

УДК 621.923

Майборода¹ В.С., д.т.н., проф., Карпушевський² Б. д.т.н., проф., Климов² О.М.

1 - НТУУ «Київський політехнічний інститут» м. Київ, Україна; 2 - Університет ім. Отто-фон-Гєріке Магдебург, Германія

АНАЛІЗ УМОВ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ КІНЦЕВИХ ФРЕЗ ІЗ ТВЕРДОГО СПЛАВУ ПРИ ЇХ ДОВІЛЬНОМУ РОЗТАШУВАННІ В РОБОЧИХ ЗОНАХ УСТАНОВКИ ТИПУ КІЛЬЦЕВА ВАННА

Maiboroda¹ V., Karpuschewski² B., Klymov² O.

1 -National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine; 2- Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, IFQ (maiborodavs@mail.ru)

ANALYSIS OF THE CONDITIONS OF A MAGNETO-ABRASIVE POLISHING OF ENDMILLS OF HARD ALLOYS DURING THEIR POSITIONING IN RING-TYPE WORKING AREAS

В роботі представлені дані по розрахунку складових швидкості руху точок на робочих поверхнях кінцевих фрез при їх магнітно-абразивній обробці за схемою «кільцева ванна». Для гвинтової канавки найбільше підходить обробка в режимі натікання при куті нахилу фрези відносно осі «кільцевої ванни» рівному $p=30-60^\circ$. Задня поверхня бокової кромки піддається ефективному поліруванню при русі фрези в обох напрямках під час обробки, незалежно від кута установки фрези в оправці. Задня поверхня торцевої кромки ефективно оброблюється лише в режимі натікання при куті $p>10^\circ$.

Ключові слова: Магнітно-абразивне оброблення, кінцеві фрези, інтенсивність оброблення, швидкості оброблення.

Вступ. Процес магнітно-абразивного оброблення (МАО) для обробки різального інструмента, його робочих поверхонь з метою покращення його експлуатаційних характеристик досліджується вже багато років. Лише декілька із розроблених схем МАО [1, 2] зайшли своє місце у сфері наукових та практичних інтересів. Найбільш перспективною є так звана схема оброблення «кільцева ванна» [3, 4]. Обробка інструмента на установці такого типу відбувається, як правило, в умовах великих робочих зазорів. Проблемаю таких систем порівняно із системи обробки деталей в умовах малих робочих щілин є недостатність сили магнітних полів що відповідають в основному за жорсткість магнітного порошку в зоні контакту. Така схема обробки дозволяє компенсувати ці недоліки та дотриматись всіх необхідних положень основних умов ефективного МАО [1] шляхом реалізації складної траєкторії руху оброблюваної заготовки. Попередні експериментальні дослідження показали, що важливий вплив на процес оброблення мають умови базування і переміщення деталей в робочих зонах верстату для МАО, які суттєво визначають перевага яких сил взаємодії (нормальних, чи тангенціальних) частини магнітно-абразивного інструменту (МАІ) із оброблюваною поверхнею буде формувати її структуру. У той самий час швидкості обертання відповідають переважно за сили цих взаємодій і запобіганню застою порошку. За результатами досліджень наведених у [3-5], оптимальним кутом установки багатограних непереточуваних твердосплавних пластин (БНТП) у «кільцевій ванні» (КВ) під час МАО прийнято вважати кут $p=20-30^\circ$ – це кут нахилу оправки відносно осі КВ, який вимірюється в дотичній площині до «кільцевої ванни». З даних наведених у [6, 7] показано, що певному базуванню БНТП, як відносно осі «кільцевої ванни», так і відносно паралельної до «кільцевої ванни» площини, можна керувати процесом впливу МАІ на оброблювану поверхню контролюючи процес зняття матеріалу і зміну твердості приповерхневого шару. У роботі [8] наведено розроблену у системі MathCAD методику розрахунку величини нормальної та тангенціальної складових вектора швидкості руху точок на поверхні інструмента під час обробки БНТП у «кільцевій ванні» на прикладі п'ятигранних пластин. Але представлена розрахункова схема, на даному етапі, може бути використана лише для опису руху БНТП. Адаптація даної методики розрахунку, до умов МАО кінцевого інструмента значно полегшила б дослідження в цьому напрямку.

