

УДК 621.9.025

Г.М. Виговський, к.т.н., проф.

В.М. Бушля, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ОБРОБКИ НА ПЕРІОД СТІЙКОСТІ ТА ХАРАКТЕР ЗНОШУВАННЯ ТОРЦЕВИХ ФРЕЗ, ОСНАЩЕНИХ НАДТВЕРДИМИ МАТЕРІАЛАМИ ПРИ ЧОРНОВІЙ ОБРОБЦІ СІРОГО ЧАВУНУ

В статті представлені результати експериментальних досліджень впливу режимів різання на зносостійкість торцевих фрез, оснащених надтвердими матеріалами при високошвидкісній чорновій обробці сірого чавуну. Представлено результати математичної обробки експериментальних даних та результати мікро- та макроструктурного аналізу зношених поверхонь інструменту.

Вступ. Актуальним завданням металообробного виробництва є підвищення продуктивності обробки деталей. Досягнення високої продуктивності є можливим при інтенсифікації параметрів процесу, зокрема підвищення швидкості різання або подачі. Ефективність запровадження таких операцій має оцінюватись забезпеченням певного рівня зносостійкості інструменту. Відомо, що використання інструментів оснащених надтвердими матеріалами (НТМ) на основі кубічного нітриду бору, дозволяє збільшувати швидкість різання, що для процесу торцевого фрезерування призводить до лінійного збільшення хвилинної подачі, яка і визначає продуктивність.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Застосування ступінчастих схем різання при конструюванні торцевих фрез з НТМ дозволяє розширити область їх використання і на чорнові процеси. Однак питання зносостійкості торцевих фрез при обробці чавунів в умовах інтенсифікації режимів різання ($V > 12$ м/с) не повністю вивчені. Зокрема існує ряд розбіжностей стосовно ступеня впливу швидкості різання і подачі на інтенсивність зношування інструменту. За даними [1] дослідження стійкості фрез, оснащених ножами з НТМ, показали, що за якісними значеннями найбільший вплив на працездатність мають швидкість різання та подача, меншою мірою – глибина різання, що підтверджує результати роботи [2]. Правдивість таких даних підтверджується результатами досліджень [3], де зазначається, що найбільший вплив на стійкість інструменту має швидкість різання, потім – подача і глибина різання.

Суцільні результати отримані в роботі [4], де вказується, що подача на зуб значно більшою мірою, ніж швидкість різання, впливає на стійкість та працездатність фрези, оснащеної НТМ. Визначення ступеню впливу режимів різання на стійкість фрези [5] вказує на те, що остання найбільшою мірою залежить від подачі, при цьому вплив глибини різання на стійкості майже не позначається. Такі дані підтверджуються результатами роботи [6]. Зазначається, що подача в 2,6 рази інтенсивніше впливає на стійкість торцевої фрези, ніж значення швидкості різання.

Результати, накопичені при визначенні впливу зміни режимів різання на характер зношування ножів торцевих фрез, оснащених надтвердими матеріалами, свідчать про те, що глибина різання є фактором, який найменше впливає на період стійкості фрез. Так, зазначається [7], що зміна глибини різання у всьому дослідженому діапазоні режимів різання майже не впливає на стійкість інструмента, що дозволяє припустити можливість реалізації чорнової обробки за умови розподілу припуску ($t_f = 0,8...1,5$ мм) за ступінчастими схемами різання ($t_z = 6...10$ мм).

В роботі [8] наводяться результати аналізу типів зношування та їх комбінацій, які описують умови виходу з ладу інструменту з НТМ. Так, вважається, що комбінація абразивного та хімічного типів зношування спричиняє появу лунок на передній поверхні інструменту. Явищу термічної втоми відповідає поява тріщин на різальній кромці інструменту. Хімічний знос викликає появу рисок та борозн, в основному по задній поверхні пластини з НТМ. Вплив ударного навантаження викликає на поверхні інструменту викришування та утворення відколів.

