МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ РОТОРНИХ ГОЛОВОК ДЛЯ ФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ З РІВНОМІРНО РОЗТАШОВАНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ НА ПЕРИФЕРІЇ**А. Ю. Гаврушкевич, В. М. Гейчук, Н. В. Гаврушкевич, О. М. Кравець, А. С. Ромашко**

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

ORCID: 0000-0001-8678-574X; 0000-0002-6704-3721; 0000-0002-6229-7458; 0000-0002-7468-0956; 0000-0001-8325-8880

У роботі розроблена методика та рекомендації з проектування технологічного обладнання для МАО поверхонь та кромки деталей складної просторової форми в кільцевій ванні на базі структурно-параметричного синтезу кінематики процесу. Методика проектування представлена алгоритмом, який включає в себе етапи синтезу структурно-кінематичних схем та структурних формул компоновання роторних верстатів і блок визначення їх основних конструктивних параметрів і розмірів. У процесі синтезу аналізуються можливі загальні матриці координатних перетворень формотворної системи верстата. Для реалізації загальна матриця координатних перетворень вибирається за результатами комплексної оцінки критеріїв інтенсивності МАО та форми кромки. Методика проектування апробована при проектуванні та конструюванні роторної головки для МАО зубчастих коліс над кільцевою ванною. Розроблена конструкція магнітної системи з двоконтурним магнітопроводом, яка дозволяє збільшити ширину робочої зони до 150 мм, а зовнішній діаметр оброблюваних зубчастих коліс до 400 мм.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення, кільцева ванна, роторна головка, кромка, заокруглення, методика, проектування.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Як відомо, відсутність задирок та гострих кромки на краях робочих поверхонь є однією із ознак високої якості виготовлення більшості деталей машинобудівного призначення. При виготовленні зубчастих коліс наявність гострих кромки часто призводить до виникнення гартівних тріщин [1]. При експлуатації зубчастих коліс в результаті відколу гострих кромки може відбутися поломка зубів [1, 2]. Зубчасті передачі з колесами, що мають гострі кромки на торцях, більш чутливі до похибок складання внаслідок виникнення крайового контакту. Як показує практика, до 50% зубчастих коліс без фасок та округлень на торцях зубів мають забоїни, а термін служби таких коліс в середньому на 20% менше, через утворення мікротріщин на гострих кромках при термообробці.

Для забезпечення стабільності геометрії ріжучих кромки інструментів і відсутності напливів при нанесенні на покриття методом PVD необхідна підготовка кромки – їх округлення. Відсутності задирок не гарантують найбільш розповсюджені методи фінішної обробки зубчастих коліс, такі як шевінгування, шліфування хонінгування [2, 3, 4, 5].

Тому проблемі видалення задирок та округленню кромки (або створенню фаски на них) на виробі різного призначення досі присвячено багато робіт [6, 7, 2, 8, 9, 10].

У роботі [6] представлений метод виготовлення закруглених різальних кромки шляхом застосування шліфувальних кругів на еластичній зв'язці. За твердженням автора гарантується потрібний радіус ріжучої кромки і її симетрія з високою точністю і повторюваністю. Зокрема досліджено вплив кінематики і параметрів процесу на результат підготовки кромки. Однак шліфуванням властиві витрати гостродефіцитних і дорогих матеріалів і часті переточування інструменту. Застосування лезового інструменту для заокруглення фаски і видалення задирок вимагає наявності багатопозиційних або декількох однопозиційних верстатів [7], як, наприклад, для обробки зубчастих коліс. Тепловий метод є досить

енергоємним і для його реалізації необхідно відповідне апаратне оформлення. Електрохімічний метод також характеризується спеціальними джерелами живлення електричним струмом і пристроями для подачі, збору, зберігання і очищення робочої рідини. Крім того, необхідне розміщення технологічного обладнання в окремих приміщеннях, що пов'язано з урахуванням специфічних вимог безпеки праці.

Ефективним комплексним методом, що дозволяє одночасне оброблення робочих поверхонь і торців та округлення кромки зубів коліс і різального інструменту, є магнітно-абразивне оброблення (МАО). Як зазначалось у роботі [11], його впровадженню виробництво гальмується відсутністю відповідного обладнання та рекомендацій з його проектування. Як показує аналіз науково-технічних джерел в галузі МАО, дослідження носять переважно технологічний характер [8, 9, 10, 12].

В [13] запропонований магнітно-реологічний процес МАО на пристрої, що використовує складну систему циркуляції рідини з абразивними частинками за допомогою конвеєрної стрічки. Досліджувались розподіл магнітного поля, зусилля при обробленні, швидкість конвеєрної стрічки і робочий зазор на якість поверхні пластини з нержавіючої сталі sus304. Результати експериментів показують, що процес може забезпечити стабільну обробку поверхні матеріалу. Шорсткість поверхні пластини з нержавіючої сталі sus304 була покращена з 273 нм до 23 нм за допомогою цього процесу.

