

**РІЗАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ. ПРОЕКТУВАННЯ,
ВИГОТОВЛЕННЯ, ЕКСПЛУАТАЦІЯ**

УДК 621.914

Л.Є. Глембоцька, аспір.*Житомирський державний технологічний університет***ПРОЕКТУВАННЯ РІЗАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ НОЖА
ТОРЦЕВОЇ ФРЕЗИ**

Спроектовано різальну частину ножів торцевої фрези з використанням графо-аналітичного рішення для обробки плоских поверхонь деталей з важкооброблювальних матеріалів.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Процес торцевого фрезерування важкооброблювальних матеріалів в певній мірі висвітлений в наукових публікаціях, але в більшості це стосується обробки деталей стандартними торцевими фрезами (ТФ), що супроводжується такими негативними явищами: зношування різальних кромки ножів; удари на вході та виході в зонах контакту з заготовкою; биття різальних кромки; нерівномірність навантаження ножів ТФ тощо. Одним із важливих факторів для мінімізації цих явищ є розробка оптимальної геометрії різальної частини ножів ТФ. В даній статті автор пропонує графо-аналітичне рішення при проектуванні різальної частини ножів ТФ з врахуванням науково-практичних підходів. Рішення цієї задачі ґрунтується на раціональному виборі геометричних параметрів різальної частини ножа ТФ, схеми різання, інструментального та оброблювального матеріалів. Раціональна геометрія різальної частини ножів ТФ при обробці плоских поверхонь деталей з важкооброблювальних матеріалів призведе до отримання якісного поверхневого шару деталі, підвищення продуктивності обробки, стійкості та ресурсу ТФ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [1–5], що визначальними для процесу зношування ножів ТФ є нагрівання різальних кромки та удари на вході і виході в зонах контакту з заготовкою. Таке зношування варто розглядати як термомеханічне руйнування матеріалу різальної частини ножів – адгезійне, абразивне, дифузійне зношування. Для зниження динаміки входу і виходу ножів з зони контакту із заготовкою в умовах різання важкооброблюваних матеріалів рекомендується [6] використовувати негативні передні кути

та великі кути нахилу різальної кромки ножів ТФ, тобто косокутне різання.

Найбільше зношування різальна частина ножів стандартних ТФ мають вершини. Тому варто використовувати безвершинну форму різальних частин ножів.

Найбільша інтенсивність зношування різальної частини ножів спостерігається на приробному етапі, що суттєво обмежує загальну стійкість ТФ. В свою чергу, різальні частини ножів в початковому стані мають найбільшу різальну здатність. Явище інтенсивного приробного зношування може бути пояснено невисокою динамічною сталістю процесу фрезерування та високою вразливістю гострих різальних кромок. Вирішення вказаної проблеми полягає в створенні “пом’якшеної” динаміки процесу фрезерування, тобто зменшенні похідних зміни сил та миттєвих швидкостей при ударних процесах. Для зниження ударів потрібно зменшувати маси за рахунок зменшення об’ємів ТФ та (чи) використання матеріалів корпусу ТФ з малою питомою вагою, підвищувати жорсткість зв’язку ТФ зі шпинделем верстата.

Причиною ударних процесів може бути як одночасність входу і виходу всіх точок різальних кромок в припуск заготовки, що має місце при ортогональному різанні, так і биття різальних кромок [7], що призводять до нерівномірного фрезерування. При косокутному різанні ножами з безвершинною формою нахиленої різальної частини цей недолік частково знімається. Але повне зняття буде мати місце після використання ступеневої схеми різання [8]. Крім того, ступеневі схеми різання характеризуються участю в різанні практично всіх ножів, що свідчить про підвищення продуктивності обробки.

Процес руйнування будь-якого матеріалу тиском, різанням тощо, в тому числі при знятті припуску, можна регулювати шляхом керування його напруженим станом [9], [10]. Тобто шар припуску, що зрізується стандартними інструментами, має звичайний всебічно стиснутий стан, тому необхідно сформувати менш напружений стан, який характеризувався б меншим гідростатичним тиском [11]. Конструктивно це можна вирішити шляхом виконання передньої поверхні різальної частини ножа опуклою циліндричною (або конічною), а задньої – плоскою.

