

## Вплив косокутної геометрії торцевих фрез на температуру різання при чистовому і напівчистовому фрезеруванні плоских поверхонь

(Представлено: к.т.н., проф. Виговський Г.М.)

За даними аналізу опублікованих робіт авторів, що досліджували процес фінішної обробки плоских поверхонь деталей торцевим фрезеруванням, встановлено доцільність використання процесів торцевого фрезерування для фінішного формування поверхневого шару деталей, що обробляються. При цьому значні переваги мають технологічні процеси з використанням торцевих фрез косокутного різання, оснащених надтвердими матеріалами, зі спіральнo-ступінчастим розташуванням різальних елементів. Разом з тим важливим фактором процесу різання, який впливає на стійкість інструменту та якість обробленої поверхні, є температура різання. Дослідження температури різання при механічній обробці, у тому числі при чистовому і напівчистовому торцевому фрезеруванні плоских поверхонь, відіграє важливу роль. Нагрівання різальної кромки інструмента в процесі різання викликає зміну структури та механічних властивостей матеріалу, а при досягненні певних значень температури сприяє інтенсифікації адгезійних та дифузійних явищ. Все це допомагає прискоренню зносу інструмента і зниженню його стійкості. Робота присвячена дослідженню впливу кута нахилу  $\lambda$  головної різальної кромки інструмента і подачі на зуб  $S_z$  на температуру різання при обробці плоскої поверхні заготовки із сірого чавуну СЧ21 та вуглецевої сталі У8 за допомогою програмного забезпечення Deform-3D. За результатами досліджень побудовані графіки залежності температури на передній поверхні ножа торцевої фрези від зміни кута нахилу  $\lambda$  головної різальної кромки і подачі на зуб  $S_z$ . Обґрунтовано характер зношування ножів косокутної торцевої фрези при обробці сірого чавуну СЧ21. Визначено вплив кута нахилу  $\lambda$  головної різальної кромки на температуру різання і обґрунтовано оптимальні його значення, що в свою чергу підвищить стійкість інструмента.

**Ключові слова:** торцеве фрезерування; торцева фреза; косокутне різання; ступінчасті фрези; різальні елементи; температура.

**Постановка проблеми.** Щораз вищі вимоги до надійності машин викликають необхідність удосконалення технологічних процесів виготовлення виробів із застосуванням нових фінішних методів обробки. Забезпечення високої якості поверхонь деталей машин технологічними способами є одним із актуальних завдань сучасного машинобудівного виробництва.

Одним із параметрів, що характеризує конкурентоспроможність машин та механізмів, є надійність їх роботи. Це особливо актуально, якщо вузол працює в умовах впливу агресивних середовищ, без мастила, у контакті з частинками абразивних матеріалів та ін. Тому актуальним є підвищення ресурсу роботи деталей машин шляхом використання нових матеріалів та інноваційних технологій. Забезпечення надійності виробів для складних умов експлуатації потребує вдосконалення технологічних процесів, які гарантують високу якість поверхонь деталей при механічній обробці.

Останнім часом широкого розповсюдження знайшли процеси чистового і напівчистового торцевого фрезерування плоских поверхонь інструментами, оснащеними надтвердими матеріалами (НТМ) [1–3, 12–13]. Разом з тим важливим фактором процесу різання, який впливає на стійкість інструменту та якість обробленої поверхні, є температура різання. Дослідження температури різання при механічній обробці, у тому числі при чистовому і напівчистовому торцевому фрезеруванні плоских поверхонь, відіграє важливу роль. Нагрівання різальної кромки інструмента в процесі різання викликає зміну структури та механічних властивостей матеріалу, а при досягненні певних значень температур сприяє інтенсифікації адгезійних і дифузійних явищ. Все це призводить до прискорення зносу інструмента та зниження його стійкості. Крім того, тепло, що виділяється в процесі різання, впливає на характер та ступінь деформації, величину сил деформації, тертя, якість обробленої поверхні. Температура різання залежить як від режимів різання, так і від механічних, теплофізичних властивостей матеріалу заготовки та інструмента [4–6].

У дослідженнях [1–3, 11–13] встановлено високу ефективність використання торцевих ступінчастих фрез косокутного різання, оснащених надтвердим інструментальним матеріалом (гексаніт-Р) для напівчистої та чистої обробки плоских поверхонь чавунних та сталевих загартованих деталей, разом з тим зміна геометрії та умов обробки деталей не дозволяє повною мірою використовувати отримані дані. Серед факторів, які впливають на характеристики процесу різання, є температура, від якої залежить стійкість різального інструменту та відповідно якість обробки, тому важливо прогнозувати температуру

для оптимізації процесу різання та збільшення терміну служби інструменту [14]. Так за високих значень температури спостерігається підвищене зношування інструменту (пластична деформація), втрата формостійкості і швидкий вихід з ладу [15]. Тому температуру пов'язують з таким фактором, як інтенсивність зношування і надалі використовують як обмежуючий фактор при визначенні раціональних (або оптимальних) режимів різання, бо одним із головних показників ефективності роботи різального інструменту являється його стійкість [14].

Найбільша температура і контактні навантаження в ножі виникають на передній поверхні через це з точки зору теорії тертя передня поверхня має зношуватися набагато інтенсивніше, ніж задня. Практика показала [16], що під час точіння сталі 30ХГСА твердосплавним різцем Т5К10 зношування різального інструменту виникає в основному по задній поверхні. Очевидно, що одну із вирішальних функцій в інтенсифікації зношування визначають термопружні навантаження, які саме на задній поверхні досягають своєї максимальної величини і сприяють руйнуванню її поверхні. Аналогічні результати були отримані і при застосуванні покриттів для твердосплавних різців Т5К10 та Т15К6 під час точіння сталі 30ХГС. Як оцінка напруженого стану різальної частини приймається критеріальне напруження  $\sigma_n$ , яке комплексно включає величини інтенсивності головних напруг. Аналізуючи динаміку зміни термонапруг в різальному інструменті, було виявлено, що їх найбільш небезпечні величини виникають при врізанні ножів у заготовку. Автором [16] було рекомендовано виконувати врізання різального інструменту з поступовим нарощенням швидкості до її заданої величини, що призводить до зменшення термопружних напруг на 20–30 % та скорочення зношування інструмента до 6 разів.

