

МАГНІТНО-АБРАЗИВНА ОБРОБКА ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС В КІЛЬЦЕВІЙ ВАННІ

MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING OF THE TEETH OF GEARS IN THE RING BATH

Проведено аналіз типів пошкоджень, яким піддаються зуби зубчастих передач, та рекомендації щодо їх запобігання. Встановлено, що одним із шляхів реалізації рекомендацій є технологічне забезпечення певних характеристик робочих поверхонь зубів. Одним із методів фінішної обробки, що забезпечують потрібні характеристики є магнітно-абразивна обробка в кільцевій ванні. Розроблено схему обробки зубчастих коліс "над кільцевою ванною" та обладнання для його реалізації, зокрема конструкції магнітних систем зі збільшеною шириною робочої зони. Виконано аналіз кінематики процесу обробки. Визначено кінематичні параметри процесу, конструктивні параметри оброблюваних зубчастих коліс та кільцевої ванни, що найбільше впливають на якість обробки, та розроблено рекомендації з їх вибору.

Ключові слова: зубчасті передачі, магнітно-абразивна обробка, конструктивні параметри зміцнення робочих поверхонь зубів

Постановка проблеми і аналіз попередніх досліджень

За умовами експлуатації зубчасті силові передачі умовно діляться на три основні класи [1]:

- передачі, що навантажені середніми за величиною крутними моментами, які експлуатуються при безударних режимах роботи та з незначними динамічними навантаженнями. Ці передачі виготовляють із сталей низької твердості (НВ 207 МПа), Основним видом їх експлуатаційного пошкодження є зношування бокової поверхні зубів;

- передачі, що навантажені значними за величиною крутними моментами, які експлуатуються при ударних режимах роботи та значними динамічними навантаженнями. Зубчасті колеса цих передач виготовляють із сталей середньої твердості (297 МПа < НВ < 220 МПа). Основними видами їх експлуатаційних пошкоджень є зношування бокової поверхні зубів та її викришування;

- передачі, що навантажені значними за величиною крутними моментами, експлуатуються при ударних і реверсивних режимах роботи. Колеса цих передач виготовляють із легованих сталей високої твердості (НВ > 220 МПа). Основними їх пошкодженнями є зношування робочої поверхні зубів в умовах абразивного тертя, викришування матеріалу бокової поверхні зубів та злами зубів внаслідок втомлюваності.

ГОСТ 31381-2009 [2] для попередження виникнення та розвитку різних типів пошкоджень рекомендує: підвищення чистоти обробки робочих поверхонь зубів; формування мікрорельєфу для попередження видавлювання мастила; підвищення поверхневої твердості; формування залишкових напружень стискання;

зменшення контактних напружень; забезпечення наявності фасок або округлень, особливо на торцях та вершинах зубів; зниження концентрації напружень в галтелі зуба.

Зазначені рекомендації реалізуються в основному забезпеченням геометричної точності відносно розташування поверхонь, заданих механічних властивостей матеріалу зубів та технологічним забезпеченням певних характеристик робочих поверхонь зубів. Наприклад, підвищення згинальної витривалості і довговічності зубчастих передач за рахунок поверхневого зміцнення перехідної поверхні ніжки зуба дозволяє підвищити навантажувальну здатність зубчастих передач приблизно в 4–5 разів [3], тоді як за рахунок поліпшення геометрії і якості збірки її можна збільшити тільки в 1,5–2 рази.

Тому актуальними є дослідження, направлені на розробку нових і вдосконалення відомих методів фінішної обробки робочих поверхонь зубів.

Одним із таких способів, що забезпечують потрібну шорсткість $Ra=0,008-0,05$ мкм [4, 5], мікротвердість та формування залишкових напружень стиснення [4, 6] без підповерхневих максимумів, які отримують в результаті застосування ударного зміцнення дробом та кульками [7], збільшення площі контактних поверхонь [8, 9], округлення кромки зубів з заданим радіусом [10, 11], зносостійкість [8] та втомну міцність [12] є магнітно-абразивна обробка (МАО). Зокрема своїми перевагами вирізняється обробка в магнітній системі типу “кільцева ванна” в умовах великих робочих зазорів.

Розроблено математичну модель і за її допомогою досліджено кінематику МАО циліндричних зу-

бастих коліс [15], зовнішній діаметр зубів яких не перевищує 35 мм. Зазначене обмеження на максимальний діаметр обумовлене обмеженням на ширину робочої зони магнітної системи (величину повітряного зазору) з точки зору допустимих енерговитрат на підтримання заданої величини магнітної індукції при заданому матеріалі магнітопроводу, використуваних магнітно-абразивних порошоків (МАП), і т. ін.

Отже метою даної роботи є розробка схеми MAO циліндричних зубчастих коліс з зовнішнім діаметром зубів $d_a \leq 200$ мм в кільцевій ванні з торцевим завтаженням, розробка обладнання для її реалізації, дослідження особливостей кінематики процесу обробки за допомогою раніше розробленої математичної моделі [13, 14].

Результати виконаних досліджень

Вихідним положенням колеса (при описі евольвенти) є його положення з вертикальним розташуванням осі Z_1 (рисунок 1). Початок O_1 системи координат $X_1Y_1Z_1$ розташований на перетині осі колеса і площини симетрії, яка паралельна його торцям. Вісь Z_1 направлено доверху, а вісь Y_1 направлено до осі “кільцевої ванни”. При цьому площина $X_1O_1Y_1$ співпадає з серединною площиною робочої зони магнітної системи, яка паралельна торцям полюсних наконечників і знаходиться на відстані $H_{ПН}/2$ від них. Система координат $X_1Y_1Z_1$ використовується для опису геометрії колеса. Для визначення положення поверхонь колеса в його обертальному русі навколо власної осі з кутовою швидкістю ω_S (рух основної кругової подачі) використовується система координат $X_2Y_2Z_2$, яку обернено відносно системи координат $X_1Y_1Z_1$ на кут φ навколо осі Z_1 . Для визначення координат точок поверхонь колеса після його установки у робоче положення під кутом ξ відносно вертикалі, використовується система координат $X_3Y_3Z_3$, яку обернено відносно системи координат $X_2Y_2Z_2$ на кут ξ навколо осі Y_2 . Для визначення положення поверхонь колеса в його обертальному русі навколо вертикальної осі, що ділить навпіл лінію зуба в її найнижчому положенні, і паралельна осі кільцевої ванни, з кутовою швидкістю ω_a використовуються системи координат $X_4Y_4Z_4$ та $X_5Y_5Z_5$. Систему координат $X_4Y_4Z_4$ зміщено відносно системи $X_3Y_3Z_3$ на величину $T_X = r_a \cos(\xi)$. Систему координат $X_5Y_5Z_5$ обернено відносно осі Z_4 системи координат $X_4Y_4Z_4$ на кут α .

