

УДК 621.923.42
DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/04>

Кальченко В.І.

Національний університет «Чернігівська політехніка»

Кальченко В.В.

Національний університет «Чернігівська політехніка»

Венжега В.І.

Національний університет «Чернігівська політехніка»

Винник В.О.

Національний університет «Чернігівська політехніка»

Скляр В.М.

Національний університет «Чернігівська політехніка»

Кальченко Д.В.

Національний університет «Чернігівська політехніка»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ КУЛАЧКІВ РОЗПОДІЛЬЧОГО ВАЛА НА МОДЕРНІЗОВАНОМУ ВЕРСТАТІ В3208Ф4

Стаття присвячена експериментальним дослідженням розробленого нового способу високошвидкісного фрезерування кулачків розподільних валів зі схрещеними осями інструмента й деталі на модернізованому для цього універсально-заточувальному верстаті з числовим програмним керуванням (ЧПК) моделі В3208Ф4 з метою підтвердження правильності розроблених раніше теоретичних моделей і проведених розрахунків.

На основі проведених раніше теоретичних розрахунків, розроблених 3D моделей і складених програм розрахунків зроблено висновок, що точність і якість обробки залежать головним чином від таких факторів: кута схрещення осі фрези з віссю розподільчого вала; припуску, що знімається, і швидкості різання.

Експериментально підтверджена ефективність фрез, оснащених надтвердими матеріалом (НТМ) на основі кубічного нітриду бору, що найбільшою мірою проявляється на багатокоординатних верстатах, оснащених сучасними системами керування, так як вони дають змогу реалізувати режими різання, близькі до оптимальних для інструменту з НТМ, і тим самим забезпечити продуктивність обробки та невеликий знос інструменту. Проведені за допомогою розробленого фотоелектричного датчика експериментальні дослідження зносу фрези з різальними елементами з кубічного нітриду бору показали незначні величини зносу.

Зафіксовані середні значення температури при різних рівнях взаємодії факторів не перевищили 250°C, що підтверджує теоретичне положення, за яким тепло, що виділяється під час обробки, практично повністю зосереджено в стружці й не перебуває тривалий час у зоні обробки, через що фреза й деталь мало схильні до високого термічного впливу.

Виміряна величина шорсткості обробленої поверхні за параметром R_a порівнянна із шорсткістю, отриманою методами абразивної обробки.

Ключові слова: високошвидкісне фрезерування, модернізований верстат, фрези, оснащені кубічним нітридом бору, знос інструменту, теплонапруженість процесу, орієнтований інструмент, розподільний вал, кулачок.

Постановка проблеми. Значна частина продукції підприємств машинобудівного комплексу належить до групи тіл обертання. Однією з головних тенденцій сучасного машинобудування в умовах

ринкової економіки є забезпечення високих показників точності та якості оброблених поверхонь при високій продуктивності обробки. Ефективним способом обробки зовнішніх поверхонь обертання

є високошвидкісне фрезерування на багатокоординатних верстатах з ЧПК, яке використовують під час обробки шийок ступінчастих і колінчастих валів, кулачків розподільчих валів, гальмівних колодок тощо. Дослідження, удосконалення наявних і впровадження нових способів фрезерної обробки сприятиме підвищенню рівня конкурентоспроможності вітчизняних підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У роботах [1; 2] досліджено фрезерування деталей, що мають форму тіл обертання набором дискових фрез (спосіб Rotomille). Перевагою такого способу є можливість отримати поверхню деталі. Однак цей спосіб не отримав широкого застосування через складність виготовлення й експлуатації інструменту. Для забезпечення високої жорсткості системи необхідно обмежувати кругові подачі, що призводить до зменшення продуктивності обробки.

