

35. Клапцов Ю. В., Панасюк І. В., Петко І. В. Визначення конструктивних параметрів струменеформуючого пристрою // Вісник Хмельницького національного університету. 2013. № 3. С. 115–118.
36. Бориславський Г. М., Сіроткін О. А., Сидяк В. О. Датчик тиску: Пат. № 32727 А UA. G 01 L/00. № 20021210166; заявл. 17.12.2002; опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5. 4 с.
37. Індикатор тиску для вогнегасника: Пат. № 6956 С1 UA. G 01 L 7/00 / Воропаєв В. М., Жилін О. М., Плаксов С. В., Плотніков В. В. № 94061590; заявл. 16.06.1993; опубл. 31.03.1995, Бюл. № 1. 3 с.
38. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978. 704 с.
39. Злотніков В. О., Попович О. В., Кущевський М. О. Пристрій для вимірювання динамічного тиску затопленого гідро-струменя: Пат. № 55669 UA. G01L 7/00. № u201000403; заявл. 18.01.2010; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 17. 3 с.
40. Якимчук О. В., Сідлецький І. О., Кущевський М. О. Про вплив геометричних параметрів насадків та затопленого гідро-струменя на якість формування об'ємних деталей головних уборів // Вісник Житомирського державного технологічного університету. 2010. № 2. С. 61–67.

Розглянуто задачу аналітичного визначення навантаженості безвершинних різальних кромок торцевої фрези зі спірально-ступінчастим розташуванням ножів. Розроблено математичну модель визначення елементів зрізу в довільному положенні ножів фрези на дузі контакту, достовірність якої підтверджена імітаційним моделюванням. Виявлено залежності величини елементів зрізу від конструктивних параметрів фрези та подачі

Ключові слова: торцеве фрезерування, елементи зрізу, ступінчасті схеми різання

Рассмотрена задача аналитического определения загрузки безвершинных режущих кромок торцевой фрезы со спирально-ступенчатым расположением ножей. Разработана математическая модель определения элементов среза в произвольном положении ножей фрезы на дуге контакта, достоверность которой подтверждена имитационным моделированием. Выявлены зависимости величины элементов среза от конструктивных параметров фрезы и подачи

Ключевые слова: торцевое фрезерование, элементы среза, ступенчатые схемы резания

УДК 621.914
DOI: 10.15587/1729-4061.2018.121712

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ БЕЗВЕРШИННИХ РІЗАЛЬНИХ КРОМОК ТОРЦЕВОЇ ФРЕЗИ ІЗ СПІРАЛЬНО-СТУПІНЧАСТИМ РОЗТАШУВАННЯМ НОЖІВ

Л. Є. Глембоцька
Асистент*

E-mail: gle.tmkt@gmail.com

П. П. Мельничук
Доктор технічних наук, професор**

E-mail: meln_pp@ukr.net

Н. О. Балицька
Кандидат технічних наук**

E-mail: balytskanataliia@gmail.com

О. Л. Мельник
Кандидат технічних наук*

E-mail: o.l.melnyk@ukr.net

*Кафедра галузевого машинобудування***

**Кафедра прикладної механіки

і комп'ютерно-інтегрованих технологій***

***Житомирський державний технологічний університет

вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

1. Вступ

Торцеві фрези знайшли широке застосування як при чорновому, так і напівчистовому та чистовому обробленні плоских поверхонь деталей машин. Підвищення продуктивності фрезерування таких поверхонь є важливою задачею сучасного машинобудування і може досягатися за рахунок підвищення подачі та/або швидкості різання.

В свою чергу, інтенсифікація швидкості різання обумовлює необхідність застосування надтвердих інструментальних матеріалів, що різко підвищує собівартість оброблення, особливо для багатозубих інструментів. Збільшення режимів різання також викликає погіршення динамічного стану технологічної оброблюючої системи, чим обмежується можливість підвищення продуктивності оброблення. Тому виникає необхідність розробки

прогресивних конструкцій торцевих фрез, які характеризуються кращою динамічною стабільністю процесу оброблення, розраховані на умови оброблення із збільшеними подачами та забезпечують необхідну якість поверхні. До них належать фрези із спірально-ступінчастими схемами різання, що мають безвершинні різальні кромки, які відрізняються змінністю площі зрізу для різних ножів.

Рішення про доцільність застосування інструмента певної конструкції не може прийматися без аналізу особливостей завантаженості його різальних кромок. Процес торцевого фрезерування характеризується ударами при вході/виході ножа із зони різання, змінністю товщини зрізу по дузі контакту та кількості ножів, що одночасно беруть участь в різанні, тощо. Наслідком цього є значні періодичні коливання сил різання, які впливають на якість обробленої поверхні, стійкість інструмента, динамічний стан всієї технологічної оброблюючої системи. Розрахунок сил різання ґрунтується на попередньо визначених елементах зрізу. Якщо для стандартних фрез, що працюють за генераторною схемою різання, визначення цих параметрів не викликає труднощів, то для торцевих фрез зі спірально-ступінчастими схемами різання і безвершинними різальними кромками дана задача залишається невирішеною. Тому виникає необхідність аналітичного визначення елементів зрізу для кожного ножа досліджуваної торцевої фрези на всій дузі контакту інструмента із заготовкою. З практичної точки зору розроблена математична модель дозволить визначити раціональні значення подачі та конструктивних параметрів торцевої фрези для її ефективної роботи при різних значеннях глибини різання.

Таким чином, прикладним аспектом використання отриманого наукового результату є можливість підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь при забезпеченні необхідної якості, що визначає актуальність даного дослідження.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Одним із напрямів сучасного машинобудування є підвищення продуктивності оброблення, разом з тим важливо, щоб при цьому не втрачалася якість оброблених поверхонь. Забезпечення необхідної шорсткості поверхні може бути досягнуте лише при задовільних динамічних характеристиках технологічної оброблюючої системи в процесі різання.

Важливий внесок у дослідження стабільності процесу фрезерування був зроблений в роботі [1], проте запропонована аналітична модель не дає можливості врахувати розподіл зрізу для ступінчастих торцевих фрез та геометричні параметри інструмента.

В роботі [2] розроблена математична модель визначення сил різання для процесу оброблення торцевими фрезами з круглими ножами з різальною кераміки. Ця модель дозволяє визначити оптимальні геометричні параметри ножів для забезпечення підвищеної продуктивності оброблення шляхом прогнозування динамічних характеристик процесу різання. Однак дане дослідження спрямоване на підвищення продуктивності за рахунок збільшення лише швидкості різання і тому, не може бути використане для ступінчастих твердосплавних торцевих фрез.