Система координат $X_6Y_6Z_6$, яка описує робоче положення колеса у кільцевій ванні, співпадає з системою координат $X_1Y_1Z_1$. Зміщення T_Y та T_Z колеса у системі координат $X_6Y_6Z_6$ визначаються залежностями

$$T_Y = D_{cp} / 2; \tag{1}$$

$$T_Z = H_{ПН} / 2 + |r_f \cdot \sin(\xi)|$$

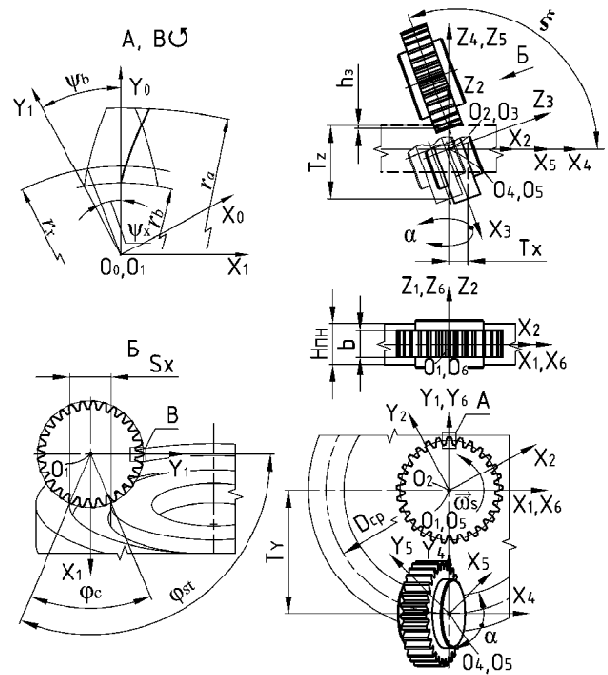


Рисунок 1 — Схема кінематики MAO зубчастих циліндричних коліс в кільцевій ванні

Величину T_Z обрано таким чином, щоб глибина занурення колеса у кільцеву ванну в перерізі колеса площиною, рівновіддаленою від торців вінця (серединний переріз), дорівнював висоті зуба (рисунок 1). У цьому випадку оброблятиметься сегмент, хорда якого у серединному перерізі дорівнює

$$S_X = 2\sqrt{r_a^2 - (r_a - h_3)^2},$$

де h_3 — величина занурення, яка дорівнює висоті зуба.

Центральний кут оброблюваного сегменту визначається виразом $\varphi_c = 2 \cdot \arcsin[S_X / (2r_f)]$. Тоді кут, при якому зуб входить у робочу зону дорівнює (рисунок 1)

$$\varphi_{st} = \frac{3}{2}\pi - \varphi_c, \text{ або } \varphi_{st} = -\frac{\pi}{2} - \varphi_c.$$

На протигвагу способу обробки у кільцевій ванні (коли заготовку повністю розташовано у робочій зоні), розроблюваний спосіб обробки назвемо умовно “обробка над кільцевою ванною”.

При моделюванні кінематики MAO колеса здійснюють такі рухи:

- обертання колеса навколо власної осі зі швидкістю ω_S (рух основної кругової подачі);
- нахил у площині, дотичній до серединного циліндру кільцевої ванни, під кутом ξ до проекції осі кільцевої ванни на цю площину (установчий рух);
- переміщення вздовж осі X на величину T_X у площині, дотичній до серединного циліндру кільцевої ванни (установчий рух);

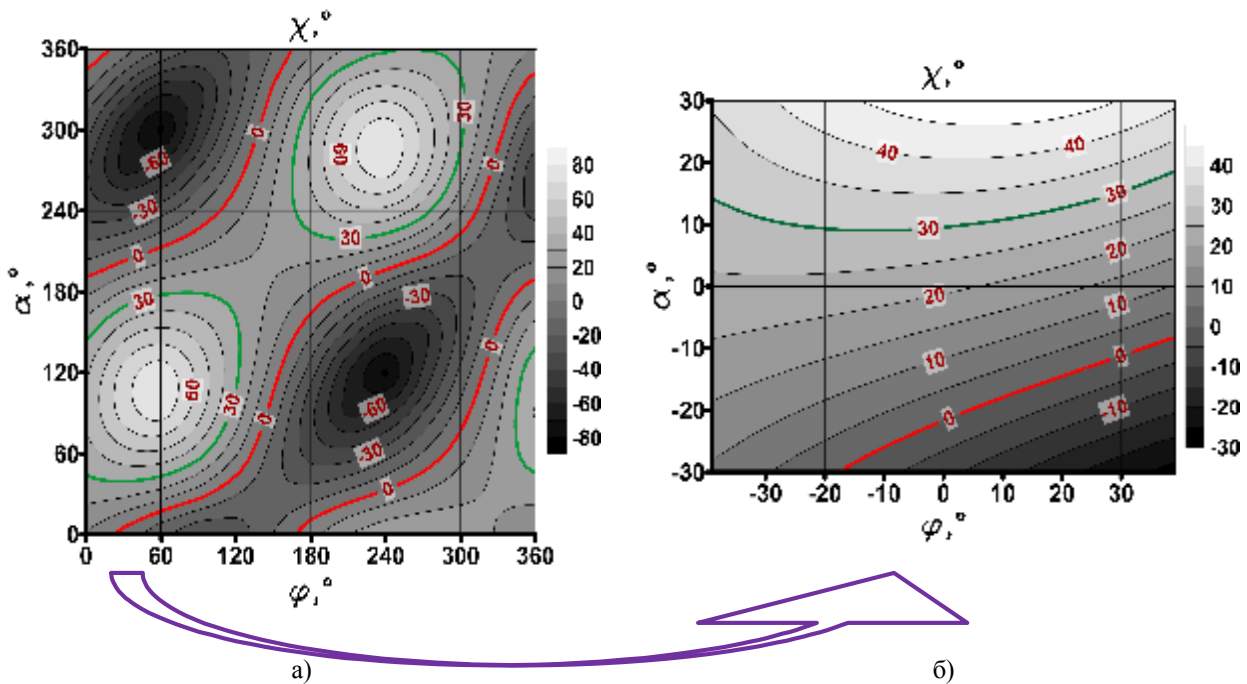


Рисунок 2 — Залежність кута атаки на лівій стороні зуба від кутових положень у рухах основної та додаткової кругових подач: $m=5$ мм, $z=29$; $\beta=0$; $D_{cp}=400$ мм; $V_s/V_{p0} \approx 0$; $\xi=70^\circ$; $Z=z/m=0$

а) обробка в кільцевій ванні $\chi=0^\circ \rightarrow \varphi_{st}=-39^\circ$; б) обробка над кільцевою ванною