У роботі [3] розглядається спосіб обробки поверхонь обертання великого діаметра (наприклад, валків прокатних станів) двома торцевими фрезами, осі яких схрещуються з віссю оброблюваної заготовки. Різання при цьому здійснюється з поздовжньою подачею фрези вздовж осі заготовки. Однак у наведених дослідженнях висвітлено питання обробки лише стосовно довгих поверхонь із поздовжньою подачею інструменту та коротких у разі її відсутності. У роботах А.О. Етін [4] для окремих випадків запропоновано залежності, за якими визначаються похибки обробки в поперечному й поздовжньому перерізах заготовки при фрезеруванні циліндричних деталей.

Дослідження процесів фрезерування тіл обертання проведено в роботі [5].

У праці [6] наводиться геометричний аналіз похибок формоутворення при фрезеруванні поверхонь обертання торцевою фрезою.

У роботі [7] обробку довгомірних валів пропонується реалізувати за способом фрезоточіння. Як ріжучий інструмент застосовується дискова фреза, оснащена ріжучими елементами з надтвердих матеріалів (НТМ) збірної або цільної конструкції. У цьому разі фрезоточіння має такі переваги:

- чистовий різець обробляє заготовку з точністю до 8-го квалітету й шорсткістю R_a до 1,6 ... 3,2 мкм, фрезоточіння ж дає змогу поліпшити обидва параметри на 1–2 класи, оскільки, на відміну від різця, фреза має кілька ріжучих крайок, а отже, і більший ресурс стійкості;

- під час точіння на різець будуть діяти великі навантаження, для усунення яких доводиться знизувати подачу, зменшуючи продуктивність, а фреза здатна працювати в умовах високих навантажень при великій подачі;

- під час обробки фрезою стружка знімається кожним зубом фрези і дробиться на окремі частинки, тоді як під час обробки різцем для дроблення стружки доводиться використовувати стружколоми;

- можлива обробка заготовок із наявністю твердої кірки (поковок, виливок), а також важкооброблюваних матеріалів, так як зуб фрези в цьому разі буде плавно різати під кірку, що допомагає істотно знизити знос фрези і збільшити її стійкість;

- фрези, оснащені НТМ, можуть замінити операцію шліфування, забезпечуючи розмірну стійкість, так як, на відміну від шліфувального круга, не мають процесу викришення.

Постановка завдання. Мета статті – експериментально дослідити розроблений новий спосіб високошвидкісного фрезерування кулачків розподільчих валів зі схрещеними осями інструмента й деталі на модернізованому для цього універсально-заточувальному верстаті з числовим програмним керуванням (ЧПК) моделі В3208Ф4 з метою підтвердження правильності розроблених раніше теоретичних моделей і проведених розрахунків.

Виклад основного матеріалу дослідження. Універсально-заточувальний напівавтомат з ЧПК моделі В3208Ф3 у базовій комплектації призначений для заточування й доведення циліндричних інструментів по передніх і задніх поверхнях, розташованих на периферії й торцю, шліфувальними кругами в умовах дрібносерійного й одиничного виробництва.

У роботі [8] проведено дослідження точнісних і жорсткісних характеристик верстату з метою можливості використання його для високошвидкісного фрезерування поверхонь обертання. Обґрунтовано та запропоновано низку рішень з переобладнання системи ЧПК сучасною від персонального комп'ютера, що забезпечує одночасне управління по чотирьох координатах, окремих вузлів приводу головного руху, використання як інструменту дискових фрез, оснащених різальними пластинами з кубічного нітриду бору.

Модернізований для високошвидкісного фрезерування верстат складається з таких основних частин: станини 1; столу 2; каретки з колоною 3; механізмів поперечної 4, поздовжньої 5 та вертикальної 6 подачі; шліфувальної бабки 7; бабки виробу 8. Кінематична схема верстата наведена на рис. 1.

Конструкція верстата забезпечує такі переміщення робочих органів:

- обертання шліфувального круга;
- вертикальне переміщення шліфувальної головки;
- поперечне переміщення шліфувальної головки;

- поздовжнє переміщення столу;
- обертання виробу.