З огляду на сказане вище, використання безвершинних ножів з циліндричною передньою та плоскою задньою поверхнями косокутного різання зі східчастим розташуванням на корпусі ТФ дасть можливість підвищити продуктивність обробки плоских поверхонь деталей з важкооброблювальних матеріалів, стійкість та ресурс ТФ.

Метою публікації є формування раціональної геометрії різальних ножів ТФ для обробки важкооброблювальних матеріалів на основі графо-аналітичного рішення при проектуванні різальної частини ножів ТФ з урахуванням наведених вище конструктивних підходів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Задачу профілювання різальної частини ножів ТФ можна вирішити за рахунок графічного [12] та аналітичного профілювання [13], [14]. Основною перевагою графічного профілювання є наочність усіх етапів. Однак його реальні елементи досить складні, особливо для різальної кромки, що є просторовою кривою. Крім того, графічне профілювання має сенс лише для конкретних значень вхідних параметрів. Усе це, особливо за наявності методик аналітичного профілювання, обмежує практичне застосування способів графічного профілювання. Однак є сенс порівняти на конкретному прикладі результати відпрацьованої методики графічного та аналітичного профілювання.

Профілювання різальної частини варто розпочати для певного ножа зі схеми різання (рис. 1).

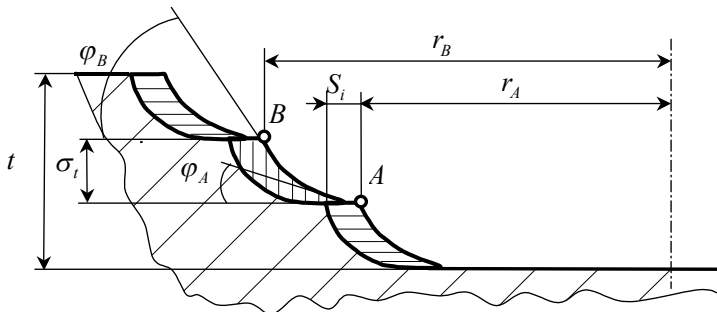


Рис. 1. Схема різання

Як вхідні параметри для вибраної глибини різання та геометричні параметри для вирішення задачі профілювання для двох базових точок A і B безвершинної різальної кромки на її краях, згідно з встановленою схемою різання, такі:

- кут в плані φ ;
- передній кут γ ;
- задні кути α ;
- кут нахилу різальної кромки λ .

Для вирішення задачі введемо систему прямокутних декартових координат $AXYZ$ з початком в базовій точці $A(0, 0, 0)$ та з наступними напрямками координатних осей (рис. 2): вісь X –

збігається з напрямком подачі; вісь Y – з нормаллю до оброблюваної поверхні (паралельно осі фрези); вісь Z – з вектором швидкості різання.

Площина XU паралельна площині Π_1 , XZ – площині Π , YZ – площині Π_3 .

За заданими значеннями кута в плані φ_A і кута λ_A нахилу різальної кромки, проводимо дотичну D_A до різальної кромки у базовій точці A .

Для цього під кутом φ_A до направлення подачі будуємо площину різання для точки A . Перемінивши площини проєкцій Π_1 на Π_2 через проєкцію A_2 точки A_1 на площину Π_2 під кутом λ_A до сліду основної площини проведемо дотичну D_A в натуральній величині до шуканої різальної кромки – A_2C_2 .

На площині Π_1 через точку A_1 паралельно основній площині проводимо пряму рівня т. A , а паралельно цій прямій проводимо пряму рівня т. B на відстані δ_i . Пряма рівня т. B перетинає D_A у площині Π_1 у точці C_1 і D_1 . Пряма, що вийшла, A_1D_1 є проєкцією сліду задньої проєкції Z_A в т. A . Для одержання сліду задньої поверхні в натуральній величині замінюємо площини проєкцій Π_1 на Π_3 та отримуємо A_3D_3 .

У головній січній площині Π_3 будуємо дотичну чи слід Π_A в натуральній величині під кутом γ_A до сліду основної площини в т. A та отримуємо – A_3F_3 . Проектуємо Π_A на площину Π_1 , а потім – на Π , Π_4 , Π_5 , Π_6 . На площині Π_1 фронтальна проєкція задньої поверхні у виді $\Delta A_1C_1D_1$, на площині Π – горизонтальна проєкція задньої поверхні $\Delta A_2C_2D_2$. На горизонтальній проєкції Π на прямій C_2D_2 знаходимо точку B , що знаходиться на відстані $\delta_r = r_B - r_A$ від точки A , спроекуємо на Π_1 пряму C_1D_1 , яка знаходиться на рівні точки B .