В роботі [14] розглянуті нові процеси, які направлені на отримання однорідної шорсткості нанорівня поверхонь довільної форми. Серед процесів з використанням магнітного поля розглянуті процеси МАО та магнітно-реологічний.

Активно проводяться дослідження з розробки технологій МАО дроту з титану [15] та з нержавіючої сталі [16], що застосовуються як біоматеріали в медицині (коронарний стент, ортодонтія і імплантація).

Для полірування поверхні заготовки з мідного сплаву у роботі [17] використано вертикальний обертовий вал з двома постійними магнітами на кінці з застиглою магнітореологічною поліруючою рідиною на торцевій поверхні нижнього магніту. Шорсткості R_a 28,8 нм досягли за 7,5 хв від початкового значення R_a 273,6 нм. Підтверджено, що нова конструкція інструменту для магнітореологічного чистового оброблення з підходить для нанооброблення діамантних матеріалів, таких як мідні сплави і т.п.

В [18] представлені результати досліджень із застосування процесу магнітно-абразивного чистового оброблення мікроканалів з використанням комбінації змінного і статичного магнітних полів. Такий спосіб дає можливість постійно замінювати абразивні частинки, що контактують із оброблюваною поверхнею, а також періодично коригувати форму магнітної щітки, щоб краще підігнати її форму до форми поверхні заготовки. Результати експериментів показують, що цей процес придатний для чистової обробки мікроканалів з ефективним видаленням задилок на їх краях.

Досліджено вплив кінематики процесу магнітно-абразивного оброблення на якість робочих поверхонь мігчиків з кутом профілю різьби 60° у роботах [9, 10, 12].

Розробці обладнання частково присвячені роботи [19, 20, 21]. У [19] описані конструкції робочих головок на постійних магнітах для обробки зовнішніх плоских поверхонь та поверхонь малої кривизни. В якості базових елементів головок використані неодимові магніти у вигляді циліндрів діаметром 40 мм і висотою 20 мм і двох кільцевих циліндрів з такої ж висоти. Досліджувався вплив компоновання магнітів робочої головки та робочого зазору на зміну шорсткості оброблюваної поверхні. В [20] розглянуто потенційні можливості використання магнітно-абразивного полірування для фінішного оброблення поверхонь каналів в чутливих до радіаційних випромінювань полімерних матеріалах. Робота [21] пропонує новий процес полірування, який поєднує в собі процеси оброблення МАО і фіксованим абразивом. Розроблено пристрій для фінішної обробки та проведені експерименти полірування керамічної пластини з оксиду алюмінію. Шорсткість зменшилася з R_a 202,11 нм до 3,67 нм протягом 30 хв.

У дослідженні [22] для чистової обробки поверхні розроблений апарат з використанням обертового магнітного поля зі стаціонарними електромагнітами і заготовкою. Проведені експерименти для оброблення різних матеріалів, таких як титан, алюміній, композитні матеріали, поліуретан і політетрафторетилен (ПТФЕ). Середня шорсткість поверхні (R_a) поліпшується з 4,156 мкм до 1,94 мкм. Під час роботи за 60 хвилин температура в зоні обробки змінюється всього на 14°C -від 23°C до 37°C .

В [2] в частині розробки обладнання виконано розрахунок і дослідження впливу форми магнітопроводу на формування профілю різального інструменту управління параметрами робочого технологічного середовища.

Таким чином, роботи направлені на створення обладнання для магнітно-абразивного оброблення

робочих поверхонь та округлення кромки зубів коліс і різального інструменту є актуальними. Раніше [11, 23, 24] було розроблено основні положення кінематики процесу магнітно-абразивної обробки робочих поверхонь і округлення кромки зубів циліндричних зубчастих коліс. На основі результатів цих досліджень удосконалено структурно-параметричний синтез кінематичних структур формотворних систем. В [23] визначені функціональні залежності критеріїв якості магнітно-абразивного оброблення робочих поверхонь зубів і кромки від кінематичних параметрів процесу та набір критеріїв для оцінки якості округлення кромки. В [25] розроблена методика визначення навантажень при МАО зубчастих коліс над кільцевою ванною. Розроблені конструкції магнітних систем з проміжним феромагнітним тілом у робочій зоні та з двоконтурним магнітопроводом, які дозволяють збільшити ширину робочої зони до 150 мм. Це дає змогу розробити методику проектування роторних головок для фінішного оброблення циліндричних деталей з рівномірно розташованими елементами на периферії з зовнішнім діаметром до 400 мм.

