

УДК 621.922

В.І. Кальченко, д-р техн. наук
В.В. Кальченко, д-р техн. наук
В.І. Венжега, канд. техн. наук
А.В. Кологойда

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТА РЕМОНТУ РОЗПОДІЛЬЧИХ ВАЛІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Розроблено новий спосіб і на його базі нова технологія обробки кулачків розподільчих валів та проведено розрахунок основних параметрів процесу обробки. Запропонована методика ремонту розподільчих валів за допомогою наплавки профілю кулачка з наступною обробкою на верстаті ЧПК в режимі глибокого однопрохідного шліфування.

Вступ

Механізм газорозподілення двигуна повинен забезпечувати своєчасний впуск в циліндри двигуна свіжої порції повітря або запальної суміші і випуск із циліндрів відпрацьованих газів. Виникнення неполадок в механізмі газорозподілення порушує нормальну роботу двигуна, зменшує його потужність і погіршує економічність. Розподільчий вал служить приводом штовхачів клапанів механізму газорозподілення, а також допоміжних механізмів – паливних насосів, масляного насоса і т.д.

В процесі виробництва і ремонту розподільчих валів використовують профільне і фасонне шліфування на копіювальних верстатах та верстатах з ЧПК. До геометричної точності розподільчих валів пред'являють високі вимоги. При обробці опорних шийок допуск діаметра становить до 8 мкм, некруглість та нециліндричність до 5 мкм, биття середньої опорної шийки відносно крайніх опорних шийок до 10 мкм, шорсткість $Ra = 0,32-0,63$. При шліфуванні профілю кулачків відхилення поточного радіуса профілю кулачка не повинно перевищувати 0,05 мм, биття циліндричної частини кулачка – 0,02-0,03 мм, кутове зміщення кулачка відносно шпоночного паза – 1° .

Аналіз досліджень і публікацій

Найбільш широко проблема шліфування складних криволінійних поверхонь, а саме кулачків висвітлена в роботі [1], де розглянуті основні аспекти обробки кулачкових валів: розрахунок подачі, сил різання, розрахунок оптимального радіуса шліфувального круга, оптимальних координат технологічної осі обертання кулачка, проаналізований процес обробки кулачкових валів за допомогою копіра, включаючи динаміку процесу. Слід зазначити, що дана робота присвячена в основному обробці кулачків копіюванням.

Більшість робіт присвячується в тій чи іншій мірі класичному способу обробки кулачків по копіру. Роботи 70-80 х років присвячені саме цьому методу обробки кулачкових валів. Хоча автори і намагаються поліпшити вищезгаданий спосіб: стабілізуючи контурну подачу деталі за допомогою спеціальних пристроїв, обертанні кулачків навколо оптимальної технологічної осі, як у роботі [2], компенсуючи похибку, викликану розмірним зносом круга (роботи [3], [4]), підвищуючи точність формоутворення шляхом зменшення переносимої похибки копіра, виникаючої при його виготовленні на деталі, – але всі ці способи залишаються за своєю сутністю все тою ж обробкою по копіру. Цій обробці притаманні невисока точність формоутворення, мала гнучкість обладнання при переналагодженні, висока коштовність виготовлення копирів при частій зміні номенклатури обробляємих виробів.

Роботи [5], [6] наводять більш сучасні методи обробки кулачкових валів на верстах з ЧПК, що можуть застосовуватись і в одиничному, і в серійному виробництвах. Однак

ці способи передбачають необхідність програмованого руху по двох координатах важких інерційних мас – столу [5] та шліфувальної бабки [6] відповідно. При русі столу чи бабки з перемінною швидкістю в механізмі приводу її руху неминуче виникатимуть великі динамічні навантаження, що негативно впливають на точність.

Найбільш сучасним і в більшій мірі усуваючим недоліки вищезгаданих способів є метод, застосований у верстаті, який запатентований Пермським заводом «Машиностроитель» [7]. Верстат має достатньо жорсткі приводи обертання деталі та качання столу, програмовані ЧПК. Спосіб обробки, застосований у верстаті, забезпечує напрямки сумарного вектора швидкості по дотичній до контуру, що дозволяє на порядок зменшити помилку від обертання деталі та качання столу. В той же час слід відзначити, що застосування коливаючогося реверсивного столу, як і при класичній схемі обробки по копіру, негативно впливає на динаміку системи. При коливанні столу з перемінною швидкістю в механізмі приводу його руху виникатимуть динамічні навантаження, знижуючи точність обробки.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою роботи є підвищення точності і продуктивності обробки кулачків та інших криволінійних деталей за рахунок розробки нового способу і на його базі нової технології шліфування профілю кулачків на верстатах з ЧПК.

В якості прототипу при розробленні нового способу було обрано патент Російської Федерації, заявлений ФДУП Пермській завод «Машиностроитель» [7].

Як вже було зазначено, він має суттєвий недолік, притаманний і верстатам, що працюють за копіром, – при обробці кулачка для повної обробки всього профілю стіл, несучий оброблювану деталь, що коливається навколо своєї осі, двічі змінює напрямок свого руху, реверсуючись в точках профілю деталі з максимальним радіус-вектором. Завдяки цій особливості спосіб має суттєвий недолік: виникнення похибки при обробці, зумовленої наявністю реверсування столу. Двічі зупиняючись по ходу обробки стілкачалку, що має суттєву масу, погіршують динамічні показники процесу – отже, знижується точність обробки.

При розробці нового способу стояла задача підвищити точність і продуктивність обробки кулачків, виключивши рух формоутворення, який вносить похибку, зберігаючи позитивні риси відомих способів.