Обертання шпинделя здійснюється від електродвигуна М1 через поліклінову передачу зі змінними шківками. Вертикальне переміщення шліфувальної бабки – від електродвигуна М3 через черв'ячну передачу на передачу гвинт-гайка 6. Поперечне переміщення каретки й поздовжнє переміщення столу відбувається завдяки приводам із двигунами М2 і М5, що передають обертання на передачу гвинт-гайка кочення прямо через з'єднувальні муфти. Обертання виробу здійснюється від електродвигуна М4 через черв'ячну передачу.

На підставі теоретичних досліджень, розроблених 3D моделей і складених робочих програм доходимо висновку, що точність і якість обробки залежать головним чином від кута схрещення осі фрези з віссю розподільчого вала – X_1 , припуску, що знімається, – X_2 і швидкості різання X_3 , які приймаємо як технологічні фактори. Умови проведення дослідів наведено в таблиці 1.

Оброблювалися кулачки розподільчого вала автомобіля КАМАЗ 740, виготовленого зі сталі 18ХГТ, термообробленого до твердості 40÷45 HRC дисковою фрезою діаметром 125 мм із різальними елементами з кубічного нітриду бору.

Під час проведення досліджень впливу технологічних параметрів обробки на точність використовувався повний факторний експеримент типу 2^3 при обліку взаємодій між факторами. Як план прийнято ортогональний план другого порядку. Так як наявна інформація про дисперсії та її однорідності недостатня, то проведені по три паралельні досліди в усіх точках плану.

Значення факторів вимірювалися й контролювалися такими приладами.

Схрещення осі фрези з віссю розподільчого вала по лімбу верстата.

Припуск, що знімається, – системою ЧПК з точністю до 0,001 мм.

Швидкість різання – за допомогою змінних шківів при частоті обертання електродвигуна 2720 об/хв.

Як досліджувані параметри прийнято точність розмірів і форми обробленої поверхні, шорсткість, теплонапруженість процесу, знос різальних елементів фрези.

Для контролю лінійного зносу фрези використовувався розроблений датчик переміщення рис. 2, який дає змогу прово-

дити вимірювання й запис профілю інструмента без демонтажу оброблюваної на верстаті деталі.

В основі конструкції лежить принцип фотоелектричного датчика відстані з використанням оптиковолоконного кабелю. Принцип роботи цього датчика показано на рис. 2а. Світло, що випромінює лампа, проходить крізь оптиковолоконний кабель 2 (його центральну частину). На виході з кабелю пучок світла являє собою конус, який розходить під кутом φ і відбивається від дзеркала 1. Він повертається в зовнішню частину кабелю й далі на фотодіод відповідного спектру, який підключено до вимірювального підсилювача