Питанням визначення динамічних характеристик процесу різання ступінчастими торцевими фрезами та фрезами стандартної конструкції присвячена робота [3].

При цьому використана математична модель динаміки процесу торцевого фрезерування ґрунтується на уточнюючих коефіцієнтах, що враховують властивості оброблюваного матеріалу, параметри режиму різання та геометрії різальної частини інструмента. Проте вибір цих коефіцієнтів є достатньо обмеженим і умовним.

Залежність параметрів шорсткості механічно оброблених поверхонь від геометричних параметрів інструмента розглядалася в роботах [4–6]. Результати, що отримані в роботах [4, 5], свідчать про високу ефективність застосування як різців, так і торцевих фрез з циліндричною передньою поверхнею ножів при обробленні деталей з високими подачами.

Автори роботи [6] досліджували питання залежності якості обробленої поверхні від геометричних параметрів торцевих фрез при високошвидкісному обробленні. Розроблена геометрична модель прогнозування шорсткості фрезерованої поверхні орієнтована лише на процес різання фрезами з квадратними ножами і тому не може бути використана в даному дослідженні.

Вплив режимів фрезерування на якість обробленої поверхні вивчали автори робіт [5, 7, 8]. В [5] вирішені питання оптимізації режимів різання при чистовому обробленні плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів ступінчастими торцевими фрезами, оснащеними надтвердими матеріалами. Однак суто експериментальний підхід не дозволяє поширити отримані результати на чорнове та напівчистове оброблення ступінчастими торцевими фрезами з іншими схемами різання, оснащеними твердим сплавом. В роботі [7] досліджений вплив лише швидкості різання на шорсткість поверхні, обробленої торцевим фрезеруванням.

В роботі [8] для опису площі поверхні мікрорельєфу, що формується торцевим фрезеруванням при різних значеннях подачі, застосований метод фрактального аналізу. Проте дане дослідження спрямоване на стандартні торцеві фрези і не вирішує задачі підвищення продуктивності фрезерування плоских поверхонь.

Варто зазначити, що спільною рисою всіх згаданих робіт є орієнтація на роботу стандартними торцевими фрезами з генераторною схемою різання, які характеризуються погіршенням динамічних характеристик процесу оброблення при інтенсифікації подачі і швидкості різання. Водночас, відповідно до [3, 9, 10], більш високим рівнем динамічної стійкості порівняно зі стандартними характеризуються торцеві фрези з комбінованими схемами різання.

Задачею підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь деталей за рахунок розробки торцевих фрез прогресивної конструкції з ступінчастими схемами різання різних типів займалися автори [5, 11, 12]. Найбільш розповсюдженим є розташування ножів торцевих фрез за спіралями Архімеда [11] та логарифмічною спіраллю [12].

Як відомо, Архімедові спіралі характеризуються постійним радіальним кроком витків, на яких розташовуються ножі. Це викликає постійну ширину, але зростаючу товщину кожного зрізу, яка створюється ножами зі збільшеними головними кутами в плані. Радіальна відстань між витками у логарифмічній спіралі необмежено зростає, що призводить до перевантаження чорнових ножів. Тому для зменшення товщини і ширини зрізу чорновими ножами доцільно використовувати спіралі Ферма, в яких радіальний крок витків у напрямку від центру зменшується [5].

Роботи [11, 13] характеризуються використанням різальних ножів з плоскою передньою та циліндричною задньою поверхнями, встановленням різного вильоту ножів відносно поверхні корпусу торцевої фрези та отриманням загальної поверхні різання конічної форми. Аналіз цих схем різання показує, що через велику різницю в швидкостях різання окремими ножами (особливо ножами на меншому та більшому діаметрах) має місце суттєва різниця в зношуванні. Через малі значення кутів в плані для чорнових ножів спостерігається зростання явища копіювання. Крім того, через велику різницю в діаметрах, на яких розташовані перший та останній ножі, обмежується ширина оброблюваної деталі та/або спостерігається збільшення габаритів фрези.

В [5] пропонується виконати загальну поверхню різання торової форми за рахунок використання тороїдального корпусу торцевої фрези. Ніж, який обробляє зовнішню поверхню заготовки, характеризується кутом в плані близьким до прямого, що визначає мінімальне копіювання поверхні заготовки на поверхні деталі. Ніж, який обробляє поверхню деталі, має нульовий кут в плані. Завдяки такому розташуванню ножів на колі тора чистовим ножом зрізається мала товщина зрізу, що обумовлює високу якість поверхневого шару.

Також в роботах [14, 15, 16] пропонується використання ножів з дуговою різальною кромкою, що призводить до збільшення довжини активної ділянки різальної кромки, підвищення якості обробленої поверхні та продуктивності оброблення.

В роботі [5] запропонована конструкція торцевої фрези з циліндричною передньою та плоскою задньою поверхнями ножів, розташованих по ділянкам спіралі Ферма на тороїдальному корпусі, яка забезпечує підвищення продуктивності оброблення та якості обробленої поверхні. Встановлено, що при обробленні плоских поверхонь спіральнo-ступінчастою торцевою фрезою з циліндричною передньою поверхнею ножів забезпечується підвищення продуктивності в 2,9 рази в порівнянні з обробленням шліфуванням. При цьому була забезпечена шорсткість обробленої поверхні $R_a = 1,2 \text{ мкм}$ та відхилення від площинності $\Delta = 25 \text{ мкм}$. Проте, для фрез такої конструкції залишаються невизначеними елементи зрізу, що унеможливує аналіз завантаженості ножів та подальший розрахунок сил різання при різних умовах фрезерування. Тому для наукового обґрунтування завантаженості ножів запропоновано в [5] фрези необхідно розробити математичну модель визначення елементів зрізу для ножів всіх ступіней.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є створення математичної моделі завантаженості безвершинних різальних кромок торцевої фрези із спіральнo-ступінчастим розташуванням ножів на тороїдальному корпусі. Це дасть можливість визначити елементи зрізу кожного ножа торцевої фрези при

різних умовах оброблення та сформулювати рекомендації щодо призначення раціональних конструктивних параметрів торцевої фрези для певної глибини різання.

- Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання:
- аналітичним методом визначити товщину, ширину, глибину, максимальний кут в плані та площу зрізу кожного ножа торцевої фрези в довільній точці дуги контакту;
 - перевірити достовірність розробленої математичної моделі за допомогою імітаційного моделювання завантаженості різальних кромок торцевої фрези;
 - на основі розробленої математичної моделі дослідити вплив конструктивних параметрів торцевої фрези та величини подачі на елементи зрізу кожного ножа фрези;
 - сформулювати рекомендації щодо призначення раціональних конструктивних параметрів торцевої фрези для певної глибини різання.

4. Методика визначення завантаженості різальних кромок торцевої фрези

4.1. Особливості конструкції торцевої фрези

Конструкція досліджуваної торцевої фрези із спіральнo-ступінчастим розташуванням ножів із безвершинними різальними кромками наведена на рис. 1.

При створенні ступінчастих схем різання ножі 5 розташовують на одній або декількох спіралях, а в осевій площині – повернутими навколо колової осі 11 на кути η_i один відносно одного.

Загальна поверхня різання утворюється за рахунок радіального розташування кожного ножа на корпусі торцевої фрези та відносного повороту осі кожного ножа навколо осі тору на кут η_i (рис. 1).

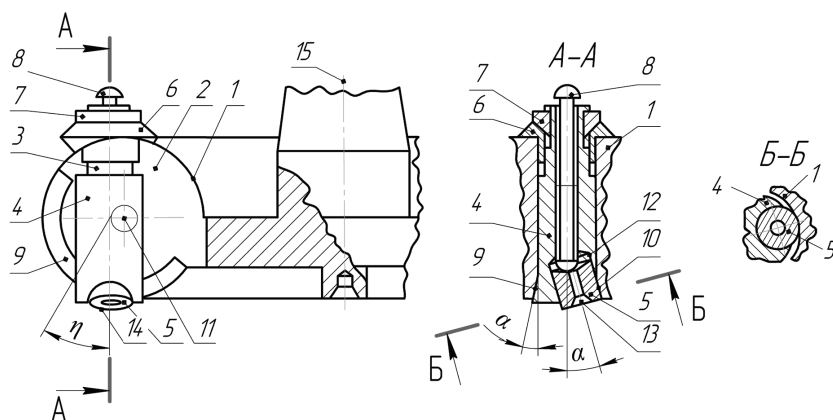


Рис. 1. Конструкція торцевої фрези:

- 1 – тороїдальний корпус, 2 – осевий паз, 3 – різцевий вузол, 4 – державка, 5 – круглий ніж, 6 – шайба, 7 – гайка, 8 – регулюючий гвинт, 9, 10 – фаски, 11 – колова вісь, 12 – циліндричний отвір під ніж, 13 – вісь ножа, 14 – торцева кромка ножа, 15 – вісь торцевої фрези

Для виконання напівчистового оброблення (глибина різання 3 мм) пропонується розташування на тороїдальному корпусі торцевої фрези 12 ножів по спіралі Ферма за ступінчастою схемою різання (3 ділянки по 4 ножа) з рівномірним кутовим кроком між ножами (кут θ). Діаметр фрези – 160 мм (за ножом розташованим на мінімальному діаметрі), діаметр ножів – 10,8 мм, кут нахилу різальних вузлів – 6, 0, 6, 12°, задній кут – 16°.

4. 2. Застосовані методи моделювання завантаженості різальних кромок торцевої фрези

При складанні математичної моделі завантаженості різальних кромок торцевої фрези були прийняті такі припущення: ножі фрези незношені, биття ножів, хвостовика, оправки, шпинделя і т. д. відсутнє, припуск на обробку – рівномірний. Для розрахунку елементів і товщини зрізу необхідно прийняти декартову систему координат таким чином: XOY співпадає з площиною різання, XOZ – з основною площиною, YOZ – з січною площиною. Вісь Z співпадає з віссю обертання фрези (рис. 2, а). Проекція задньої плоскої поверхні ножа на основну площину XOZ має форму еліпса. Форма зрізу, що видаляється кожним ножом, визначається положеннями різальних кромок суміжних ножів в основній площині XOZ (рис. 2, б).

Для математичного моделювання необхідно ввести початкові дані (рис. 2): радіус фрези – R , радіус тора – r_{tor} , радіус ножа – r_{ins} , задній кут – α_N , величина зміщення осі різального вузла – δ , кількість ножів – k , кількість спіралей – N , подача на хвилину – $s_{хв}$, частота обертання – n , величина вильоту центра плоскої задньої поверхні ножа – Δr , кут нахилу осі різального вузла відносно осі тороїдального корпусу фрези – η_i .

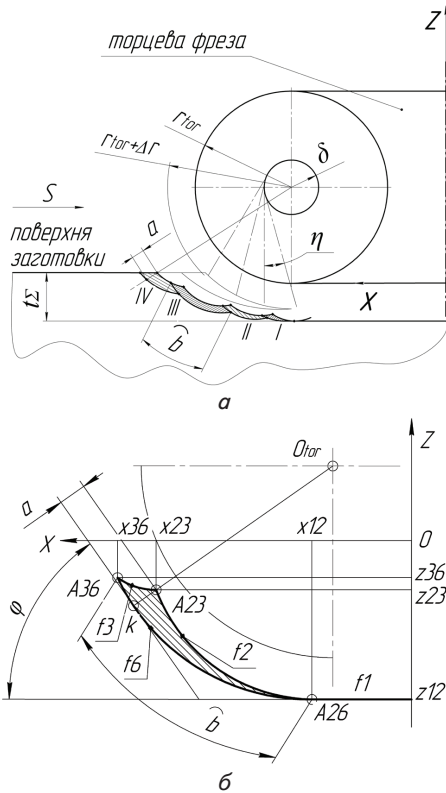


Рис. 2. Елементи зрізу:

а – схема різання; б – переріз зрізу ножа першої ступені

Розробка математичної моделі завантаженості безвершинних різальних кромок ножів торцевої фрези із спірално-ступінчастою схемою різання проводилася в наступній послідовності.

1. Визначення початкового і кінцевого радіуса, на якому розташовуються ножі торцевої фрези за трьома ділянками спіралі Ферма:

$$\rho_{0,k} = R + \delta + \left(\sqrt{(r_{tor} + \Delta r)^2 - \delta^2} + \delta \cdot \operatorname{tg} \eta_i \right) \cdot \sin \eta_i. \quad (1)$$

2. Визначення координат центрів задньої плоскої поверхні циліндричних ножів на площині XOZ :

$$\begin{aligned} x_i &= \rho_i; \\ z_i &= r_{tor} - \left(\sqrt{(r_{tor} + \Delta r)^2 - \delta^2} + \delta \cdot \operatorname{tg} \eta_i \right) \cdot \cos \eta_i, \end{aligned} \quad (2)$$

де ρ_i – радіусна відстань центра задньої плоскої поверхні кожного ножа, що розраховується за допомогою рівняння спіралі Ферма.

