

Рудик А.В.

Чернігівський національний технологічний університет

Венжега В.І.

Чернігівський національний технологічний університет

ЕФЕКТИВНЕ ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ ЗА РАХУНОК КЕРУВАННЯ КОНТАКТОМ

У статті запропоновано нові принципи підвищення ефективності процесу та способи шліфування як ступінчастих, так і фасонних поверхонь обертання торцем абразивного інструмента чашкової форми. Зазначені способи дають змогу підвищити продуктивність та якість оброблених поверхонь за раціонального завантаження круга вздовж плями контакту. Зростання ефективності можливо досягти керуванням міжосьовою відстанню, вибором кута правки торця. Указане дозволяє збільшити розміри контакту і можливої подачі на рядок. Поліпшення якості зумовлене виділенням захищеної базової формотворної точки та появою шорсткості у вигляді сітки. Нові способи мають кращу динаміку та дозволяють заощаджувати енергію завдяки коротшому термінові машинної обробки й використанню менших інструментів. У статті запропоновано вибір параметрів налаштування верстата із числовим програмним керуванням для забезпечення їхніх потрібних вихідних значень.

Ключові слова: точність, продуктивність, якість, ефективність, формоутворення, лінія контакту, кривизна поверхні, міжосьова відстань, профіль деталі, керування контактом.

Постановка проблеми. Підвищення продуктивності для покращення якості та енергозбереження є актуальною проблемою машинобудування, яка може бути вирішена за допомогою верстатів із числовим програмним керуванням (далі – ЧПК) у разі використання торцевого шліфування заправленим чашковим кругом. Це дає змогу керувати геометрією контакту за рахунок зміни відстані H між осями обертання деталі й інструмента.

Як відомо [1], підвищення продуктивності шліфування $Q = \iint V_n \cdot dS$ визначається збільшенням розмірів контакту S між інструментом та деталлю і швидкості V_n підведення припуску за рахунок відносного руху в напрямку нормалі (нормальної швидкості) на кожній елементарній ділянці у його межах. Рівняння для нормальної відносної швидкості було отримано автором та наведено у попередній роботі [8].

Для нових способів доведено [4; 5], що розміри контакту в Ейлеревих перетинах за наближення їхніх радіусів кривизни є значно більшими, а підведення припуску є більш раціональним [9].

Покращення якості забезпечують розподіленням функцій вздовж профілю інструмента з виділенням чорнової, захищеної чистової та фінішної ділянок стосовно наближення до місця очікуваного контакту номінальних поверхонь – базової точки. За рахунок наближення радіусів кривизни у напрямі осьової подачі можливо збільшити кіль-

кість проходів. Вектор швидкості різання вздовж контакту лежить під різними кутами до осі виробу, зумовлює шорсткість обробленої поверхні у вигляді сітки. Існують зустрічна та попутна схеми обробки інструментом, що обертається. Для попутної схеми характерна менша теплова напруженість, тому спостерігається краща стійкість, особливо в разі зменшення ширини контакту біля базової точки.

Динаміка процесу покращується за рахунок раціонального вектора коливачень, що лежить під кутом до оброблюваної поверхні, а зменшення маси інструмента та зростання розмірів контакту приводить до збільшення частоти власних коливань і величини демпфування. Енергозбереження можливо пояснити меншими розмірами інструмента і верстата, спрощенням приводу, зменшенням витрат машинного часу, викликаного збільшенням кількості проходів за скорочення холостого ходу. Крім того, впливає раціональне завантаження інструмента на рівень різальної здатності, що викликано характером залежності V_n [9].

Основні переваги нових способів обробки наведено на рис. 1.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемою ефективного формоутворення поверхонь, зокрема обертання, за керування взаємною орієнтацією, зазвичай кутовою, займалися ряд вітчизняних учених, серед яких П.Р. Родін, Н.С. Равська, В.І. Кальченко [2; 3] та інші. Крім

того, спеціалістами фірми «ЮНКЕР» (Німеччина) було винайдено спосіб та ефективне обладнання для обробки ступінчастих валів [10].

ПЕРЕВАГИ НОВИХ СПОСОБІВ ШЛІФУВАННЯ			
Підвищення продуктивності	Покращення якості	Енергозбереження	
1. збільшення розмірів плями контакту.	1. розподілення функцій по ділянках.	МОЖЛИВІСТЬ використання менших верстату та кругу	
2. збільшення хвилинної подачі.	2. шорсткість у вигляді сітки.		спрощення приводу
3. раціональне підведення припуску	3. краща динаміка та теплова напруженість		зменшення часу обробки

Рис. 1. Переваги нових способів обробки порівняно із традиційними

У наукових роботах, присвячених порушеній темі, вказувалося, що кутове керування орієнтацією інструмента здатне значно підвищити продуктивність та якість обробки (дозволяє інструментом простої геометричної форми обробляти різноманітні поверхні). Однак на ефективність останньої значною мірою впливають форма круга та кінематика формоутворення. Ці питання в сучасній науковій літературі лише частково обґрунтовані, тому їх розв'язання потребує створення нового або значного удосконалення наявного обладнання.