У [4] під час точіння зразків з легованих сталей ХВГ (48...50 HRC) і ШХ15 (60...62 HRC) (рис. 1) було встановлено, що найбільше на температуру в зоні контакту впливає швидкість різання  $V$  та кут нахилу  $\lambda$  головної різальної кромки інструмента, а глибина різання  $t$  і подача  $S$  впливають менше, хоча зі зростанням останньої температура зростає менш інтенсивно порівняно зі збільшенням глибини різання. Аналіз експериментальних даних показує, що зі збільшенням кута нахилу  $\lambda$  головної різальної кромки з  $+30^\circ$  до  $+60^\circ$  ( $t = 0,1$  мм,  $V = 1,4$  м/с,  $h_z = 0,1$  мм,  $S = 0,67$  мм/об) середня температура контакту збільшується з 800 до 1030 °С.

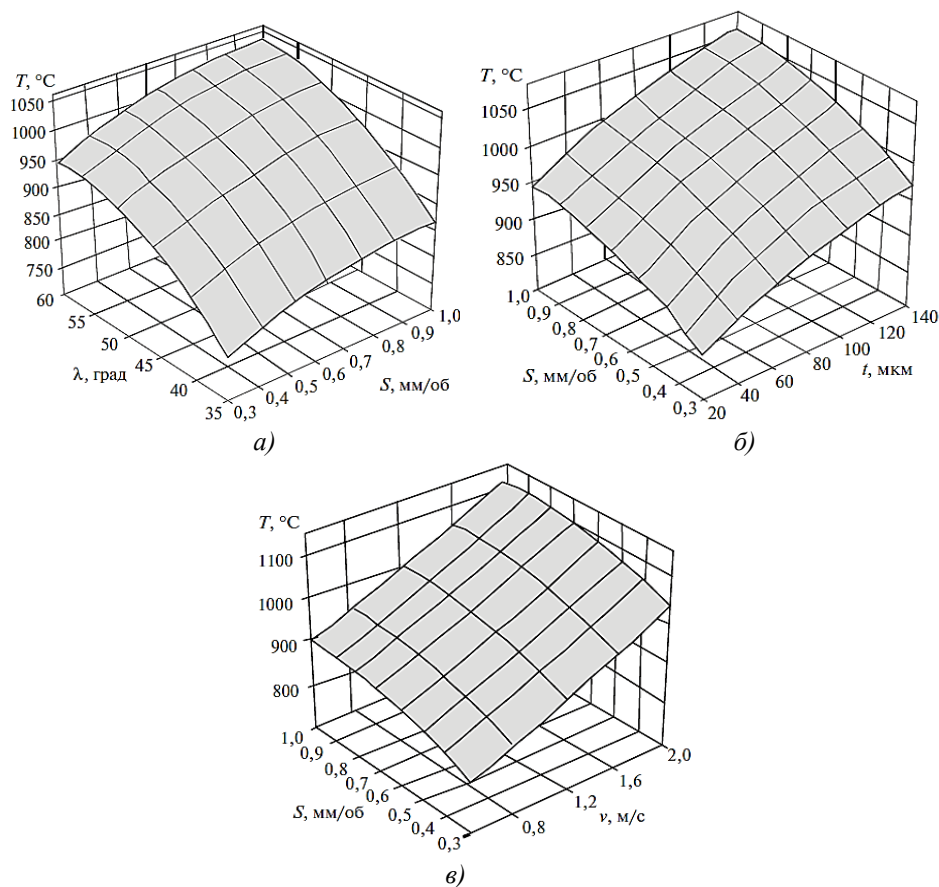


Рис. 1. Залежність температури різання від умов обробки: а) кута нахилу  $\lambda$  і подачі  $S$ ; б) подачі  $S$  і глибини різання  $t$ ; в) подачі  $S$  і швидкості різання  $V$  [4]

Варто також виокремити роботу [17], де зазначається, що навантаження і теплові процеси, які визначають механічне та фізико-хімічне зношування інструменту в процесі його контактної взаємодії в зоні різання з оброблюваною заготовкою, істотно інтенсифікують хімічні реакції між елементами і сполуками оброблюваного матеріалу та ПКНБ, особливо за високих температур (понад 900 °С). Високі значення температури в процесі різання можуть призводити до значної зміни механічних властивостей металів та сплавів. Відомо [18, 19], що у процесі різання під впливом високої швидкості деформації оброблюваний матеріал може суттєво зміцнюватися, а під впливом температури – розміцнюватися. Тому більш глибоке вивчення механізму формування структури та якості поверхневого шару заготовки в процесі різання має безпосередній зв'язок із досягненням стабільного процесу зношування різального інструменту, що є головною умовою успішної обробки чавунів та сталей.

У низці робіт [4, 20, 21] температура різання визначалася або експериментально, або теоретично [22– 23]. Експериментальні методи визначення температури трудомісткі економічно затратні та не завжди доступні. Трудомісткість полягає в необхідності постійного налаштування експериментального обладнання у зв'язку зі змінними умовами різання, електризацією інструмента та заготовки, появою паразитної термо-ЕРС (якщо йдеться про методи вимірювання температури термопарами), постійного калібрування приладів та підбору коефіцієнтів теплового випромінювання (якщо йдеться про безконтактні методи). У зв'язку з цим для зменшення обсягу натурних досліджень виникає необхідність застосування комп'ютерного моделювання процесів механічної обробки методом скінчених елементів у таких програмах, як Abaqus, AdvantEdge, Ansys, Deform-3D тощо.

