

## ПРО ТЕХНОЛОГІЧНУ НЕМОЖЛИВІСТЬ ВІДТВОРЕННЯ ТЕОРЕТИЧНО ТОЧНОГО ПРОФІЛЮ ГВИНТОВОЇ РІЗЬБИ ТОКАРНИМ РІЗЦЕМ

Існує думка, що найбільш точним різальним інструментом для виготовлення різьби є токарний різець з пласкою передньою поверхнею, яка лежить у осьовій площині гвинтової поверхні різьби. Саме тому для виробництва різьбових кінців труб нафтогазового сортаменту, до яких існують посилені вимоги щодо механічної міцності і герметичності, використовують одно- або багатониткові різьбові різці чи різцеві головки. Але у більшості випадків прямолінійні різальні кромки таких інструментів є мимобіжними відносно осі різьби. Наприклад тоді, коли кут нахилу їх різальної кромки відповідає куту підйому різьби. Те саме відбувається у випадку, якщо передній кут інструменту не дорівнює нулю. У статті йдеться про те, що у випадку мимобіжності різальної кромки різця та осі різьби, для формування якої він застосовується, різьбова поверхня формується на основі конволютного гелікоїда і не відповідає заданій формі різьби на основі косого закритого гелікоїда. На базі застосування криволінійних циліндричних координат отримано скалярний аналітичний вигляд функції осьового перерізу конволютного гвинта у прямокутній системі координат, аргументами якої є величина переднього кута різця і діаметр різьби, а також висота теоретичного профілю і величина кроку різьби. Ця функція є трансцендентною і не відповідає алгебраїчній функції першого порядку, яка визначає профіль трикутної чи трапецеїдальної різьби, що, власне, і надає право зробити висновок про неможливість відтворення теоретично точного профілю гвинтової різьби токарним різцем.

**Ключові слова:** різьбовий різець; косий закритий гелікоїд; конволютний відкритий гелікоїд; передній кут; кут нахилу різальної кромки; трикутна різьба; трапецеїдальна різьба; осьовий переріз; профіль різальної кромки; трансцендентна функція; алгебраїчна лінійна функція.

**Актуальність питання.** Точність відтворення різьбових поверхонь залежить від багатьох чинників, у тому числі й від обраного технологічного процесу їх виготовлення. На сьогоднішній день у виробництві різьбових кінців труб нафтогазового сортаменту домінує процес нарізання кріпильної різьби токарними одно- і двонитковими різьбовими різцями, різьбовими гребінками або різцевими різьбовими головками. Визначальними параметрами точності кріпильної різьби є її відповідність заданому кроку, середньому діаметру та профілю. Від дотримання вказаних параметрів залежать основні характеристики якості різьбових кінців труб вказаного сортаменту: міцність з'єднання,

його згвинчуваність і герметичність. За стандартом [3, с. 41] регламентованим параметром різьби є кут її профілю, а він, у свою чергу, залежить від точності самого різального інструменту. Отож актуальним є завдання виявлення можливостей досягнення номінального значення заданого профілю різьби методами токарної обробки. Тобто мова йде про те, чи можливо взагалі відтворити теоретично точний профіль різьби при формуванні її токарним різцем.

#### **Аналіз існуючих досліджень та публікацій з цієї проблематики.**

Класичні дослідження можливостей досягнення теоретично точного профілю, що представлені у багатьох посібниках та підручниках, в основному, зводяться до отримання точок профілю різальної кромки з урахуванням зміщення їх координат уздовж осі різьби. На рисунку 1 показана схема визначення різальної кромки різця, що призначений для нарізання різьби. Схема відповідає рисунку з першоджерела [8, с. 238].

Величина повздовжнього зміщення координати точки різальної кромки  $\Delta$  функціонально залежить від величини кута  $\tau$ , що, у свою чергу, – від відстані вказаної точки від осі різьби і величини нахилу передньої площини  $\gamma$ . Вказане зміщення спричиняє асиметричність профілю різьби. Величина вказаної асиметричності може бути проігнорована у процесі профілювання різальної кромки у випадку, коли кут  $\gamma$  є меншим за  $10^\circ$  [1, с. 28]. Незначний функціональний вплив вказаного поперечного зміщення, тим не менше має місце, особливо, коли мова йде про досягнення теоретично точного профілю різальної кромки. З цієї точки зору, корисним може бути програмний алгоритм визначення повздовжніх зміщень точок залежно від діаметра різьби і величини переднього кута [5, с. 53]. Цей автоматизований розрахунок дає можливість отримувати не лише величину асиметричного профілю, а і координати усіх заданих точок профілю різальної кромки, якщо потрібно її виконати криволінійною задля досягнення більшої точності, ніж тієї, яку можна досягти при застосуванні прямолінійних різальних кромки.