Метою цих досліджень є розробка методики проектування роторних головок для фінішного оброблення циліндричних деталей з рівномірно розташованими елементами на периферії, а також апробація методики при розробці конструкції роторної головки для реалізації МАО циліндричних зубчастих коліс над кільцевою ванною.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Розроблена методика проектування, алгоритм якої представлений на рис. 1, включає в себе етапи 10, 11 і 12, які стосуються стадії проектування. Це блоки синтезу структурно-кінематичних схем (СКС) та структурних формул компоновання (СФК) роторних верстатів і блок визначення їх основних конструктивних параметрів і розмірів. У процесі синтезу аналізуються можливі загальні матриці координатних перетворень формотворної системи верстата. Для реалізації загальна матриця координатних перетворень вибирається за результатами комплексної оцінки критеріїв інтенсивності МАО та форми кромки.

Розробка СКС і СФК виконується в такій послідовності:

- аналіз вихідних характеристик заготовки і кінцевих характеристик готової деталі, зокрема стану і вимог до якості поверхні і кромки;
- розробка схеми базування заготовки в кільцевій ванні, визначення типів і кількості відносних рухів деталі і магнітно-абразивного інструменту (МАІ);
- аналіз кінематики процесу МАО заготовки, уточнення схеми базування заготовки, а також типів і кількості відносних рухів деталі і МАІ; пошук для кожної оброблюваної кромки режимів, що дозволяють отримати «кращі» за формою кромки (для яких виконуються умови: $|\delta R_{cp}| \leq \Delta_{cp}$, $|R\delta| \leq \Delta_\delta$; $R\delta \neq 0$, де $R\delta = \delta R_{max} - \delta R_{min}$ – розмах відносних відхилень радіусу округлення, Δ_δ та Δ_{cp} – задані максимальні значення розмаху відхилень та середніх відхилень [23]), при мінімально можливому відхиленні інтегрального критерію інтенсивності $k_{min} < k_{кеф} < k_{max}$

[11] від оптимального значення $k_{кеф} = 1$; вибір раціональних режимів для всіх кромок і поверхонь;

- розгортання загальної матриці координатних перетворень і розподіл її складових на матриці відображення рухів ланок формотворчих системи верстата і матриці конструктивних параметрів;

- визначення додаткових переміщень, які не відображені в загальній матриці координатних перетворень, наприклад, налагоджувальних;

- розподіл рухів між заготовкою і магнітною системою;

- розробка структурно-кінематичних схем;

- розробка структурних формул компоновання.

Рисунок 1 – Алгоритм проектування роторних верстатів для МАО деталей складної форми

Рисунок 1 – Алгоритм проектування роторних верстатів для MAO деталей складної форми (закінчення)

Розрахунок навантажень з боку МАІ на заготовку (рис. 1, блок 13) виконується за методикою, викладеною в [25]. Її застосування для різних матеріалів заготовок вимагає додаткових досліджень трибо-технічних властивостей магнітно-абразивного інструменту з більш широким і повнішим охопленням

фракцій частинок і оброблюваних матеріалів в порівнянні з роботою [26].

За допомогою викладеної методики, базуючись на результатах досліджень [11, 23], були:

- синтезовані структурно-кінематична схема (СКС) та структурна формула компонентування (СКФ)

верстата з ЧПК для МАО циліндричних зубчастих коліс над кільцевою ванною для МАО зубчастих коліс над кільцевою ванною (рис. 2);

- спроектовані та сконструйовані роторні головки.

Загальна матриця координатних перетворень верстата у розгорнутому стані має вигляд:

$$MRT_{1-8} = \begin{matrix} MR_Z(\Phi) \times MT(0,0,T_Z(\xi)) \times \\ \times MT(0,T_Y,0) \times MT(T_X(\xi),0,0) \times \\ \times MR_Z(\alpha(\varphi)) \times MR_Y(\xi(\varphi)) \times MR_Z(\varphi); \end{matrix} \quad (1)$$

де $MR_Z(\varphi)$ - рух основної кругової подачі $\Phi_{S1}(D)$; $MR_Y(\xi(\varphi))$ - рух першої додаткової кругової подачі; $MT(T_X(\xi),0,0)$ - установчий рух $Uc1(X)$ для раціонального розміщення оброблюваних поверхонь заготовки в робочій зоні; $MR_Z(\alpha)$ - установчий рух розвороту $Uc2(F)$ або рух другої додаткової кругової подачі $\Phi_{S3}(F)$, (прийнемо позначення буквою F додатковий поворот навколо осі Z); $MT(0,T_Y,0)$ - конструктивний параметр; $MR_Z(\Phi)$ - головний рух $\Phi_V(C)$; $MT(0,0,T_Z(\xi))$ - рух врізання $Bp(Z)$ для занурення зубів заготовки в робочу зону.