Проблема та аналіз процесу МАО кінцевих фрез

Характер позиціонування оброблюваного кінцевого інструмента під час МАО у КВ майже не відрізняється від характеру установки БНТП. Відмінність полягає у просторовому розміщенні різальних кромки оброблюваного інструмента відносно осі шпинделя $Z_{ш}$ (в даному випадку проходить вздовж осі інструмента) та осі «кільцевої ванни» Z_0 . Від їх просторового положення, та форми їх формуютьвірочуючих поверхонь (в даному

випадку геометрії різальної частини фрези) буде залежати напрям вектора нормалі до цих поверхонь в кожній точці. Таким чином задача зводиться до знаходження положення вектора нормалі в кожній точці на відповідно кожній робочій поверхні інструмента із подальшою підстановкою координат цього вектора в загальну методику розрахунку складових швидкості руху точок під час МАО.

Визначення напрямку нормалей до робочих поверхонь на гвинтовій різальній кромці

Задня поверхня (ЗП) бокової кромки кінцевих фрез формується стрічкою фрези, і характеризується величиною заднього кута α . На відміну від спіральних свердел, різальна частина кінцевих фрез не має форму зворотнього конуса, тому, як показано на рис. 1. вектор нормалі до задньої поверхні $N_{зг}$ буде лежати безпосередньо в площині $X_N Y_N$. Тоді матриця вектора нормалі $N_{зг}$ для ЗП гвинтової кромки (на стрічці) кінцевих фрез набуває вигляду:

$$N_{зг} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ -\sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix} N_{зг} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ -\sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

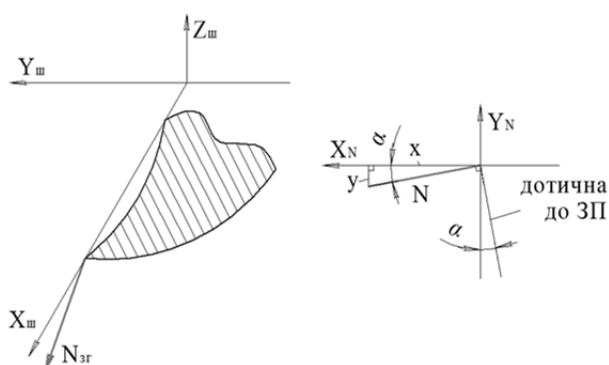


Рис. 1. Положення вектора нормалі до задньої поверхні гвинтової кромки кінцевої фрези

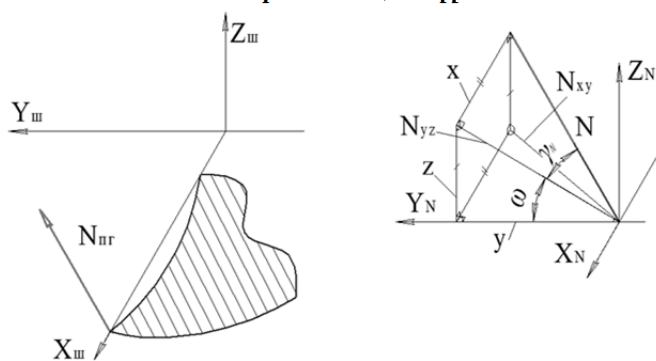


Рис. 2. Положення вектора нормалі до передньої поверхні гвинтової кромки кінцевої фрези

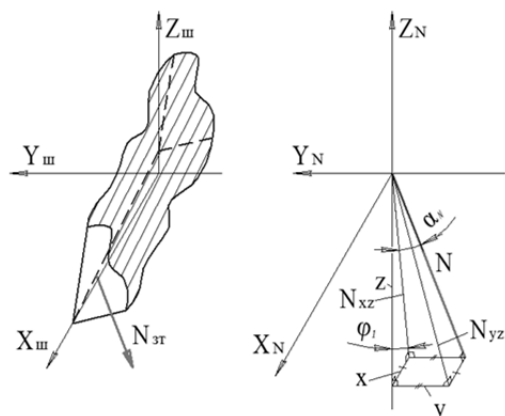


Рис. 3. Положення вектора нормалі до задньої поверхні торцевої кромки кінцевої фрези

Передня поверхня (ПП) характеризується кутом підйому ω та переднім кутом в плані γ_N . В даному випадку кут між $N_{пр}$ та проекцією вектора нормалі N_{yz} на площину $Y_N Z_N$ і буде γ_N . Кутом підйому гвинтової кромки, в свою чергу, буде кут між N_{yz} та віссю Y_N . Схематичне зображення вектора нормалі $N_{пр}$ представлено на рис. 2. Оскільки вектор нормалі при $\omega \neq 0$ та $\gamma_N \neq 0$ буде лежати в трьох площинах, то матриця його координат набуває вигляду:

$$N_{пр} = \begin{bmatrix} -\sin \gamma_N \\ \cos \omega \cdot \cos \gamma_N \\ \sin \omega \cdot \cos \gamma_N \end{bmatrix} N_{пр} = \begin{bmatrix} -\sin \gamma_N \\ \cos \omega \cdot \cos \gamma_N \\ \sin \omega \cdot \cos \gamma_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