Визначення характеру руйнування пластин з надтвердих матеріалів і факторів, які мають найбільший вплив на інтенсивність зношування при обробці сірого чавуну [5], дає результати, які свідчать про те, що на передній поверхні інструменту утворюється лунка, риси і борозни,

орієнтовані в напрямку сходження стружки. Істотний вплив на характер руйнування має товщина зрізу. При її великих значеннях можливе утворення великих відколів (до декількох десятих міліметра) на головній задній поверхні. При фрезеруванні сірого чавуну припустиме збільшення подачі до 0,3 мм/зуб.

Залежність стійкості торцевих фрез від швидкості різання при обробці сірого чавуну має характерний графік горбоподібної форми [8]. Дослідження впливу швидкості різання на зношування торцевих фрез, оснащених НТМ, в діапазоні $10 \leq V \leq 100$ м/с вказують на те, що значення максимального періоду стійкості ($T_{\max} = 400$ хв.) досягаються при швидкості різання $V = 50$ м/с.

Аналіз робіт, присвячених впливу режимів обробки і геометрії інструменту при торцевому фрезеруванні чавуну, показав, що існує незначна кількість аналітичних або емпіричних залежностей [5, 9] для оцінки впливу режимів різання на період стійкості при обробці чавуну, при цьому тип загострення приймався гостровершинним, який не є раціональним для даного типу оброблюваного матеріалу. Встановлено, що стійкість фрез при середніх (чистових та напівчистових) режимах складає 450–500 хв. [5, 6]. Відомості щодо періоду стійкості фрез на чорнових операціях відсутні.

Наведений аналіз вказує на те, що необхідними є більш детальні експериментальні дослідження впливу режимів різання на зносостійкість торцевих фрез при чорновій обробці чавунів надтвердими матеріалами при використанні безвершинної геометрії і встановлення впливу інтенсифікації режимів на характер зношування і руйнування інструменту, що і являло собою мету роботи.

Основна частина. З метою встановлення впливу швидкості різання V , подачі на зуб S_z та глибини різання t на період стійкості торцевої фрези, оснащеної НТМ марки гексаніт-Р при одноножевому фрезеруванні чавуну СЧ 20 при застосуванні косокутної безвершинної геометрії ножа фрези та з метою встановлення характеру зношування та руйнування НТМ проводились відповідні дослідження. За критерій стійкості приймалась величина фаски зносу по задній поверхні $h_s = 0,5$ мм, яка є характерною величиною для НТМ при напівчистових та чорнових процесах обробки. З метою мінімізації кількості досліджень використовувалось повнофакторне планування експерименту для побудови залежності:

$$T = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (1)$$

Визначення значень коефіцієнтів лінійного та взаємного впливу факторів для даного полінома першої степені (1) проводилось за матрицею повнофакторного експерименту типу 2^3 (табл. 1):

Таблиця 1

Матриця планування повного факторного експерименту типу 2^3

Номер досліджу	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	T
1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	T_1
2	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	T_2
3	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	T_3
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	T_4
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	T_5
6	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	T_6
7	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	T_7
8	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	T_8

Для компенсації впливу випадкових похибок кожен дослід проводився при рівномірному трикратному дублюванні за однакових значень вхідних параметрів.

Факторами виступали: x_1 – швидкість різання V , м/хв.; x_2 – подача S_z , мм/зуб; x_3 – глибина різання t , мм. Діапазони зміни факторів та інтервали варіювання представлені в табл. 2.

Дійсні значення факторів та інтервали їх варіювання

x_1^{-1}	x_1^0	x_1^{+1}	ϵ_1
879,62	1143,506	1407,392	263,886
x_2^{-1}	x_2^0	x_2^{+1}	ϵ_2
0,1	0,175	0,25	0,075
x_3^{-1}	x_3^0	x_3^{+1}	ϵ_3
0,75	1,125	1,5	0,375

З врахуванням попередньо отриманих результатів досліджень [10] умов ударного навантаження при врізанні ножа торцевої перевірки забезпечення рівня періоду стійкості проводилась при використанні раціональної геометрії. Так, геометричні параметри різальної частини ножа фрези становили: передній кут $\gamma = -5^\circ$, кут нахилу головної різальної кромки $\lambda = -10^\circ$, радіус при вершині $r = 3$ мм, загострення задньої циліндричної поверхні проводилось з постійним значення заднього кута в напрямку швидкості різання $\alpha = 8^\circ$.