3. Враховуючи те, що ножі запропонованої фрези розташовані на різній радіальній відстані та з різним кутом нахилу η_i кожного різального вузла відносно осі фрези, то канонічне рівняння еліпса має такий вид:

$$X^2/r_{ins}^2 + Z^2/(r_{ins} \cdot \sin \alpha)^2 = 1, \quad (3)$$

де

$$\begin{cases} X = (x - x_i) \cdot \cos \eta_i + (z - z_i) \cdot \sin \eta_i, \\ Z = -(x - x_i) \cdot \sin \eta_i + (z - z_i) \cdot \cos \eta_i \end{cases}$$

– формули перетворення нової системи координат до системи координат XOZ , які враховують перенос системи координат та поворот на кут η_i .

4. Визначення загальних рівнянь проекцій ножів (еліпсів) на основну площину у вигляді:

$$Ax^2 + 2Bxz + Cz^2 + 2Dx + 2Ez + F = 0. \quad (4)$$

5. Знаходження координат точок перетину еліпсів A12, A23, A36 (рис. 2, б) за допомогою рішення системи рівнянь:

$$\begin{cases} f_1(x, z), \\ f_2(x, z), \\ f_3(x, z), \\ f_4(x, z), \end{cases} \quad (5)$$

де $f_i(x, z)$ – загальні рівняння еліпсів, які формують кожен зріз.

6. Визначення максимальної товщини a , ширини зрізу b , максимального головного кута в плані ϕ , глибини різання t та площі зрізу S для ножів всіх ступіней проводиться відповідно до наведеної нижче послідовності (рис. 2, б):

- визначається рівняння прямої, що проходить через центр тора O_{tor} і точку перетину A23;
- визначаються координати перетину прямої і еліпса рішенням системи рівнянь:

$$\begin{cases} f_6(x, z); \\ z = kx + c; \end{cases} \quad (6)$$

– визначається товщина зрізу за формулою:

$$a_i = \sqrt{(x_k - x_{ij})^2 + (z_k - z_{ij})^2}, \quad (7)$$

де x_k, z_k – координати точки перетину прямої і еліпса (6); x_{ij}, z_{ij} – координати точки перетину A23 відповідних еліпсів;

– визначається максимальний головний кут в плані ϕ в досліджуваній точці різальної кромки x_{ij}, z_{ij} :

$$\phi_i = \arcsin((a_i \cdot n \cdot N) / s_{хв}); \quad (8)$$

– визначається глибина різання ножом кожної ступені:

$$t_i = z_{36} - z_{12}, \tag{9}$$

де z_{36} та z_{12} – координати точок перетину еліпсів А36 та А12, що формують відповідний зріз (рис. 2, б);

– визначається ширина зрізу, як довжина дуги, яка є проекцією активної ділянки різальної кромки на кожній ступені:

$$b_i = \int_{x_{12}}^{x_{36}} \sqrt{1 + (f(x)')^2}, \tag{10}$$

де x_{36} , x_{12} – граничні координати точок дуги (ширини зрізу); $f(x)$ – рівняння відповідного еліпсу, що визначає ширину зрізу;

– визначається площа зрізу S ножів на всіх ступенях, як площа криволінійної фігури, обмеженої дугами:

$$S_{ij} = \int_{x_{26}}^{x_{23}} (f_2(x) - f_6(x)) dx + \int_{x_{23}}^{x_{36}} (f_3(x) - f_6(x)) dx, \tag{11}$$

де x_{23} , x_{26} , x_{36} – границі інтегрування – координати точок перетину еліпсів, що формують відповідний зріз.

Площі зрізу ножів кожної ступені фрези в довільній точці дуги контакту будуть визначатися за формулою:

$$S_i = S_{ic} \cdot \cos \psi_i = S_{ic} \cdot \cos \left(\frac{B/2 \pm \epsilon}{R_i} \right), \tag{12}$$

де S_{ic} – це площа зрізу ножа відповідної ступені в базовій площині (основній площині, що проходить через вісь фрези і напрямок подачі).

4.3. Імітаційне моделювання навантаженості різальних кромок торцевої фрези

Результати проведеного аналітичного дослідження потребують експериментальної перевірки. Проте величину елементів зрізу виміряти безпосередньо неможливо по причині усадки стружки. Визначення елементів зрізу опосередкованими методами не забезпечує достатньої точності. З огляду на це, для перевірки адекватності розробленої математичної моделі було проведено імітаційне моделювання навантаженості різальних кромок в середовищі SolidWorks Motion шляхом графічного моделювання руху фрези та заготовки. При цьому за рахунок створення ескізу в контексті збірки та формування проекцій різальних кромок, одержано плоскі фігури (котрі є перерізами зрізу матеріалу) та визначені їх площі.

З імітаційної моделі були виключені всі незначущі для даного дослідження елементи (кріпильні частини різальних вузлів), а взаємне положення деталей збірки моделі визначається спряженнями між деталями.

Для виконання імітаційного моделювання створена твердотіла збірна модель фрези та заготовки (рис. 3, а). Конструктивні параметри фрези відповідають вищезгаданім, ширина фрезерування $B=82$ мм, зміщення осі фрези відносно осі симетрії заготовки $\epsilon=10$ мм. Зміщення заготовки у напрямку врізання ножа торцевої фрези забезпечує початок різання при зменшеній товщині зрізу.

Імітація взаємного переміщення заготовки та фрези реалізувалася двома двигунами: лінійним (імітує подачу заготовки) та обертовим (імітує обертання фрези). Швидкість руху лінійного двигуна становила 1,33 мм/с (що від-

повідає подачі заготовки $s_{хв}=80$ мм/хв); частота обертання лінійного двигуна становила 200 об/хв. В параметрах дослідження руху встановлено 1500 кадрів в секунду при тривалості дослідження 0,15 секунди (час, за який фреза робить півоберту). В моменти часу дослідження, коли центри задніх поверхонь ножа фрези почергово співпадали з базовою площиною (основна площина, що проходить через вісь фрези і напрямок подачі), створювалися проекції різальних кромок на цю площину (рис. 4, а).