Постановка завдання. Авторами статті було проаналізовано новий науковий підхід до підвищення ефективності процесу шліфування за рахунок керування міжосьовою відстанню [2; 3], що можливо використати для обробки як фасонних поверхонь обертання, так і ступінчастих. Запропоновано нові способи, захищені патентами України [6; 7]. Згаданий принцип є конкурентоспроможним порівняно з наявними, його можливо реалізувати на вітчизняному обладнанні у разі проведення незначної модернізації.

Метою статті є підвищення ефективності обробки поверхонь обертання за рахунок керування контактом, зумовленим зміною міжосьовою відстані. Слід теоретично дослідити нові високо-ефективні способи шліфування поверхонь обертання торцем абразивного інструмента чашкової форми та визначити вплив технологічних розмірів налашки на вихідні параметри точності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Модель обробки запровадним конічним торцем на заточувальному верстаті із ЧПК мод. В3208Ф3 [4; 5], де забезпечується обертання деталі й інструмента

за відносних вертикальної, поздовжньої та поперечної подач, зображена на Рис. 2.

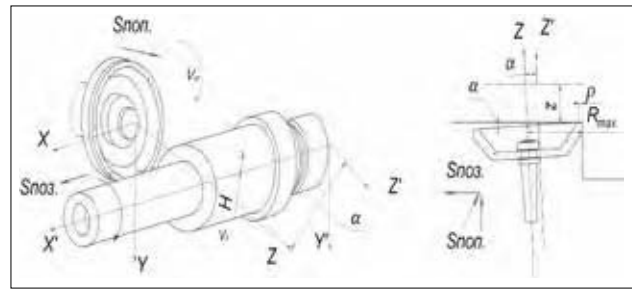


Рис. 2. Схема ефективного обробки ступінчастих валів торцем чашкового круга у процесі керування геометриєю контакту за рахунок зміни відстані H між осями

Для точного формоутворення ділянки поверхні деталі слід у точці контакту витримати рівність нахилу дотичних, відповідність діаметральних розмірів та накласти умови на радіуси кривизни деталі в осьовій площині й інструмента. Під час обробки впалої ділянки профілю деталі у напрямку осьової подачі такими умовами є менші значення радіусу кривизни інструмента, що наближаються до необхідного значення відповідної ділянки заготовки. Ці вимоги можливо забезпечити раціональним вибором діаметральних розмірів круга, зміною значень кута α , що характеризує конус запровадненого торця, відносних вертикальної, поздовжньої та поперечної подач. За допомогою матриць перетворення систем координат (далі – СК) [1] побудовано [4; 5; 6; 8] математичні моделі поверхні круга та формоутворення на верстаті деталі з урахуванням значень можливого керування наявними подачами.

Формоутворення фрагмента поверхні на верстаті [1] можливо записати матричним рівнянням, враховуючи послідовні переходи між його ланками до системи координат деталі. Отримане рівняння має такий вигляд:

$$\vec{r}_{di}(\phi, z, x, \theta, \rho) = A^4(\phi) \cdot A^3(z) \cdot A^1(x) \cdot A^5(-\alpha) \cdot A^2(H) \cdot \vec{r}(\theta, \rho), \quad (1)$$

де $\vec{r}(\theta, \rho) = A^6(\theta) \cdot A^1(R_{max}) \cdot A^5(\alpha) \cdot A^1(-\rho) \cdot \vec{e}^4$ – радіус вектора торцевої конічної поверхні круга, $A^1(q) \dots A^6(q)$ – матриці 4×4 перетворення СК, q – деяка узагальнена координата; θ, ρ – криволінійні координати торцевої конічної поверхні інструмента, які відповідають за зміну радіального розміру відповідно до параметра ρ , що спрямований вздовж твірної конічної поверхні торця від найбільшого радіусу та кутового положення навколо осі інструмента; α – кутова орієнтація інструмента, який встановлений на колоні верстата і в

такому положенні проходить правку; R_{max} – максимальний радіальний розмір круга; z, x – координати, які відповідають за вертикальне та позовжне переміщення.