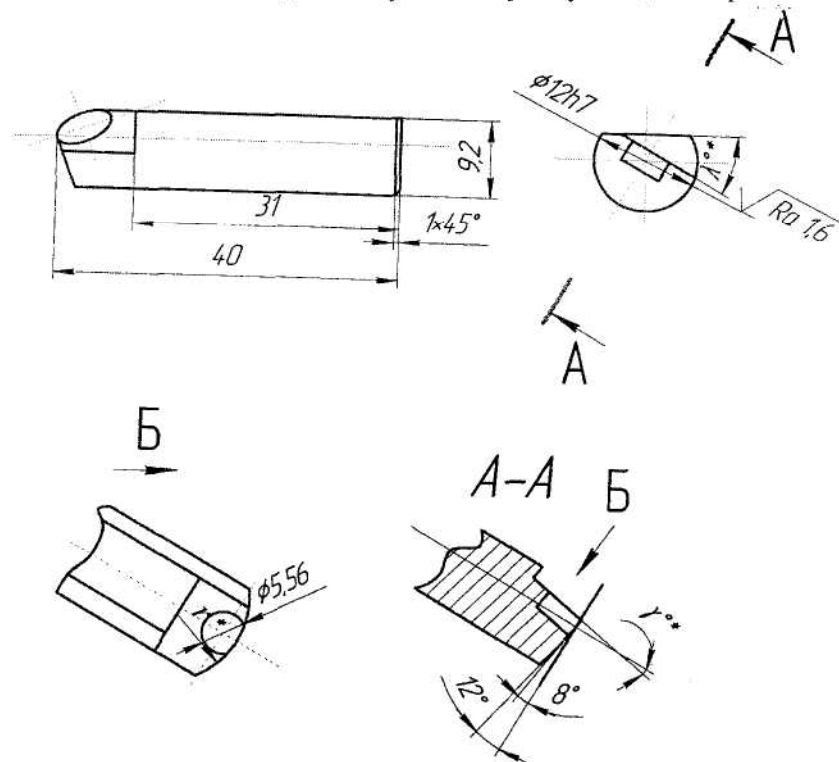


Рис. 1. Геометричні параметри різальних ножів торцевої фрези

Попередні розрахунки показали, що для зняття припусків величиною $t_z = 6 \dots 10$ мм глибина різання на одному ножі повинна становити $t_i = 0,75 \dots 1,5$ мм. Згідно з рекомендаціями [10] щодо створення умов раціонального ударного навантаження ножа фрези при врізанні ефективним є збільшення подачі до величини $0,2 \dots 0,25$ мм/зуб, тому серед рекомендованого діапазону подач $0,05 \dots 0,25$ мм/зуб для проведення досліджень інтервал варіювання подачі на зуб приймався $S_z = 0,1 \dots 0,25$ мм/зуб. Оскільки було встановлено, що швидкість різання не впливає на вказаний характер навантаження, запропоновано змістити діапазон швидкостей різання в зону його більших значень. Рекомендованими значеннями швидкості різання при обробці сірого чавуну вважаються $V = 8 \dots 12$ м/с [5], однак згідно з [8] значення швидкості

різання мають приймати більші значення, і тому при проведенні стійкісних досліджень вони вибирались з діапазону $V = 14,5 \dots 23,5$ м/с.

У процесі обробки проводилась реєстрація величини фаски зносу по задній поверхні, інтенсивності збільшення фаски в процесі обробки та проводився аналіз зношених передньої та задньої поверхонь ножів фрези. Аналіз характеру зношування при проведенні стійкісних досліджень показав, що найбільш характерним видом зношування при заданих умовах проведення експерименту є рівномірне зношування по задній поверхні з утворенням незначної за розмірами лунки на передній поверхні. Нетиповим видом зношування є утворення сколів з подальшим їх розгалуженням та руйнуванням надтвердого матеріалу, що спостерігалось в умовах максимального навантаження інструменту. Класифікуючи отримані в процесі обробки види зношування, можливо виділити:

1. Рівномірний характер зношування різальної кромки з подальшим монотонним осипанням кромки (рис. 2).