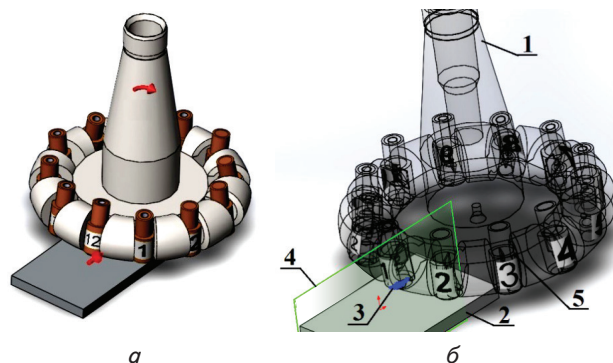


Рис. 3. Твердотіла збірна модель фрези та заготовки: а – загальний вигляд імітаційної моделі; б – ескіз моделі в контексті збірки: 1 – фреза; 2 – заготовка; 3 – ескіз з проекцій різальних кромок; 4 – допоміжна площина; 5 – ніж фрези з індивідуальним номером

Для визначення площі зрізу одержаний ескіз редагувався шляхом обрізання зайвих елементів для формування поперечного перерізу зрізу (рис. 4, б). На основі геометрії ескізу програмний продукт SolidWorks визначає його площу із вказаною точністю.

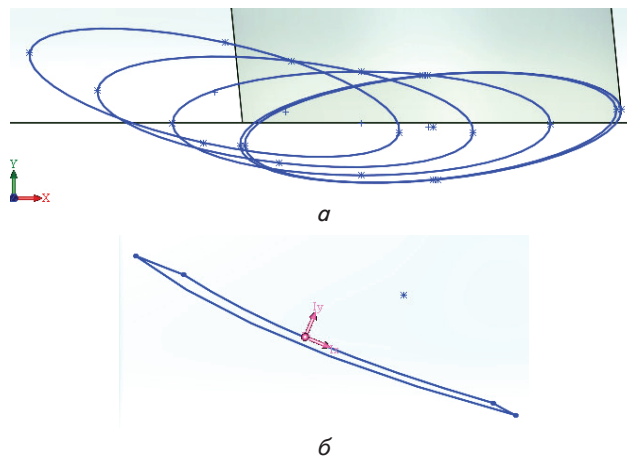


Рис. 4. Формування ескізу шляхом проєкціювання різальних кромок на допоміжну площину: а – проєкції сукупності різальних кромок; б – форма зрізу

На рис. 5 наведена порівняльна діаграма результатів математичного та імітаційного моделювання навантаженості безвершинних різальних кромок ножів торцевої фрези із спіралью-ступінчастою схемою різання.

Оскільки відносна похибка визначення площі зрізів математичним та імітаційним моделюванням знаходиться в межах від 1,8 % до 5,7 %, то достовірність отриманої математичної моделі можна вважати підтвердженою.

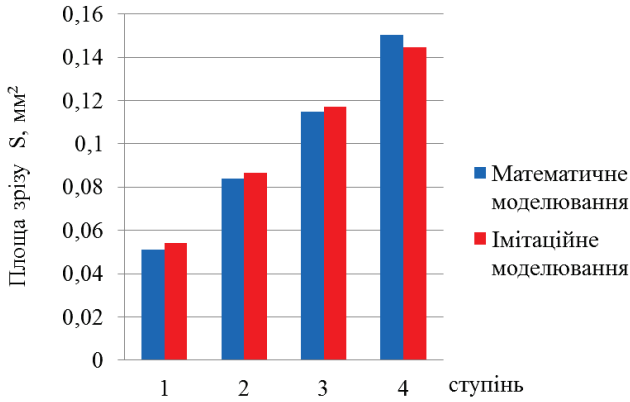


Рис. 5. Діаграма результатів розрахунку площі зрізу ножами кожної ступені торцевої фрези в основній площині

На основі математичної моделі було проведено розрахунки в середовищі Maple, що дозволили визначити величину елементів зрізу кожного ножа торцевої фрези в довільній точці дуги контакту.

5. Результати моделювання завантаженості різальних кромок торцевої фрези

За допомогою розрахунків в середовищі Maple було досліджено вплив конструктивних параметрів торцевої фрези та величини подачі на елементи зрізу. Моделювання завантаження різальних кромок досліджуваної торцевої фрези проводилося для вищезазначених умов різання ($t=3$ мм, $B=82$ мм, $\epsilon=10$ мм).

Графічні залежності за отриманими результатами розрахунків наведені на рис. 6–8. Результати моделювання впливу величини подачі $s_{хв}$ на товщину, ширину зрізу, глибину різання, максимальний головний кут в плані та площу зрізу кожного ножа торцевої фрези представлені на рис. 6.

На рис. 7 наведені результати моделювання залежності елементів зрізу кожного ножа торцевої фрези від величини заднього кута α_N .

Результати моделювання впливу кутів нахилу різальних вузлів торцевої фрези на елементи зрізу кожного ножа фрези наведені на рис. 8.