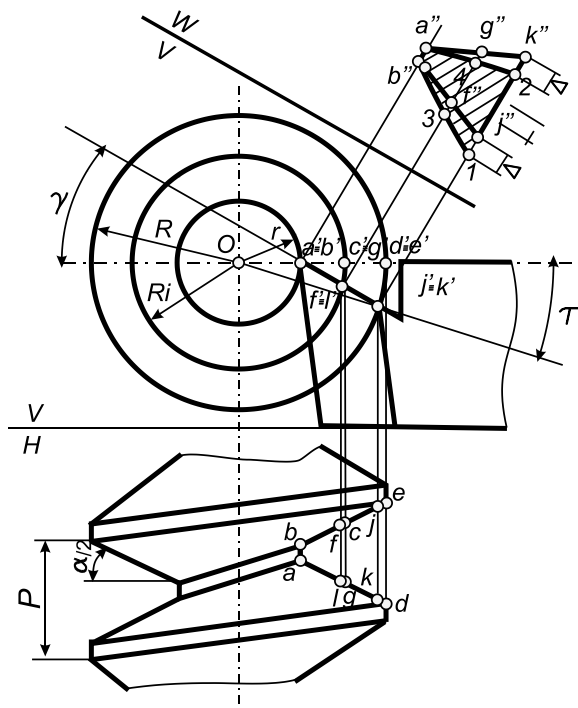


Рис. 1. Схема визначення повздовжніх зміщень точок профілю різальної кромки різьбового різця

У низці публікацій профіль різальної кромки різьбового різця розглядається як переріз конічної поверхні, площиною яка не проходить через вісь конуса, адже теоретична поверхня різби визначається косим закритим гелікоїдом [6, с. 112], тобто є лінійчатою поверхнею, яка утворюється за рахунок рівномірного обертання навколо власної осі  $i$  напрямного конуса  $Tz$  вершиною  $S$  і одночасного його рівномірного поступального руху уздовж цієї осі (рис. 1).

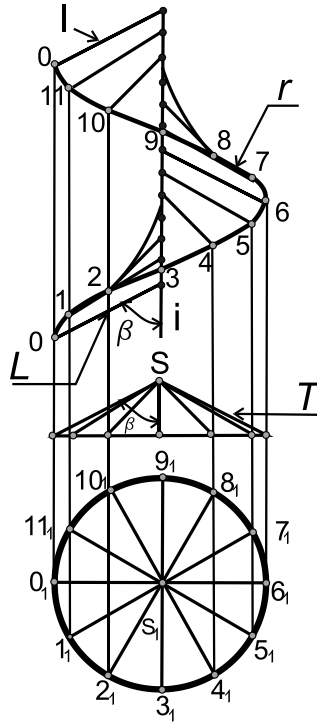


Рис. 2. Комплексне креслення косою закритого гелікоїда

Якщо мова йде, наприклад, про трикутну різьбу, то вона теоретично може бути сформована двома такими косими гелікоїдами і поверхнею спряження між ними. У роботі [7, с. 12] запропоновано визначати профіль різальної кромки на основі лінійної інтерполяції гіперболічної кривої, яка отримана внаслідок перетину напрямного конуса різбової поверхні передньою площиною. Стаття показує відчутні результати: уже за  $\gamma = 8^\circ$  необхідна корекція профілю різальної кромки сягає  $1^\circ 30'$ , що для труб нафтогазового сортаменту, згідно із діючим стандартом [3, с. 41], перевищує регламентований допуск на величину кута нахилу бічної сторони профілю різьби.

У дисертаційній роботі Є.В. Фоміна проведено глибокий аналітичний аналіз залежності зміщення координат профілю отриманої різьби при її виконанні токарним різцем залежно від зміщення координат установки різця [9, с. 129].

У всіх перелічених працях є спільний недолік: різальна кромка не розглядається як твірна іншої гвинтової поверхні, аніж тієї, що зображена на рисунку 1. Але ж, якщо різальна кромка різця (вона ж твірна гвинтової поверхні) не перетинає вісь цієї поверхні, наприклад, якщо вона дещо зміщена у вертикально напрямку щодо осі деталі, то слід очікувати і теоретично іншу гвинтову поверхню.