Рисунок 2 – СК Сверстата з ЧПК для МАО циліндричних зубчастих коліс над кільцевою ванною

При цьому рухи додаткових кругових подач виконуються за залежностями: $\xi(\varphi) = \xi_{don} \cdot \sin(n_O \cdot \varphi)$ - в русі першої додаткової кругової подачі, $\alpha(\varphi) = \alpha_{don} \cdot \sin(n_A \cdot \varphi)$ - в русі другої додаткової кругової подачі. В цьому випадку швидкості додаткових кругових подач будуть визначатись за наступними виразами:

$$\omega_{\alpha_z} = \frac{d\alpha(\varphi)}{dt} = \alpha_{don} \cdot n_A \cdot \cos(n_A \cdot \varphi); \quad (2)$$

$$\omega_{O_y} = \frac{d\xi(\varphi)}{dt} = \xi_{don} \cdot n_k \cdot \cos(n_k \cdot \varphi). \quad (3)$$

де $\alpha(\varphi) = \alpha_{don} \cdot \sin(n_A \cdot \varphi)$ - кут повороту в русі першої додаткової кругової подачі, а n_A - кількість коливань за оберт колеса в русі кругової подачі; $\xi(\varphi) = \xi_{don} \cdot \sin(n_k \cdot \varphi)$ - кут повороту в русі другої додаткової кругової подачі, а n_O - кількість коливань за оберт колеса в русі кругової подачі.

Структурна формула компоновання, що відповідає приведеній СКС, є такою: $\tilde{N}(D_{x/y} b x F) \hat{C}_V z 00_{MS}$ або $\tilde{N}(D_{x/y} b x f) \hat{C}_V z 00_{MS}$, де $\tilde{N}$ - кількість робочих шпинделів в складі роторної головки. При поділі компоновання на конструктивні модулі формула має вигляд:

$$\left[0 \tilde{N} D_{x/y} b x F \right] \left[0 \hat{C}_V \right] \left[0 z \right] \left[0 \right] \left[0_{MS} \right] \quad (4)$$

або

$$\left[0 \tilde{N} D_{x/y} b x f \right] \left[0 \hat{C}_V \right] \left[0 z \right] \left[0 \right] \left[0_{MS} \right]. \quad (5)$$

Конструкція першої із них представлена в [27], а іншої – на рис. 3 та 4

Головка (рис. 4) складається із корпусу 1, який закріплено, наприклад, на оправці 2 з конусом 7:24. Оправка встановлюється і закріплюється в шпинделі. В корпусі 1 на підшипнику 3 з перехресними роликами встановлено корпус 4, що містить привод першої додаткової кругової подачі (коливального руху розвороту на кут $\pm\alpha$) з електромеханічним приводом М3. В нижній частині корпусу 4 в дуговому пазу розміщені ролики 5, на яких встановлено корпус 6 з робочим шпинделем (валом) І, приводом кругової подачі з електромеханічним приводом М1 та приводом другої додаткової подачі (коливального руху унахилу на кут $\pm\xi$) з електромеханічним приводом М2.

Робочий шпиндель І з оброблюваною заготовкою встановлений на постійній задній опорі 7 з двома підшипниками та передній відвідний опорі 8 зі сферичними підшипниками 9. Стержень 10 слугує для підтримки опори при відведенні/ підведенні. Шпиндель І з'єднано валом ІІ з приводом кругових подач

М1 зубчато-пасовою передачею $Z_{ш1} = 20$, $Z_{ш2} = 31$, $Z_{п1} = 71$.

На корпусі 6 встановлено електромеханічний привід М2 другої додаткової подачі, що валом ІІІ з'єднаний з кулачковим механізмом КМ1. Штовхач цього механізму з'єднаний з зубчатою рейкою ЗР1, яка з'єднана зубчастими секторами $Z_1=34$ та $Z_2=153$ (на двох бокових сторонах корпусу 6) з зубчастими секторами $Z_3=115$, що закріплені на двох внутрішніх сторонах корпусу 4 співвісно дуговому пазу а. В пазу а встановлені ролики 5, осі яких закріплені на двох бокових сторонах корпусу 6. Вісь повороту сектора Z_3 , корпусу 6 на роликах 5 по дугових пазах є віссю коливання заготовки, дотичною до зовнішнього циліндру зубів оброблюваного колеса в площині середній до торців вінця.

Електромеханічний привід М3 першої додаткової подачі встановлено в верхній частині корпусу 4. Привід М3 валом ІV, зубчато-пасовою передачею $Z_{ш3} = 17$, $Z_{ш4} = 17$, $Z_{п2} = 36$ з'єднаний з валом V, на якому встановлений кулачок кулачкового механізму КМ2.

Коромисло кулачкового механізму КМ2 встановлено на валу VI. На його кінці, протилежному ролику, встановлено зубчастий сектор Z4, зчеплений з зубчастим сектором Z5, що нерухомо закріплений на корпусі 1. При цьому вісь зубчастого сектору Z5 співпадає з віссю повороту корпусу 4 в підшипнику 3 та проходить через центр коливань заготовки.