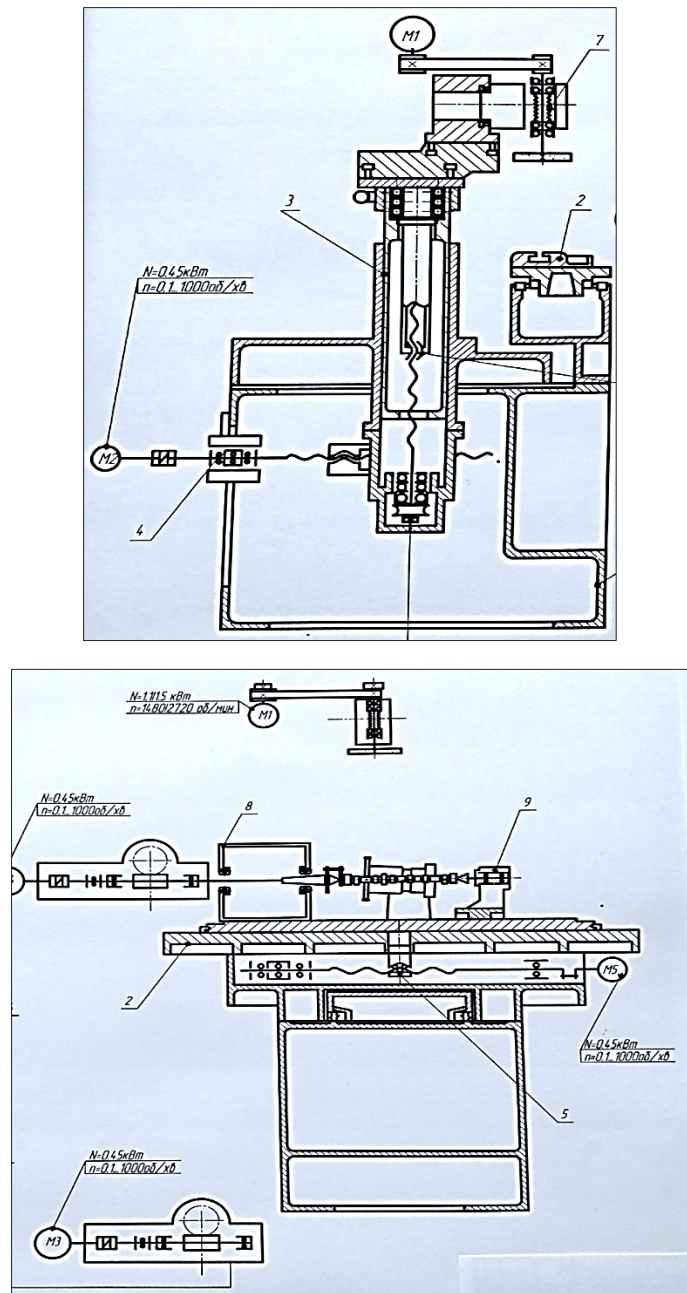


Рис. 1. Кінематична схема верстата ВЗ 208Ф3

4. Підсилювач перетворює фотострум в електричний сигнал для контролю й запису відстані H від головки кабелю 2 до перешкоди 1. Лампа отримує живлення від стабільного джерела постійного струму.

Електрична принципова схема вимірювального підсилювача подана на рис. 2 г.

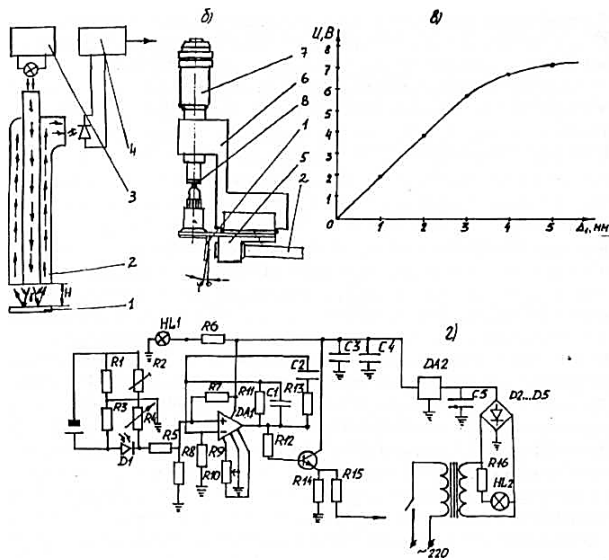


Рис. 2. Схема роботи й налагодження для тарювання оптико-волоконного датчика відстані

Вимірювальний міст складається з підібраних за опором резисторів $R1$ і $R3$, підналагоджувальних резисторів $R2$, $R4$, які використовуються для балансування моста, і фотодіода D . Сигнал розбалансування моста під час переміщення перешкоди 1 через резистор $K5$ подається на підсилювач постійного струму, який виконано на операційному підсилювачі $DA1$ зі стандартними ланцюгами корекції амплітудно-частотної характеристики.