Виклад основного матеріалу статті

Технічний результат досягається тим, що зі схеми обробки виключається реверсивний стіл, а замість нього застосовується багатопозиційний барабан. На відміну від прототипу, де стіл здійснював коливальний рух навколо своєї осі, барабан обертається навколо своєї осі з постійною швидкістю та в одному напрямку. Напрямок сумарного вектора швидкості обертання деталі і барабану завжди направлений по дотичній до поверхні обробки, що досягається за рахунок нерівномірного обертання самих деталей по заданій програмі від системи ЧПК.

Барабан є багатопозиційним, що дозволяє проводити обробку декількох деталей. Натяг в системі при обробці забезпечується постійним знаходженням в контакті шліфувального круга та двох заготовок.

Обробка кулачків розподільчих валів (рис. 1), встановлених на багатопозиційному столі-барабані, відбувається в наступній послідовності.

Перед обробкою шліфувальному кругу 3 надається подача в радіальному напрямку на врізання. Деталі – кулачкові вали 2, базуються за допомогою центрів на багатопозиційному барабані 1 та отримують обертання з програмуємою кутовою швидкістю від власних сервоприводів.

На рисунку 1 показана початкова позиція обробки першої деталі. Деталь 1 встановлена з умови отримання максимального радіуса кривизни $\rho_k = \max$, причому сумарний вектор швидкості обертання столу і деталі направлений до контуру деталі по дотичній, яка перпендикулярна радіусу кривизни деталі ρ_k та радіусу круга $R_{кр}$. Деталь отримує обертання зі змінною кутовою швидкістю $\omega_2 = var$ навколо своєї осі в напрямку проти годинникової стрілки та одночасно здійснює обертальний рух разом з багатопозиційним барабаном радіусом $R_{б}$, в тому ж напрямку, але з постійною кутовою швидкістю $\omega_1 = const$. Кутові швидкості обертання барабану і деталі задаються по програмі від системи ЧПК.

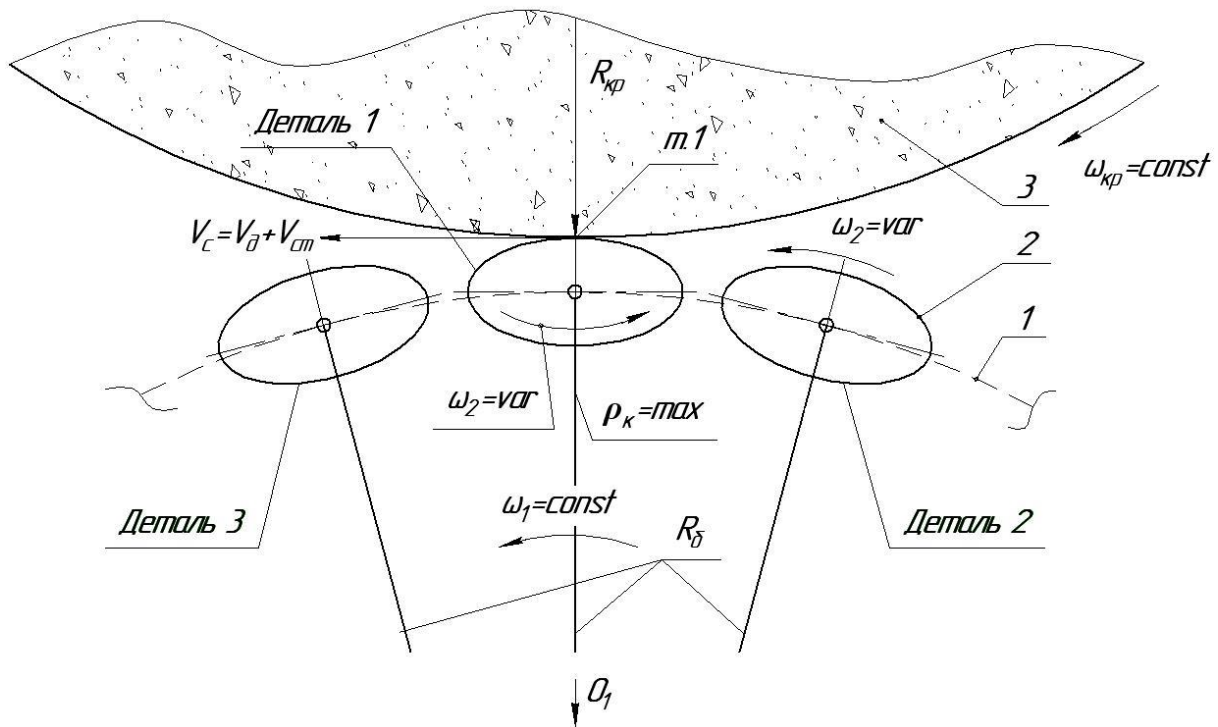


Рис. 1. Початкова позиція обробки першої деталі

На рисунку 2 зображено отримання проміжної точки т. 2 профілю першої деталі.

Завдяки нерівномірній кутовій швидкості обертання деталі при постійній кутовій швидкості барабану досягається необхідний напрямок сумарної швидкості – по нормалі до оброблюваного контуру.

При подальшому обертанні барабану і деталі остання займає крайнє положення, що відповідає точці т. 3₁ (рис. 3) з найменшим значенням радіусу кривизни $\rho_k = \min$. Оскільки барабан обертається постійно і після обробки крайньої точки т. 3₁ деталь виходить з контакту з шліфувальним кругом, то для забезпечення неперервності шліфування (необхідного натягу в системі ВПД (верстат, пристрій, інструмент, деталь), а отже і точності), деталі на барабані розміщені таким чином, щоб в контакті з кругом перебували дві різні деталі. На рис. 3 в одночасному контакті з кругом знаходяться крайня т. 3₁ першої деталі, точка т. 1₂ другої деталі. При подальшому повороті барабану перша деталь виходить із зони обробки, але натяг в системі зберігається, так одночасно починається обробка третьої деталі (т. 2₃). При входженні третьої деталі в зону обробки перша деталь повертається на визначений кут до входження в контакт крайньої точки т. 2₁ профілю кулачка з шліфувальним кругом.