Загальний вигляд роторної головки, конструкція якої відповідає представленим структурно-кінематичній (рис. 2) та кінематичній (рис. 3) схемам, приведена на рис. 4. При конструюванні головок необхідно притримуватись наступних рекомендацій:

- якомога точніше визначати навантаження на оброблювані заготовки, зокрема магнітні сили та сили різання (сили тертя в парах «МАІ-оброблювана поверхня» та «МАІ - МАІ») і мінімізувати необхідні потужності приводів;

- застосовувати у приводах високо моментні двигуни;

- кулачкові механізми потрібно виконувати з геометричним замиканням, оскільки при рекомендованих значеннях допустимих кутів розвороту α_{don} та нахилу ξ_{don} (для зубчастого колеса з $m=5$ мм $z=30$, $\alpha_{don} = \pm 30^\circ$, $\xi_{don} = \pm 25^\circ$) величини підйому профілів кулачків мають відносно значні величини. В зв'язку з цим використання силового замикання є досить проблематичним;

- кулачки повинні бути збалансованими відносно своїх осей обертання;

- зменшувати маси деталей за рахунок:

- якомога ширшого застосування матеріалів із алюмінієвих та інших легких сплавів;

- надання раціональної форми деталям для отримання мінімальної маси при забезпеченні максимальної жорсткості з урахуванням заданих залежностей. Це можна виконати, наприклад, за допомогою модуля «Генератор форм» Autodesk Inventor Professional.

Рисунок 3 – Кінематична схема роторної головки

Рисунок 4 – Загальний вигляд роторної головки в робочій зоні верстата

ВИСНОВКИ. У результаті проведених досліджень розроблено методику та рекомендації з проектування роторних головок для фінішної обробки циліндричних деталей з рівномірно розташованими елементами на периферії (зубчастих коліс, кінцевого та осевого різального інструменту, тощо).

Розроблена методика апробована при проектуванні головки для МАО зубчастих коліс над кільцевою ванною.

Для підвищення ефективності застосування методики необхідно провести додаткові дослідження:

- триботехнічних властивостей магнітно-абразивного інструменту в сторону більш широкого і повного охоплення фракцій частинок і оброблюваних матеріалів і особливо експериментальних досліджень сил опору при русі тіл в МАІ;
- з удосконалення кінематико-геометричної моделі формування кромek в напрямку визначення

тіньових зон при обробці, які утворюються сусідніми елементами (зубами, виступами, впадинами, тощо).