Указане рівняння дозволяє диференціюванням знайти як орт нормалі [1], так і відносну швидкість у СК інструмента, а також перенести її до СК деталі. Вперше у явному, функціональному вигляді отримано [5; 8] рівняння для знаходження швидкості підведення припуску по ділянках контакту в напрямку нормалі до поверхні інструмента, яке після перетворень має такий вигляд (Рис. 3):

$$V_n(\rho, \theta, H, z, s_r) = \omega \cdot \left\{ \left[H \cdot \sin^2 \alpha + \frac{\rho}{2} \cdot \sin 2\alpha + s_r \right] \cdot \cos \theta + \left[R_{max} \cdot \cos^2 \alpha - \rho \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha \right] \cdot \sin \theta + \left[H \cdot \cos^2 \alpha - \frac{\rho}{2} \cdot \sin 2\alpha \right] \right\} \quad (2)$$

де $\omega = \frac{d\phi}{dt}$ – кутова швидкість; $S_r = \frac{S_0}{2\pi}$ – параметр гвинтового руху.

Для зручності у рівнянні (2) позначимо вирази у квадратних дужках при косинусі, синусі та вільні від кута θ через

$$\begin{aligned} CO(H, \rho) &= H \cdot \sin^2 \alpha + \frac{\rho}{2} \cdot \sin 2\alpha + s_r; \\ SI(z, \rho) &= R_{max} \cdot \cos^2 \alpha - \rho \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha; \\ IO(H, \rho) &= H \cdot \cos^2 \alpha - \frac{\rho}{2} \cdot \sin 2\alpha. \end{aligned}$$

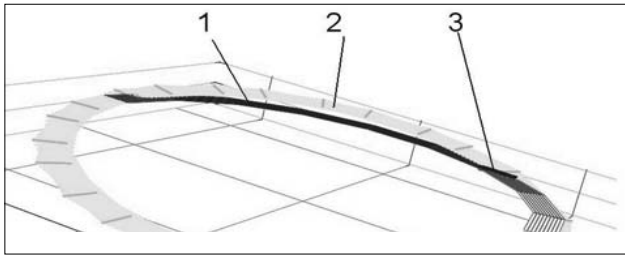


Рис. 3. Епюра навантажень V_n , викликаних підведенням припуску до інструмента

На Рис. 3 цифрами позначено: 1 – поверхня відліку, 2 – епюра зміни навантажень на поверхню торця V_n , 3 – характеристика $V_n = 0$.

Проведений аналіз рівняння зв'язку $\theta(\rho)$ (Рис. 3) доводить раціональний характер зміни навантажень вздовж контакту для нових способів, порівняно з відомими [5; 8]. Крім того, методика дозволяє враховувати вплив подач, чим переважно нехтують.

Рівняння зв'язку $\theta(\rho)$ між параметрами поверхні інструмента визначає місце дотику номінальних поверхонь – їхню лінію контакту $V_n = 0$.

З урахуванням прийнятих позначень її можливо записати, використовуючи таке тригонометричне рівняння:

$$\theta(\rho, H, z) = \arccos \frac{IO(H, \rho)}{\sqrt{(CO(H, \rho))^2 + (SI(z, \rho))^2}} + \operatorname{arctg} \frac{SI(z, \rho)}{ICO(H, \rho)} \quad (3)$$

Диференціювання лінії контакту за радіальним параметром ρ відповідає вектору $DE(\rho)$ дотичної. Знайдемо похідні рівняння зв'язку $\theta\rho$, θH від радіального параметра конічної поверхні ρ та від міжосьової відстані H , які з урахуванням позначень можливо записати, використовуючи допоміжну функцію $C(\rho, H, z)$ (Рис. 4):

$$\theta_\rho = \frac{\partial \theta}{\partial \rho} = -H \cdot \cos \alpha \cdot C(\rho, H); \quad (4)$$

$$\theta_H = \frac{\partial \theta}{\partial H} = -SI(\rho, z) \cdot C(\rho, H);$$

$$C(\rho, H, z) = \frac{SI(\rho, z) \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cdot \sqrt{(SI(\rho, z))^2 - H^2 \cdot \cos 2\alpha}}{(SI(\rho, z))^2 + H^2 \cdot \sin^4 \alpha} \cdot \sqrt{(SI(\rho, z))^2 - H^2 \cdot \cos 2\alpha} \quad (5)$$

Рис. 4. Локальна геометрія контакту біля базової точки та схема до визначення кривизни конічної поверхні торця (отримані методом розрахунку в пакеті програм MathCAD)

Надалі для спрощеного вираження й аналізу зручніше буде користуватись позначеннями $\theta(\rho)$ та $\theta\rho$, θH , записаними у вигляді лінійного полінома, де коефіцієнти знаходять, мінімізуючи похибку заміни [5; 11]. За допомогою розрахунків доведено, що навіть за їх регулювання у широкому діапазоні така заміна може бути прийнятною з погляду точності обробки.