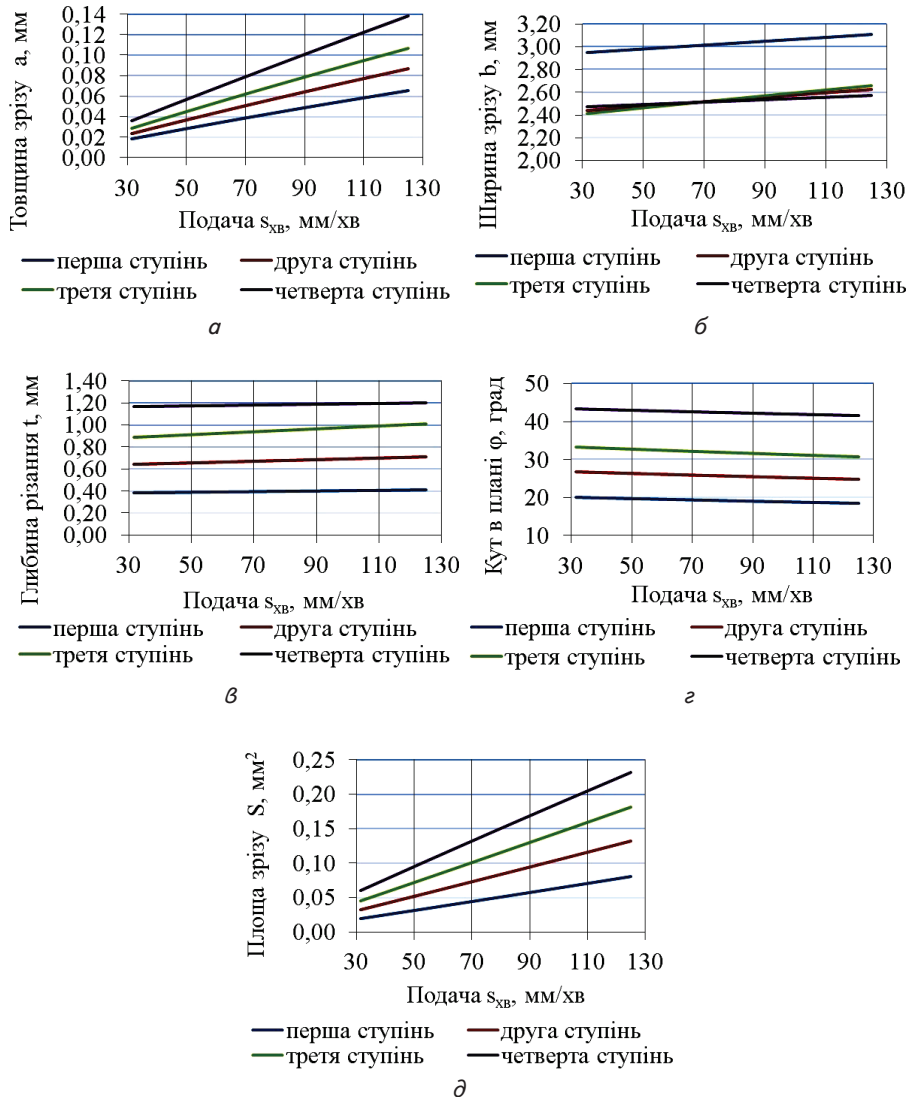


Рис. 6. Вплив подачі $s_{хв}$ на елементи зрізу кожного ножа торцевої фрези: а – на товщину зрізу; б – на ширину зрізу; в – на глибину різання; г – на головний кут в плані; д – на площу зрізу, ($\alpha = 16^\circ$, $\eta = -6, 0, 6, 12^\circ$)

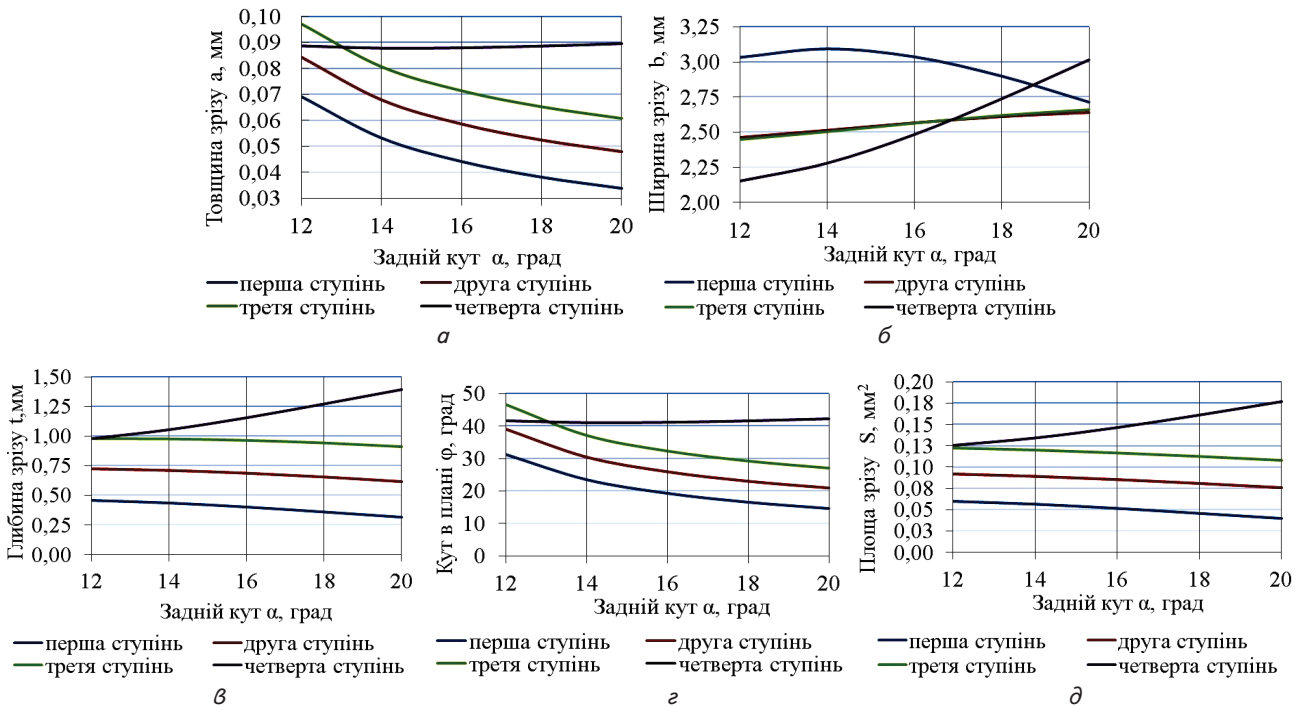


Рис. 7. Вплив заднього кута α_N на елементи зрізу кожного ножа торцевої фрези: a – на товщину зрізу; b – на ширину зрізу; β – на глибину різання; z – на головний кут в плані; d – на площу зрізу ($s_{хв} = 80$ мм/хв, $\eta = -6, 0, 6, 12^\circ$)