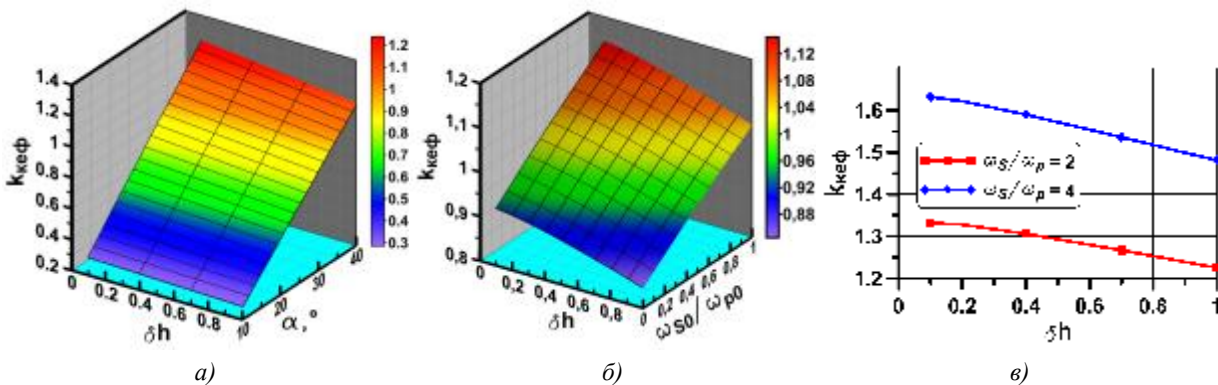


Рисунок 3 — Розподіл значень інтегрального критерію інтенсивності МАО по висоті зуба ($m=5$ мм; $z=29$; $\beta=0^\circ$; $D_{cp}=1000$ мм; $\xi=90^\circ$; $\delta Z=0$):

а) $\omega_s/\omega_p \ll 1$; б) $\omega_s/\omega_p=0 \div 1.0$, $\alpha_{дон}=\pm 30^\circ$; в) $\omega_s/\omega_p=2, 4$, $\alpha_{доп}=\pm 30^\circ$

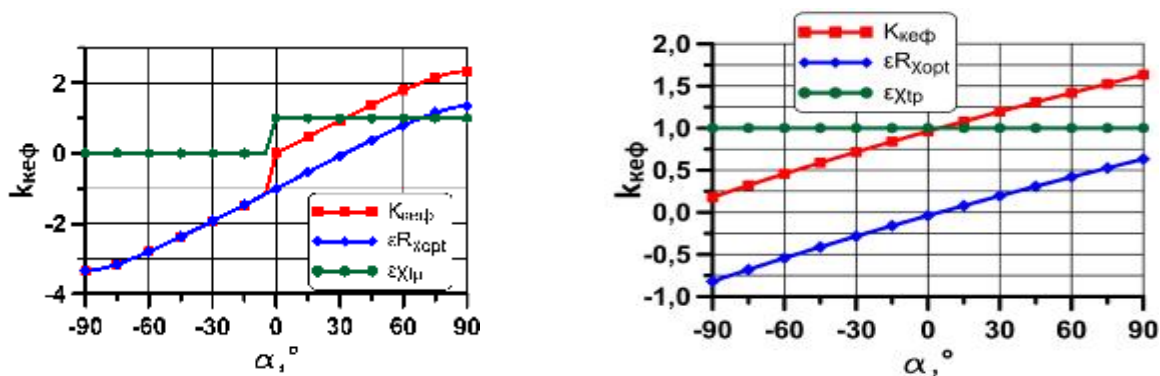


Рисунок 4 — Залежності інтегрального критерію інтенсивності МАО k_{khef} на лівій стороні зуба від кута розвороту α_1 ($m=5$ мм; $z=29$; $\beta=0^\circ$; $D_{cp}=1000$ мм; $\xi=90^\circ$; $\delta Z=0$; $\delta h=0.1$):

а) $\omega_s/\omega_p=0.0$; б) $\omega_s/\omega_p=4$

- розворот на кут $\pm\alpha$ навколо проекції осі кільцевої ванни на площину, дотичну до її серединного циліндра, в якій знаходиться вісь колеса (установчий рух);

- переміщення вздовж осі кільцевої ванни на величину $T_z(1)$ для занурення колеса в МАП на потрібну величину (рух врізання);

- обертання навколо осі кільцевої ванни зі швидкістю ω_p (головний рух).

У порівнянні з обробкою зубчастих коліс у кільцевій ванні, обробка над кільцевою ванною потребує додаткових досліджень кінематики з таких причин:

- обмеженість простору параметрів $\{\varphi, \alpha\}$ у рухах основної та додаткової кругових подач (рисунок 2);

- необхідність визначення вхідних кінематичних параметрів (кут нахилу ξ , кут розвороту α , співвідношення номінальних швидкостей головного руху та кругової подачі V_{S0}/V_{P0}), при яких вихідні кінематичні параметри (кути атаки, критерій інтенсивності MAO) матимуть оптимальні або близькі до них значення;

- визначення розмірів робочої зони за відомими параметрами зубчастих коліс та кутами нахилу ξ та розвороту α і навпаки.

Упродовж аналізу кінематики визначались кути атаки, сумарна швидкість різання, її нормальна і тангенційна складові і їх співвідношення, та інтегральний критерій інтенсивності MAO [14]. Попередніми дослідженнями [15] встановлено, що застосування додаткової кругової подачі є недоцільним. Доцільним є застосування фіксованих кутів розвороту, які визначаються за залежностями інтегрального критерію інтенсивності MAO від кута розвороту $\pm\alpha$.

У діапазоні величин модулів (0–5 мм) та величин швидкості основної кругової подачі $V_{S0} = (0.0 \div 1.0)V_{P0}$, розподіл кінематичних параметрів по висоті зуба є досить рівномірним (рисунок 3): при зміні кута розвороту у межах $\alpha = 10\text{--}40^\circ$ розкид критерію по висоті зуба змінюється у межах 8,7 – 9,4% (рисунок 3, а). При зміні швидкості основної кругової подачі у межах $\omega_s/\omega_p = 0\text{--}1$ ($V_S/V_P \approx 0 \div 0.15$ при $D_{cp} = 1000$ мм) розкид критерію по висоті зуба змінюється у межах 9,2–8,34% (рисунок 3, б), тобто при збільшенні величини кругової подачі розкид зменшується. Збільшення швидкості основної кругової подачі з $\omega_s/\omega_p = 2$ до $\omega_s/\omega_p = 4$ ($V_S/V_P \approx 0.3 \div 0.6$) (рисунок 3, в) призводить до збільшення розкиду критерію з 8,34% до 9,68%. При цьому кут розвороту, при якому значення інтегрального критерію дорівнює оптимальному значенню ($k_{кеф} = 1$), зменшується з $\alpha_{k_{кеф}=1} \approx 30^\circ$ до $\alpha_{k_{кеф}=1} \approx 4^\circ$ (рисунок 4).

Але при цьому відхилення сумарної швидкості різання V_Σ від 1 (умовної відносної номінальної величини швидкості) складає відповідно 35% при $\omega_s/\omega_p = 2$ і 54% при $\omega_s/\omega_p = 4$. Тому користуватись значенням швидкості основної кругової подачі як регулятором

значення критерію потрібно обережно, контролюючи значення сумарної швидкості різання.