Знаходимо натуральну величину ΔACD – задня поверхня ножа фрези – за допомогою методу заміни площин проєкцій. При заміні однієї площини Π_1 робимо площину трикутника, що проєктується. Для цього нову площину проєкцій Π_4 проводимо перпендикулярно до

горизонтальної проекції площини Π . На нову площину проекцій Π_4 $\triangle ACD$ проектується прямою лінією $A_4C_4D_4$. Заміна другої площини проекцій Π_4 на площину Π_5 , що вибирається паралельно площині трикутника, забезпечує проектування $\triangle ACD$ на цю площину в натуральну величину.

Це дає можливість знайти в натуральну величину радіус циліндричної передньої поверхні ножа торцевої фрези. В т. A під прямим кутом до дотичної до різальної кромки проводимо нормаль (перпендикуляр). З точки A та точки B під однаковим кутом будуємо дуги сполучення, після чого з'єднуємо точки перетину дуг прямою – кривою помилок. Вона утворить проекцію бісектральної площини. Точка O_5 – перетин нормалі в точці A з кривою помилок – утворить центр окружності, що являє собою задню поверхню, а A_5O_5 – це радіус окружності в натуральну величину. При з'єднанні точок B_5 та O_5 створиться пряма B_5O_5 , до якої будується перпендикуляр. Точка перетину з дотичною в точці A_5 позначається M_5 . Пряма B_5M_5 – дотична до різальної кромки в т. B .

Якщо передня поверхня конічна, то потрібна ще одна проекція для знаходження вершини конуса.

Для знаходження на попередніх проекціях зображення різальної кромки, позначимо на ній деяку проміжну точку E_5 , і спроектуємо на всі проекції. Потім з'єднаємо дугою три точки: A , E , B . Також доцільно виконати перевірку геометричних параметрів в т. E .

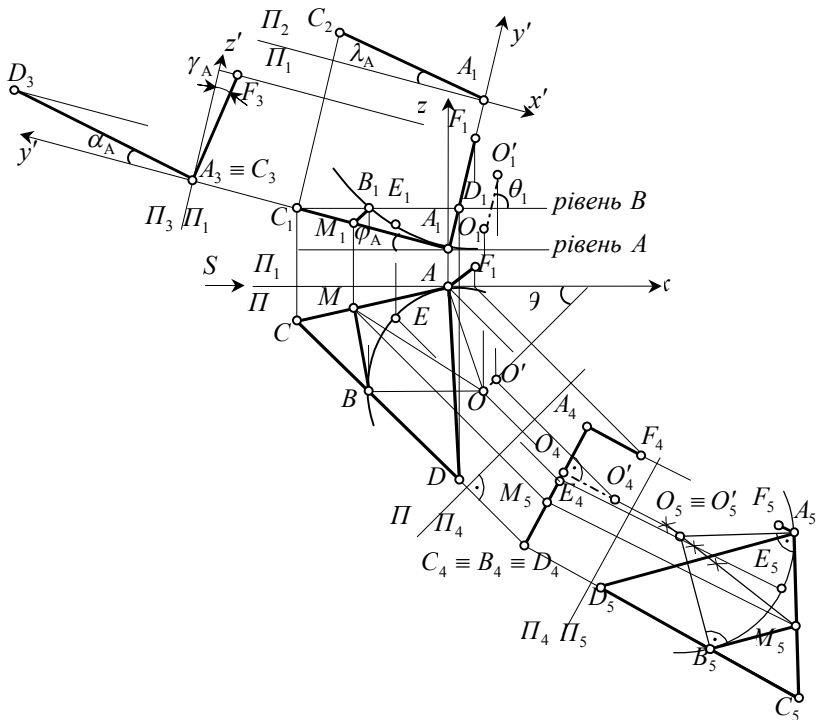


Рис. 2. Графічне профілювання різальної частини ножів ТФ

Кінцевими параметрами для виготовлення і встановлення різальної частини в корпусі ТФ є:

- радіус циліндричної поверхні;
- нахил проекції OO' до основної площини з кутом θ та нахил до площини різання з кутом θ_1 .