При подальшому обертанні барабану і обертанні деталей з перемінною кутовою швидкістю на деталі обробляються проміжні точки другої чверті кулачка, і деталь вхо-

дить до положення, що відповідає отриманню точки з максимальним радіусом кривизни або мінімальним радіус-вектором кулачка, – точки симетричної т. 1.

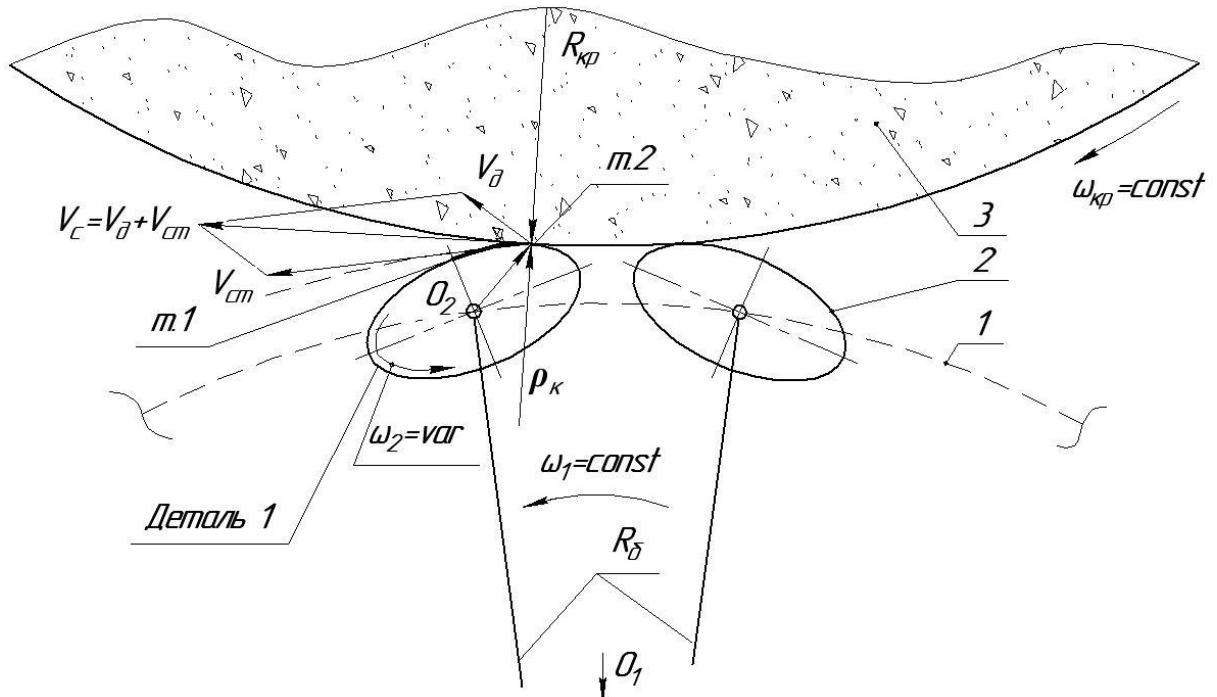


Рис. 2. Обробка проміжної точки контуру деталі

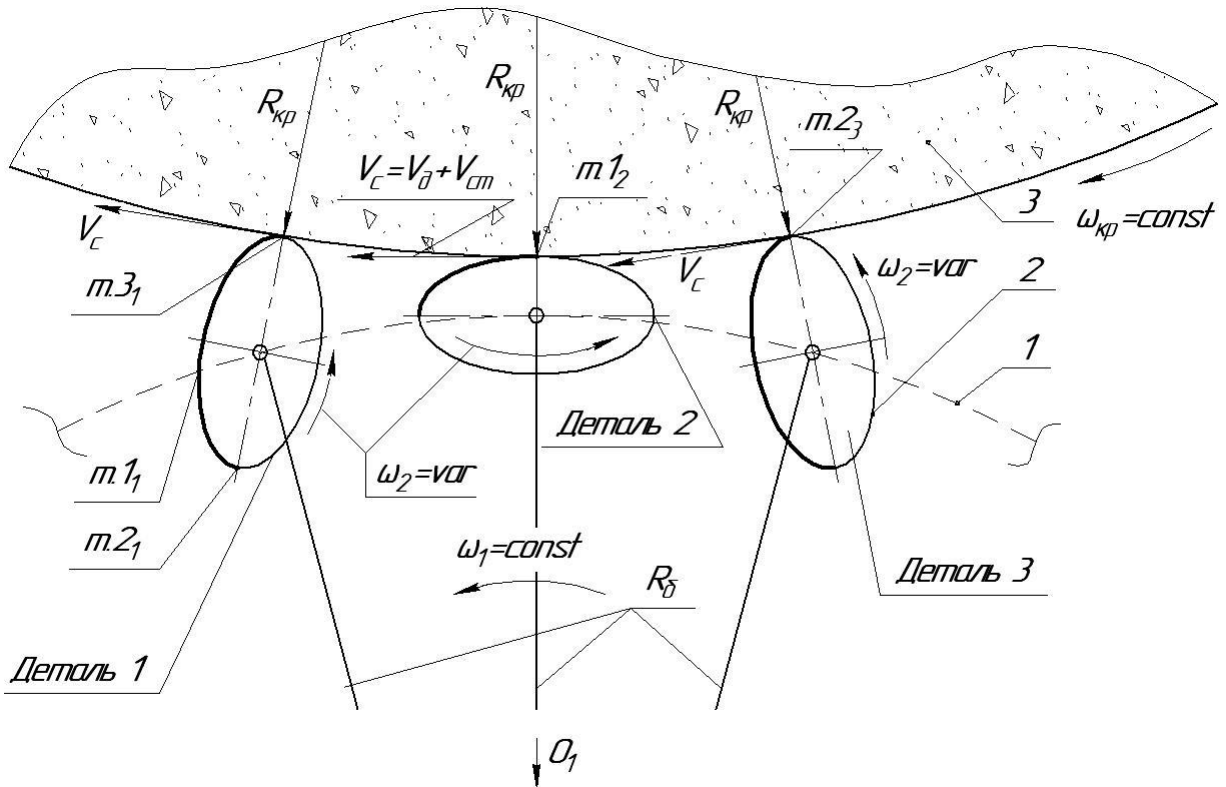


Рис. 3. Крайня точка чверті деталі

При подальшому обертанні барабану до досягнення другої крайньої точки з мінімальним радіусом кривизни обробляються інші 3/4 частини профілю, після чого де-

таль знову виходить з контакту. Таким чином за два оберти барабану обробляються всі деталі, встановлені на барабані.

В представленому способі реверсивний стіл-качалка, який традиційно використовувався на верстатах, призначених для фінішної обробки, і який вносив динамічну складову похибки формоутворення, замінений на барабан, який для покращення динаміки процесу отримує обертання в одному напрямку з постійною швидкістю; отримання необхідного профілю досягається за рахунок нерівномірної кутової швидкості обертання кулачкового валу. Завдяки цим двом рухам також вдається досягнути напрямку сумарного вектора швидкості обертання деталі і столу по дотичній в кожній точці оброблюваного профілю.

Під час обробки фасонних поверхонь велике значення має плавність профілюючого руху, що залежить від величини і характеру зміни прискорення, яке визначається другою похідною від радіус-вектора еквідистанти центра кулачка по часу, і залежить як від задаючої подачі, так і від профілю деталі та інструмента. Різка зміна прискорення супроводжується ударами і призводить до утворення дефектної фасонної поверхні у вигляді огранки та хвилястості. Оптимальне керування задаючою кутовою подачею дозволяє стабілізувати контурну подачу і, як наслідок, інші складові процесу обробки (сили різання, знімаємий припуск, покращити теплові явища під час обробки) (рис. 4).