Таким чином, розкид значень інтегрального критерію вздовж лінії зуба в діапазоні швидкостей кругової подачі $\omega_s/\omega_p = 0\text{--}4$ ($V_S/V_P \approx 0,3\text{--}0,6$) складає не більше 10% (рисунок 5). Тому, зважаючи на невеликий розкид значень критерію інтенсивності (<10%) по висоті зуба та вздовж лінії зуба далі будуть наведені значення вихідних кінематичних параметрів (інтегрального критерію інтенсивності MAO, сумарних швидкостей різання та кутів атаки) в середній точці евольвенти (відносна величина $h_y = r - r_{\min}$, де поточна координата по висоті зуба

$$r_{\min} = \begin{cases} r_f + \rho_0, & \text{якщо } r_f + \rho_0 \geq r_b; \\ r_b, & \text{якщо } r_f + \rho_0 < r_b. \end{cases}$$

та посередині лінії зуба.

Як було встановлено [14, 15] зміна кутів розвороту дозволяє у широких межах змінювати значення інтегрального критерію інтенсивності (рисунок 4).

При обробці зубчастих коліс над кільцевою зоною, як і при обробці деталей типу дискових фрез, важливим параметром є визначення ширини робочої зони H при заданих розмірах зубчастих коліс, діаметрі серединного циліндра кільцевої ванни D_{cp} та куті розвороту $\pm\alpha$. Ширина кільцевої ванни при заданих розмірах зубчастого колеса, куті розвороту $\pm\alpha$, куті нахилу ξ , визначається за крайніми положеннями точок перерізу верхньою торцевою площиною полюсних наконечників торцевих кругових кромки зовнішнього циліндра зубчастого колеса: нижнього при $\xi < 90^\circ$, верхнього при $\xi > 90^\circ$ та обох торцевих перерізів при $\xi = 90^\circ$. Наприклад, для колеса з розмірами $m = 5$ мм, $z = 30$, $B = 40$ мм; при максимальному куті розвороту $\pm\alpha = \pm 30^\circ$, куті нахилу $\xi = 110^\circ$ необхідна ширина робочої зони складає $H = 102$ мм. При цьому необхідна ширина робочої зони не залежить від діаметра серединного циліндра кільцевої ванни та від кута розвороту α , крім діапазону $|\alpha| \leq 20^\circ$ при кутах нахилу близьких до 90° (рисунок 6). Зазначений діапазон зменшується при збільшенні відхилення кута нахилу від 90° .

Встановлено [15], що при обробці прямозубих коліс у кільцевій ванні при кутах нахилу $\xi = 0\text{--}90^\circ$, за відсутності кругової подачі і прямолінійному головному русі у діапазоні модулів $m = 1\text{--}10$ мм значення інтегрального критерію є постійним і дорівнює $k_{кеф} = 0,5$. Для кільцевої ванни залежність $k_{кеф} = f(m)$ має близький до лінійного характер.

При обробці над кільцевою ванною у діапазоні модулів $m = 2,5\text{--}8$ мм залежності $k_{кеф} = f(m, D_{cp} = C_1, \alpha_{дон} \leq C_2)$ мають квадратичний характер, близький до лінійного (рисунок 7). Іншою відмінністю обробки над кільцевою ванною є те, що безкінечний радіус серединного циліндра задає залежність $k_{кеф} = f(m)$ з найменшими значеннями при $D_{cp} = \infty$.

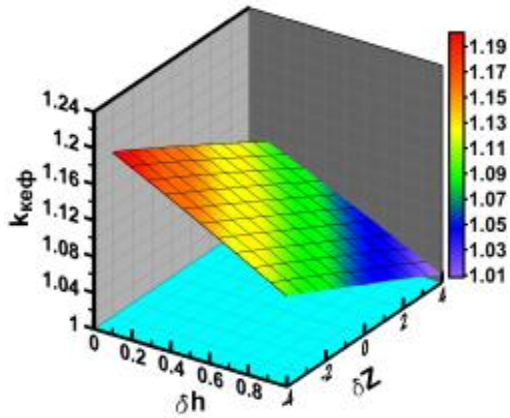


Рисунок 5 — Розподіл максимального значення інтегрального критерію інтенсивності МАО по висоті зуба (δh) та вздовж лінії зуба: ($\delta Z = -B/2m \div B/2m$); $D_{cp} = 1000$ мм; $\xi = 90^\circ$; $\omega_S/\omega_P = 1.0$;

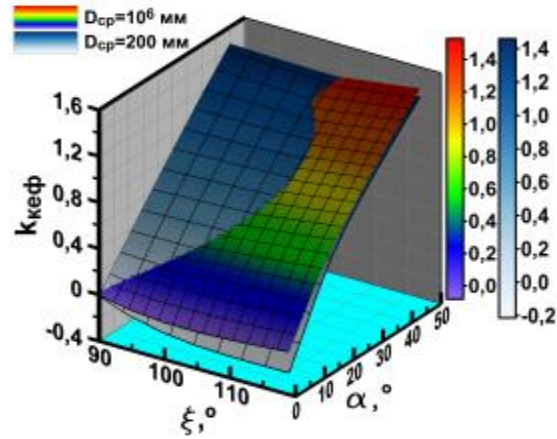


Рисунок 8 — Залежності максимального значення інтегрального критерію інтенсивності МАО $k_{кеф}$ від кута розвороту α та кута нахилу ξ ($m = 5$ мм; $z = 29$; $\beta = 0^\circ$; $B = 40$ мм; $\delta h = 0.5$; $\delta Z = 0$; $V_S/V_{P0} \approx 0$)

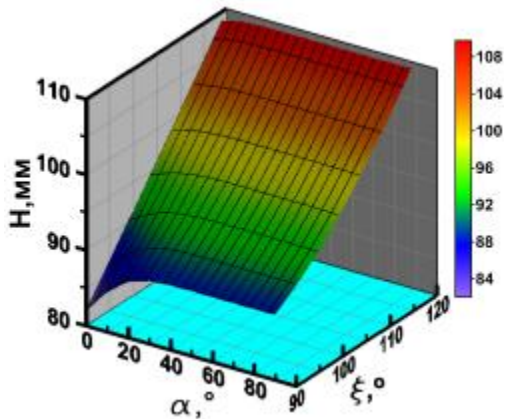


Рисунок 6 — Залежність ширини робочої зони кільцевої ванни від кута розвороту α та кута нахилу ξ ($m = 5$ мм; $z = 30$; $\beta = 0^\circ$; $D_{cp} = 1000$ мм)