Визначення напрямку нормалей до робочих поверхонь на торцевій різальній кромці

Задня поверхня торцевої кромки має форму площини і характеризується двома основними кутами: заднім кутом в плані α_{1N} (кут між вектором нормалі та його проекцією на площину $X_N Z_N$) та кутом нахилу торцевої (другорядної) кромки ϕ_1 , що дорівнює куту між N_{xz} та Z_N . Таким чином впливає, що для даної точки на задній поверхні торцевої кромки кінцевої фрези напрям вектора нормалі $N_{зт}$ визначатиметься координатами:

$$N_{зт} = \begin{bmatrix} -\sin \phi_1 \cdot \cos \alpha_{1N} \\ -\sin \alpha_{1N} \\ -\cos \phi_1 \cdot \cos \alpha_{1N} \end{bmatrix} N_{зт} = \begin{bmatrix} -\sin \phi_1 \cdot \cos \alpha_{1N} \\ -\sin \alpha_{1N} \\ -\cos \phi_1 \cdot \cos \alpha_{1N} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Передня поверхня торцевої кромки задається переднім кутом в нормальному перерізі рівному γ_{1N} . Виходячи із того, що торцева кромка лежить під кутом ϕ_1 відносно осі $X_{ш}$, – кутом γ_{1N} буде кут між $N_{пр}$ та Z_N . В свою чергу нормаль $N_{пр}$ лежить в площині $Y_N Z_N$. Це дає змогу стверджувати, що:

$$N_{пр} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \gamma_{1N}}{\cos^2 \phi_1}} \\ \frac{\sin \gamma_{1N}}{\cos \phi_1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

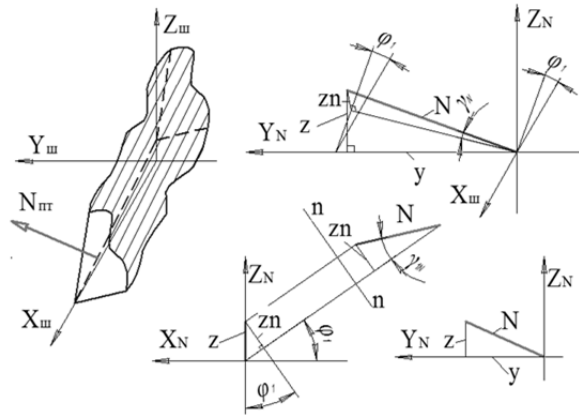


Рис. 4. Положення вектора нормалі до передньої поверхні торцевої кромки кінцевої фрези

Аналіз отриманих результатів. Після підстановки отриманих даних в базу методу розрахунку було знайдено відносні залежності між складовими вектора швидкості в даній точці на робочих поверхнях кінцевого інструменту. Так під час розрахунку були прийняті такі значення відповідних кутів, що відповідають за геометрію кінцевої фрези:

- передній кут гвинтової кромки в нормальному перетині $\gamma_N=10^\circ$;
- кут підйому гвинтової кромки $\omega=45^\circ$;
- задній кут гвинтової кромки $\alpha=0^\circ$;
- передній кут торцевої кромки в нормальному перетині $\gamma_{IN}=10^\circ$;
- задній кут торцевої кромки в нормальному перетині $\alpha_{IN}=10^\circ$;
- кут нахилу торцевої кромки $\phi_1=2^\circ$.

Розрахунок проводився для умов обробки, при яких кут повороту оправки відносно власної осі $q=0^\circ$, а кут нахилу оброблюваної фрези приймався рівним $p=-60; -50; -40; -30; -20; -10; 0; 10; 20; 30; 40; 50; 60^\circ$. Варіювалися значення швидкостей обертання під час головного ($\omega_B=10-400 \text{ об}^{-1}$) та другорядного ($\omega_o=400-10 \text{ об}^{-1}$) рухів фрези у системі «кільцева ванна».