Рис. 2. Характер зношування задньої поверхні ножа фрези ($V = 14,5$ м/с; $S_z = 0,25$ мм/зуб; $t = 0,75$ мм) 90X: а) – рівномірне зношування; б) – осипання різальної кромки

2. Утворення мікросколів з їх подальшим ростом при одночасному рівномірному зношуванні кромки (рис. 3).

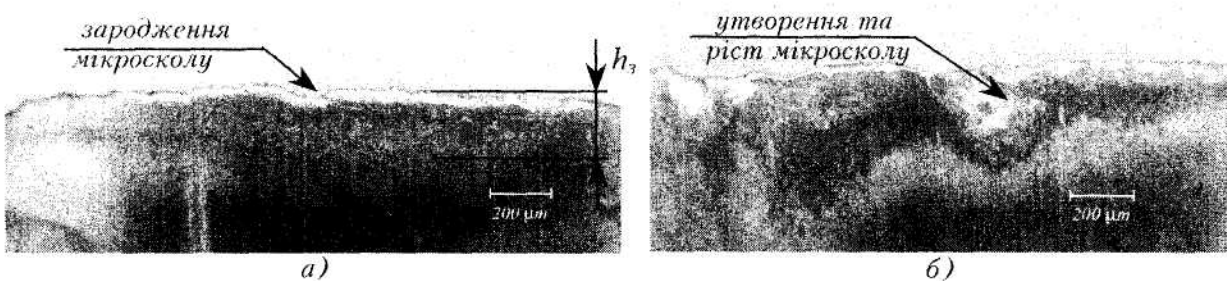


Рис. 3. Характер зношування задньої поверхні ножа фрези ($V = 23,5$ м/с; $S_z = 0,1$ мм/зуб; $t = 1,5$ мм) 90X: а) – зародження мікросколу; б) – ріст мікросколу

3. Утворення мікросколів з їх подальшим інтенсивним розповсюдженням і утворенням макросколу (рис. 4).



Рис. 4. Характер зношування та руйнування ножа фрези ($V = 23,5$ м/с; $S_z = 0,25$ мм/зуб; $t = 1,5$ мм) 90X: а) – утворення мікросколу; б) – утворення макросколу та осипання кромки

4. Зародження та ріст тріщин на задній поверхні ножа фрези з наступним руйнуванням різального клину інструменту (рис. 5).