**Мета дослідження.** Визначення впливу негативних значень кутів нахилу  $\lambda$  головної різальної кромки ножа косокутної торцевої фрези та подачі при чистовій і напівчистовій обробці плоскої поверхні деталей із сірого чавуну СЧ21 (аналог EN-GJL-200, 170HB) та вуглецевої сталі У8 (С80W, 46 HRC) на температуру різання, шляхом моделювання процесу косокутного торцевого фрезерування у програмі Deform-3D.

**Викладення основного матеріалу.** На основі розробленої комп'ютерної моделі [24] в програмі Deform-3D, яка ґрунтується на методі скінчених елементів, для умов торцевого косокутного фрезерування інструментом із одним ножом, оснащеним надтвердим інструментальним матеріалом (гексаніт-Р), необхідно дослідити вплив від'ємних кутів нахилу  $\lambda$  головної різальної кромки та подачі на температуру різання при врізанні леза ножа в заготовку.

Умови моделювання: косокутне фрезерування сірого чавуну СЧ21 (аналог EN-GJL-200, 170HB) та вуглецевої сталі У8 (С80W, 46 HRC); швидкість різання  $V = 2,5$  м/с; подача  $S_z = 0,625$  (мм/зуб), для кута нахилу  $\lambda = -35^\circ$  подача змінювалася від  $S_z = 0,25$  до  $S_z = 0,625$  (мм/зуб); глибина різання  $t = 0,12$  мм; інструмент – торцева фреза діаметром 360 мм, інструментальний матеріал – гексаніт-Р. Геометрія різальних пластинок: плоска передня поверхня; передній кут  $\gamma = -10^\circ$ ; задній кут у напрямку вектора швидкості різання  $\alpha_v = 12^\circ$  (рис. 2). Кут нахилу головних різальних кромки змінювався від  $\lambda = 0^\circ$  до  $\lambda = -45^\circ$ .

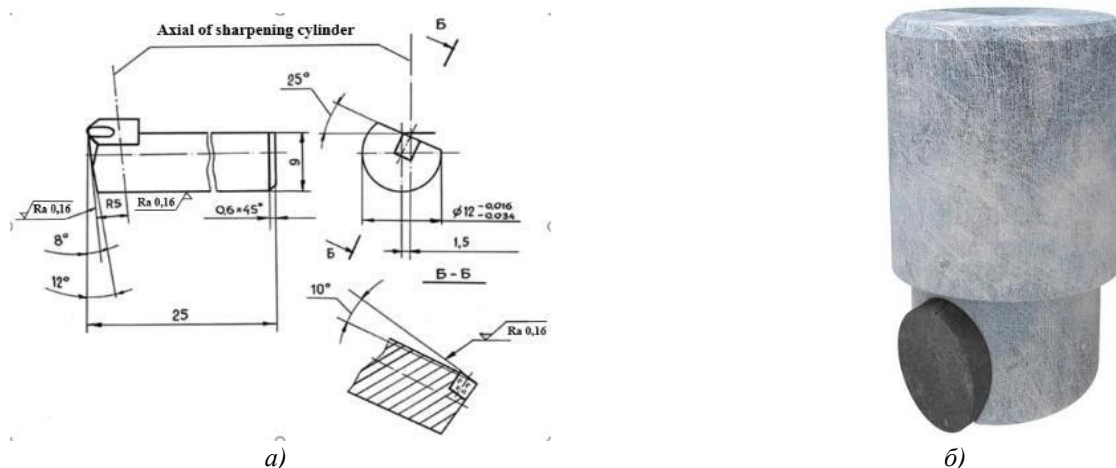


Рис. 2. Ніж фрези: а) конструкція ножа [1], б) 3D-модель різальної вставки

3D-модель заготовки із попереднім зрізом розроблена в модулі SolidWorks Motion за методикою, описаною в [25]. Розрахунок в Deform-3D враховував механічну поведінку оброблюваних матеріалів, яка описувалася рівнянням Джонсона-Кука (ДЖ) [26, 27]:

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \cdot \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^\alpha \cdot (D - E \cdot T^{*m}), \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  – еквівалентна пластична деформація,  $\dot{\varepsilon}$  і  $\dot{\varepsilon}_0$  еквівалентна і довідкова швидкості пластичної деформації;  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$  і  $m$  – константи матеріалу базового рівняння ДЖ, що становлять межу текучості, деформацію та швидкість деформації, деформаційне зміцнення та коефіцієнт термічного пом'якшення (табл. 1). Коефіцієнти рівняння приймалися згідно з [26].

Таблиця 1

## Коефіцієнти рівняння Джонсона – Кука

Матеріал	A, МПа	B, МПа	n	C	m	T <sub>пл.</sub> , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
СЧ21	573	380	0,17	0,034	0,12	1200	7200
У8 (46 HRC)	674,8	239,2	0,28	0,027	1,3	1487	7839

Отримані результати максимальних значень температури різання на передній поверхні ножа торцевої фрези при врізанні в заготовку з сірого чавуну СЧ21 та вуглецевої сталі У8 із зміною кутів нахилу  $\lambda$  головної різальної кромки наведені на рисунку 3.