На Рис. 5, 7 представлені діаграми зміни складових вектора швидкості залежно від кута установки фрези p відносно осі КВ (від -60° до 0° : *стікання*; від 0° до 60° : *натікання*) для різних значень кутових швидкостей обертання. Розглядаючи характер зміни кутових швидкостей обертання точок на відповідних поверхнях інструмента при MAO кінцевих фрез, встановлено, що зростання відповідних складових вектора швидкості в найбільшій мірі залежить від ω_B . Чим більша швидкість обертання навколо осі КВ, тим більше значення складових вектора швидкості; як і у випадку із MAO БНТП ω_o не має помітного впливу на інтенсивність процесу обробки і відповідає переважно за перемішування порошку в зоні контакту. Складна геометрія кінцевих фрез, і як наслідок складна траєкторія руху робочих поверхонь у просторі під час обробки, є причиною того, що характер зміни складових швидкостей різний на різних поверхнях інструмента.

Характер зміни складових швидкості на передній поверхні бокової кромки (Рис. 5) має відносно прямолінійний характер, де v_n спадає, а v_t відповідно зростає при зміні кута нахилу фрези відносно осі КВ від $p=-60^\circ$ (стікання) до $p=60^\circ$ (натікання) та коливається в середньому в межах від $0,1$ до $0,9 \text{ м/с}$. Розподіл значень швидкостей v_n та v_t на задній поверхні має дзеркальний характер, що свідчить про незалежність їх значень від режиму обробки.

Так розрахувавши значення відношення $|v_n|/|v_t|$ [7, 8], що характеризує ефективність MAO (Рис. 6), було встановлено, що загалом, найбільшому впливу під час MAO кінцевих фрез у «кільцевій ванні» піддається саме передня поверхня бокової кромки. Обробку, згідно розрахунків, слід проводити в режимі натікання, при чому за умов обробки в режимі стікання, кут установки p не має перевищувати 40° , виходячи із умови, що ефективна MAO досягається при $|v_n|/|v_t| \leq 2-2,5$ та швидкості головного руху більше 2 м/с [9]. Задня поверхня бокової кромки кінцевих фрез під час обробки піддається найбільшому впливу. Підходить як обробка при натіканні, так і при стіканні ($|v_n|/|v_t| \approx 1$).

При аналізі результатів розрахунків величини складових вектора швидкості для точок на передній поверхні та задній поверхні торцевої РК (Рис. 7) встановлено, що характер зміни величини значень v_n та v_t співпадає із результатами на боковій кромці, але їх величини коливаються в менших межах, а саме від $0,4$ до $0,8 \text{ м/с}$. Характер зміни значень нормальної та тангенціальної швидкості на задній поверхні змінюється при куті нахилу фрези рівному $p=10^\circ$. Так на передній поверхні відбувається перехід від від'ємних значень, до позитивних, а на задній починається спадання величини значень тангенціальної швидкості. Це пояснюється виходом задньої поверхні із так званої *тіньової зони* [7], коли починається процес її полірування.

З аналізу значень $|v_n|/|v_t|$, можна зробити висновок, що під час MAO робочі поверхні допоміжної (торцевої) кромки кінцевих фрез оброблюються теж достатньо інтенсивно (Рис. 8). Так для передньої поверхні середні значення відношення нормальної швидкості руху точок на поверхні до тангенціальної лежать в межах

$|v_n|/|v_\tau| \approx 1$, а для задньої поверхні – $|v_n|/|v_\tau| \approx 0,5$ (враховуючи, що ця поверхня буде оброблюватись тільки в режимі натікання із кутом установки $p \geq 10^\circ$).