ЛІТЕРАТУРА

- ГОСТ 31381-2009. Колеса зубчатые. Виды повреждений. Классификация и описание. - Минск: БелГИСС, 2009. - 70 с.
- Акулович Л. М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. - Минск: БГАТУ, 2019. - 272 с.: ил. - ISBN 978-985-25-0018-0.
- Новиков Ф. В. Механизм образования заусенцев при шлифовании и технология их устранения / Ф. В. Новиков, В. П. Ткаченко // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: труды 5-й Междунар. научн.-техн. конф., 28-29 мая 2002, г. Харьков. - Х.: ХНПК "ФЭД", 2002. - С. 271 - 275.
- Огородов В. А. Исследование обработки кромки пересечения на операции алмазного хонингования // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 4 (57). С. 96-105.
- Огородов В. А. Предотвращение образования заусенцев на кромке пересечения при алмазном хонинговании [Текст] / В. А. Огородов // СТИН. - 2014. - № 9. - С. 30-36. - Библиогр.: с. 36. - ISSN 0869-7566.
- Aurich J. C. Cutting edge preparation with elastic bonded superabrasive grinding wheels / J. C. Aurich, C. Effgen, B. Kirsch // CIRP Annals - Manufacturing Technology 65 (2016) 329-332.
- Акулович Л. М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. - Минск : БГАТУ, 2013. - 372 с. : ил. - ISBN 978-985-519-544-4.
- Майборода В. С. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы / В. С. Майборода, И.В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий // Житомир.: ПП «Рута», 2017. - 272 с.
- Тарган Д. В. Аналіз інтенсивності магнітно-абразивного оброблення мітчиків в залежності від кінематичних параметрів процесу / Д. В. Тарган, В. С. Майборода, Д. Ю. Джулий // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. - 2017. - Вип. № 5 (106). - С. 82-88.
- Тарган Д. В. Вплив магнітно-абразивного оброблення на твердість та структуру матеріалу мітчиків із швидкорізальної сталі / Д. В. Тарган, В. С. Майборода // Вісник ХНТУ. Серія : Інженерні науки. - 2017. - Вип. № 2 (61). - С. 119-125.
- Гаврушкевич А. Ю. Основні положення кінематики МАО циліндричних зубчастих коліс. Дисс. канд. техн. наук: 05.03.01/ Гаврушкевич А. Ю. - Київ. - 2016. 303 с.
- Тарган Д. В., Майборода В. С., Плівак О. А., Добровольський Г.Г. (2018). Вплив кінематики процесу магнітно-абразивного оброблення на параметри якості робочих поверхонь мітчиків із швидкорізальної сталі. Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки», (1 (81), 48-53. [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-48-53](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-48-53).
- Jiaye X. Development of a new magnetic abrasive finishing process with renewable abrasive particles using the circulatory system / X. Jiaye, Z. Yanhua // Precision Engineering 72 (2021). P. 417-425.
- Nagdeve L. Nano finishing of freeform/sculptured surfaces: state-of-the-art / L. Nagdeve, V.K. Jain, J. Ramkumar // Manufacturing Rev. 5, 6 (2018).
- Nam S.S. Magnetic Abrasive Finishing of Beta-Titanium Wire Using Multiple Transfer Movement Method / S.S. Nam, J.S. Kim, S.D. Mun // Applied Sciences. - 2020, - Volume 10, Issue 19, 6729; doi:<http://dx.doi.org/10.3390/app10196729>.
- YinCh. Development of a New Ecological Magnetic Abrasive Tool for Finishing Bio-Wire Material / Ch. Yin, L. Heng, J.S. Kim, M.S. Kim, S.D. Mun // Materials 2019, 12, 714; doi:10.3390/ma12050714.
- Harsh K. Magnet or heological nano-finishing of diamagnetic material using permanent magnets tool / K. Harsh, G. Vishwas. // Precision Engineering. - 2018. - No. 51. - P. 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.07.003>.
- Huijun X. Investigation of the application of a magnetic abrasive finishing process using an alternating magnetic field for finishing micro-grooves / X.Huijun, Z. Yanhua // Nanotechnology and Precision Engineering. Volume 4, Issue 3. Published Online: 24 May 2021.<https://doi.org/10.1063/10.0005015>.
- Майборода В. С. Магнитно-абразивная обработка плоских поверхностей головками на постоянных магнитах / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий, А. И. Зелинко // Наукове видання державного університету «Житомирська політехніка» Технічна інженерія. - № 1 (85) - 2020. С. 60-65.
- Тітаренко О. В. Визначення параметрів магнітно-абразивного полірування оптичних полімерних матеріалів для чутливих елементів дозиметрів / О. В. Тітаренко, Н. В. Зубкова, С. О. Новак // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. -Харків, 2020. Вип. 2 (36). - С. 26-34.
- Zou Y. Development of a New Finishing Process Combining a Fixed Abrasive Polishing with Magnetic Abrasive Finishing Process / Y. Zou, R. Satou, O. Yamazaki, H. Xie Machines 2021, 9(4), 81;<https://doi.org/10.3390/machines9040081> - 12 Apr 2021.
- Al-Dulaimi T. Analysis and Design of a Stationary Magnetic Abrasive Finishing System / Thamir Al-Dulaimi // Phd - Thesis, University of Waterloo, Waterloo. - Ontario, 2018. - P. 156.
- Гейчук В. Н. Кинематика формирования кромок магнитно-абразивной обработкой [Електронний ресурс] / В. Н. Гейчук, А. Ю. Гаврушкевич // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. Том 2, №4. С. 25-32. Режим доступа до статті: <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1355331> / <http://www.indust-engineering.ru/issues/2014/2014-4.pdf>.
- Гейчук В. М. Магнітно-абразивна обробка циліндричних зубчастих коліс в кільцевій ванні/ В. М. Гейчук, А. Ю. Гаврушкевич // Всеукраїнський

науково-технічний журнал «Промислова гідраліка і пневматика». - 2014. - Вип. №1(43). - С. 90-98.

25. Гейчук В. Н. Методика определения нагрузок при магнитно-абразивной обработке цилиндрических зубчатых колес над кольцевой ванной/ В. Н. Гейчук, А. Ю. Гаврушкевич// Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. № 39, 2017. с.23-32.

26. Майборода В. С. Основы створення і використання порошкового магнітно-абразивного інстру-

менту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. докт. техн. наук: 05.03.01 / Майборода Віктор Станіславович. Київ, 2001. - 404 с.

27. Пат. 116340 Україна В24В 31/03 (2006.01), В24В 31/073 (2006.01), В24В 31/112 (2006.01). Спосіб магнітно-абразивної об'ємної обробки/ В. М. Гейчук, В. С. Майборода, А. Ю. Гаврушкевич, О. О. Галицький; заявник та патентовласник: Національний технічний університет України «КПІ». - а 2014 09042; заявл. 11.08.2014; опубл. 12.03.2018; бюл. № 5.