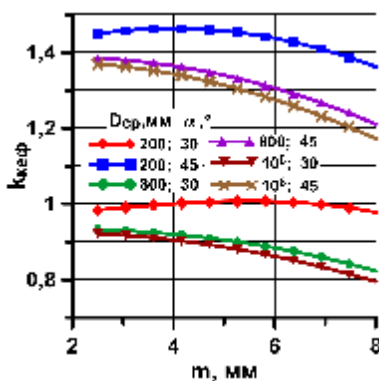


Рисунок 7 — Залежності максимального значення інтегрального критерію інтенсивності МАО $k_{кеф}$ на лівій стороні зуба від модуля та діаметра середнього циліндра: $V_S/V_{P0} \approx 0$; $\xi = 90^\circ$; $\delta Z = 0$; $\beta = 0^\circ$, $\delta h = 0.5$; $d_a = const$; $\psi_m = b/m = 8$

При зменшенні величини діаметра середнього циліндра величини інтегрального критерію зростають. Причини різниці між залежностями $k_{кеф} = f(m)$ при обробці в кільцевій ванні і над кільцевою ванною полягає у двох основних моментах:

- при обробці над кільцевою ванною обробляється тільки відносно невеликий сегмент зубчастого вінця, тобто усереднення кінематичних величин виконується в межах цього сегменту;

- стартовим значенням кута нахилу осі колеса є кут $\xi = 90^\circ$ при обробці над кільцевою ванною ($\xi = 0^\circ$ при обробці в кільцевій ванні [13, 15]). Схожий, але неоднозначний характер має залежність $k_{кеф} = f(\alpha, \xi, D_{cp} = const)$ (рисунок 8). При малих відхиленнях кута нахилу від $90^\circ \leq \xi \leq 105^\circ$ величини інтегрального критерію зростають при зменшенні діаметра середнього циліндра D_{cp} і зростанні кута розвороту α в середньому на величину $\Delta k_{кеф} = 0,034$. При $\xi > 105^\circ$ зменшення D_{cp} призводить до зменшення величини критерію в середньому на величину $\Delta k_{кеф} = -0,064$.

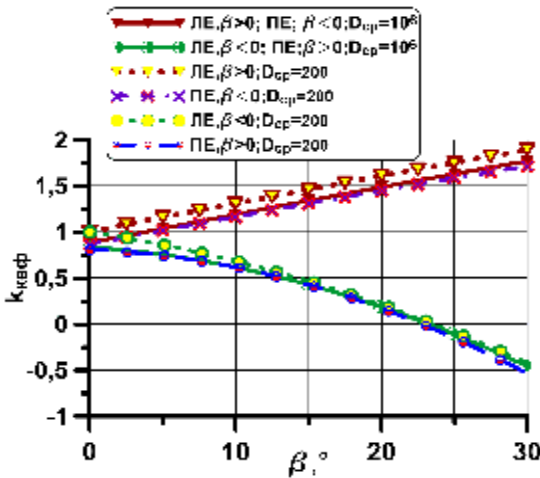
Результатом названих чинників і напряму швидкості кругової подачі також є характер залежності $\Delta k_{кеф} = f(\beta)$ інтегрального критерію від величини і знаку кута нахилу гвинтової лінії зуба (рисунок 9). Зміна діаметра середнього циліндра кільцевої ванни з $D_{cp} = 200$ мм до $D_{cp} = 10^6$ мм змінює значення інтегрального критерію у межах $\Delta k_{кеф} = 0-0,2$. Навіть у вихідному положенні колеса ($\xi = 90^\circ$, $\alpha = 0^\circ$) і відсутності основної кругової подачі розподіл кутів атаки на лівій і правій сторонах зуба несиметричний (таблиця 1). Для дрібномодульних коліс різниця значень інтегрального критерію складає кілька десятих [15], то для модулів $m \geq 2,5$ ця різниця досягає $\Delta k_{кеф} \geq 3$ (таблиця 1).

Причина полягає в тому, що в даній моделі права сторона зуба у кільцевій ванні обернена від кільцевої ванни і при малих діаметрах середнього циліндра і швидкостях основної кругової подачі вектор сумарної

швидкості розташований таким чином, що в межах оброблюваного сегменту права сторона знаходиться у “тіньовій зоні” (рисунок 11, а). Зміна напрямку основної кругової подачі та зростання її величини і призводить до зростання значення інтегрального критерію (рисунки 3, б, в; рисунок 10, б; таблиця 1). При цьому для лівої сторони зуба найкращі результати можна отримати при від’ємному зміщенні $T_x = -T_{x0}$ (таблиця 1; рисунок 10, а), водночас як для правої сторони при $T_x = +T_{x0}$ (таблиця 1; рисунок 10, б). Потрібно зауважити, що при цьому оброблюваний сектор ділиться осьюовою площиною приблизно навпіл (рисунок 11, а). Необхідна ширина кільцевої ванни при зміщенні колеса в межах $T_x = \pm T_{x0}$ залишається незмінною.

Отже, для забезпечення якісної рівномірної обробки обох сторін зуба, яка контролюється значенням інтегрального критерію інтенсивності та рівномірністю його розподілу, можуть бути запропоновані три підходи до вибору кінематичних параметрів обробки:

- за двома різними для лівої і правої сторони кутами розвороту та єдиним (загальним для правої та лівої сторін) зміщенням T_x ;
- за двома різними для лівої і правої сторони кутами розвороту та різними зміщеннями T_x для правої та лівої сторін;
- за одним значенням кута розвороту та одним зміщенням, визначених для лівої сторони.



ЛЕ — ліва поверхня зуба
 ПЕ — права поверхня зуба

Рисунок 9 — Залежності максимального значення інтегрального критерію інтенсивності MAO $k_{кеф}$ на робочих поверхнях зуба від кута нахилу лінії зуба в: $\xi = 90^\circ$; $V_S/V_{P0} \approx 0$; $\alpha_{дон} = \pm 30^\circ$; $\delta Z = 0$; $\beta = 0^\circ$, $\delta h = 0.5$; $d_a = const$; $\psi_m = b/m = 8$

Всі три підходи вимагають визначення середнього вздовж лінії зуба кута розвороту колеса за оптимальним значенням критерію інтенсивності ($\alpha_{к-1}$) (таблиця 1; рисунок 10).

Для першого підходу величину обирають як раціональне (компромісне) значення за значеннями інтегрального критерію. При цьому швидкість основ-

ної кругової для правої і лівої сторін може бути різною. Наприклад, таким набором параметрів може бути $T_{хлп} = T_{x0}$, $\alpha \approx 4^\circ$, $V_S/V_{P0} \approx -0.4$ для правої сторони і $\alpha_{cp} \approx 23^\circ$, $V_S/V_{P0} \approx -0.1$ для лівої сторони (таблиця 1).