Вирішення задачі за допомогою аналітичного профілювання:

1. Передня поверхня різальної частини прийнята циліндричною, задня – плоскою.

Загальне рівняння площини:

$$Ax + By + Cz + D = 0.$$

Так як точка A проходить через початок координат, то рівняння задньої поверхні:

$$Ax + By + Cz = 0.$$

Рівняння дотичної D_A до різальної кромки в точці A :

$$\frac{x - x_0}{l_1} = \frac{y - y_0}{m_1} = \frac{z - z_0}{n_1},$$

де x_0, y_0, z_0 – координати точки, через яку проходить пряма; l, m, n – напрямні коефіцієнти прямої, що є проєкціями на координатні вісі OX, OY, OZ напрямного вектора прямої.

Так як т. A має координати $x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = 0$, рівняння буде таким:

$$\frac{x}{l_1} = \frac{y}{m_1} = \frac{z}{n_1}. \quad (1)$$

Як видно з рис. 2 (площина Π_2, Π_1):

$$\begin{aligned} l_1 &= -\cos \lambda_A \cdot \cos \varphi_A; \\ m_1 &= \sin \lambda_A; \\ n_1 &= \sin \varphi_A. \end{aligned}$$

Знак кута нахилу різальної крайки враховано ($\lambda_A < 0^\circ$).

Рівняння дотичної Z_A до сліду передньої поверхні на головній січній площині в т. A :

$$\frac{x}{l_2} = \frac{y}{m_2} = \frac{z}{n_2}, \quad (2)$$

де

$$\begin{aligned} l_2 &= \sin \varphi_A; \\ m_2 &= \cos \alpha_A; \\ n_2 &= \sin \alpha_A \cdot \cos \varphi_A. \end{aligned}$$

Рівняння площини, дотичної до передньої поверхні, проведеної через дотичну до різальної кромки D_A в т. A , та дотичну Z_A до сліду передньої поверхні на головній січній площині в т. A :

$$\begin{vmatrix} x & y & z \\ l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \end{vmatrix} = 0.$$

Позначивши

$$A'_1 = \begin{vmatrix} m_1 & n_1 \\ m_2 & n_2 \end{vmatrix} = m_1 n_2 - m_2 n_1;$$

$$B'_1 = \begin{vmatrix} n_1 & l_1 \\ n_2 & l_2 \end{vmatrix} = n_1 l_2 - n_2 l_1;$$

$$C'_1 = \begin{vmatrix} l_1 & m_1 \\ l_2 & m_2 \end{vmatrix} = l_1 m_2 - l_2 m_1,$$

маємо

$$A'_1 x + B'_1 y + C'_1 z = 0; \quad (3)$$

в нормальному вигляді:

$$A_1 x + B_1 y + C_1 z = 0, \quad (4)$$

де

$$A_1 = \frac{A'_1}{\sqrt{(A'_1)^2 + (B'_1)^2 + (C'_1)^2}};$$

$$B_1 = \frac{B'_1}{\sqrt{(A'_1)^2 + (B'_1)^2 + (C'_1)^2}};$$

$$C_1 = \frac{C'_1}{\sqrt{(A'_1)^2 + (B'_1)^2 + (C'_1)^2}}.$$

Рівняння нормалі до задньої поверхні в точці A :

$$\frac{x}{A_1} = \frac{y}{B_1} = \frac{z}{C_1}. \quad (5)$$

Запишемо рівняння сліду Π_A ($A_3 F_3$) головної січної площини на задній поверхні в т. A :

$$\frac{x}{l_3} = \frac{y}{m_3} = \frac{z}{n_3}, \quad (6)$$

де

$$l_3 = \sin \varphi_A;$$

$$m_3 = \sin \gamma_A;$$

$$n_3 = \cos \gamma_A \cos \varphi_A.$$

Рівняння площини задньої поверхні:

$$\begin{vmatrix} x & y & z \\ l_1 & m_1 & n_1 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

чи

$$A_2x + B_2y + C_2z = 0, \quad (8)$$

де

$$A_2 = \begin{vmatrix} m_1 & n_1 \\ m_3 & n_3 \end{vmatrix} = m_1n_3 - m_3n_1;$$

$$B_2 = \begin{vmatrix} n_1 & l_1 \\ n_3 & l_3 \end{vmatrix} = n_1l_3 - n_3l_1;$$

$$C_2 = \begin{vmatrix} l_1 & m_1 \\ l_3 & m_3 \end{vmatrix} = l_1m_3 - l_3m_1.$$

2. Знаходимо лінію перетину задньої поверхні ножа ТФ та обробленої поверхні деталі, яка знаходиться на рівні точки B , за допомогою системи рівнянь (відстань між рівнем точки A та рівнем точки B дорівнює δ_t).