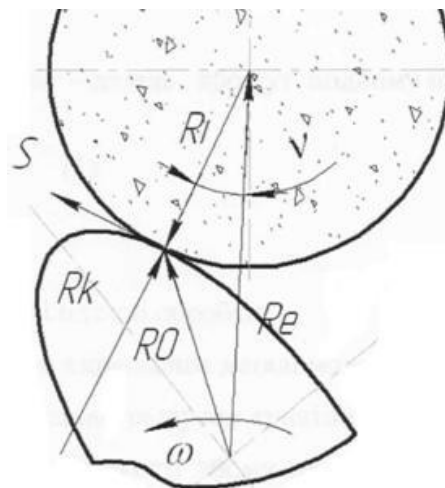


Рис. 4. Схема визначення кутової подачі

Подача під час обробки кулачка визначається з виразу:

$$S = \omega \cdot \frac{l}{1 \mp R_i / R_k} \cdot \sqrt{R_e^2 + \left(\frac{dR_e}{d\alpha} \right)^2}, \quad (1)$$

де R_i – радіус інструменту; R_k – радіус кривизни кулачка; R_e – плинний радіус-вектор еквідистанти; α – кут повороту деталі; \mp – для опуклого та увігнутого контурів.

Кут тиску в парі інструмент-деталь, або кут підйому профілю можна знайти з виразу:

$$\nu(\alpha) = \arctan \left[\frac{l}{R_e(\alpha)} \left(\frac{dR_e(\alpha)}{d\alpha} \right) \right]. \quad (2)$$

Враховуючи рівняння (1) і (2), подачу при обробці кулачка можна записати у вигляді:

$$S = \omega \cdot \frac{l}{(1 \mp R_i / R_k) \cos(\nu)}. \quad (3)$$

Радіус-вектор поверхні в точці обробки R_o дорівнює:

$$\frac{R_e}{\cos(\nu)} = R_o + R_i. \quad (4)$$

Знаючи залежності, відомі з креслення деталі, знайдемо характер зміни кутової подачі в точках з різним радіусом кривизни та залежних від неї технологічних величин – швидкості знімання припуску, товщини зрізаного шару, сил різання.

Для деталі еліптичної форми залежність радіуса кривизни і радіус-вектора поверхні в точці обробки від кута повороту: $R_i = 0,6 \text{ м}$ – початковий радіус інструменту; $b = 0,05 \text{ м}$; $a = 0,03 \text{ м}$ – величини великої та малої осей кулачка.

Залежність радіус-вектора поверхні в точці обробки від кута повороту кулачка

$$R_o(\alpha) = \sqrt{\frac{b^2}{1 - \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) \cdot (\cos(\alpha))^2}} \quad (5)$$

Залежність радіусу кривизни поверхні в точці обробки від кута повороту кулачка

$$R_k(\alpha) = a^2 \cdot b^2 \cdot \left[\frac{R_o(\alpha)^2 \cdot \cos(\alpha)^2}{b^4} + \frac{R_o(\alpha)^2 \cdot \sin(\alpha)^2}{a^4} \right]. \quad (6)$$

Використовуючи рівняння (5) і (6), можна побудувати графіки зміни величин радіус-вектора R_o та радіуса кривизни R_k поверхні кулачка в точці обробки в залежності від кута повороту кулачкового валу (рис. 5).