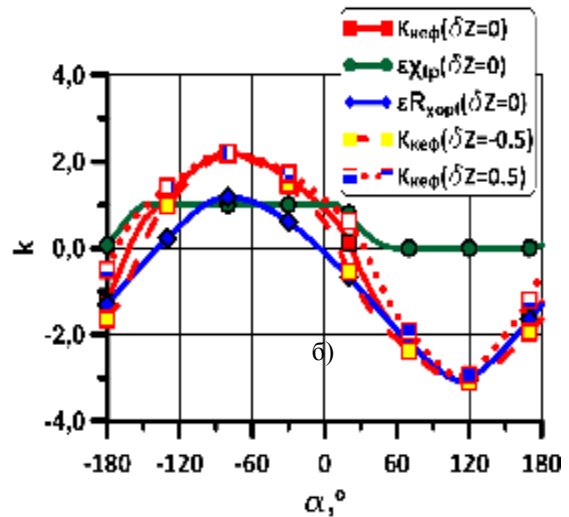
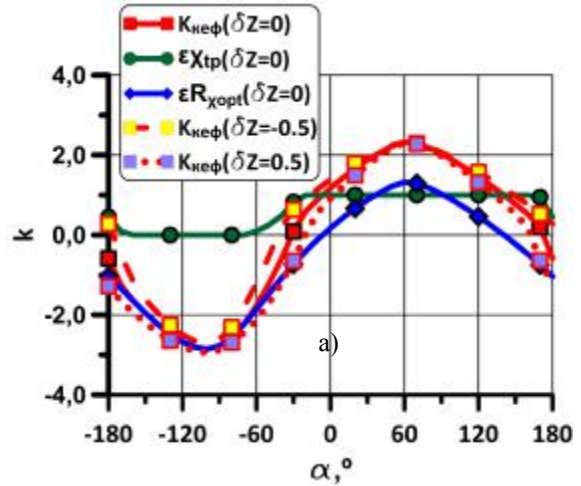


Рисунок 10 — Залежності інтегрального критерію інтенсивності MAO $k_{кеф}$ на робочій поверхні зуба від кута розвороту ($m = 5$ мм; $z = 29$; $\beta = 0^\circ$; $D_{cp} = 200$ мм; $\xi = 110^\circ$; $\delta h = 0.5$); а) ліва сторона, $V_S/V_{P0} \approx 0.1$; $T_x = -T_{x0}$; б) права сторона $V_S/V_{P0} \approx -0.4$;

Значення інтегрального критерію при цьому для правої сторони відповідно (для $\delta Z = \{-0.5; 0; 0.5\}$) дорівнюють відповідно $k_{кеф} = \{0.76; 0.99; 1.21\}$. Середнє значення $k_{кеф,cp} \approx 0.99$. Для лівої сторони значення інтегрального критерію при цьому дорівнюють відповідно $k_{кеф} = \{1.23; 1.0; 0.74\}$. Середнє значення Відхилення сумарної швидкості різання від номінальної (1) складає 0,2–0,45 (рисунок 11, б). Значною мірою змінюється тангенційна складова сумарної

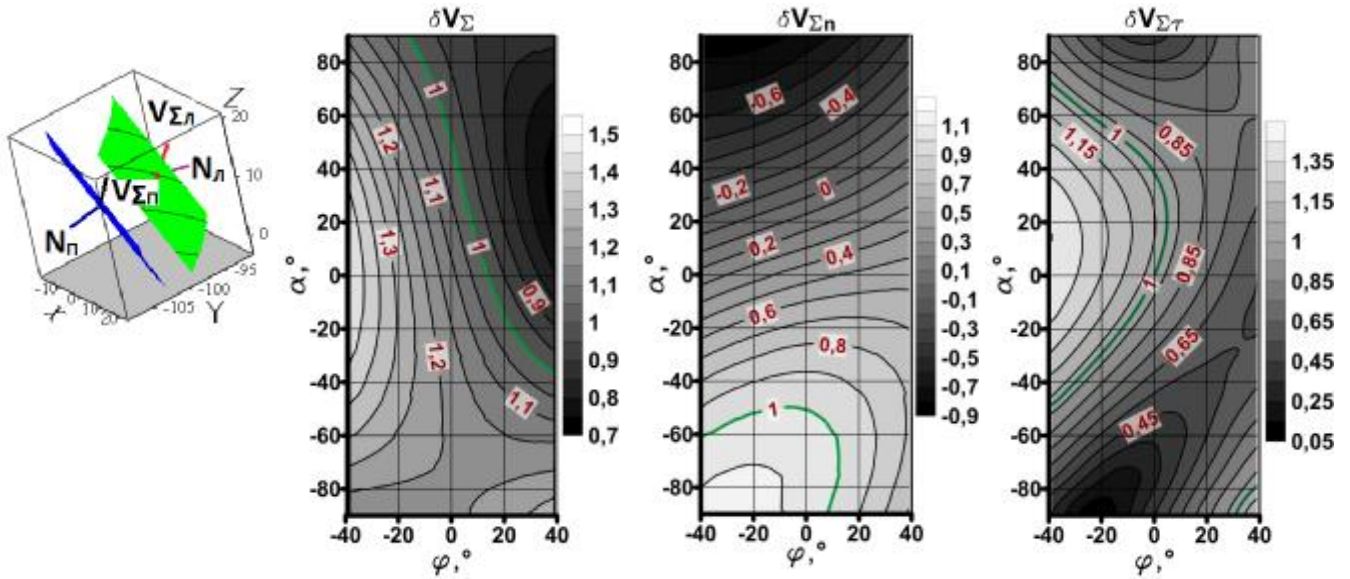


Рисунок 11 — Залежність сумарної швидкості різання на правій стороні зуба від кутових положень у рухах основної та додаткової кругових подач ($m = 5 \text{ мм}; z = 29; \beta = 0^\circ; D_{cp} = 200 \text{ мм}; \xi = 110^\circ; \delta Z = 0; \delta h = 0.5; T_x = T_{x0}; V_s/V_{p0} \approx -4$): а) початкове положення зуба в кільцевій ванні; б) сумарна швидкість; в) нормальна складова сумарної швидкості; г) тангенційна складова сумарної швидкості

Таблиця 1 – Кутові положення колеса при оптимальних значеннях критерію інтенсивності ($\alpha_{k=1}$) та значення інтегрального критерію інтенсивності MAO при вихідному положенні колеса ($k_{кеф\alpha=0}$) ($D_{cp} = 200 \text{ мм}; \xi = 110^\circ; T_{x0} = 26,5; \alpha_{доп} = \pm 90^\circ; \delta h = 0,5$) вздовж лінії зуба