Вирішуючи систему рівнянь

$$\begin{cases} A_2x + B_2y + C_2z = 0 \\ z = \sigma_t \end{cases}, \quad (9)$$

отримаємо рівняння лінії перетину:

$$\frac{x - x_0}{B_2} = \frac{y - y_0}{-A_2} = \frac{z - z_0}{0}, \quad (10)$$

де $x_0 = 0$; $y_0 = \frac{C_2}{B_2} \sigma_t$; $z_0 = \sigma_t$.

Так як $n = 0$, то ця лінія перпендикулярна до осі OZ та проходить через точку $(0; \frac{C_2}{B_2} \sigma_t; \sigma_t)$.

3. Знаходимо точку B – друга визначальна точка площі задньої поверхні.

Вона знаходиться на лінії перетину площин (10) шляхом її перетину циліндричною поверхнею, яка має за вісь вісь фрези та радіус $r_B = r_A - \sigma_r$.

$$\begin{cases} \frac{x}{B_1} = \frac{y + \frac{C_1}{B_1} \sigma_t}{-A_1} = \frac{z - \sigma_t}{0} \\ (x - r_A)^2 + (y - r_A)^2 + z^2 = (r_A + \sigma_r)^2 \end{cases}. \quad (11)$$

Підставляючи значення, отримуємо:

$$L \cdot t^2 + M \cdot t + N = 0,$$

де

$$t_{1,2} = \frac{-M \pm \sqrt{M^2 - 4 \cdot L \cdot N}}{2L} \Rightarrow .$$

$$\text{Координати т. } B : x_B = B_2 t_{1,2}; \quad y_B = -\frac{C_2}{B_2} \sigma_t - A_2 t_{1,2}; \quad z_B = \sigma_t.$$

4. Знаходимо бісектрису між відомою дотичною в т. *A* і невідомою дотичною в т. *B* як геометричне місце точок, рівновіддалених від точок *A* і *B*.

Відстань між двома точками в просторі:

$$\rho(A, B) = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}. \quad (12)$$

Бісектриса проходить через точку, яка буде ділити відрізок *AB* порівну (точка *M*).

Нехай *M* (x_M, y_M, z_M) – точка даного геометричного місця. За умовою $|AM| = |BM|$:

$$|AM| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2};$$

$$|BM| = \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2}.$$

Так як т. *A*(0; 0; 0), то за формулою (12) отримуємо:

$$\rho(A, B) = \sqrt{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2}.$$

Підставляючи ці вирази в умову $|AM| = |BM|$, знаходимо рівняння даної множини точок:

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2}.$$

Спростимо це рівняння. Зведемо в квадрат обидві частини рівняння та розкриємо дужки в підкорінних виразах, підставляючи координати x_B, y_B, z_B отримаємо рівняння прямої лінії – бісектриси:

$$A_2 x_M + B_2 y_M + C_2 z_M + D_2 = 0. \quad (13)$$

Центр шуканої дугової кромки буде знаходитись на цій бісектрисі.

5. Знайдемо перпендикуляр (лежить в площині задньої поверхні) до дотичної до ріжучої кругової кромки в т. *A*.