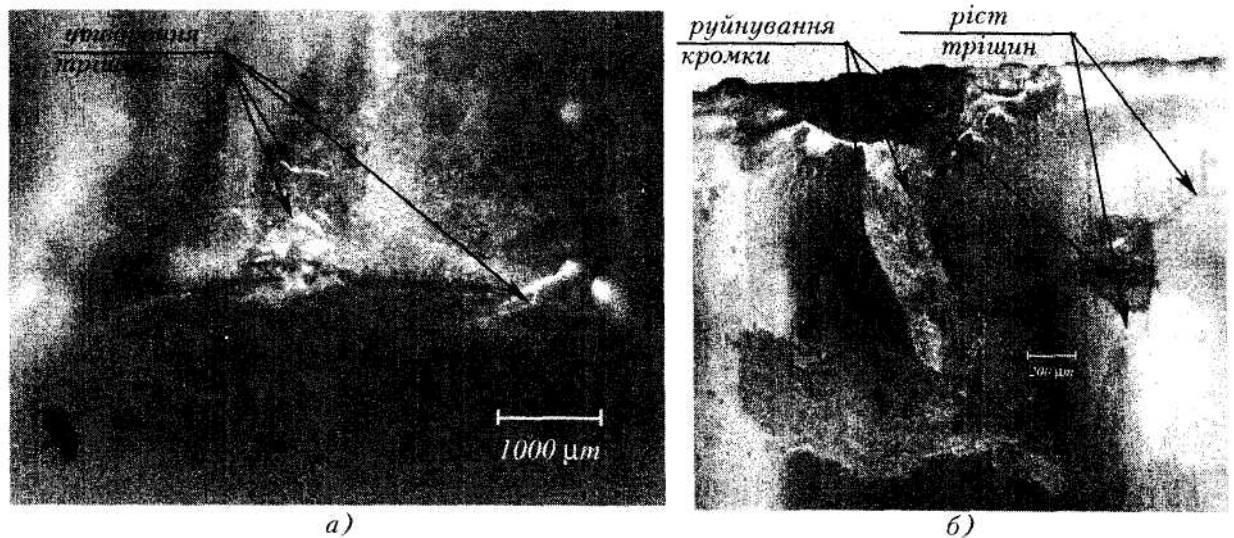


Рис. 5. Характер зношування та руйнування задньої поверхні ножа фрези $V = 23,5$ м/с; $S_z = 0,25$ мм/зуб; $t = 1,5$ мм): а) – утворення тріщин 20X; б) – ріст тріщин з подальшим руйнуванням кромки 90X

5. Макроруйнування різального клину внаслідок його ударного перевантаження та/або перевантаження при сталому різанні з подальшою механічною поломкою (рис. 6).

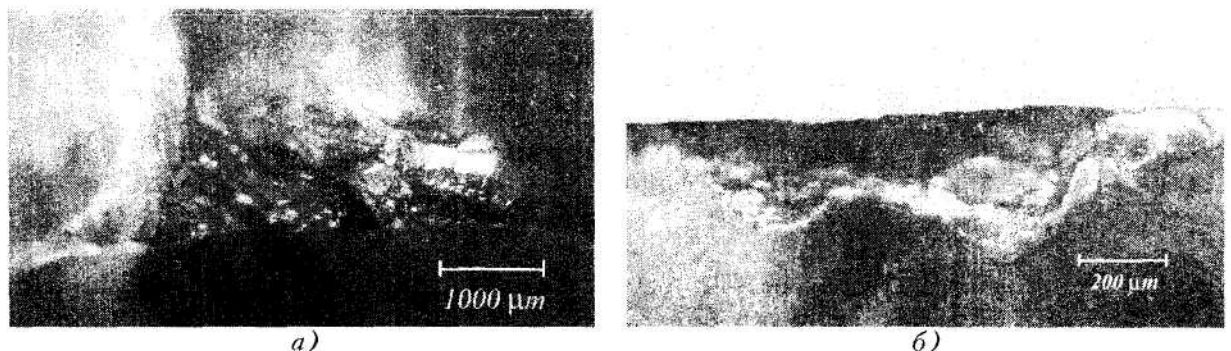


Рис. 6. Характер руйнування різальної частини ножа ($V = 24,5$ м/с; $S_z = 0,25$ мм/зуб; $t = 0,5$ мм; $\lambda = +5^\circ$; $r = 3,5$ мм; $\gamma = -10^\circ$): а) – викришування 20X; б) – скол по задній поверхні 90X

Випадки 1 та 2 є типовими представниками характеру зношування, який спостерігався в усьому діапазоні досліджуваних режимів, окрім випадку росту мікросколу з їх подальшим збільшенням і переходом в макроскол та утворенням мікротріщин з руйнуванням різального клину, які спостерігались при максимальних значеннях режимів – $V = 23,5$ м/с; $S_z = 0,25$ мм/зуб; $t = 1,5$ мм. Руйнування різальної кромки внаслідок її механічної поломки при проведенні стійкісних досліджень не спостерігалось. Випадок 5 реєструвався при проведенні ряду силових досліджень при значеннях геометричних параметрів поза межами їх раціональних значень з умови мінімізації ударного навантаження (значення кута нахилу головної різальної кромки $\lambda = +5^\circ$).

За отриманими значеннями періоду стійкості (табл. 3), отриманими згідно з планом повнофакторного експерименту (табл. 1), проводилась перевірка сумнівності результатів.

Аналіз перевірки сумнівності результатів за відношенням U (ГОСТ 11.002-73) показав, що внаслідок виконання умови $|U_{max}| \geq \beta$ серед результатів стійкісних досліджень не спостерігається аномальних результатів, що різко виділяються. Значення критерію β приймалось при рівні значущості 5 %.