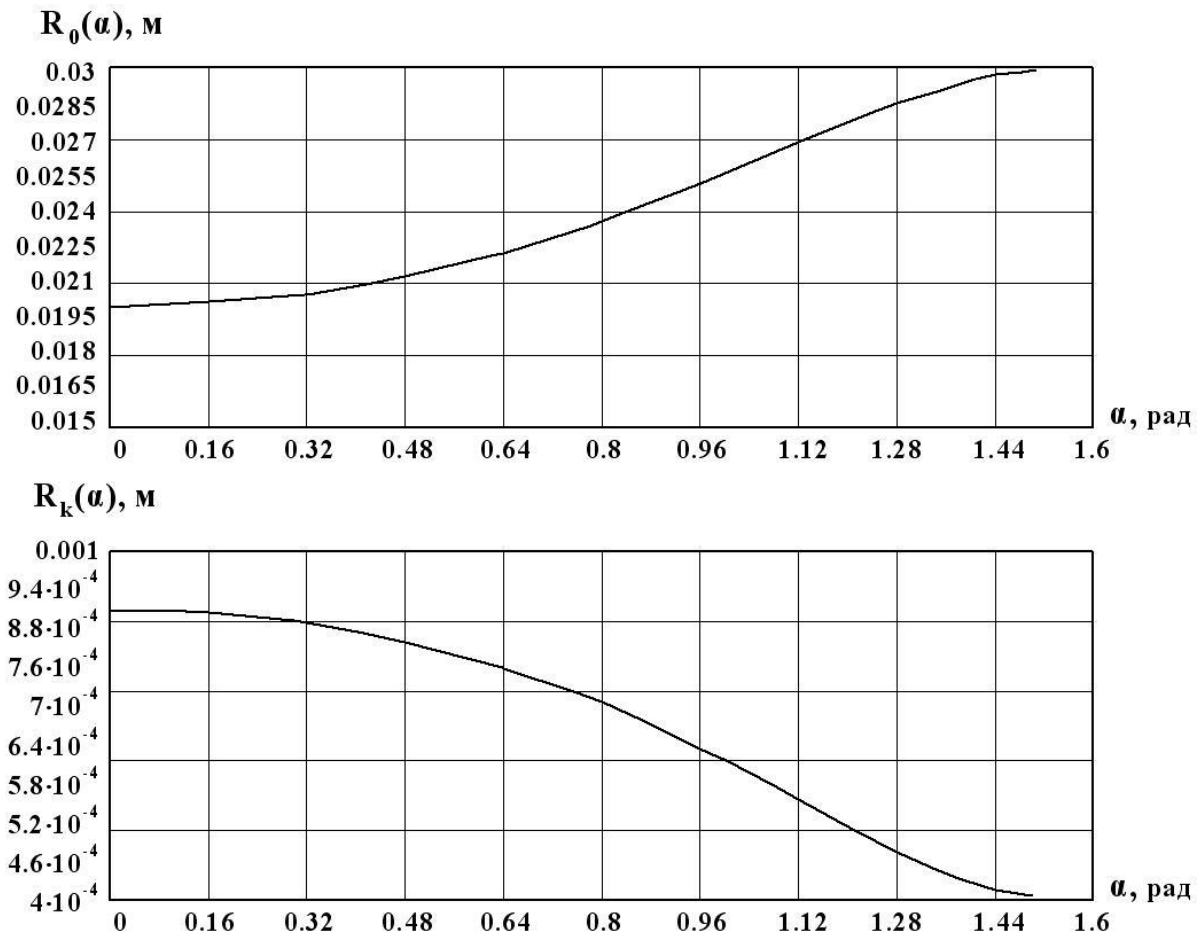


Рис. 5. Графіки зміни величин радіус-вектора R_o та радіуса R_k кривизни поверхні кулачка в точці обробки в залежності від кута повороту кулачкового валу

Залежність радіус-вектора еквідистанти від кута повороту α розраховуємо з виразу (4):

$$R_e(\alpha) = R_o(\alpha) + R_i \quad (7)$$

Кут підйому профілю (кут тиску в парі інструмент-деталь) в залежності від кута повороту деталі розраховуємо з рівняння (2).

Графік зміни величини радіус-вектора $R_e(\alpha)$ еквідистанти побудований за рівнянням (7), зображено на рис. 6. Графік зміни кута підйому профілю від функції кута повороту деталі зображено на рис. 7.