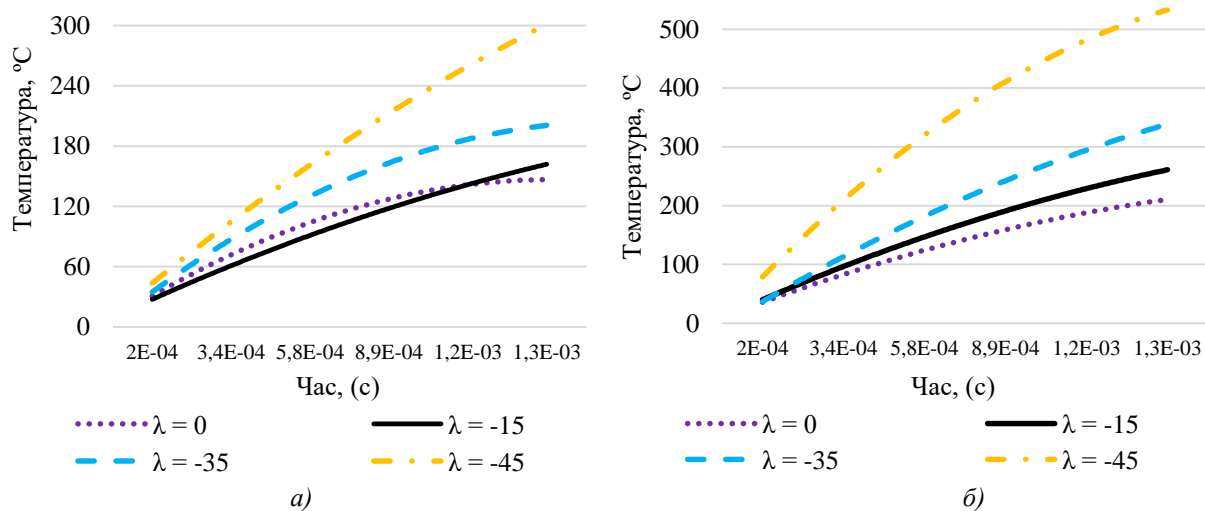


Рис. 3. Залежність температури на передній поверхні ножа торцевої фрези від кута нахилу головної різальної кромки  $\lambda$ : а) при врізанні в заготовку з СЧ-21, б) при врізанні в заготовку з У8

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання показує (рис. 3), що зі збільшенням кута нахилу головної різальної кромки від  $\lambda = 0^\circ$  до  $\lambda = -45^\circ$  температура різання зростає, а особливо помітно при використанні кута нахилу  $\lambda = -45^\circ$ . При врізанні ножа торцевої фрези в заготовку з сірого чавуну СЧ-21 різниця в температурі між кутами нахилу  $\lambda = -45^\circ$  і  $\lambda = -35^\circ$  становить 32 %, а при врізанні в заготовку з У8 різниця в температурі між кутами нахилу  $\lambda = -45^\circ$  і  $\lambda = -35^\circ$  становить 37 %. Причиною зростання температури в цьому випадку є збільшення середньої площі зрізу за рахунок збільшення довжини активної частини різальної кромки. Також зростає потужність теплового потоку і загальна кількість теплоти, що надходить в інструмент при контактній взаємодії інструмента зі стружкою та деталлю, що обробляється. Разом з тим в міру зносу ножа (рис. 4) буде відбуватися зростання сили тертя на передній поверхні інструмента, а також збільшення сил тертя, що діють на задній поверхні ножа фрези. Це в свою чергу буде призводити до зростання площі контакту оброблюваного матеріалу із задньою поверхнею різального інструменту і, відповідно, до інтенсифікації процесів тертя на ділянці зносу.