Таблиця 3

Результати дослідження впливу режимів обробки на період стійкості ножа
з НТМ марки гексаніт-Р при одноножевому фрезеруванні чавуну СЧ-20

T_1	T_2	T_3	T_m	S_j^2	U_{max1}	U_{max2}	U_{max3}	β
274	273	267	271	14,333	-0,704	-0,440	1,145	0,046
313	311	317	313	9,333	0,218	0,873	-1,091	0,046
337	332	329	332	16,333	-1,072	0,165	0,907	0,046
378	379	374	377	7,000	-0,378	-0,756	1,134	0,046
314	311	309	311	6,333	-1,060	0,132	0,927	0,046
327	328	334	329	14,333	0,704	0,440	-1,145	0,046
369	362	363	364	14,333	-1,145	0,704	0,440	0,046
403	394	398	398	20,333	-1,035	0,961	0,074	0,046

Перевірка однорідності дисперсій S_j^2 проводилась за G-критерієм Кохрена. Розраховуючи G-критерій Кохрена як $G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum S_j^2}$ (S_{\max}^2 – максимальне значення дисперсії у досліді, S_j^2 – дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів), було встановлено, що досліджуваний період стійкості підпадає під нормальний закон розподілу, оскільки виконується умова:

$$G_p = 0,1986 < G_{\text{табл}} = 0,5157,$$

де $G_{\text{табл}}$ – табличне значення критерію Кохрена при обраному 5 % рівні значущості.

Визначаємо дисперсію відновлюваності:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2 = 12,7917.$$

Значення коефіцієнтів шуканого рівняння регресії (1) визначаються за наступними залежностями:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j - \text{коефіцієнти регресії, що характеризують лінійні ефекти;}$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{ij} \bar{y}_j - \text{коефіцієнти регресії, що характеризують ефекти взаємодії.}$$

Отримані значення коефіцієнтів поліному першої степені дорівнюють (табл. 4):

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів регресії, що характеризують лінійні та ефекти взаємодії

Коефіцієнт	Значення коефіцієнта	Дійсне значення критерію Стьюдента t_p	Критерій Стьюдента $t_{(0,05)}$ при рівні значущості 5 %
b_0	337,3333	462,0631	2,12
b_1	-17,3333	23,74237	2,12
b_2	-30,8333	42,23403	2,12
b_3	-13,6667	18,71995	2,12
b_{12}	2,166667	2,967797	2,12
b_{23}	-0,33333	0,456584	2,12
b_{13}	-4,33333	5,935594	2,12
b_{123}	-1,66667	2,282921	2,12

Аналіз значущості коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента (табл. 4) показує, що коефіцієнт взаємодії одночасної дії подачі й глибини різання менший за табличне значення при

рівні значущості 5 % – $t_{b23} = 0,45 < t_{(0,05)} = 2,12$, тому, виключаючи даний коефіцієнт з рівняння, отримуємо кінцевий вигляд рівняння регресії:

$$T = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3,$$

або в чисельному вигляді:

$$T = 337,3 - 17,3 \cdot x_1 - 30,8 \cdot x_2 - 13,6 \cdot x_3 + 2,16 \cdot x_1 \cdot x_2 - 4,33 \cdot x_1 \cdot x_3 - 1,66 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (2)$$

З метою перевірки гіпотези адекватності створеної моделі за F-критерієм Фішера

$$\text{визначалась дисперсія адекватності } S_{ad}^2 = \frac{n \sum (\bar{y}_j - \bar{y})^2}{N - (k + 1)} = 0,667.$$

За отриманим значенням дисперсії адекватності розрахункове значення F-критерію Фішера порівнюватиме $F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = 0,052$, що при обраному рівні значущості 5 % і кількості ступенів вільності $f = N - (k + 1) = 4$ підтверджує адекватність отриманої моделі, оскільки умова $F_p = 0,052 < F_{таб} = 6,4$ виконується.