$R_e(\alpha)$, мм

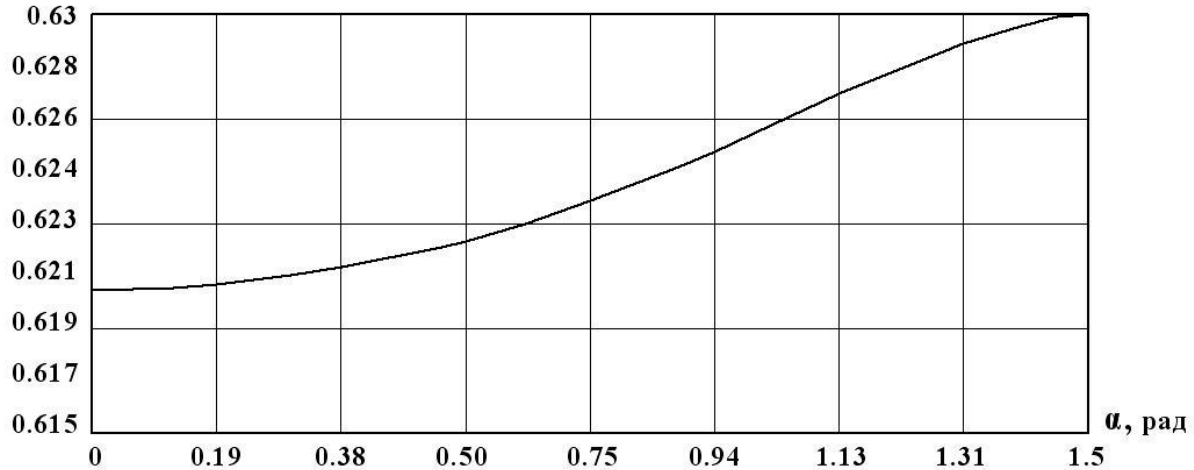


Рис. 6. Графік зміни величини радіус-вектора еквідистанти

$\nu(\alpha)$, рад

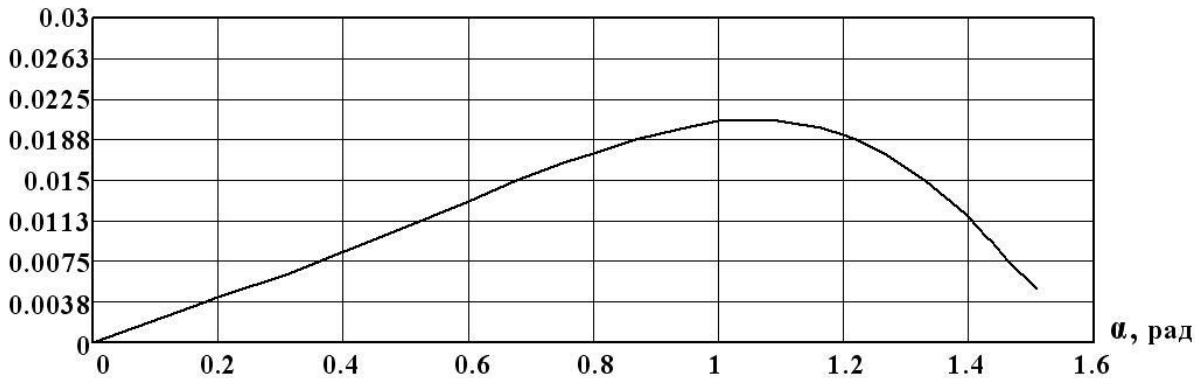


Рис. 7. Графік зміни кута підйому профілю від функції кута повороту

Розраховуємо кутову нерівномірну задаючу подачу, таким чином стабілізуючи контурну подачу кулачка при шліфуванні:

$$\omega(\alpha) = S_n \frac{R_k(\alpha) + R_i}{R_k(\alpha) \cdot (R_i + R_o(\alpha))} \quad (8)$$

де $S_n = 0,03 \text{ м/с}^2$ – нормативна контурна подача.

Графік зміни кутової швидкості від функції кута повороту кулачка зображено на рис. 8.

Розраховану кутову подачу порівнюємо з максимально допустимою, що розраховується з умови забезпечення необхідної шорсткості поверхні:

$$\omega(\alpha) = 16,7 \cdot \left[\frac{R_k(\alpha) + R_i}{R_k(\alpha) \cdot (R_i + R_o(\alpha))} \right] \cdot 10^{\frac{0,40,35}{0,2}}, \quad (9)$$

де $0,4 \text{ мкм}$ – потрібна шорсткість поверхні деталі; $0,35 \text{ мкм}$ – значення параметра шорсткості при $S = 1 \text{ м/хв.}$; $p = 0,2$ – коефіцієнт.

Графік зміни кутової швидкості, максимально допустимої з точки зору отримання необхідної шорсткості, від кута повороту зображено на рис. 9.