METHOD OF DESIGNING ROTOR HEADS FOR FINISHING CYLINDRICAL PARTS WITH UNIFORMLY LOCATED ELEMENTS ON THE PERIPHERAL

A. Havrushkevych., V. Geichuk, N. Havrushkevych, O. Kravets, A. Romashko

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

ORCID: 0000-0001-8678-574X; 0000-0002-6704-3721; 0000-0002-6229-7458; 0000-0002-7468-0956; 0000-0001-8325-8880

Purpose. The purpose of these studies is to develop a method designing rotor heads for finishing cylindrical parts with evenly spaced elements on the periphery and approbation a technique at development a design a rotor head for realization magnetic-abrasive processing cylindrical gear wheels over a ring bath. **Methodology.** The design technique is based on the synthesis of structural-kinematic schemes and structural formulas of rotary machine composing. In the synthesis process are analyzed the possible general coordinate transformations matrices of the forming system of the rotor heads. The general matrix coordinate transformations is selected by the results of a comprehensive assessment the criteria of the intensity of magnetic abrasive treatment and the shape of the edge. **Findings.** The design technique is represented by an algorithm that includes the stages of synthesis structural-kinematic schemes and structural formulas of the composing rotary machines and the stage for determining their basic design parameters and dimensions. **Originality.** The algorithm of development structural-kinematic schemes and structural formulas arrangement rotary machines for magnetic-abrasive processing blanks in the stage of definition and choice of rational modes is improved. This allows you to get the particular level of quality of processing that is best for the whole set of machined surfaces and edges of the work pieces. **Practical value.** The design technique has been tested in the design and construction of the rotor head for magnetic-abrasive processing gears over the ring bath. The design of the magnetic system with a double-circuit magnetic circuit is developed, which allows to increase the width of the working zone up to 150 mm, and the outer diameter of the processed gears up to 400 mm. **Conclusions.** As a result of the carried out researches the technique and recommendations on designing of rotor heads for finishing of cylindrical details with equally located elements on periphery (gears, end and axial cutting tools, etc.) are developed. To increase the efficiency of the technique, it is necessary to conduct additional studies of tribotechnical properties of magnetic-abrasive tools with a wider coverage of fractions of particles and processed materials and especially experimental studies of resistance forces during the movement of bodies in the working environment.

Key words: magnetic abrasive finishing, ring bath, rotor head, edge, rounding, methodology, design.

REFERENCES

1. Kolesa zubchatye. Vidy i povrezhdeniy. Klassifikatsiya i opisanie [Gear wheels. Modes of Failures. Classification and description], 70 GOST 31381-2009 (2009).
2. Akulovich, L. M. & Sergeev, L. E. (2019), Magnitno-abrazivnaya obrabotka slozhnoprofilnykh poverhnostey detaley sel'skohozyaystvennykh mashin. Minsk: Belarusian State Agrarian Technical University.
3. Novikov, F. V., & Tkachenko, V. P. Mehanizm obrazovaniya zausentsev pri shlifovanii i tehnologiya ih ustraneniya (2002), Fizicheskie i kompyuternye tehnologii v narodnom hozyaystve: trudy 5-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, 28-29 maya 2002, Harkov, 271 - 275.
4. Ogorodov, V. A. (2013), Issledovanie obrabotki kromki peresecheniya na operatsii almaznogo honingovaniya. Bulletin of Ufa State Aviation Technical University, V. 17, 4(57). 96–105.
5. Ogorodov, V. A. (2014), Predotvrashchenie obrazovaniya zausentsev na kromke peresecheniya pri almaznom honingovanii. STIN, 9, 30-36.
6. Aurich, J. C., Effgen, C. & Kirsch, B. (2016), Cutting edge preparation with elastic bonded superabrasive grinding wheels. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 65, 329–332.
7. Akulovich, L. M. & Sergeev, L. E. (2013), Tehnologiya i oborudovanie magnitno-abrazivnoy obrabotki metallicheskh poverhnostey razlichnogo profilya. Minsk: Belarusian State Agrarian Technical University.
8. Mayboroda, V. S., Slobodyanyuk I. V. & Dzhuliy D.Yu. (2017), Magnitno-abrazivnaya obrabotka detaley slozhnoy formy. Private enterprise «Ruta».
9. Tarhan, D. V., Maiboroda, V. S., & Dzhulii D.Iu. (2017), Analiz intensyvnosti mahnitno-abrazyvnoho obroblennia mitchykiv v zalezhnosti vid kinematychnykh parametriv protsesu. Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. 5 (106). 82–88.
10. Tarhan, D. V., & Maiboroda, V. S. (2017), Vplyv mahnitno-abrazyvnoho obroblennia na tverdist ta strukturu materialu mitchykiv iz shvydkorizalnoi stali.