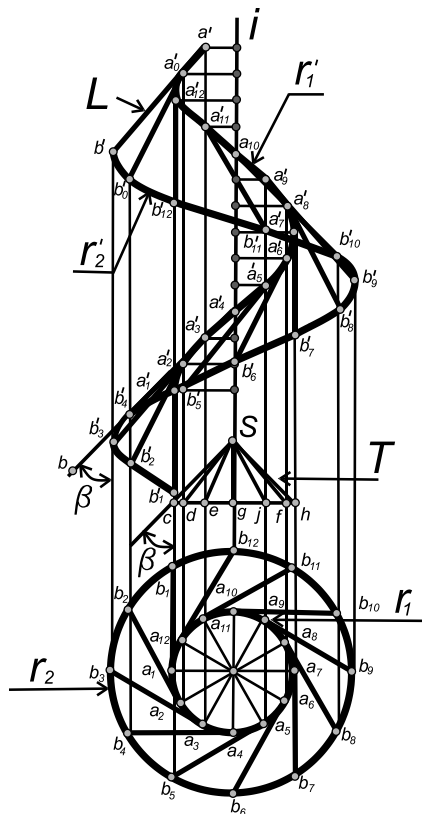


Рис. 3. Комплексне креслення косо­го відкритого конволютного гелікоїда

На рисунку 3 відображено комплексне креслення відкритого конволютного гелікоїда, твірні якого не перетинають вісь гвинта  $i$ , а є дотичними до основного циліндра, на якому лежить напрямна — геліса  $r_1$ . Гвинтова лінія  $r_2$  обмежує конволютний гелікоїд ззовні. Напряmnий конус  $T$  служить для побудови усіх потрібних положень

твірної  $L$  у точках  $a_1 \dots a_{12}$  під заданим кутом нахилу бічної сторони прямого конуса  $\beta$  з вершиною  $S$ . Отримані у результаті побудови точки  $b_1 \dots b_{12}$  є точками зовнішньої геліси  $r_2$ .

Отже, якщо приймати різальну кромку різця за прямолінійну і таку, що є мимобіжною до осі різбової поверхні  $i$ , положення якої задається кутом  $\gamma$  у горизонтальній площині проєкцій і кутом  $\beta$  (рис. 4) у вертикальній, то в результаті її гвинтового руху буде отримана конволютна різбова поверхня, обмежена гелісами  $r_2$  і  $r_3$ .

Слід зауважити, що можливо більшість різьб, нарізаються за допомогою різців із різальною кромкою, орієнтація якої визначається кутом підйому різьби [10, с. 338; 11, с. 1]. Це робиться задля рівномірного розподілу бічних задніх кутів і є загальноприйнятою практикою, у тому числі для чистових різців [6, с. 112].

Відомі праці, в яких аналізуються методи обробки лінійчатих поверхонь, що вказують на певні технологічні труднощі їх формування різальними інструментами, а у випадку використання круглого циліндричного інструменту вказується на неможливість теоретично точної їх обробки [2, с. 73]. Це пояснюється тим, що еквідистанта конволютного гелікоїда, на якій має лежати траєкторія осі інструмента, не є лінійчатою поверхнею.

У нашому випадку різальна кромка лежить безпосередньо на твірній, і тому причетна до створення лінійчатої поверхні, але не закритого косою гелікоїда, а відкритого конволютного гелікоїда, поверхні яких очевидно не збігаються. Оскільки, згідно з нормативними документами, профіль різьби визначається у площині осьового перерізу, то для порівняння двох означених вище гвинтових поверхонь слід визначитися із аналітичним виразом, що описує осьовий переріз конволютного косою гелікоїда.