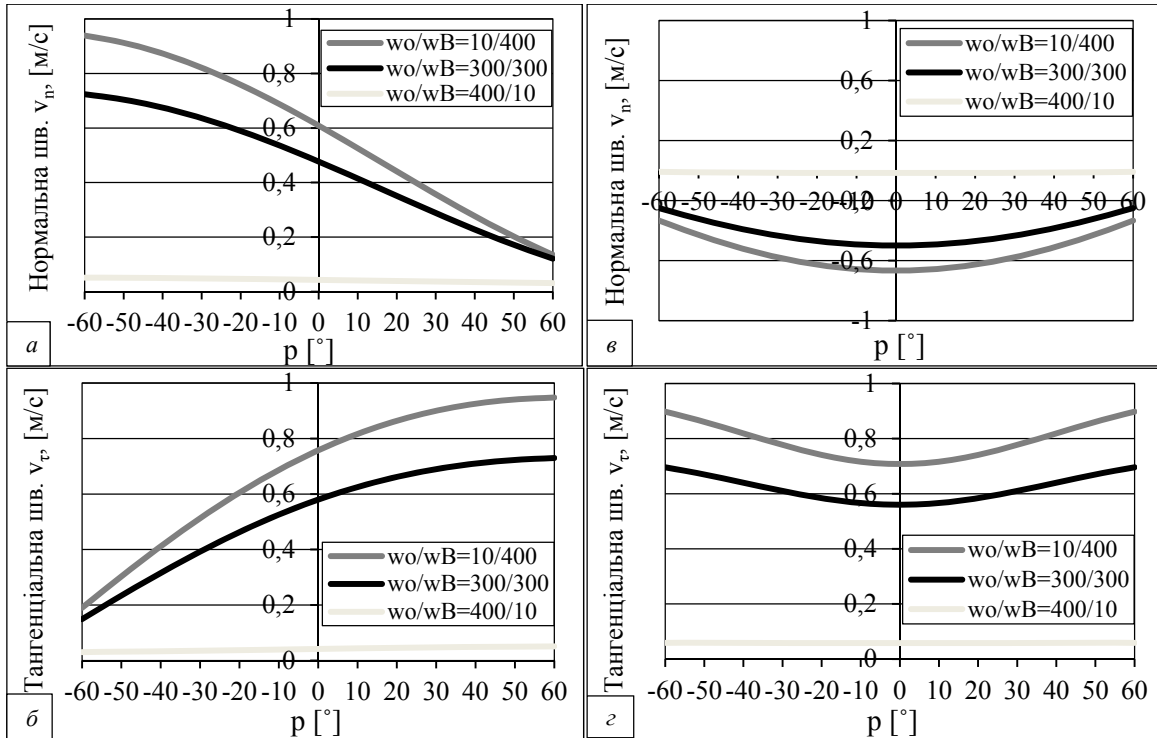


Рис. 5. Значення нормальних та тангенціальних швидкостей на передній (а, б) та задній (в, з) поверхнях бокової кромки кінцевої фрези при різних значеннях співвідношення кутових швидкостей її обертання під час MAO у «кільцевій ванні» при p від $0-60^\circ$ при натіканні та стіканні та $q=0^\circ$

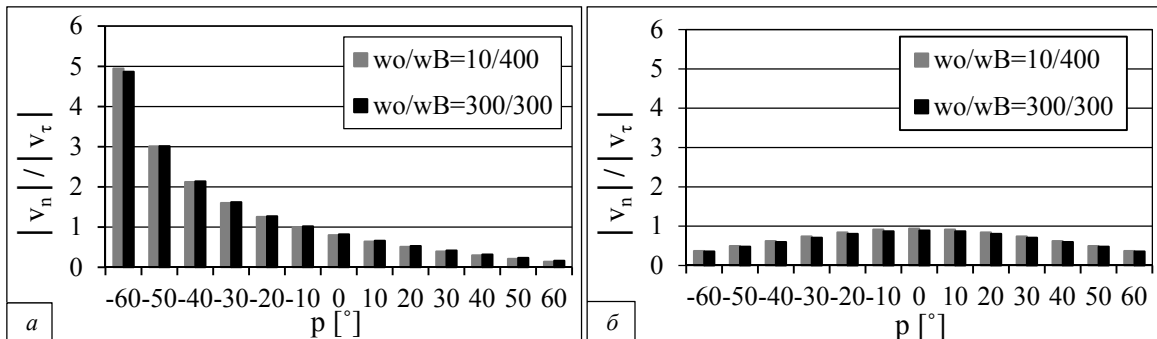


Рис. 6. Значення співвідношення нормальних до тангенціальних швидкостей для передньої (а) та задньої (б) поверхні бокової кромки кінцевої фрези при різних значеннях співвідношення кутових швидкостей її обертання під час MAO у «кільцевій ванні» при $p = 0-60^\circ$ при натіканні та стіканні та $q=0^\circ$

Висновки. Базова схема розрахунку величини складових швидкості руху точок на поверхні БНТП під час MAO у KB була доповнена і адаптована для розрахунку відповідних величин для умов MAO кінцевих фрез. Були наведені результати таких розрахунків та проведений їх аналіз. Було помічено, що під час обробки кінцевих фрез методом MAO за схемою «кільцева ванна»:

1. найбільший вплив на інтенсивність обробки кінцевих фрез має кутова швидкість інструмента навколо вісі KB – ω_B , в той час, як ω_o відповідає переважно за перемішування порошку в зоні контакту;
2. характер впливу MAI на робочі поверхні під час MAO відрізняється і залежить від того, яка саме поверхня розглядається: так обробка в режимі стікання не ефективна при полірування задньої поверхні торцевої кромки, та при куті $p > 40^\circ$ призводить до зниження ефективності полірування передньої поверхні бокової кромки;
3. максимальні тангенціальні швидкості досягаються на гвинтовій канавці фрези в умовах MAO в режимі натікання при куті нахилу фрези відносно осі ванни $p=30-60^\circ$, при цьому ближче до бокової кромки $|v_n|/|v_\tau| \approx 0,5$, в зоні ближче до торцевої кромки $|v_n|/|v_\tau| \approx 0,9$;
4. загальна ефективність обробки задньої поверхні робочих кромки кінцевих фрез є досить високою: задня поверхня бокової кромки полірується найінтенсивніше ($|v_n|/|v_\tau| \approx 0,5$) при обробці в обох напрямках та

при будь-якому значенні кута установки p , а торцевої кромки лише в режимі натікання, якщо кут $p=10^\circ$ ($|v_n|/|v_\tau| < 0,5$).

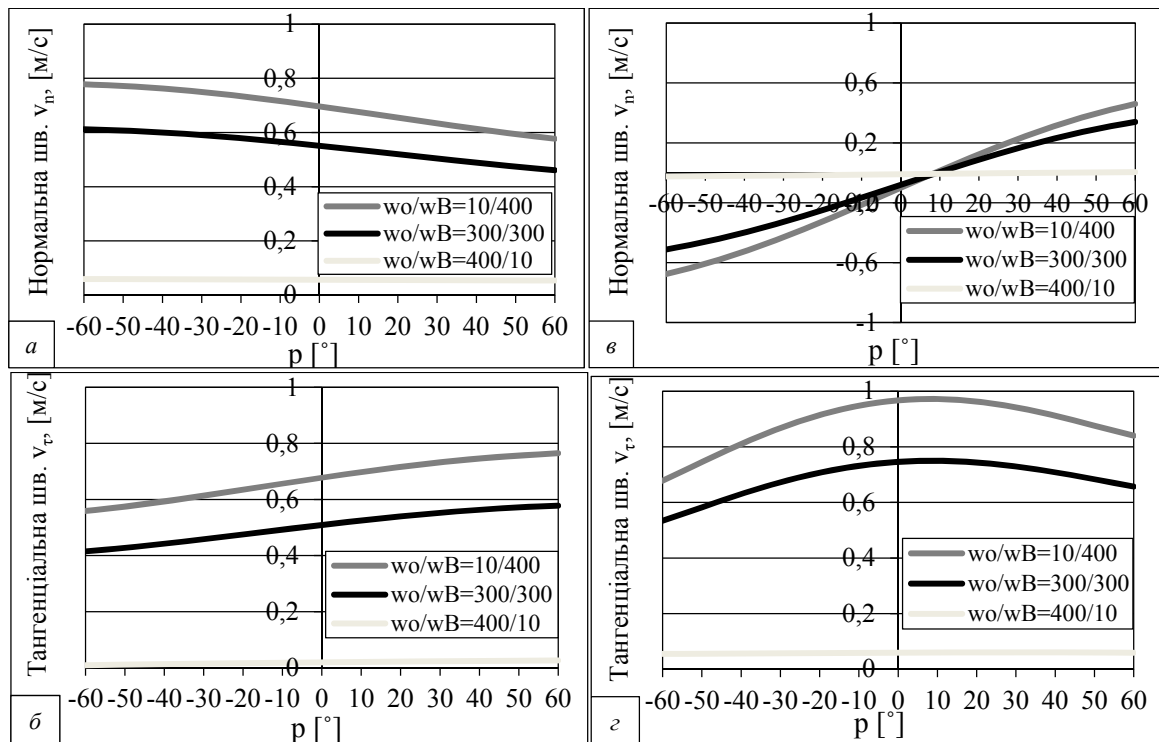


Рис. 7. Значення нормальних та тангенціальних швидкостей на передній (а, б) та задній (в, г) поверхнях торцевої кромки кінцевої фрези при різних значеннях співвідношення кутових швидкостей її обертання під час MAO у «кільцевій ванні» при $p=0-60^\circ$ при натіканні та стіканні та $q=0^\circ$