З огляду на нестабільність характеристики відбивання від різальних елементів фрези, для контролю їх профілю розроблено спеціальний прилад. Він складається з твердосплавного наконечника, штанги, пружної пластини, дзер-

кала, кронштейна, кріплення оптичного кабелю, основи. Головка кабелю, закріплена в кронштейні гвинтовим затискачем. Пересування здійснюється за допомогою мікрометричного гвинта 7. З тарювального графіка датчика видно, що він має лінійну характеристику в діапазоні від 0 до 3 мм. Розширення лінійної характеристики отримуємо за рахунок кутової (ϕ_0) орієнтації дзеркала 1 спеціального приладу.

Датчик закріплюється на кронштейні заднього центру. Під час роботи верстата датчик знаходиться в неробочій зоні й не перешкоджає обробці. Датчик під час вимірювання зносу має дві установки. При контролі профілю периферії подача здійснюється системою ЧПК уздовж осі фрези. При вимірі торця датчик закріплюється в інше положення, і подача виконується в осевій площині фрези, перпендикулярно до осі її обертання.

Проведені за допомогою датчика експериментальні дослідження показали найбільший знос інструмента при нижньому значенні факторів X_1 та X_3 і верхньому X_2 порядку 5 мкм і найменший – приблизно 2 мкм при верхньому значенні факторів X_1 та X_3 і нижньому X_2 .

Для визначення розподілу температури на поверхні деталі під час процесу фрезерування використовувався тепловізор моделі ULIRVISION TI-384 (рис. 3). Діапазон вимірювання приладу становить від -20°C до 350°C , похибка вимірювання – $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Під час проведення вимірювання відбувається автоматичний захват максимальної температури й результат відображається на кольоровому дисплеї.

Зафіксовані середні значення температури при різних рівнях взаємодії факторів не перевищили 250°C , що підтверджує теоретичне положення, за яким тепло, що виділяється під час обробки, практично повністю зосереджено в стружці й не перебуває тривалий час у зоні обробки, через що фреза й деталь мало схильні до високого термічного впливу.

Таблиця 1

Умови проведення дослідів

Рівні й інтервали варіювання	Фактори		
	Схрещення осі фрези з віссю розподільчого вала – $X_1, ^{\circ}$	Припуск, що знімається, – X_2 , мм	Швидкість різання X_3 , м/хв
Нульовий рівень, X_{i0}	4	0,3	1067
Інтервал варіювання, Δ_i	2	0,2	200
Верхній рівень, $X_{i0} + \Delta_i$	6	0,5	1267
Нижній рівень, $X_{i0} - \Delta_i$	2	0,1	867



Рис. 3. Тепловізор моделі ULIRVISION TI-384

Параметри шорсткості вимірювалися малогабаритним профілометром Pocket Surf (рис. 4). Він дає змогу здійснювати вимірювання під різними кутами та в різних місцях. Принцип роботи приладу базується на прощупуванні нерівностей вимірювальної поверхні алмазною голкою шупа й перетворення механічних коливань шупа, що виникають при цьому, у зміну величини напруги. Зміна напруги пропорційна цим коливанням, які підсилюються, перетворюються у величину мікронерівностей і виводяться на екран приладу. Похибка вимірювання профілометра за параметром шорсткості R_a становить 3%. Профілограма шорсткості наведена на рис. 5. Величина шорсткості за параметром R_a зівставна із шорсткістю, отриманою методами абразивної обробки.

Висновки. Проведені за допомогою фотоелектричного датчика відстані експериментальні дослідження зносу фрези з різальними елементами з кубічного нітриду бору показали, що найбільший знос інструмента (порядку 5 мкм) – при найменшому значенні кута схрещення осей інструмента й заготовки та швидкості різання й найбільшому значенню припуску згідно з таблицею умов проведення дослідів. Найменший знос – приблизно 2 мкм при верхньому значенні факторів кута схрещення осей і швидкості й нижньому значенні припуску.



Рис. 4. Профілометр Pocket Surf



Рис. 5. Профілограма шорсткості обробленої поверхні кулачка

Зафіксовані середні значення температури тепловізором моделі ULIRVISION TI-384 при різних рівнях взаємодії факторів не перевищили 250°C , що підтверджує теоретичне положення, за яким тепло, що виділяється під час обробки, практично повністю зосереджено в стружці й не перебуває тривалий час у зоні обробки, через що фреза й деталь мало схильні до високого термічного впливу.