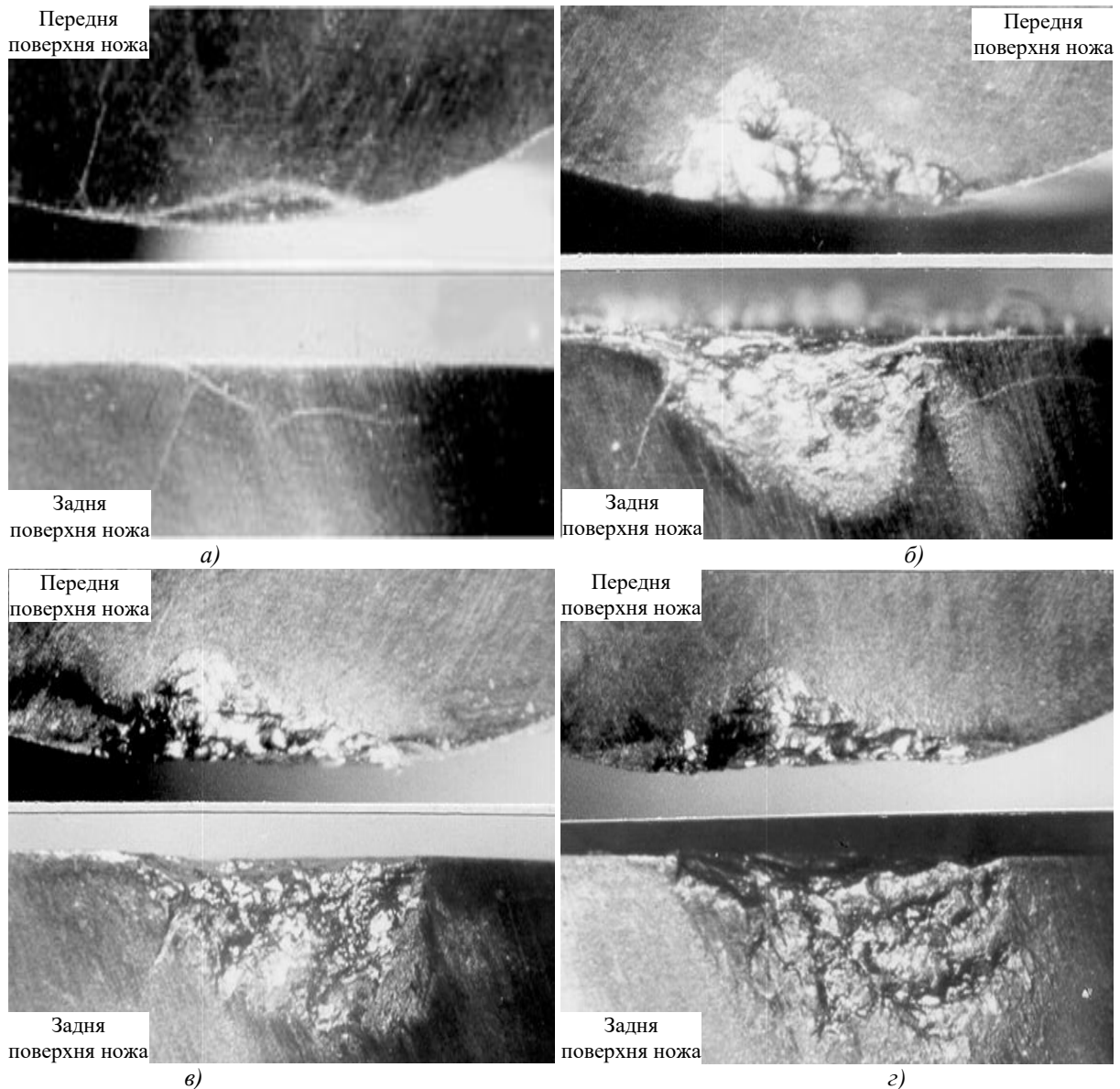


Рис. 4. Характер зношування ножів торцевої фрези при обробці чавуну СЧ21 [1]. Довжина обробленої поверхні: а)  $L = 0$  м; б)  $L = 29,7$  м; в)  $L = 39,6$  м; г)  $L = 59,4$  м

Дослідження [1] процесу торцевого фрезерування деталей із сірого чавуну СЧ21 показує, що процес зносу починає інтенсивно протікати вже в початковий період різання (рис. 4). На першому етапі відбуваються мікротріщини різального леза, причому найбільш часто в області вхідних і вихідних точок різальної частини ножів. Термічні напруження, що виникають у процесі різання та холостого пробігу ножів, можуть також інтенсифікувати появу мікросколів та мікротріщин. Після цього виникають зазублини, які виходять і на передню поверхню. З часом відбувається подальше опускання зазублин уздовж задньої поверхні ножів у напрямі вектора швидкості різання. Зазублини є концентраторами зносу, тому що надалі знос протікає за рахунок поглиблення цих зазублин і появи нових мікросколів на лезі інструмента. У області зазублин фаска зносу уздовж задньої поверхні більша, ніж для інших точок різального леза, де мікросколі відсутні. При досягненні зазублин значної глибини відбувається викришування більшої частини різального матеріалу, що в свою чергу буде призводити до різкого збільшення шорсткості обробленої поверхні.

Отримані результати максимальних значень температури різання на передній поверхні ножа торцевої фрези під час врізання в заготовку з сірого чавуну СЧ21 та вуглецевої сталі У8 із зміною подачі в межах від  $S_z = 0,25$  до  $S_z = 0,625$  (мм/зуб) з кутом нахилу  $\lambda = -35^\circ$  головної різальної кромки наведені на рисунку 5.

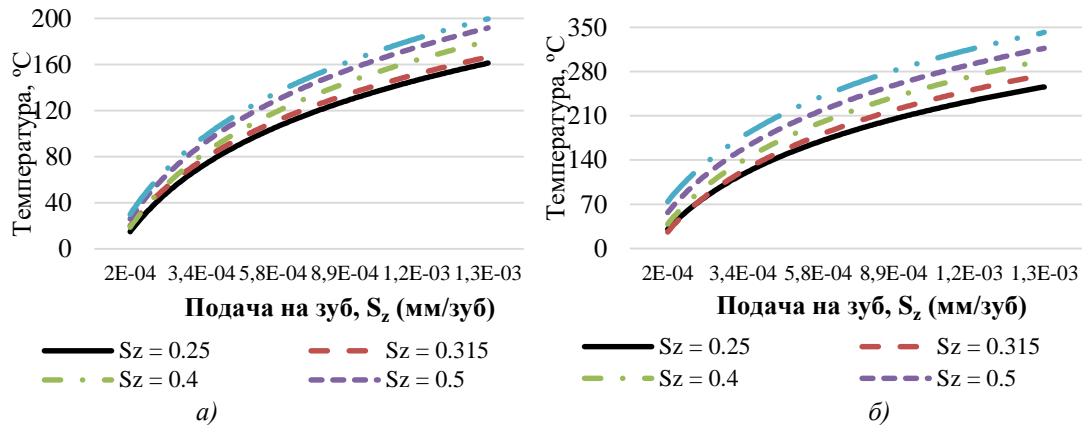


Рис. 5. Залежність температури на передній поверхні ножа торцевої фрези від подачі на зуб,  $S_z$  (мм/зуб): а) при врізанні в заготовку з СЧ-21, б) при врізанні в заготовку з У8

З наведених результатів комп'ютерного моделювання (рис. 5) було встановлено, що при зазначеній зміні подачі на зуб  $S_z$  температура зростає менш інтенсивно на відміну від зміни кута нахилу  $\lambda$  головної різальної кромки. Причиною зростання температури в цьому випадку є збільшення середньої площі зрізу за рахунок збільшення подачі, разом з тим інтенсифікації температури різання на передній поверхні інструмента.