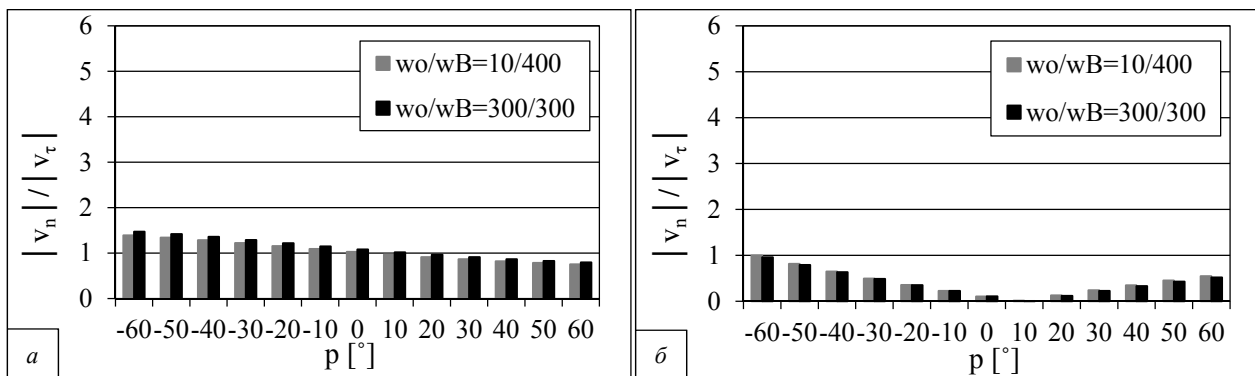


Рис. 8. Значення співвідношення нормальних до тангенціальних швидкостей для передньої (а) та задньої (б) поверхні торцевої кромки кінцевої фрези при різних значеннях співвідношення кутових швидкостей її обертання під час MAO у «кільцевій ванні» при $p=0-60^\circ$ при натіканні та стіканні та $q=0^\circ$

Аннотація. В роботі представлені дані по расчёту составляющих скорости движения точек на рабочих поверхностях концевых фрез при их магнитно-абразивной обработке по схеме «кольцевая ванна». Для винтовой канавки наиболее подходящей является обработка в режиме натекания при угле наклона фрезы относительно оси «кольцевой ванны» равному $p=30-60^\circ$. Задняя поверхность боковой кромки поддается эффективному полированию при движении фрезы в обоих направлениях во время обработки, независимо от угла установки фрезы в оправке. Задняя поверхность торцевой кромки эффективно обрабатывается только в режиме натекания при угле $p > 10^\circ$.

Ключевые слова: Магнитно-абразивное обрабатывание, конечные фрезы, интенсивность обрабатывания, скорости обрабатывания.

Abstract. The following paper shows the results of mathematical calculations of speed components of points on the tool surfaces of endmills, during their magneto-abrasive machining in the ring-type working area. The rotation speed of an endmill around the axis of ring bath influences the intensity of the preparation dramatically. At the same time axial rotation of a tool serves for the immixture

of the polishing powder in the contact zone. The most suitable preparation conditions for the chip flute are reached during the magneto-abrasive machining in the drilling direction with the tilt angle from about $p=30-60^\circ$. Clearance surface of periphery cutting edges of the endmill is being efficiently polished during its machining in both directions and independent from the degree of a tilt angle. Clearance surface of the end cutting edge can be effectively polished only during the tool movement in the drilling direction, tilt angle should be chosen as $p>10^\circ$.

Keywords: Magnetically-abrasive treatment, eventual milling cutters, intensity of treatment, speed of treatment.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Барон Ю.М. Технология магнитно-абразивной обработки / Ю.М. Барон – Л.:Машиностроение, 1975. – 128 с.
2. Сакулевич Ф.Ю. Магнитно-абразивная обработка заготовок / Ф.Ю. Сакулевич – Минск, 1978
3. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка многогранных неперетачиваемых твердосплавных пластин в условиях больших рабочих зазоров. 1. Влияние условий базирования режущих пластин в рабочих зонах на эффективность процесса обработки / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулий, Б.М. Фесюн и др. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Вип.6(154). – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С.157-165
4. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка многогранных твердосплавных пластин / В.С. Майборода, В.Я. Лебедев, А.Н. Климов // Машиностроение: Респ. межвед. сб. науч. тр. / под. ред. Б.М. Хрусталева. – Минск, 2009. Вып. 25. – С. 85-89
5. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка многогранных неперетачиваемых твердосплавных пластин в условиях больших рабочих зазоров. 2. Формирование заданной шероховатости рабочих поверхностей режущих неперетачиваемых твердосплавных пластин. / В.С. Майборода, В.Н. Гейчук, Е.С. Клишты // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Вип.7(155). – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – С.142-151
6. Майборода В.С. Кінематика процесу магнітно-абразивної обробки твердосплавних багатограних непереточуваних пластин в умовах кільцевої робочої зони / В.С. Майборода, Т.М.Капушак // Вісник ЖДТУ – 2004.-№4(31). Т.1. – С.57-65
7. Ульяненко Н.В. Підвищення працездатності твердосплавного інструменту шляхом застосування магнітно-абразивного оброблення та нанесення зносостійких покриттів. Дис.канд. техн. наук. – Київ, 2006. – 160с
8. Майборода В.С. Аналіз умов магнітно-абразивного оброблення багатограних непереточуваних твердосплавних пластин при їх довільному розташуванні в робочих зонах установки типу кільцева ванна / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського. 2008.-№1(48), частина 2. – С. 22-28
9. Майборода В.С. Вплив умов магнітно-абразивного оброблення в великих робочих зазорах кільцевого типу на якість багатограних непереточуваних твердосплавних пластин / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб.наук.праць. – Краматорськ, вип.28, 2011. – С.48-55