Рівняння перпендикуляра:

$$\frac{x - x_{\Pi}}{l_4} = \frac{y - y_{\Pi}}{m_4} = \frac{z - z_{\Pi}}{n_4}. \quad (14)$$

Якщо прямі (1) та (14) лежать в одній площині ($x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $z_0 = 0$), то

$$\begin{vmatrix} x_{\Gamma} & y_{\Gamma} & z_{\Gamma} \\ l_1 & m_1 & n_1 \\ l_4 & m_4 & n_4 \end{vmatrix} = 0.$$

Умова перпендикулярності двох прямих:

$$l_1 l_4 + m_1 m_4 + n_1 n_4 = 0.$$

Умова, за якої перпендикуляр та D_A лежать в одній площині:

$$x \cdot (m_1 n_4 - m_4 n_1) - y \cdot (l_1 n_4 - l_4 n_1) + z \cdot (l_1 m_4 - l_4 m_1) = 0.$$

Центр дугової ріжучої кромки – точку O – знаходимо як точку перетину бісектриси (13) і перпендикуляра (14):

$$\begin{cases} \frac{x - x_{\Gamma}}{l_4} = \frac{y - y_{\Gamma}}{m_4} = \frac{z - z_{\Gamma}}{n_4} \\ A_2 X_M + B_2 Y_M + C_2 Z_M + D_2 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

За допомогою побудованих формул можна провести розрахунок на будь-яку кількість ножів, в свою чергу, за допомогою графічного профілювання – на один ніж. Результат аналітичного методу виходить з більшою точністю та швидкістю, ніж графічного.

Рекомендовані числові значення геометричних параметрів для базових точок A і B різальної кромки:

- кут в плані $\varphi_A = 5 \div 15^\circ$ та $\varphi_B = 20 \div 50^\circ$;
- передній кут $\gamma_A \approx \gamma_B \approx -5^\circ \div -15^\circ$;
- задні кути $\alpha_A \approx \alpha_B \approx 8 \div 10^\circ$;
- кут нахилу різальної кромки $\lambda_A = 5 \div 10^\circ$; $\lambda_B = 30 \div 50^\circ$.

Висновок. З використанням графоаналітичного методу спроектовано різальну частину безвершинних ножів з циліндричною передньою та плоскою задньою поверхнями косокутного різання зі ступеневим розташуванням на корпусі ТФ, що дозволило визначити рекомендовані раціональні числові значення геометричних параметрів різальної частини ножа ТФ та оптимальну схему різання.

Подальші дослідження потребують розробки конструкції ТФ з спроектованими ножами та виконання експериментів для певного інструментального та оброблювального матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Андреев Г.С.* Удар при прерывистом резании металлов // Вестник машиностроения. – 1971. – № 3. – С. 65–68.
2. *Андреев Г.С.* Влияние тепловых и адгезионных явлений на работоспособность твердосплавного инструмента при прерывистом резании // Вестник машиностроения. – 1974. – № 10. – С. 71–74.
3. *Фадеев В.С.* Хрупкое разрушение твердосплавного инструмента при фрезеровании // Станки и инструмент. – 1985. – № 5. – С. 23–24.
4. *Bratia S.M., Pandey P.C., Shan H.S.* Температурное разрушение твердосплавных инструментов при прерывистом резании // Wear. – 1978. – 51, № 2. – P. 201–211.
5. *Wilson Robert A.* Стойкость инструмента в условиях прерывистого резания // Iron Age. – 1975. – 215, № 12. – P. 35–39.
6. *Зорев Н.Н.* Обработка стали твердосплавным инструментом в условиях прерывистого резания с большими сечениями среза // Вестник машиностроения. – 1963. – № 2. – С. 62–66.
7. *Шохов И.С.* Влияние биения зубьев фрез на процесс фрезерования жаропрочных сталей и сплавов. – М.: ГИОП, 1955. – 59 с.
8. *Сенькин Е.Н. и др.* Конструкция и эксплуатация фрез, оснащенных композитами. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 63 с.
9. Механические свойства материалов под высоким давлением / Под ред. Х.Л. Пью. – Том 1. – М.: Мир, 1973. – С. 65–75.
10. *Береснев Б.И. и др.* Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях. – М.: Наука, 1970. – С. 79–88.
11. *Армарего И.Дж.А., Браун Р.Х.* Обработка металлов резанием. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 22–24.
12. *Антонович Є.А. та ін.* Нарисна геометрія. Практикум: Навчальний посібник / За ред. проф. Є.А. Антоновича. – Львів: Світ, 2004. – 528 с.
13. *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1976. – 870 с.
14. *Гусак А.А.* Аналитическая геометрия и линейная алгебра: Справочное пособие к решению задач. – Минск, 1991. – 352 с.

ГЛЕМБОЦЬКА Лариса Євгеніївна – аспірант кафедри ТМ і КТС Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування та проектування різальних інструментів.

Подано 20.09.2005