**Висновки.** За допомогою комп'ютерного моделювання процесу врізання ножа косокутної торцевої фрези у заготовку із сірого чавуну СЧ21 та вуглецевої сталі У8 встановлено вплив кута нахилу різальної кромки  $\lambda$  в діапазоні від  $0^\circ$  до  $-45^\circ$ , а також зі зміною подачі на зуб  $S_z$  в межах від 0,25 до 0,625 мм/зуб на температуру різання. При зміні подачі на зуб  $S_z$  температура має впливає менше та зростає менш інтенсивно, ніж зі зміною кута нахилу різальної кромки в діапазоні від  $\lambda = 0^\circ$  до  $\lambda = -45^\circ$ , а особливо при  $\lambda = -45^\circ$ . Встановлено, що застосування від'ємних значень  $\lambda$  значно збільшує температуру різання за рахунок збільшення середньої площі зрізу через збільшення довжини активної частини різальної кромки. Разом з тим буде збільшуватися сила тертя на передній поверхні інструмента і на задній поверхні різця фрези в міру його зносу. Застосування кутів нахилу від  $\lambda = 0^\circ$  до  $\lambda = -35^\circ$  забезпечить менші значення температури різання та підвищить стійкість інструмента на відміну від використання кута нахилу  $\lambda = -45^\circ$ .

Отримані результати можуть бути використані під час проектування торцевих фрез косокутної геометрії різного типу, прогнозування температури на передній поверхні інструмента.

#### Список використаної літератури:

1. Виговський Г.М. Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь : автореф. дис. ... к.т.н. : 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / Г.М. Виговський. – К., 2000. – 16 с.
2. Громовий О.А. Шляхи удосконалення процесу обробки плоских поверхонь деталей фрезеруванням / О.А. Громовий, Г.М. Виговський, Н.О. Балицька // Технічна інженерія. – 2020. – № 2 (86). – С. 48–53.
3. Инструменты из сверхтвердых материалов / под. ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – М. : Машиностроение, 2014. – 608 с.
4. Клименко С.А. Твердое «бреющее» точение / С.А. Клименко, А.С. Манохин // Сверхтвердые материалы. – 2009. – № 1. – С. 58–74.
5. Modeling and optimization of temperature in end milling operations / J.C. Baralić, N.G. Dučić, A.M. Mitrović and other // Thermal Science. – 2019. – Vol. 23 (6A). – P. 3651–3660.
6. Добротворський С.С. Комп'ютерне проектування та моделювання технологічних процесів високошвидкісного фрезерування загартованих сталей / С.С. Добротворський, Є.В. Басова, Л.Г. Добровольська // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2015. – № 822. – С. 7–13.
7. Виговський Г.М. Дослідження напружено-деформованого стану торцевої фрези для чистової обробки площин / Г.М. Виговський, М.М. Плисак // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2019. – № 1 (83). – С. 53–58. DOI: 10.26642/tn-2019-1(83)-53-58.
8. Виговський Г.М. Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь / Г.М. Виговський. – К. : НТУУ «КПІ», 2000.
9. Engineering Methodology for Determining Elastic Displacements of the Joint «Spindle Assembly-Face Milling Cutter» While Machining Planes / H.Vyhovskyi, M.Plysak, N.Balytska and other ; in V.Tonkonogyi and other (ed.) // Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham : Springer, 2021. – P. 258–268. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_26).
10. Structural improvement of face mills designs based on systems approach / L.Hlembotska, N.Balytska, P.Melnychuk, H.Vyhovskyi // Scientific Journal of TNTU. – 2021. – № 101 (1). – P. 102–114.
11. Степчин Я.А. Порівняльна характеристика динаміки процесів торцевого фрезерування фрезами стандартних та спеціальних конструкцій / Я.А. Степчин // Вісник ЖДТУ. Сер. : Технічні науки. – 2016. – № 1 (72). – С. 51–56.

12. Громовий О.А. Розробка чистових косокутних торцевих фрез з комбінованими схемами різання : дис. ... к.т.н. : 05.03.01 / О.А. Громовий. – Київ, 2002. – 172 с.
13. Мельничук П.П. Наукові основи чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь : автореф. дис. ... д.т.н. / П.П. Мельничук. – К. : НТУУ «КПІ», 2002. – 26 с.
14. Modeling and optimization of temperature in end milling operations / J.C. Baralić, N.G. Dučić, A.M. Mitrović and other // *Thermal Science*. – 2019. – Vol. 23 (6A). – P. 3651–3660. DOI: 10.2298/TSC190328244B.
15. Fedorov S.V. The influence of complex surface treatment on wear of milling carbide inserts when machining of nickel alloy / S.V. Fedorov, Kh.S. Min // *Physics Journal*. – 2018. – Vol. 61, № 8–2. – P. 93–97.
16. Ноценко О.М. Підвищення ефективності використання твердосплавних різців на основі об'ємного моделювання їх термоміцності : автореф. дис. ... к.т.н. : 05.03.01 / О.М. Ноценко ; Нац. техн. ун-т України «Київ. політех. ін-т». – К., 2003. – 20 с.
17. Новиков Н.В. Контактное взаимодействие резцов, оснащенных КНБ, с обрабатываемым материалом при точении износостойкого чугуна / Н.В. Новиков, А.Н. Ващенко // *Збірник наукових праць ЖДТУ «Процеси механічної обробки в машинобудуванні»*. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – № 5. – С. 118–124.
18. Разработка математической модели кривой течения сплавов при адиабатических условиях деформирования / В.С. Кушнер, М.Г. Сторчак, О.Ю. Бургонова, Д.С. Губин // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2017. – Т. 83, № 5. – С. 45–49 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.zldm.ru/jour/article/view/477/478>.
19. High speed turning of Inconel 718 using PVDcoated PCBN tools / S.L. Soo, S.A. Khan, D.K. Aspinwall and other // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 65, № 1. – P. 89–92. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.044.
20. Клименко С.А. Науково-технічні проблеми механічної обробки інструментами з надтвердих матеріалів: стан та перспективи / С.А. Клименко // *Вісник Національної академії наук України*. – 2018. – № 9. – С. 45–52.
21. Identification of temperatures in cutting zone when dry machining of nickel alloy Inconel 718 / A.Czan, M.Sajgalik, J.Holubjak and other // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – Vol. 14. – P. 66–75.
22. Коваленко Я.П. Оцінка технологічних та термобаричних особливостей механічної обробки загартованих сталей: опис явищ у контактній зоні різанням лезовими інструментами із ПКНБ групи BL / Я.П. Коваленко, П.П. Мельничук, В.А. Кирилович // *Технічна інженерія*. – 2022. – № 1 (89). – С. 27–31. DOI: 10.26642/ten-2022-1(89)-27-31.
23. Степчин Я.А. Особливості моделювання теплофізичних процесів зони різання в системі SOLIDWORKS SIMULATION / Я.А. Степчин, О.А. Степчин // *Вісник ЖДТУ / Технічні науки*. – 2017. – № 1 (79). – С. 41–47.
24. Numerical Simulation of Cutting Forces in Face Milling / H.Vyhovskyi, M.Plysak, N.Balytska and other ; in V.Tonkonogyi and other (ed.) // *Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Cham : Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-16651-8\_21.
25. Daoud M. Effect of rake angle on Johnson-Cook material constants and their impact on cutting process parameters of Al2024-T3 alloy machining simulation / M.Daoud, J.F. Chatelain, A.Bouzid // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2015. – Vol. 81. – P. 1987–1997.
26. Chernykh D.M. Simulation of the machining process in order to optimize the operating parameters / D.M. Chernykh, Yu.S. Tkachenko, V.S. Tsyganov // *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. – 2019. – Vol. 15, № 1. – P. 130–137.
27. Vovk A. Finite element simulations of the material loads and residual stresses in milling utilizing the CEL method / A.Vovk, J.Sölter, B.Karpuschewski // *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 87. – P. 539–544.