References

1. Baron Yu.M. Technologia magnitno-abrazivnoi obrabotki. Yu.M. Baron- Leningrad: Mashinostroenie, 1975. 128 p.
2. Sakulevitch F.Yu. Magnitno-abrazivnaya obrabotka zagotovok. F.Yu.Sakulevitch. Minsk, 1978
3. Maiboroda V.S. Magnitno-abrazivnaya obrabotka mnogogrannykh neperetachevaemykh tverdosplavnykh plastin v usloviakh bolshykh rabochih zazorov. 1. Vlianie usloviy bazirovaniya rezhushih plastin v rabochih zonah na effektivnost protsessu obrabotki. V.S.Maiboroda, D.Yu.Dzhulii, B.M.Fesiun I dr. Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo technichnogo universytetu. Seria: Mashynobuduvannia I mashynoznavstvo. Vyp.6 (154). Donetsk: DonNTU, 2009. P.157-165
4. Maiboroda V.S. MAgnitno-abrazivnaya obrabotka tverdosplavnykh plastin. V.S. Maiboroda, V.Ya. Lebedev, O.M. Klymov. Mashynostroenie: Pesp.mezhved. sb.nauch.tr. pod red. B.M. Khrustaliyova. Minsk, 2009. Vyp 25. P. 85-89
5. Maiboroda V.S. Magnitno-abrazivnaya obrabotka mnogogrannykh neperetachevaemykh tverdosplavnykh plastin v usloviakh bolshykh rabochih zazorov. 2. Formirovanie zadannoi sherohovatosti rabochih poverhnostei rezhushih neperetachevaemykh tverdosplavnykh plastin. V.S.Maiboroda., V.N.Geitshuk, E.S.Klyshyta. Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo technichnogo universytetu. Seria: Mashynobuduvannia I mashynoznavstvo. Vyp.7 (155). Donetsk: DonNTU, 2010. P.142-151
6. Maiboroda V.S. Kinemayka protsessu magnitno-abrazivnoi obrabotky tverdosplavnykh bagatogrannykh neperetochuvanykh plastyn v umovah koltsevoi robochoi zony. V.S.Maiboroda, T.M.Kapushchak. Visnyk ZhDTU, 2004. No4 (31). T.1. P.57-65
7. Ulyanenko N.V. Pidvyshennia pratsezdatsnosti tverdosplavnogo instrumentu shliahom zastosuvannia magnitno-abrazivnogo obroblennia ta nanesennia znosostiykykh pokryttiv. Dys. kand. tech. nauk. Kyiv, 006. 160p.
8. Maiboroda V.S. Analiz umov magnitno abrazivnogo obroblennia bagatogrannykh neperetochuvanykh tverdosplavnykh plastyn pry ih dovilnomu roztashuvanni v robochih zonah ustanovky typu kiltseva vanna. V.S.Maiboroda, D.Yu. Dzhulii. Visnyk Kremenchutskogo derzhavnogo politechnichnogo universytetu im. M.Ostrogradskogo. 2008. No1 (48), chastyna 2. P. 22-28
9. Maiboroda V.S. Vplyv umov magnitno-abrazivnogo obroblennia v velykykh robochih zazorah kiltsevoogo typu na yakist bagatogrannykh neperetochuvanykh tverdosplavnykh plastyn. V.S.Maiboroda, D.Yu.Dzhulii. Nadiynist instrument ta optymizatsiya technologichnykh system. Zb.nauk.prats. Kramatorsk, vyp.28, 2011. P.48-55.