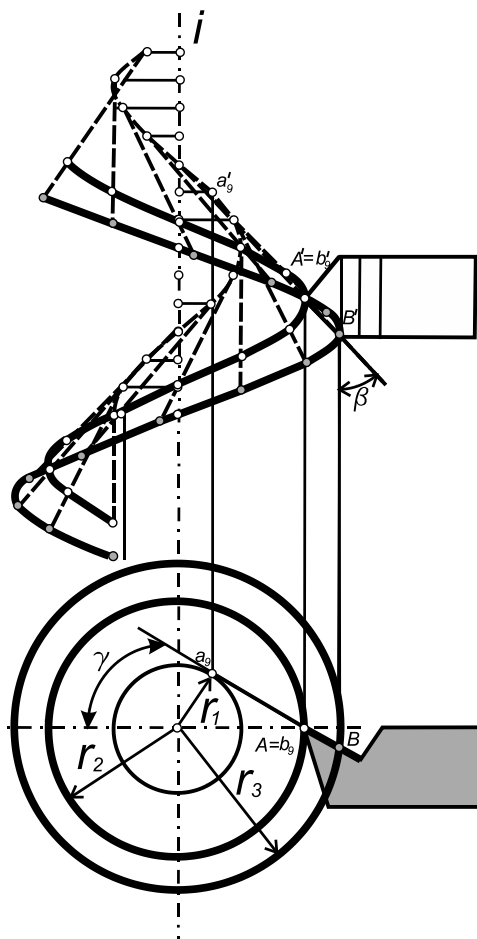


Рис. 4. Схема формування конволютної різьбової поверхні різцем з прямолінійною різальною кромкою, що не лежить у осевій площині заготовки

**Постановка завдання.** Для визначення теоретичної невідповідності заданої різьби і різьби, сформованої різцем, різальна кромка якого не лежить у її осевому перерізі необхідно знайти аналітичну залежність осевого перерізу конволютного гвинта від величини кута  $\gamma$  інструмента та діаметра різьби і здійснити його аналітичне порівняння з формулою профілю заданої різьби.

Аналitичний підхід до знаходження осьового перерізу конволютної гвинтової поверхні. На рисунку 5 твірна  $L$  конволютного гелікоїда побудована у циліндричних координатах. Вісь  $Z$  координатної системи збігається з віссю гвинта. Відповідно до рисунку 3, величина  $r_1$  позначає радіус основного циліндра, на якому розміщена напрямна — одноіменна з цим радіусом геліса  $r_1$  конволютного гвинта, а  $r_2$  і  $r_3$  є відповідно внутрішнім і зовнішнім радіусами різьби.

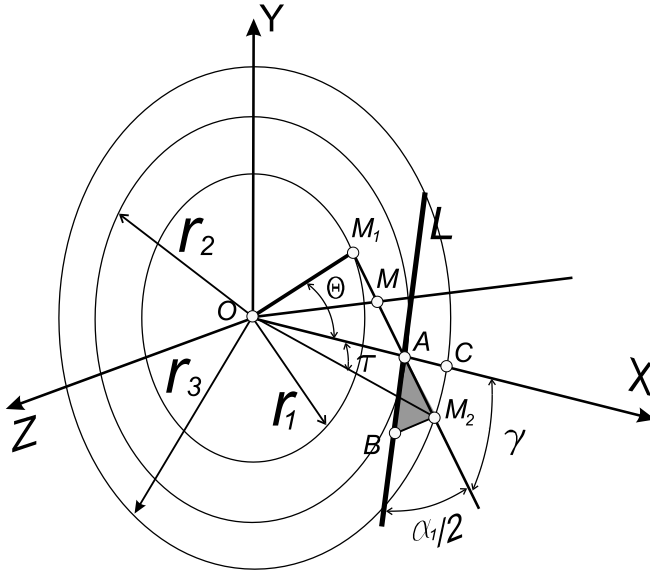


Рис. 5. Схема розміщення передньої поверхні різьбового різця у циліндричних координатах

Площина  $XY$  є перпендикулярною до осі  $Z$  і містить точку початку координат  $O$ .

Твірна  $L$  конволютного гвинта перетинає вісь  $X$  у точці  $A$ , а до площини  $XY$  вона нахилена під кутом  $\frac{\alpha_1}{2}$ . Проекцією твірної  $L$  на площину координат  $XY$  є пряма  $M_1M_2$ . Відрізок  $AB$  лежить на твірній  $L$  і є різальною кромкою різця. Площина, що задана трикутником  $ABM_2$ , є передньою поверхнею різьбового різця. При цьому відрізок  $BM_2$



паралельний до осі  $Z$ , а його довжина  $|BM_2|$  визначає аплікату точки  $B$ . Відрізок  $AM_2$  є проекцією різальної кромки  $AB$  на площину  $XY$ .