Z, мм	$T_x = 1T_{x0}$		$T_x = 0$		$T_{x0} = -0,5T_{x0}$		$T_x = 1T_{x0}$	
	$\alpha_{k=1}^\circ$	$k_{кеф\alpha=0}$	$\alpha_{k=1}^\circ$	$k_{кеф\alpha=0}$	$\alpha_{k=1}^\circ$	$k_{кеф\alpha=0}$	$\alpha_{k=1}^\circ$	$k_{кеф\alpha=0}$
$V_s/V_{p0} \approx 0,4$, ліва сторона								
-20	-7,7	1,16	-25,1	1,47	-32,0	1,59	-37,4	1,69
0	5,24	0,87	-11,2	1,26	-18,3	1,41	-24,5	1,54
20	16,1	0,51	0,2	0,99	-7,05	1,19	-13,6	1,35
$V_s/V_{p0} \approx 0,1$, ліва сторона								
-20	13,1	0,64	-3,0	1,07	-10,2	1,24	-16,6	1,39
0	23,2	0,11	7,5	0,78	0,21	0,99	-6,5	1,18
20	32,6	-0,63	17,3	0,43	9,9	0,68	2,9	0,91
$V_s/V_{p0} \approx -0,1$, права сторона								
-20	-29,2	-0,36	-44,5	-1,30	-51,9	-1,55	-58,9	-1,73
0	-20,1	0,34	-35,1	-0,66	-42,6	-1,13	-49,8	-1,47
20	-11,1	0,70	-25,8	0,07	-33,4	-0,45	-40,8	-0,95
$V_s/V_{p0} \approx 0,1$, права сторона								
-20	-41,5	-1,28	-57,4	-1,67	-64,7	-1,80	-71,2	-1,97
0	-31,6	-0,41	-47,0	-1,40	-54,4	-1,59	-61,3	-1,77
20	-22,2	0,28	-37	-0,76	-44,8	-1,31	-51,9	-1,52
$V_s/V_{p0} \approx -0,4$, права сторона								
-20	-13,1	0,62	-27,9	-0,22	-35,4	-0,68	-42,8	-1,07
0	4,0	0,89	-18,5	0,49	-26,1	-0,02	-33,7	-0,50
20	5,3	1,12	-8,8	0,78	-16,5	0,58	-24,3	0,20

швидкості (рисунок 11, г) у порівнянні з нормальною її складовою.

Для другого підходу таким набором параметрів може бути $T_{Xn} = T_{X0}$, $\alpha_{cp} \approx 4^\circ$, $V_s/V_{p0} \approx -0,4$ для правої сторони і $T_{Xn} = T_{X0}$, $\alpha_{cp} \approx 6,7^\circ$, або $\alpha_{cp} \approx 0^\circ$, $V_s/V_{p0} \approx -0,1$ для лівої сторони (таблиця 1). Значення інтегрально-го критерію при $\alpha_{cp} \approx 6,7^\circ$ для лівої сторони дорівнюють $k_{кеф} = \{1,23; 1,0; 0,74\}$, $k_{кефcp} \approx (1,0)$, а для $\alpha_{cp} \approx 0^\circ$ відповідно $k_{кеф} = \{1,39; 1,18; 0,91\}$, $k_{кефcp} \approx (1,16)$ (таблиця 1).

Для третього підходу можна застосувати такі самі параметри для лівої сторони, що і для другого підходу. Для обробки правої сторони потрібно виконати розворот заготовки на кут $\alpha \approx 0^\circ$ і виконати зміщення на величину $T_{Xлп} \leq T_{X0}$, щоб права сторона зуба зайняла місце лівої і повторити процес обробки.

Запропоновані підходи нерівнозначні. Перший є найпростішим для його реалізації. Другий підхід вимагає наявності привода установочного переміщення T_X . Третій підхід вимагає наявності приводів установочного переміщення T_X та установочного розвороту на кут α . З точки зору якості обробки, перший підхід повинен забезпечувати найнижчу якість, а третій найвищу.

Для реалізації розробленої схеми обробки спроектовано експериментальний верстат, який складається із базового вертикально-фрезерного верстака, роторної головки та магнітної системи типу “кільцева ванна”. Для збільшення ширини робочої зони кільцевої ванни при збереженні або незначному збільшенні непродуктивних втрат енергії, розроблені два варіанти магнітних систем: з проміжним феромагнітним тілом у робочій зоні та з двоконтурним магнітопроводом. Обидві магнітні системи в плані мають форму дванадцятикутника, конструкції зовнішньої обolonки та зовнішнього контуру магнітопроводу і габарити. Перша магнітна система має шість електромагнітних котушок і дозволяє збільшити ширину робочої зони до 60 мм (при збереженні енерговитрат конструкції з шириною робочої зони 40 мм і забезпеченням величини магнітної індукції $B=0,7$ Тл). Внутрішній контур магнітопроводу другої магнітної системи складається з центрального магнітопроводу, внутрішнього дископодібного полюсного наконечника, кільцевого магнітопроводу з шістьма котушками, який спряжено у верхній частині з немагнітним конусом кільцевого магнітопроводу. Ця конструкція дозволяє збільшити ширину робочої зони до 120 мм.

Висновки

1. На значення інтегрального критерію інтенсивності MAO при обробці над кільцевою ванною впливають такі параметри (в порядку зменшення ступеня впливу): орієнтація зуба в кільцевій ванні, кут розвороту α (кут нахилу лінії зуба β), швидкість основної кругової подачі V_s , зміщення T_X (положення вздовж лінії зуба δZ), кут нахилу осі колеса ξ , модуль зубчатої передачі m , діаметр серединного циліндру кільцевої ванни D_{cp} , положення по висоті зуба δh .

2. Запропоновано три підходи до вибору кінематичних параметрів обробки:

- за двома різними для лівої і правої сторін кутами розвороту $\alpha_{л}$ і $\alpha_{п}$ та єдиним (загальним для правої та лівої сторін) зміщенням $T_{Xл}$ і $T_{Xп}$;

- за двома різними для лівої і правої сторін кутами розвороту $\alpha_{л}$ і $\alpha_{п}$ та різними зміщеннями для правої $T_{Xл}$ та лівої сторін $T_{Xп}$;

- за одним значенням кута розвороту $\alpha_{лп}$ та одним зміщенням $T_{Xлп}$, визначених для лівої сторони.

3. Для обробки циліндричних зубчастих коліс рекомендуються кінематичні параметри: кут нахилу осі колеса $\xi = 70-110^\circ$; співвідношення швидкостей головного руху та кругової подачі $0,1 \leq V_s/V_{p0} \leq 0,4$. При цьому знаки напрямків повороту в головному русі та установочному русі нахилу осі колеса на кут ξ повинні співпадати, $V_s > 0$ для лівої сторони зуба, $V_s < 0$ для правої сторони.

4. Кінцевий вибір значень кутів нахилу ξ та співвідношення швидкостей повинен виконуватись за залежностями інтегрального критерію інтенсивності MAO від кута розвороту $k_{кеф}$.