$$\omega(\alpha), \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

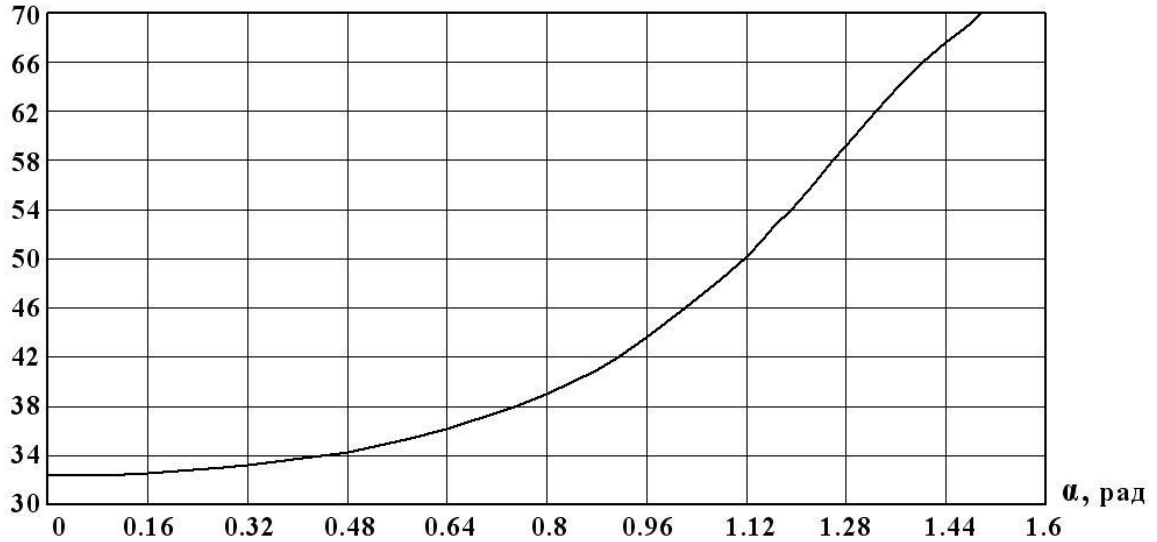


Рис. 8. Графік зміни кутової швидкості від функції кута повороту кулачка

$$\omega(\alpha), \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

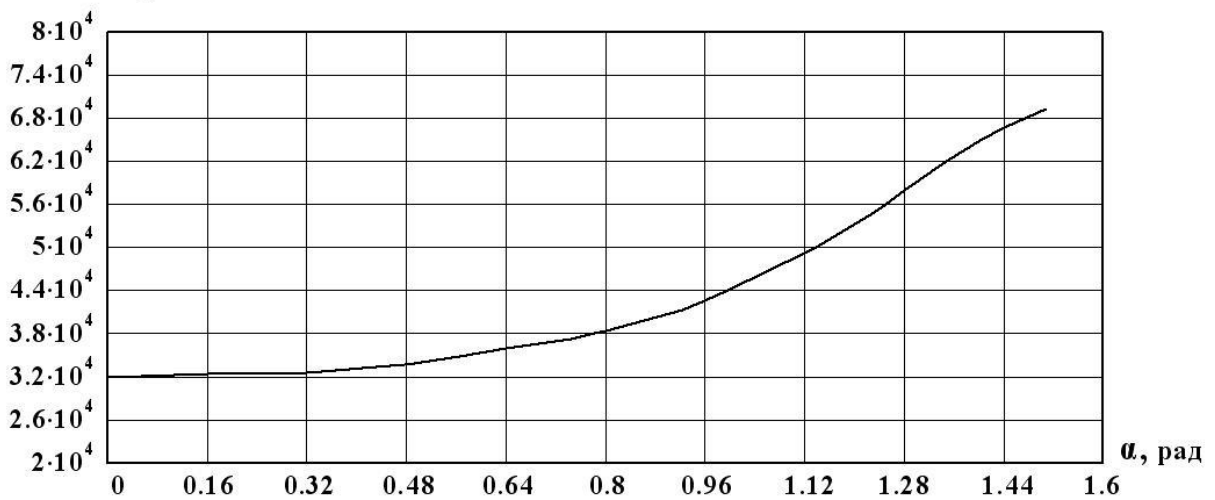


Рис. 9. Графік зміни кутової швидкості, максимально допустимої з точки зору отримання необхідної шорсткості

Розраховуємо кутове прискорення, диференціюючи кутову швидкість:

$$W(\alpha) = \frac{d\omega(\alpha)}{d\alpha}. \quad (10)$$

Побудуємо відповідний графік зміни кутового прискорення деталі в залежності від кута повороту α (рис. 10).

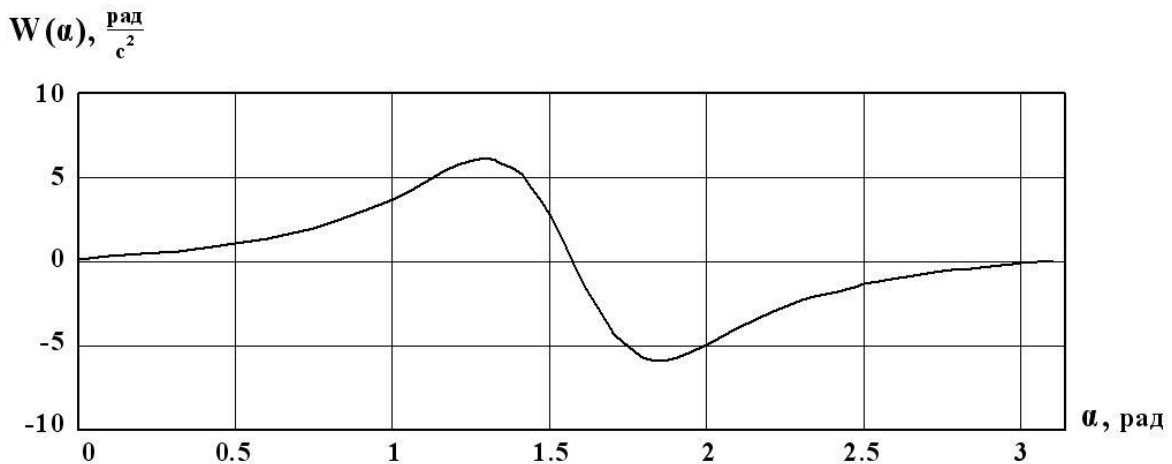


Рис. 10. Графік зміни кутового прискорення деталі

Завдяки нерівномірній кутовій швидкості обертання деталі (задаючої подачі) вдається оптимізувати контурну подачу $S(\alpha)$, стабілізуючи її до рівня нормативної (рис. 11). Таким чином вирівнюються і шар знімаемого припуску, і сили різання.