Для знаходження аналітичного опису гвинтової конволютної поверхні скористаємося методом, який запропонував В.С. Люкшин [4, с. 43]:

1. Якщо твірна  $L$  дана рівняннями у циліндричних координатах:

$$\rho = f(\tau); \quad (1)$$

$$Z = F(\tau), \quad (2)$$

де проекція  $L$  на площину  $XY$  (пряма  $M_1M_2$ ) визначається формулою (1), що є рівнянням у полярних координатах:

$$\rho = f(\tau),$$

де  $\rho$  – відстань довільної точки відрізка  $AM_2$  до точки  $O$ , то рівняння гвинтової поверхні у скалярній формі записують у вигляді такої системи рівнянь [1]:

$$\begin{cases} x = f(\tau)\cos(\tau + \nu); \\ y = f(\tau)\sin(\tau + \nu); \\ z = F(\tau) + p\nu, \end{cases} \quad (3)$$

де параметри  $\tau$  і  $\nu$  визначають положення точки на поверхні та є її криволінійними координатами. При цьому параметр  $\tau$  визначає положення довільної точки  $M$  на проекції твірної  $L$  на площину  $XY$ . Параметр  $\nu$  визначає величину повороту твірної  $L$  навколо осі  $Z$ ; величина  $p$  є параметром гвинта і визначається за формулою:

$$p = \frac{P}{2\pi},$$

де  $P$ — крок гвинта.

2. Якщо вирішити рівняння (1) відносно  $\tau$ , то рівняння твірної  $L$  набудуть такого вигляду:

$$\tau = f_1(\rho); \quad (4)$$

$$z = F_1(\rho). \quad (5)$$

Система рівнянь (3) гвинтової поверхні у скалярній формі відтак матимуть наступний вигляд [4, с. 44]:

$$\begin{cases} x = \rho \cos(\tau + \nu); \\ y = \rho \sin(\tau + \nu); \\ z = F_1(\rho) + p\nu, \end{cases} \quad (6)$$

де параметр  $\tau$  необхідно замінити формулою (4).

Координатними лініями є: при  $\nu = \text{const}$  — твірна  $L$ , а при  $\tau = \text{const}$  — гвинтова лінія, яка розміщена на циліндрі з радіусом  $\rho$ .

3. Приведемо систему рівнянь (6) до нових криволінійних координат, зробивши заміну:

$$\phi = \tau + \nu.$$

Система рівнянь гвинтової поверхні (6) набуде такого вигляду:

$$\begin{cases} x = \rho \cos(\phi); \\ y = \rho \sin(\phi); \\ z = F(\rho) + p\phi, \end{cases} \quad (7)$$

де

$$F(\rho) = F_1(\rho) - p\tau. \quad (8)$$

Тут  $(\rho, \phi)$  криволінійні координати точки на гвинтовій поверхні, якщо  $\phi = \text{const}$ , то маємо твірну  $L$ , якщо ж  $\rho = \text{const}$ , то маємо гвинтову лінію.

Функція  $F(\rho)$  визначає закон зміни аплікати поточної точки напрямної  $L$  й її можна записати у такому вигляді [4, с. 45]:

$$F(\rho) = F(\tau) - p\tau = z - p\tau.$$

Геометричний зміст цієї функції легко виявити, якщо підставити у систему рівнянь (7)  $\phi = 0$ . Тоді отримаємо такі значення:

$$\begin{aligned} x &= \rho; \\ y &= 0; \\ z &= F(\rho), \end{aligned}$$

або (що те саме):

$$z = F(x), y = 0. \quad (9)$$

Рівняння (9) визначають лінію перетину гвинтової поверхні площиною  $XZ$ , тобто аналітично описують осьовий переріз конволютної гвинтової поверхні.

Визначення рівнянь різальної кромки як функції переднього кута у циліндричних координатах. Розглянувши трикутник  $OM_1M_2$  (рис. 3), можемо визначити величину радіуса основного циліндра  $r_1$ :

$$r_1 = r_2 \cos(\Theta) = r_2 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) = r_2 \sin \gamma. \quad (10)$$

Якщо вісь  $OX$  прийняти за полярну, то полярні координати  $(\rho, \tau)$  визначатимуть положення відрізка  $AM_2$ , що є проекцією різальної кромки  $AB$  на площину  $XY$ .