#### References:

1. Vygovs'kyj, G.M. (2000), *Pidvyshhennja pracezdatnosti torcevyh frez dlja chystovoi' obrobky ploskyh poverhon'*, Abstract of Ph.D. dissertation, 05.03.01 «Procesy mehanichnoi' obrobky, verstaty ta instrument», Kyi'v, 16 p.
2. Gromovyj, O.A., Vygovs'kyj, G.M. and Balyc'ka, N.O. (2020), «Shljahy udoskonalennja procesu obrobky ploskyh poverhon' detalej frezeruvannjam», *Tehnichna inzhenerija*, No. 2 (86), pp. 48–53.
3. Novikova, N.V. and Klimentko, S.A. (ed.) (2014), *Instrumenty iz sverkhverdnykh materialov*, Mashinostroenie, M., 608 p.
4. Klimentko, S.A. and Manokhin, A.S. (2009), «Tverdoe «breyushchee» tochenie», *Sverkhverdnye materialy*, No. 1, pp. 58–74.
5. Baralić, J.C., Dučić, N.G., Mitrović, A.M. et al. (2019), «Modeling and optimization of temperature in end milling operations», *Thermal Science*, Vol. 23 (6A), pp. 3651–3660.
6. Dobrotvors'kyj, S.S., Basova, Je.V. and Dobrovol's'ka, L.G. (2015), «Komp'juterne proektuvannja ta modeljuvannja tehnologichnyh procesiv vysokoshvydkisnogo frezeruvannja zagartovanyh stalej», *Visnyk Nacional'nogo universytetu «L'vivs'ka politehnika»*, No. 822, pp. 7–13.
7. Vygovs'kyj, G.M. and Plysak, M.M. (2019), «Doslidzhennja napruzhenno-deformovanogo stanu torcevoi' frezy dlja chystovoi' obrobky ploskyh», *Visnyk ZhDTU, Ser. Tehnichni nauky*, No. 1 (83), pp. 53–58, doi: 10.26642/tn-2019-1(83)-53-58.
8. Vygovs'kyj, G.M. (2000), *Pidvyshhennja pracezdatnosti torcevyh frez dlja chystovoi' obrobky ploskyh poverhon'*, NTUU «KPI», K.
9. Vyhovskyi, H., Plysak, M., Balytska, N. et al. (2021), *Engineering Methodology for Determining Elastic Displacements of the Joint «Spindle Assembly-Face Milling Cutter» While Machining Planes*, in Tonkonogyi, V. et al (ed.), *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, pp. 258–268, doi: 10.1007/978-3-030-68014-5\_26.
10. Hlembotska, L., Balytska, N., Melnychuk, P. and Vyhovskyi, H. (2021), «Structural improvement of face mills designs based on systems approach», *Scientific Journal of TNTU*, No. 101 (1), pp. 102–114.