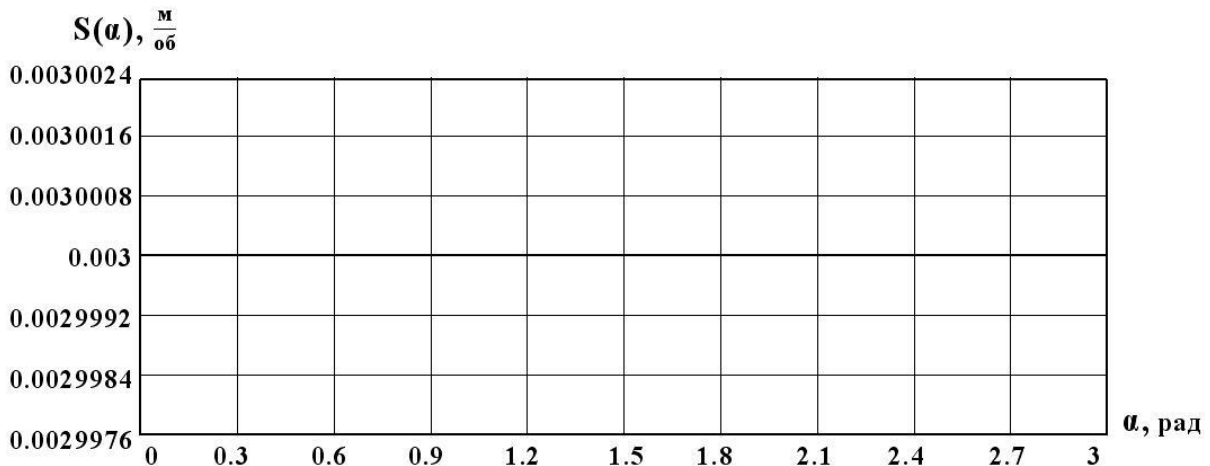


Рис. 11. Стабілізація контурної подачі деталі за рахунок розрахованої нерівномірної кутової подачі

Ремонт розподільчих валів виконується методом наплавки профілю кулачків з наступною обробкою на верстаті з ЧПК, наприклад, ВЗ 208-ФЗ. Обробка виконується методом продольного шліфування, оскільки метод копіювання, описаний вище, де ширина круга дорівнює ширині кулачка, який використовується при обробці нових валів, є не доцільним по причині нерівномірного зносу круга при обробці наплавленого профілю.

Обробка виконується за один прохід вузьким алмазним кругом діаметром 200 мм і висотою 5 мм в режимі глибинного шліфування. Подача шліфувальної бабки виконується в горизонтальній площині за рахунок розташування поточного радіусу кривизни кулачка в цій площині, що досягається підйомом шліфувальної бабки разом з консолю, що забезпечує виключення впливу зносу радіусу круга на точність формоутворення. Обчислення керуючих програм виконується за методикою, наведеною в роботі [8].

Для обробки розроблений новий спосіб і на його базі нова технологія шліфування зі схрещеними осями круга та деталі. Обробка здійснюється в режимі глибинного шліфування за один прохід. Оптимізацію кута повороту наведено в роботі [9].

Радіус-вектор обробленої поверхні описується рівнянням:

$$r_o(u, i, \theta) = A3(p \cdot \theta) \cdot A4(\theta) \cdot A1(-L(\theta)) \cdot A4(\chi) \cdot A3(Z(i)) \cdot A6(u) \cdot A1(R(i)) \cdot \epsilon 4 \quad (11)$$

при виконанні умови:

$$n \cdot \nabla = 0, \quad (12)$$

де $A1 \dots A6$ – матриці перетворення систем координат, що моделюють зсуви та повороти вздовж та навколо осей; i – координата в здовж профілю круга, u – кутова координата; $Z(i)$ – залежність висоти круга від координати на профілі; $R(i)$ – залежність радіуса круга від координати на профілі; χ – кут орієнтації круга; L – міжосьова відстань; p – параметр гвинтового руху круга.

Висновки з даного дослідження

Розроблено новий спосіб і на його базі нова технологія обробки кулачків розподільчих валів. Нова технологія дозволить значно підвищити продуктивність та точність обробки складних криволінійних поверхонь. В ході роботи було проведено розрахунок основних параметрів процесу обробки: зміни кутової швидкості та прискорення деталі, зміни радіус-вектору еквідистанти центру деталі.

Розроблена методика ремонту розподільчих валів за допомогою наплавки профілю кулачка з наступним шліфуванням на верстаті ЧПК. Обробка здійснюється в режимі глибинного шліфування за один прохід.

Список літературних джерел

1. Кулик В.К. и др. Прогрессивные процессы обработки фасонных поверхностей. – К.: «Техника», 1987, 176 с., с ил.
2. Кальченко В.И. Шлифование криволинейных поверхностей крупногабаритных деталей. – М., «Машиностроение», 1979, 160 с., с ил.
3. Авторское свидетельство СССР №808251, кл. В24В 19/8 – Ю.В. Петраков. Устройство для шлифования некруглой детали.
4. Авторское свидетельство СССР №619326, кл. В24В 17/02, 1978 – Кулик В.К., Данько Л.В., Иотов В.В. Устройство для обработки некруглых деталей.
5. Авторское свидетельство СССР №656813, кл. В24В 17/10, 1980 – Ю.С. Рейбах, В.Г. Башмаков, М.А. Водяницкая, В.А. Ерохин. Вертикальный шлифовальный станок с числовым программным управлением.
6. Пасов Г.В., Кальченко В.В. та ін. Обчислення керуючих координат шліфувального круга при різних схемах його руху. //Вісник ЧДТУ, 2001, №13. – С. 73-77.
7. Лурье Г.Б., Комиссаржевская В.Н. Шлифовальные станки и их наладка. Ученик для средних проф.-технических училищ. Изд. 3-е, дополненное и переработанное. М.: «Высшая школа», 1976. 415 с. с ил.
8. Кальченко В.І., Пасов В.Г. Обробка фасонних поверхонь на верстаті моделі ВЗ-208-ФЗ. //Вісник ЧДТУ, 2002, №15. – С. 64-68.
9. Кальченко В.І., Кальченко В.В., Дмитренко М.А. Глибинне кругле шліфування зі схрещеними осями деталі і круга. //Вісник ЧДТУ, 2009, №37. – С. 64-72.