Аналіз коефіцієнтів регресії показує, що при збільшенні всіх значень факторів спостерігається зменшення періоду стійкості і що подача найбільш інтенсивно впливає на стійкість різальної частини ножа фрези. Встановлено, що глибина різання найменшою мірою впливає на період стійкості фрез, оснащених НТМ, що підтверджує результати попередніх досліджень [2–4, 6]. Отримані дані дозволяють рекомендувати обробку чавунних деталей торцевими фрезами з НТМ з величинами припуску на один ніж $t_i = 1 \dots 1,5$ мм, що при використанні спіральних-ступінчастих схем різання дозволяє реалізувати процес фрезерування з сумарними глибинами $t_{\Sigma} = 8 \dots 10$ мм. Математична обробка результатів досліджень підтверджує дані робіт [5, 6] з порівняння ступеня впливу подачі на зуб та швидкості різання. З отриманих значень коефіцієнтів регресійного рівняння випливає, що подача на зуб значно більше впливає на стійкість інструменту, ніж швидкість різання. Завдаючись умовою максимальності продуктивності обробки при забезпеченні необхідного рівня зносостійкості фрези, оснащеної НТМ, рекомендується призначати подачу на зуб з діапазону $S_z = 0,15 \dots 0,2$ мм/зуб при одночасному завданні швидкості різання в межах $V = 19 \dots 23,5$ м/с при сумарній глибині різання до 10 мм при обробці чавунних деталей. Проведені розрахунки продуктивності обробки чавунних деталей торцевими ступінчастими фрезами та результати їх впровадження у виробництво показали високу ефективність обробки, інтенсивність зняття припуску складає 400...550 мм³/с, що значно перевищує можливості традиційних методів.

Висновки. За результатами досліджень зі встановлення впливу режимів різання на період стійкості та характер зношування та руйнування різальної частини торцевих фрез, оснащених надтвердими матеріалами при чорновій обробці сірого чавуну, визначено, що інтенсифікація вказаних режимів, за умови застосування раціональних геометричних параметрів, дозволяє досягти рівного характеру зношування та забезпечити рівень періоду стійкості, притаманний чистовим процесам обробки торцевими фрезами з НТМ.

Розширення досліджень в даній області має бути спрямоване на визначення раціональних марок інструментальних матеріалів при використанні високошвидкісних процесів чорнової обробки чавунних деталей.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Панов А.А.* Опыт интенсификации обработки деталей инструментом, оснащённым синтетическим сверхтвёрдым материалом и керамикой // Вестник машиностроения. – 1989. – № 11. – С. 37–41.
2. *Жедь В.П., Боровский Г.В.* Состояние и перспективы развития лезвийного инструмента из поликристаллических сверхтвёрдых материалов на основе нитрида бора // Резание и инструмент. – 1984. – Вып. 34. – С. 6–11.
3. *Лищинский Н.Я.* Торцовые фрезы с упругими элементами // Синтетические алмазы. – 1978. – Вып. 1. – С. 30–31.

4. Каменкович А.С. Лезвийные инструменты из сверхтвердых материалов на основе нитрида бора // Высокопроизводительный инструмент из сверхтвердых материалов и области его применения / Под ред. Г.А. Коссовича. – М., 1976. – С. 3–32.
5. Захаренко П.В., Волкогон В.М., Бочко А.В., и др. / Отв. ред. Г.Г. Карюк; Технологические особенности механической обработки инструментом из поликристаллических сверхтвердых материалов: АН УССР Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.
6. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами, и их применение: Справочник / В.П. Жедь, Г.В. Боровский, Я.А. Музыкант и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
7. Analyzing PCBN tool wear // *Thomas J. Broskea*, GE Superabrasives // Modern Machine Shop Online // <http://www.mmsonline.com/articles/010102.html>.
8. Клименко С.А., Муковоз Ю.А., Ляшко В.А. и др. К вопросу об износе инструмента из кубического нитрида бора // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 2. – С. 42–45.
9. Кабалдин Ю.Г., Мокрицкий Б.Я., Пронин А.И. Стойкость режущего инструмента, оснащенного керамикой и сверхтвердыми материалами // Станки и инструмент. – 1991. – № 12. – С. 19–21.
10. Виговський Г.М., Бушля В.М. Характеристики процесу врізання для глибинної обробки торцевими фрезами // Вісник СумДУ / Технічні науки. – Суми: СумДУ. 2003. – № 2 (48), – С. 12–18.

ВИГОВСЬКИЙ Георгій Миколайович – кандидат технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– процеси різання.

БУШЛЯ Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– процеси різання.

Подано 15.01.2008