11. Stepchyn, Ja.A. (2016), «Porivnjal'na harakterystyka dynamiky procesiv torcevoogo frezeruvannja frezamy standartnyh ta special'nyh konstrukcij», *Visnyk ZhDTU, Ser. Tehnichni nauky*, No. 1 (72), pp. 51–56.
12. Gromovyj, O.A. (2002), *Rozrobka chystovyh kosokutnyh torcevyh frez z kombinovanymy shemamy rizannja*, Thesis of Ph.D. dissertation, 05.03.01, Kyi'v, 172 p.
13. Mel'nychuk, P.P. (2002), *Naukovi osnovy chystovogo torcevoogo frezeruvannja ploskyh poverhon'*, Abstract of D.Sc. dissertation, NTUU «KPI», K., 26 p.
14. Baralić, J.C., Dučić, N.G., Mitrović, A.M. et al. (2019), «Modeling and optimization of temperature in end milling operations», *Thermal Science*, Vol. 23 (6A), pp. 3651–3660, doi: 10.2298/TSCI190328244B.
15. Fedorov, S.V. and Min, Kh.S. (2018), «The influence of complex surface treatment on wear of milling carbide inserts when machining of nickel alloy», *Physics Journal*, Vol. 61, No. 8–2, pp. 93–97.
16. Noshhenko, O.M. (2003), *Pidvyshhennja efektyvnosti vykorystannja tverdospлавnyh rizciv na osnovi ob'jemnogo modeljuvannja i'h termomicnosti*, Abstract of Ph.D. dissertation, 05.03.01, Nac. tehn. un-t Ukrainy «Kyiv. politeh. in-t», K., 20 p.
17. Novikov, N.V. and Vashchenko, A.N. (2007), «Kontaktne vzaimodeistvie reztsov, osnashchennykh KNB, s obrabatyvaemym materialom pri tochenii iznosostoikogo chuguna», *Zbirnyk naukovykh prac' ZhDTU «Procesy mehanichnoi' obrobky v mashynobuduvanni»*, ZhDTU, Zhytomyr, No. 5, pp. 118–124.
18. Kushner, V.S., Storchak, M.G., Burgonova, O.Yu. and Gubin, D.S. (2017), «Razrabotka matematicheskoi modeli krivoi techeniya splavov pri adiabaticheskikh usloviyakh deformirovaniya», *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, Vol. 83, No. 5, pp. 45–49, [Online], available at: <https://www.zldm.ru/jour/article/view/477/478>
19. Soo, S.L., Khan, S.A., Aspinwall, D.K. et al. (2016), «High speed turning of Inconel 718 using PVDcoated PCBN tools», *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 65, No. 1, pp. 89–92, doi: 10.1016/j.cirp.2016.04.044.
20. Klymenko, S.A. (2018), «Naukovo-tehnichni problemy mehanichnoi' obrobky instrumentamy z nadtverdyh materialiv: stan ta perspektyvy», *Visnyk Nacional'noi' akademii' nauk Ukrainy*, No. 9, pp. 45–52.
21. Czan, A., Sajgalik, M., Holubjak, J. et al. (2017), «Identification of temperatures in cutting zone when dry machining of nickel alloy Inconel 718», *Procedia Manufacturing*, Vol. 14, pp. 66–75.
22. Kovalenko, Ja.P., Mel'nychuk, P.P. and Kyrylovych, V.A. (2022), «Ocinka tehnologichnyh ta termobarychnykh osoblyvostej mehanichnoi' obrobky zagartovanyh stalej: opys javyssh u kontaktnej zoni rizannjam lezovymy instrumentamy iz PKNB grupy VL», *Tehnichna inzhenerija*, No. 1 (89), pp. 27–31, doi: 10.26642/ten-2022-1(89)-27-31.
23. Stepchyn, Ja.A. and Stepchyn, O.A. (2017), «Osoblyvosti modeljuvannja teplofizychnykh procesiv zony rizannja v systemi SOLIDWORKS SIMULATION», *Visnyk ZhDTU, Ser. Tehnichni nauky*, No. 1 (79), pp. 41–47.
24. Vyhovskiy, H., Plysak, M., Balytska, N. et al. (2023), «Numerical Simulation of Cutting Forces in Face Milling», in Tonkonogyi, V. et al. (ed.), *Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-031-16651-8\_21.
25. Daoud, M., Chatelain, J.F. and Bouzid, A. (2015), «Effect of rake angle on Johnson-Cook material constants and their impact on cutting process parameters of Al2024-T3 alloy machining simulation», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 81, pp. 1987–1997.
26. Chernykh, D.M., Tkachenko, Yu.S. and Tsyganov, V.S. (2019), «Simulation of the machining process in order to optimize the operating parameters», *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, Vol. 15, No. 1, pp. 130–137.
27. Vovk, A., Sölter, J. and Karpuschewski, B. (2020), «Finite element simulations of the material loads and residual stresses in milling utilizing the CEL method», *Procedia CIRP*, Vol. 87, pp. 539–544.

**Плисак Микола Миколайович** – аспірант Державного університету «Житомирська політехніка».  
<https://orcid.org/0000-0002-3244-6037>.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

**Плысак М.М.**

#### **The influence of oblique geometry face mill on the cutting temperature during finishing and semi-finishing flat surfaces**

Processing of materials by cutting is the main method of manufacturing engineering products. According to the analysis of the authors published works, which investigated the process of finishing parts by face milling, the feasibility of using face milling processes for the final formation surface layer of the parts being processed has been established. At the same time, there are significant advantages of technological processes using face mills for oblique cutting, equipped with superhard materials, with a spiral-stepped arrangement of cutting elements. Along with the important factor of the cutting process, which affects the stability of the tool and the quality of the machined surface, is the cutting temperature. The study of the cutting temperature during machining, including face milling, plays an important role. Heating the cutting edge of the tool during the cutting process causes a change in the structure and mechanical properties of the material, and when certain temperature values are reached, it contributes to the intensification of adhesion and diffusion phenomena. All this helps to accelerate the wear of the tool and reduce its stability. This work is devoted to the study of the influence of the inclination angle of the oblique face mill cutting edge on the cutting temperature when processing the flat surface of a workpiece made of gray cast iron and carbon tool steel using the Deform-3D program. On the according research results were plotted graphs dependence of the temperature on the front surface of the face mill insert on the angle inclination of the main cutting edge and on the feed per tooth  $S_z$  (mm/tooth). The dynamics wear of the face mill insert in the machining gray cast iron is substantiated. At the same time, the optimal values of the angle inclination of the main cutting edge are determined, which in turn will increase the stability of the tool and the quality of the machined surface.

**Keywords:** face milling; face mill; oblique cutting; spiral-stepped face mills; cutting elements; temperature.

Стаття надійшла до редакції 19.07.2022.