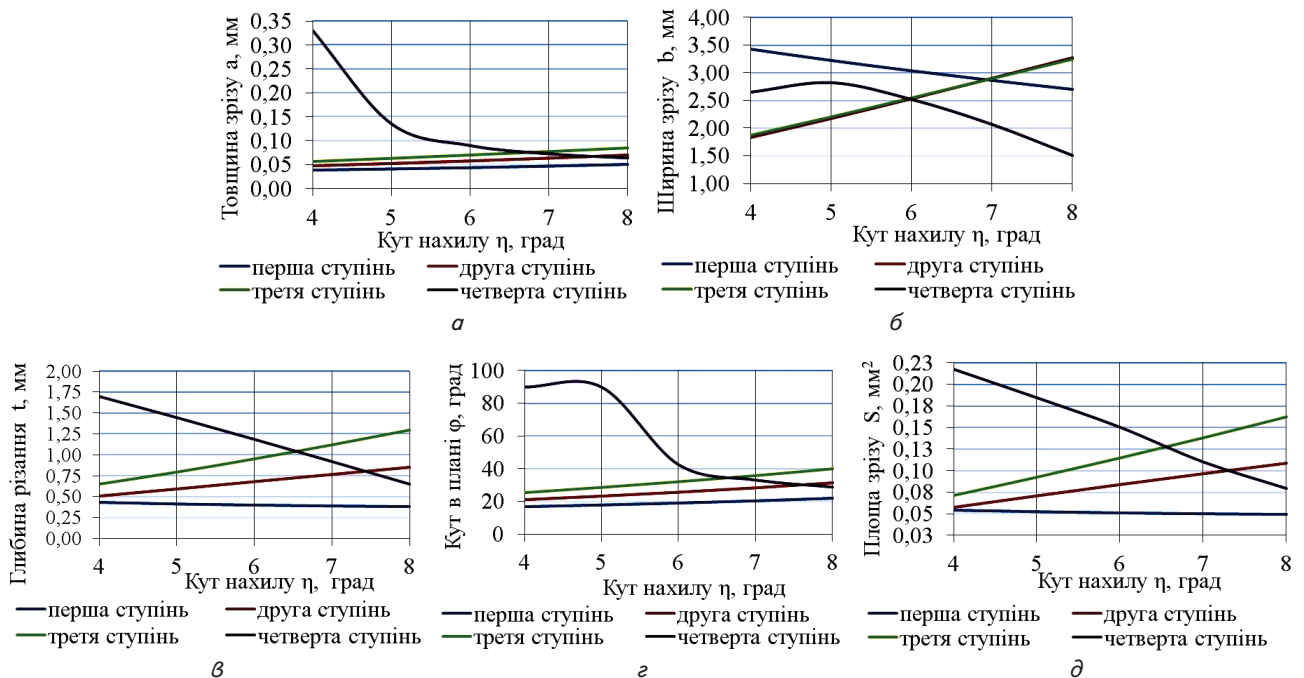


Рис. 8. Вплив кутів η нахилу різальних вузлів на елементи зрізу кожного ножа торцевої фрези: a – на товщину зрізу; b – на ширину зрізу; β – на глибину різання; z – на головний кут в плані; d – на площу зрізу ($s_{хв} = 80$ мм/хв, $\alpha = 16^\circ$)

6. Обговорення результатів дослідження завантаженості різальних кромок торцевої фрези

Задача математичного опису завантаженості безвершинних різальних кромок торцевої фрези із спіралью-ступінчастою схемою різання була вирішена аналітичним

методом при відсутності різного роду спрощень, що обумовлює високу точність отриманих результатів і визначає цінність даної роботи.

На основі отриманих результатів можна зробити наступні висновки. Збільшення величини подачі викликає лінійне зростання товщини, ширини зрізу та глибини

різання на ножах всіх ступіней (рис. 6). Найбільш інтенсивно зростає товщина зрізу, а найменш – глибина різання, що узгоджується із загальновідомими положеннями теорії різання. При цьому ширина зрізу ножів першої ступені виявляється найбільшою, що обумовлює покращення якості обробленої поверхні, яка формується послідовними положеннями різальних кромочок ножів саме першої ступені. Також варто відмітити, що співвідношення ширини зрізів змінюється при досягненні величини подачі 70 мм/хв. Водночас зростання подачі викликає плавне лінійне зменшення головного кута в плані в точці, що відповідає найбільшій товщині зрізу, при цьому всі отримані значення кутів в плані є допустимими ($<90^\circ$). Зміна величин всіх зазначених елементів зрізу призводить до поступового лінійного зростання площі зрізу на ножах всіх ступіней торцевої фрези. Таким чином, у всьому діапазоні зміни величини подачі найбільш навантаженими виявляються ножі четвертої ступені фрези (чорнові) і найменш навантаженими – ножі першої ступені (чистові).

Як видно з рис. 7, зростання заднього кута від 12° до 20° викликає поступове зменшення товщини зрізу, глибини різання та головного кута в плані для ножів всіх ступіней торцевої фрези, крім четвертої. Такий результат пояснюється тим, що еліптичні проекції різальних кромочок характеризуються зменшенням величини малої півосі при зростанні заднього кута, в результаті чого ніж четвертої ступені виявляється перевантаженим. При значеннях заднього кута $\alpha_N < 16^\circ$ ширина зрізу зростає від чорнових зубців до чистових, а при $\alpha_N > 16^\circ$ – такий порядок порушується, що не є раціональним. Такі взаємозв'язки між заднім кутом і елементами зрізу обумовлюють поступове зменшення площі зрізу ножами всіх ступіней, окрім четвертої (рис. 7, д) при зростанні α_N . Отже, виходячи із вищезазначеного, можна зробити висновок про доцільність призначення для торцевої фрези запропонованої конструкції заднього кута у розмірі 16° , оскільки саме в такому випадку площа зрізу ножами різних ступіней буде рівномірно зростати від першої ступені до четвертої.

Графічні залежності (рис. 8) свідчать про перевантаженість ножів четвертої ступені при зменшенні кутів нахилу різальних вузлів до $4-5^\circ$, при цьому величина головного кута в плані перевищує рекомендовані значення ($<90^\circ$). Разом з тим, збільшення цих кутів до $7-8^\circ$ викликає перенесення максимального навантаження на ножі третьої або другої ступіней, що не є доцільним (рис. 8, д). Тому для досліджуваної фрези при умові обробки загальною глибиною різання 3 мм можна рекомендувати призначення кутів нахилу різальних вузлів в розмірі 6° , так як в цьому випадку площа зрізу ножами різних ступіней буде пропорційно зростати від першої ступені до четвертої. У випадку обробки з більшими глибинами різання величини кутів нахилу різальних вузлів варто збільшувати, при менших глибинах різання – зменшувати.

Проведене дослідження дало змогу запропонувати раціональні значення основних конструктивних параметрів торцевої фрези залежно від необхідної глибини різання (табл. 1).

Таким чином, для ефективної роботи торцевої фрези досліджуваної конструкції при глибині різання 3 мм, доцільне використання ножів радіусом 5,4 мм, з кутами нахилу різальних вузлів – 6° та заднім кутом – 16° . При необхідності збільшення загальної глибини різання рекомендоване використання ножів зі збільшеними кутами нахилу різальних вузлів та збільшеним значенням

заднього кута. Це дозволить уникнути перевантаження ножів четвертої ступені фрези. І навпаки, при меншій глибині різання можливе використання ножів зі зменшеними кутами нахилу різальних вузлів та заднім кутом.