Література

- Афтаназів, І. Вплив технологічних параметрів процесу ВВЗК на чистоту зміцненої бокової поверхні зубів / І. Афтаназів, І. Юрчишин, О. Клименко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. — Краматорськ. — 2003. Вип. 14. — С. 106—118.
- ГОСТ 31381-2009 “Колеса зубчатые. Виды повреждений. Классификация и описание”.
- Кравчук, В.С. Опір деформуванню та руйнуванню поверхнево-зміцнених деталей машин і елементів конструкцій: Монографія/ В.С. Кравчук, Абу Айаш Юсеф, А.В. Кравчук. — Одеса: Астропринт, 2000. — 160 с.
- Литвиненко, В.А. Финишная обработка фасонных поверхностей с высокими требованиями к качеству методом МАП с вращающейся рабочей зоной: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08/Литвиненко Валентина Алексеевна. — Ленинград, 1985. — 259 с.
- Sunil, J. Nano-Finishing Techniques / J. Sunil, V.K. Jain // Micromanufacturing and Nanotechnology. 2006. P. 171—195.
- Мрочек, Ж.А. Особенности процесса магнитно-абразивной обработки поверхностей / Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов// Вестник Белорусской государственной политехнической академии. — 2002. — № 2. — С.36-38.
- Петросов, В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента / В.В. Петросов. — М.: Машиностроение. — 1977. — 166 с.
- Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. — Л.: Машиностроение, 1986. — 176 с.
- Ульяненко, Н.В. Підвищення працездатності твердосплавного інструменту шляхом застосування магнітно-абразивного оброблення та нанесення зносостійких покриттів: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Київ, 2006. — 167 с.

10. Барон, Ю.М. Влияние состояния кромок лезвий на эффективность режущих инструментов / Ю.М. Барон // Инструмент и технологии. — СПб., 1997. — Вып. 5. — С. 1—11.

14. Гейчук, В.М. Математична модель кінематики процесу магнітно-абразивної обробки комплексів поверхонь // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наукових праць ЖДТУ. — Житомир: ЖДТУ. — 2011. — Вип. 10. — С. 99-114.

15. Гейчук, В.М. Магнітно-абразивна обробка зубчастих коліс в кільцевій ванні: аналіз кінематики / В.М. Гейчук, А.Ю. Гаврушкевич, Д.І. Галатович // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. — Краматорськ. — Вип. № 32. — 2013. — С. 63—69.

References

1. Aftanaziv, I. Vplyv tekhnolohichnykh parametriv protsesu VVZK na chystotu zmitsnenoї bokovoї poverkhni zubiv / I. Aftanaziv, I. Yurchyshyn, O. Klymenko // Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system: zb. nauk. prats. — Kramatorsk. — 2003. — Vyp. 14. — S. 106—118.

2. GOST 31381-2009 "Kolesa zubchatyie. Vidy i povrezhdeniy. Klassifikatsiya i opisaniie".

3. Kravchuk V.S. Opir deformuvanniu ta ruinuvanniu poverkhnevo-zmitsnennykh detalei mashyn i elementiv konstruktzii: Monohrafiia/ V.S. Kravchuk, Abu Aiash Yusef, A. V. Kravchuk. — Odesa: Astroprynt, 2000. — 160 s. (Ros. movoiu).

4. Litvinenko V.A. Finishnaya obrabotka fasonnykh poverhnostey s vysokimi trebovaniyami k kachestvu metodom MAP s vraschayuscheysya rabochey zonoй: dis. ...kand. tehn. nauk: 05.02.08/Litvinenko Valentina Alekseevna. — Leningrad, 1985. — 259 s.

5. Sunil, Jha. Nano-Finishing Techniques / Sunil Jha, V. K. Jain // Micromanufacturing and Nanotechnology. 2006. Pp. 171—195.

6. Mrochek, Zh.A. Osobennosti protsesa magnitno-abrazivnoy obrabotki poverhnostey / Zh.A. Mrochek, L.M. Kozhuro, I.P. Filonov // Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy politehnicheskoy akademii. — 2002. — № 2. — S. 36—38.

7. Petrosov, V.V. Gidrodobestruynoe uprochnenie detaley i instrumenta / V.V. Petrosov. M.: Mashinostroenie. 1977. — 166 s.

8. Baron, Yu.M. Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdeliy i rezhushchih instrumentov / Baron Yu.M. L.: Mashinostroenie, 1986. — 176 s.

9. Ulianenko, N.V. Pidvyshchennia pratsezdatsnosti tverdosplavnoho instrumentu shliakhom zastosuvannia mahnitno-abrazivnoho obroblennia ta nanesennia znosostiiknykh pokryttiv: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01. — K., 2006. — 167 s.

13. Heichuk, V.M. Verstaty dlia mahnitno-abrazivnoy obrabotky na bazi mahnitnoy systemy typu "kiltseva vanna": kinematyka obrabotky dribnomodulnykh zubchastykh kolis / V.M. Heichuk, V.S. Maiboroda, A. Yu. Havrushkevych, O.O. Shamshur // Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho universytetu imeni M.Ostrohradskoho. — 2010. — № 2(61), ch. 1. — S. 51—60.

14. Heichuk, V.M. Matematychna model kinematyky protsesu mahnitno-abrazivnoy obrabotky kompleksiv

poverkhon // Protsey mekhanichnoy obrabotky v mashynobuduvanni. Zbirnyk naukovykh prats ZhDTU. — Zhytomyr: ZhDTU. — 2011. — Vyp. 10. — S. 99—114.

15. Heichuk, V.M. Mahnitno-abrazivna obrabotka zubchastykh kolis v kiltsevii vanni: analiz kinematyky / Heichuk V.M., Havrushkevych A. Yu., Halatovych D.I. // Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system. Zbirnyk naukovykh prats. — Kramatorsk. — Vyp. № 32. — 2013. — S.63—69.

Надійшла 23.12.2013 року

УДК 621.923

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В КОЛЬЦЕВОЙ ВАННЕ

В.М. Гейчук, А.Ю. Гаврушкевич

Выполнен анализ типов повреждений, которым подвергаются зубья зубчатых передач, и рекомендации по их предотвращению. Определено, что одним из путей реализации рекомендаций является технологическое обеспечение определенных характеристик рабочих поверхностей зубьев. Одним из методов финишной обработки, обеспечивающих требуемые характеристики является магнитно-абразивная обработка в кольцевой ванне. Разработана схема обработки зубчатых колес "над кольцевой ванной" и оборудование для его реализации, в частности конструкции магнитных систем с увеличенной шириной рабочей зоны. С помощью ранее разработанных математической модели и интегрального критерия интенсивности выполнен анализ кинематики процесса обработки.

Ключевые слова: зубчатые передачи, магнитно-абразивная обработка, упрочнение рабочих поверхностей зубьев.

UDC 621.923

MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING OF TEETH OF GEARS IN THE RING BATH

V.M. Geichuk, A.Yu. Gavrushkevich

The analysis of the types of damage suffered by the teeth of gears, and recommendations for their prevention. Determined that one of the ways to implement the recommendations is the technological support of certain features work surfaces of the teeth. One of the finishing techniques that provide desirable characteristics is the magnetic-abrasive machining in the ring bath. Developed a method of treating gears "over the ring bath", and equipment for its implementation, in particular magnetic design systems with a larger width of the working area. Using the previously developed mathematical model and integral criterion intensity analyzed the kinematics of the treatment process. The kinematic parameters of the process, the design parameters of machined gears and ring bath having the greatest impact on the quality of treatment, and recommendations on their choice.

Key words: the teeth of gears, magnetic-abrasive machining, integral criterion intensity