Нехай точка  $M_2$  є однією із довільних точок відрізка  $AM_2$ , тоді криволінійна координата  $\rho$  буде відрізком змінної величини  $|OM_2|$ . З використанням трикутника  $OM_1M_2$  і, користуючись (10), знаходимо змінну величину  $\rho$ :

$$\rho(\tau) = \frac{r_2 \sin \gamma}{\cos\left(\tau + \frac{\pi}{2} - \gamma\right)} = \frac{r_2 \sin \gamma}{\sin(\gamma - \tau)}. \quad (11)$$

Отримана формула (11) відповідає (1), тобто одному із рівнянь різальної кромки  $AB$  у циліндричних координатах.

Із трикутника  $OAM_2$ , користуючись теоремою синусів, відшукаємо значення відрізка  $(AM_2)$ :

$$|AM_2| = \frac{r_2 \sin \tau}{\sin(\gamma - \tau)}.$$

Із прямокутного трикутника  $ABM_2$  можемо отримати значення довжини відрізка  $(BM_2)$ :

$$|BM_2| = \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} |AM_2| = \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha_1}{2} \right) \frac{r_2 \sin \tau}{\sin(\gamma - \tau)}.$$

Оскільки точка  $M_2$  прийнята нами як довільна, то можна вважати, що довжина відрізка  $BM_2$  є змінною величиною і відповідає аплікаті довільної точки різальної кромки  $AB$  у циліндричних координатах. Отже, замість  $|BM_2|$  підставляємо  $z$ :

$$z(\tau) = \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha_1}{2} \right) \frac{r_2 \sin \tau}{\sin(\gamma - \tau)}. \quad (12)$$

Отримане рівняння (12) відповідає (2) і є другим з рівнянь, що описують твірну  $L$  у циліндричних координатах.

Визначення рівняння осьового перерізу конволютного гелікоїда, отриманого при допомозі гвинтового руху твірної  $L$ . Застосуємо

подальший крок методу Люкшина і, згідно з (4) та використовуючи (11), розв'яжемо рівняння відносно  $\tau$  :

$$\tau = \gamma - \arcsin\left(\frac{r_2 \sin \gamma}{\rho}\right). \quad (13)$$

Наступним кроком, згідно із (5), має бути розв'язок аплікати  $z$  відносно  $\rho$ , тобто слід підставити (13) у (12). Отже отримаємо таку залежність:

$$z(\rho) = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) \frac{r_2 \sin\left(\gamma - \arcsin\left(\frac{r_2 \sin \gamma}{\rho}\right)\right)}{\sin\left(\gamma - \left(\gamma - \arcsin\left(\frac{r_2 \sin \gamma}{\rho}\right)\right)\right)}.$$

Після деяких скорочень отримане рівняння набуде наступного вигляду:

$$z(\rho) = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) \rho \frac{\sin\left(\gamma - \arcsin\left(\frac{r_2 \sin \gamma}{\rho}\right)\right)}{\sin \gamma}. \quad (14)$$

Для отримання системи рівнянь гвинтової поверхні згідно із (7) слід здійснити перетворення (14) відповідно до (8) і в результаті отримаємо згідно із (9) рівняння осьового перерізу конволютної гвинтової поверхні:

$$z(x) = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) x \frac{\sin \tau}{\sin \gamma} - \frac{P}{2\pi} \tau, \quad (15)$$

де  $\tau$  – це одна із криволінійних координат різальної кромки, що визначається за:

$$\tau = \gamma - \arcsin\left(\frac{r_2 \sin \gamma}{x}\right);$$

$P$  – крок заданої різьби;  $\gamma$  – передній кут;  $\alpha_1$  – це кут між правою та лівою різальними кромками різбового різця у площині його передньої поверхні.

Згідно із [7, с. 13]:

$$\frac{\alpha_1}{2} = \operatorname{arctg}\left(\frac{P + \Delta_{\max} - \Delta_{\min}}{2H}\right),$$

де  $H$  – висота вихідного профілю різьби згідно з [13, с. 52]:

$$\Delta_{\max} = \frac{r_2^2 \sin^2 \gamma}{1 + \cos \gamma};$$

$$\Delta_{\min} = \frac{r_2^2 \sin^2 \gamma}{r_3 + \sqrt{r_3^2 - (r_2 \sin \gamma)^2}},$$

де  $r_2$  та  $r_3$  відповідно внутрішній і зовнішній радіуси різьби.

