуба є технологічно складним.

Побудова групової схеми різання для гвинтових шліцевих протяжок залежно від ширини ріжучої кромки зуба B_n (рис. 2 переріз А-А) [5]. Поділ профілю на вузькі стружки здійснюється за допомогою викружок, листків або фасок, які формуються на першому зубі секції. Другий зуб у секції обробляє весь профіль. Для запобігання зрізання стружки другим зубом по всій ширині шліца внаслідок пружної деформації металу після проходження першого зуба та можливого зменшення діаметра першого зуба D_1 в процесі переточування, діаметр другого D_2 зуба секції (другого заходу) зменшується на 0,02-0,04 мм, отже $D_2 = D_1 - (0,02 \div 0,04)$ мм.

Форма першого зуба в секції визначається шириною його ріжучої кромки B_n . Якщо $B_n < 14$ мм, рекомендується використовувати форму без центральної викружки (позначено як I на рис. 2). При $B_n > 14$ мм, слід застосовувати форму з викружкою (позначено як II на рис. 2). Розмір елементів поділу стружки F на першому зубі в обох випадках не повинен перевищувати 2,5-3 мм. Загальна довжина ріжучих крайок першого зуба має складати приблизно 0,6 від ширини профілю протяжки $0,6 B_n$. [5].

Для забезпечення надійного поділу стружки між першим та другим зубами секції висота S розділових елементів першого зуба повинна бути більшою за подачу на секцію a_{zc} : [5].

$$S \geq (2,5 \div 3)a_{zc} \quad (12)$$

Наступна група зубців секції має загальний підйом a_{zc} і побудована аналогічно до попередньої (рис. 1).

Ширина ріжучої кромки B_n зуба гвинтової шліцевої протяжки в залежності від конструктивних параметрів отворів, що пробиваються, для яких спроектована протяжка, може бути визначена [5,6]:

а) у разі протягування отворів, показаних на рис. 1 (поз. 1, 2),

$$B_n = b_{max} - \delta; \quad (13)$$

б) у разі протягування отворів, показаних на рис. 1 (поз. 3 та 4),

$$B_n = \frac{\pi d_1}{K \cos \omega_{cp}} - a_{max} - \delta, \quad (14)$$

де b_{max} — максимальний допустимий розмір винтового паза по ширині;

a_{max} — максимальний допустимий розмір гвинтового виступу;

δ — величина «розбивання» шліца при протягуванні (встановлюється дослідним шляхом);

K — кількість заходів гвинтових шліців;

ω_{cp} — кут підйому гвинтової лінії на середньому діаметрі.

Висновки

У роботі проаналізовано проектування гвинтових шліцевих протяжок групового різання для підвищення ефективності обробки. Визначено оптимальні методи поділу стружки (фаски, викружки, листки) залежно від співвідношення ширини профілю до діаметра протяжки та ширини ріжучої кромки зуба.

Розглянуто побудову різальної секції, зокрема форму першого зуба та необхідність зменшення діаметра другого зуба для якісного стружкоутворення. Визначено залежність ширини ріжучої кромки від параметрів оброблюваного отвору.

Зроблено висновок про важливість врахування зазначених аспектів для проектування ефективних гвинтових шліцевих протяжок групового різання.

Література

1. 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. – ISSN 2520-6990. – DOI: 10.24412/2520-2480-2021-289-30-36.
2. 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. – ISSN 1729-3774.
3. Паладійчук, Ю. Б., Кордонський, В. А. Обґрунтування механіки руйнування стружки при протягуванні циліндричних поверхонь з припуском // *Вібрації в техніці та технології*. – 2020. – Вип. 4 (99). – С. 73–84.
4. 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. – ISSN 2567-5273. – DOI: 10.30890/2567-5273.2019-10-01-012.
5. 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.
6. Веселовська, Н. Р., Паладійчук, Ю. Б., Телятник, І. А. Дослідження мікротвердості поверхні циліндричної деталі при деформаційному протягуванні // *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. – 2022. – № 3 (118). – С. 31–42.

References

1. 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). – R. 30–35. – ISSN 2520-6990. – DOI: 10.24412/2520-2480-2021-289-30-36.
2. 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. – ISSN 1729-3774.
3. Paladiichuk, Yu. B., Kordonskyi, V. A. Obgruntuvannia mekhaniky ruynuvannia struzhky pry protiahuvanni tsylindrychnykh poverkhon z prypuskom // *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohii*. – 2020. – Vyp. 4 (99). – S. 73–84.
4. 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. – ISSN 2567-5273. – DOI: 10.30890/2567-5273.2019-10-01-012.
5. 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.
6. Veselovska, N. R., Paladiichuk, Yu. B., Teliatnyk, I. A. Doslidzhennia mikrotverdosti poverkhni tsylindrychnoi detali pry deformatsiynomu protiahuvanni // *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. – 2022. – № 3 (118). – S. 31–42.