Bulletin of Kherson National Technical University, 2 (61), 119–125.

11. Havrushkevych, A. Iu. Osnovni polozhennia kinematyky MAO tsylindrychnykh zubchastykh kolis. (Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk). Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky, Kyiv.

12. Tarhan, D. V., Maiboroda, V. S., Plivak, O. A. & Dobrovolskyi, H. H. (2018), Vplyv kinematyky protsesu mahnitno-abrazyvnoho obrobлення na parametry yakosti robochykh poverkhon mitchykyv iz shvydkorizalnoi stali. Bulletin of Zhytomyr Polytechnic State University. Series: Technical Sciences, 1 (81), 48–53. [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-48-53](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-48-53).

13. Jiaye, X. & Yanhua, Z. (2021), Development of a new magnetic abrasive finishing process with renewable abrasive particles using the circulatory system. Precision Engineering, 72, 417 - 425.

14. Nagdeve, L., Jain, V. K. & Ramkumar, J. (2018), Nanofinishing of freeform/sculptured surfaces: state-of-the-art. Manufacturing Review, 5, 6.

15. Nam, S. S., Kim, J. S. & Mun, S. D. (2020), Magnetic Abrasive Finishing of Beta-Titanium Wire Using Multiple Transfer Movement Method. Applied Sciences. - Volume 10, Issue 19, 6729; doi:<http://dx.doi.org/10.3390/app10196729>.

16. Yin, Ch., Heng, L., Kim, J. S., Kim, M. S. & Mun, S. D. (2019), Development of a New Ecological Magnetic Abrasive Tool for Finishing Bio-Wire Material. Materials, 12, 714; doi:10.3390/ma12050714.

17. Harsh, K. & Vishwas, G. (2018), Magnetorheological nano-finishing of diamagnetic material using permanent magnets tool. Precision Engineering, 51, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.07.003>.

18. Huijun, X. & Yanhua, Z. (2021), Investigation of the application of a magnetic abrasive finishing process using an alternating magnetic field for finishing micro-grooves. Nanotechnology and Precision Engineering. Volume 4, Issue 3. <https://doi.org/10.1063/10.0005015>.

19. Maiboroda, V. S., Slobodyanyuk, I. V., Dzhuliy, D. Yu. & Zelinko, A. I. (2020), Magnitno-abrazivnaya obrabotka ploskikh poverhnostey golovkami na postoyannykh magnitakh. Bulletin of Zhytomyr Polytechnic State University. Series: Technical Sciences, 1 (85), 60–65.

20. Titarenko, O. V., Zubkova, N. V. & Novak, S. O. (2020), Vyznachennia parametriv mahnitno-abrazyvnoho poliruvannya optychnykh polimernykh materialiv dlia chutlyvykh elementiv do zymetriv. The collection of scientific works of the Military Institute of Internal Troops of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, 2 (36), 26–34.

21. Zou, Y., Satou, R., Yamazaki, O. & Xie, H. (2021), Development of a New Finishing Process Combining a Fixed Abrasive Polishing with Magnetic Abrasive Finishing Process. Machines, 9(4), 81. <https://doi.org/10.3390/machines9040081>.

22. Al-Dulaimi, T. (2018), Analysis and Design of a Stationary Magnetic Abrasive Finishing System (Phd – Thesis). University of Waterloo, Waterloo.

23. Geichuk, V. N. & Gavrushkevich, A. Yu. (2014), Kinematika formirovaniya kromok magnitno-abrazivnoy obrabotkoy. Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal. V. 2, 4, 25–32. Retrieved from: <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1355331> / <http://www.indust-engineering.ru/issues/2014/2014-4.pdf>.

24. Geichuk, V. M. & Gavrushkevych, A. Iu. (2014), Mahnitno-abrazyvna obrobka tsylindrychnykh zubchastykh kolis v kiltsevi vanni. All-Ukrainian scientific and technical journal "Industrial hydraulics and pneumatics", 1(43), 90–98.

25. Geichuk, V. N. & Gavrushkevich, A. Yu. (2017), Metodika opredeleniya nagruzok pri magnitno-abrazivnoy obrabotke tsilindricheskiy zubchatykh koles nad koltsevoy vannoy. Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system: Proceedings Scientific publication. Kramatorsk, 39, 23–32.

26. Maiboroda, V. S. (2001), Osnovy stvorennia i vykorystannia poroshkovoho mahnitno-abrazyvnoho instrumentu dlia finishnoi obrobky fasonnykh poverkhon (Dysertatsiia doktora tekhnichnykh nauk). Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky, Kyiv.

27. Geichuk, V. M., Maiboroda, V. S., Gavrushkevych, A. Iu. & Halytskyi, O. O. (2014), UA Patent No.116340. Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (Ukrpatent).

Стаття надійшла 12.08.2021