Величина шорсткості виміряна малогабаритним профілометром Pocket за параметром R_a 1 мкм порівнянна із шорсткістю, отриманою методами абразивної обробки.

Отже, запропонований спосіб високошвидкісного фрезерування може бути застосований для обробки кулачків та опорних шийок розподільчих валів двигунів внутрішнього спалювання, валів коробок перемикачів швидкостей автомобілів і тракторів, що підвищує продуктивність і точність обробки, їх ресурс і надійність.

Список літератури:

1. Грязев М.В., Степаненко А.В. Перспективные технологии обработки поверхностей вращения фрезерованием. *Известия ТулГУ. Серия «Технические науки»*. 2010. Вып. 2. Ч. 1. С. 130–136.
2. Технология механической обработки артиллерийских снарядов. Москва : Оборонгиз, 1948. 658 с.
3. Полетаев В.А., Волков Д.И. Особенности стружкообразования при фрезеровании и фрезоточении тел вращения. *Инженерный журнал*. 2001. № 7. С. 18–21.
4. Этин А.О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. Москва : Машиностроение, 1964. 324 с.
5. Полетаев В.А. Конструктивные особенности приводов подачи станков для кругового фрезерования. *Инженерный журнал*. 2001. № 8. С. 63–64.
6. Грязев М.В., Степаненко А.В. Фрезерование наружных цилиндрических поверхностей торцевой фрезой. *Известия ТулГУ. Серия «Технические науки»*. 2010. Вып. 2. Ч. 1. С. 140–148.
7. Гречишников В.А., Приходько А.С., Романов В.Б. Фрезы, оснащенные СТМ для обработки тел вращения сложной формы на токарном станке. *Известия Тульского государственного университета. Серия «Технические науки»*. 2017. № 8. Ч. 2. С. 69–74.

8. Модернізація універсально-заточувального верстата з ЧПК ВЗ 208 ФЗ для високошвидкісного фрезерування поверхонь обертання / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, В.І. Венжега, В.О. Винник. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 72–80.

**Kalchenko V.I., Kalchenko V.V., Wenzhega V.I., Vinnik V.A., Sklar V.M., Morochko V.V.
EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF HIGH-SPEED MILLING SHAFT ROLLS
ON MODERNIZED VZ208F4 MACHINE**

The article is devoted to the experimental researches of the developed new method of high-speed milling of camshaft cams with crossed axes of a tool and details on the modernized for this purpose the universal-sharpening machine of the CNC model VZ208F4 in order to confirm the correctness of previously developed theoretical models.

Based on the theoretical calculations made earlier, the 3D models developed and the complex calculation programs, it is concluded that the accuracy and quality of processing depend mainly on the following factors: the angle of intersection of the milling axis with the camshaft axis; removable allowance and cutting speed.

The efficiency of cutters equipped with NTM based on cubic boron nitride is experimentally confirmed, which is mostly manifested on multi-coordinate machines equipped with modern control systems as they allow to realize cutting modes close to the optimal ones for the tool with NTM, and thus to provide low productivity and tool wear. Experimental studies of the wear of a cutter with cutting elements made of cubic boron nitride, carried out with the help of a developed photoelectric sensor, showed negligible wear values.

The recorded average values of temperature at different levels of interaction of factors did not exceed 2500C, which confirms the theoretical position that the heat released during processing is almost completely concentrated in the chips and does not stay for a long time in the processing zone, which is why the milling cutter and the part are slightly inclined to high thermal effects.

The measured roughness measured by the treated surface by parameter Ra is comparable to the roughness obtained by abrasive method.

Key words: *high-speed milling, modernized machine, mills equipped with cubic boron nitride, tool wear, heat stress of the process, oriented tool, camshaft, cam.*