### Висновки і перспективи подальших розвідок.

1. При формоутворенні трикутної, або трапецеїдальної, різьби різцем, прямолінійна різальна кромка якого не проходить через вісь різьби, утворюється не заданий профіль різьби як архімедового гвинта, а конволютна гвинтова поверхня.

2. Отримане трансцендентне рівняння (15) осьового профілю різьби, що виконана означеним вище різцем, вказує на його теоретичну невідповідність профілю заданої різьби, яка описується алгебраїчним рівнянням першого порядку:

$$z(x) = \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha}{2} \right) x,$$

де  $\alpha$  – кут профілю заданої різьби.

3. Вказана невідповідність осьових перерізів заданої та отриманої гвинтових поверхонь вказує на технологічну неможливість відтворення теоретично точного профілю гвинтової різьби токарним різцем з кутом нахилу передньої поверхні, що не дорівнює нулю.

У наступних найближчих розвідках варто здійснити аналітичні дослідження отриманої залежності (15) щодо визначення величини її відхилення від заданого профілю різьби і здійснити порівняння із допустимими відхиленням певних стандартів.

### Список використаної літератури:

1. *Бобров В.Ф.* Многопроходное нарезание крепежных резьб резцом / *В.Ф. Бобров.* – М. : Машиностроение, 1982. – 104 с.
2. ГОСТ 632–80. Межгосударственный стандарт. Трубы обсадные и муфты к ним : Разработан и внесен Министерством черной металлургии СССР, нефтяной промышленности СССР. Утвержден и внесен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 05.06.80 № 2578. Взамен ГОСТ 632–64. Издание (апр. 2010 г.) с изменениями № 1, № 2, № 3, № 4, утвержденными в октябре

- 1982 г., январе 1986 г., январе 1988 г., мае 1989 г., июле 1992 г.  
(ИУС 2-83,  
5-86, 4-88,8-89). – М. : Стандартиформ, 2010. – 75 с.
3. *Боголюбов А.В.* О невозможности теоретически точной обработки линейчатых винтовых поверхностей круглым цилиндрическим инструментом / *А.В. Боголюбов* // Вестник МГТУ «Станкин». – 2012. – № 2 (20). – С. 70–74.
  4. *Люкшин В.С.* Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов / *В.С. Люкшин*. – М. : Машиностроение, 1967. – 372 с.
  5. *Онисько О. Р.* Забезпечення точності виготовлення різьб обсадних труб шляхом застосування параметричного проектування профілю різальної частини різьбонарізних інструментів в сердовищі системи програмування Дельфі / *О.Р. Онисько, Л.О. Боруцак, В.Б.Копей* // Науковий вісник Івано-Франківського нац. техн. ун-ту. – 2009. – № 2 (20). – С. 50–53.
  6. *Онисько О.Р.* Методи забезпечення точності виготовлення різьбових кінців труб нафтогазового сортаменту / *О.Р. Онисько* // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ, 2014. – № 3 (52). – С. 107–115.
  7. *Онисько О.Р.* Різьбові різці з відкоректованою за значенням переднього кута прямолінійною різальною кромкою / *О.Р. Онисько, В.Г. Панчук, В.В. Врюкало* // Прогресивні технології і системи машинобудування : міжнар. зб. наук. пр. – Донецьк, 2014. – № 2 (48). – С. 10–14.
  8. *Родин П.Р.* Металлорежущие инструменты : учебник / *П.Р. Родин*. – К. : Вища школа, 1986. – 456 с.
  9. *Фомин Е.В.* Повышение стойкости и точности резьбовых резцов на основе моделирования процесса резьбонарезания : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 : защищена 22.03.07 : утв. 24.09.07 / *Фомин Евгений Владимирович*. – М., 2007. – 206 с.
  10. Katalog 2011-2012 ZCC-CT. Гедион-Альфа Официальный дистрибутор инструмента ZCC-CT в России [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [www.g-alfa.ru/tochenie\\_2012.pdf](http://www.g-alfa.ru/tochenie_2012.pdf). – Назва з екрану.
  11. Ultra-rigid thread turning for all types of threads – internal and external // Sandvik Coromant. Site [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/corothread\\_266/Pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/corothread_266/Pages/default.aspx). – Назва з екрану.

ОНИСЬКО Олег Романович – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп’ютеризованого машинобудівного виробництва Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Наукові інтереси:

– САПР різьбових інструментів.

Тел.: 095–48–85–401.

E-mail: onysko.oleg@gmail.com

Стаття надійшла до редакції 14.07.2015