Таблиця 1

Рекомендовані значення конструктивних параметрів торцевої фрези

Конструктивні параметри торцевої фрези	Глибина різання, мм				
	2	2,5	3	3,5	4
Кути нахилу різальних вузлів η_b , град	4	5	6	7	8
Задній кут α_N , град	12	14	16	18	20

Отримані результати можуть бути використані для підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь при забезпеченні необхідної якості за рахунок застосування торцевих фрез із спіральсько-ступінчастою схемою різання із безвершинними різальними кромочками.

Виконане дослідження може бути в подальшому вдосконалене шляхом врахування зносу та биття ножів торцевої фрези, а також нерівномірності припуску на оброблення.

7. Висновки

1. Створено математичну модель навантаженості безвершинних різальних кромочок кожного ножа торцевої фрези із спіральсько-ступінчастою схемою різання. Встановлено, що величина елементів зрізу залежить від величини подачі, конструктивних параметрів фрези та положення ножа на дузі контакту. Змінними факторами математичної моделі в проведеному дослідженні виступали величина подачі, задній кут ножа та кут нахилу різальних вузлів. Розроблена модель дозволяє визначити товщину, ширину зрізу, глибину різання, максимальну величину головного кута в плані та площу зрізу при довільному положенні ножа фрези на дузі контакту.

2. Достовірність розробленої математичної моделі підтверджена за допомогою імітаційного моделювання навантаженості різальних кромочок фрези в середовищі SolidWorks Motion, що здійснювалося шляхом графічного моделювання руху фрези та заготовки. При цьому відносна похибка визначення площі зрізів математичним та імітаційним моделюванням знаходиться в межах від 1,8 % до 5,7 %.

3. На основі розробленої математичної моделі в середовищі Maple здійснено розрахунок елементів зрізу у довільному положенні ножа фрези на дузі контакту. Виконано аналіз впливу конструктивних параметрів фрези та величини подачі на значення елементів зрізу. Встановлено, що збільшення подачі викликає лінійне зростання товщини, ширини зрізу та глибини різання на ножах всіх ступіней, при цьому найбільш інтенсивно зростає товщина зрізу, а найменш інтенсивно – глибина різання. Зростання заднього кута від 12° до 20° викликає поступове зменшення товщини зрізу, глибини різання та головного кута в плані для ножів всіх ступіней торцевої фрези, крім четвертої. Також відмічається перевантаженість ножів четвертої ступені при зменшенні кутів нахилу різальних вузлів до $4-5^\circ$, при цьому величина головного кута в плані

перевищує 90° . Разом з тим, збільшення цих кутів до $7-8^\circ$ викликає перенесення максимального навантаження на ножі третьої або другої ступіней, що не є доцільним.

4. За допомогою проведеного аналізу навантаженості різальних кромок надано рекомендації по вибору раціо-

нальних значень конструктивних параметрів торцевої фрези для її ефективної роботи при різних значеннях глибини різання. Так, при глибині фрезерування 3 мм доцільно прийняти кут нахилу різальних вузлів – 6° та задній кут – 16° .

Література

1. Altıntaş Y., Budak E. Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling // *CIRP Annals*. 1995. Vol. 44, Issue 1. P. 357–362. doi: 10.1016/s0007-8506(07)62342-7
2. Euan I. G., Ozturk E., Sims N. D. Modeling Static and Dynamic Cutting Forces and Vibrations for Inserted Ceramic Milling Tools // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 8. P. 564–569. doi: 10.1016/j.procir.2013.06.151
3. Степчин Я. А. Порівняльна характеристика динаміки процесів торцевого фрезерування фрезами стандартних та спеціальних конструкцій // *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2015. № 1 (72). С. 51–56.
4. Клименко С. А. Повышение производительности финишной обработки деталей лезвийным инструментом // *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2017. Т. 2, № 2 (80). С. 56–66. doi: 10.26642/tn-2017-2(80)-56-66
5. Глембоцька Л. Є., Мельничук П. П. Вдосконалення процесу торцевого фрезерування загартованих сталей: проблеми, пропозиції, обґрунтування // *Вісник ЖДТУ*. 2010. № 2 (53). С. 3–15.
6. Muñoz-Escalona P., Maropoulos P. G. A geometrical model for surface roughness prediction when face milling Al 7075-T7351 with square insert tools // *Journal of Manufacturing Systems*. 2015. Vol. 36. P. 216–223. doi: 10.1016/j.jmsy.2014.06.011
7. Saï K., Bouzid W. Roughness modeling in up-face milling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005. Vol. 26, Issue 4. P. 324–329. doi: 10.1007/s00170-004-2305-2
8. Special features in the application of fractal analysis for examining the surface microrelief formed at face milling / Moskvina P., Balytska N., Melnychuk P., Rudnitskiy V., Kyrylovych V. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 2, Issue 1 (86). P. 9–15. doi: 10.15587/1729-4061.2017.96403
9. Popke H., Emmer T., Alex R. Dynamisch stabile Fräsen mit Schnittaufteilung // *Werkstatt und Betrieb: WB (München)*. 2001. Issue 12 (134). P. 23–29.
10. Karpuschewski B., Batt S. Improvement of dynamic properties in milling by integrated stepped cutting // *CIRP Annals*. 2007. Vol. 56, Issue 1. P. 85–88. doi: 10.1016/j.cirp.2007.05.001
11. Виговський Г. М., Громовий О. А., Мельничук П. П. Використання кінематичних схем різання при чистовому торцевому фрезеруванні // *Вісник ЖІТІ*. 2000. № 13. С. 18–25.
12. Виговський Г. М., Громовий О. А., Мельничук П. П. Розрахунок сил різання при обробці деталей ступінчастими торцевими фрезами // *Вісник ЖІТІ*. 1999. № 11. С. 58–66.
13. Виговський Г. М. Коливання сил різання при обробці деталей торцевими ступінчастими фрезами // *Вісник ЖІТІ*. 1998. № 9. С. 28–32.
14. Ghorbani H., Moetakef-Imani B. Specific cutting force and cutting condition interaction modeling for round insert face milling operation // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 84, Issue 5-8. P. 1705–1715. doi: 10.1007/s00170-015-7985-2
15. Манохин А. С., Клименко С. А., Мельничук Ю. А. Параметры сечения среза при точении инструментом с цилиндрической передней поверхностью // *Резание и инструмент в технологических системах*. 2010. Вып. 78. С. 105–112.
16. Мельничук Ю. А., Клименко С. А., Манохин А. С. Влияние режимов обработки на силы резания при точении деталей из закаленной стали инструментом с цилиндрической передней поверхностью // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*. 2011. Вып. 28. С. 39–43.