Знайдемо радіус кривизни фрагмента профілю.

Відомо [11], що для довільної гладкої поверхні, біля деякої (базової) точки, кривизну K_χ нормального перерізу визначають згідно з теоремою Ейлера:

$$K_\chi = K_1 \cdot \cos^2 \chi + K_2 \cdot \sin^2 \chi; \quad (6)$$

де χ – кут орієнтації навколо головної нормалі між ейлеревим та головним перерізами (Рис. 4); K_1, K_2 – головні нормальні кривизни, причому для конічної поверхні з кутом конусу α вони, відповідно, дорівнюють:

$$K_1 = 0, \quad K_2 = \frac{\sin \alpha}{[R_{max} - \rho \cdot \cos \alpha]} = \frac{\sin \alpha}{R_\rho}$$

Таким чином, кривизну конічної поверхні торця інструмента у площині контакту визначають:

$$K_\chi = \frac{\sin \alpha}{R_\rho} \cdot \sin^2 \chi; \quad (7)$$

У наведеному рівнянні невідомим є кут χ між характеристикою та твірною конічної поверхні,

який відповідає орієнтації навколо головної нормалі. Відомо [14], як визначають косинус кута χ між двома напрямками довільних кривих поверхні. Для конічної поверхні інструмента такими напрямками є радіальна твірна (перший) та дотична до характеристики (другий). Використовуючи коефіцієнти квадратичної форми [3], знаходять радіус кривизни фрагмента інструмента в нормальній ейлеревій площині, дотичній до характеристики, що утворює ділянку профілю деталі.

Однак нормальний переріз, який проходить через характеристику, є повернутим на кут ζ навколо головної нормалі деталі щодо її осьової площини. Тому кривизну утвореної ділянки профілю деталі можемо знайти за теоремою Ейлера [3]:

$$K_{\text{проф}} = \frac{K_{\chi} - K_{\text{об}} \cdot \sin^2 \zeta}{\cos^2 \zeta} \quad (8)$$

Головні ейлереві перетини деталі (Рис. 5) як поверхні обертання проходять через її вісь, а та, відповідно, через вектори нормалі та швидкості $\vec{V}_{\text{oi}}(H, z)$ кругової подачі. Косинус кута ζ між ними визначають через їх скалярний добуток:

$$\cos \zeta(H, z) = \frac{\vec{D}_E \cdot \vec{V}_{\text{oi}}}{|\vec{D}_E| \cdot |\vec{V}_{\text{oi}}|} \quad (9)$$

де довжину векторів дотичної та кругової подачі знаходять таким чином:

$$|\vec{D}_E(H, z)| = \sqrt{1 + (\theta' \cdot R_{\sigma})^2} = \frac{1}{\cos \chi} ; \quad (10)$$

$$|\vec{V}(H, z)| = \omega \cdot \vec{r}_{\sigma}(H, z) \times \vec{i}$$

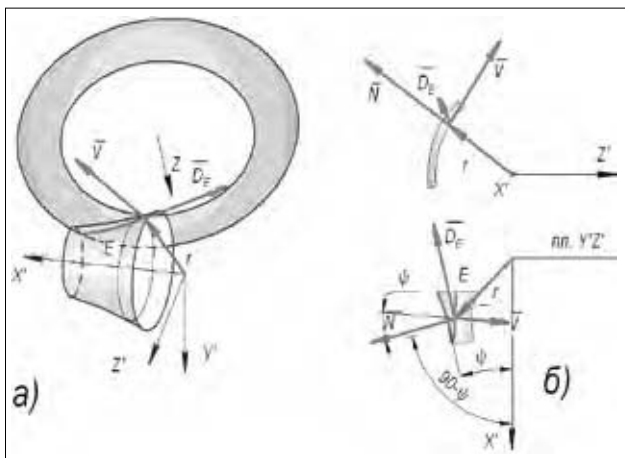


Рис. 5. Схема для знаходження кута нахилу та кривизни ділянки профілю деталі:
а) розташування векторів \vec{D}_E, \vec{V} , дотичних до характеристики E та напрямної деталі;
б) визначення нормалі \vec{N} до поверхні деталі та кута ψ нахилу ділянки профілю

Визначимо вплив зміни розміру між осями H на діаметральний.

Знайдемо повний диференціал виразу, після інтегрування якого за період зміни міжосьової відстані H у межах $[H_0, H_1]$ можливо визначити кривизну K_2 та характер зміни профілю обробленої поверхні.

Кут нахилу ψ ділянки профілю, що утворюється до осі деталі, визначають таким чином:

$$\cos(90^\circ - \psi) = \sin \psi = \vec{n} \cdot \vec{i} \approx \psi,$$

або

$$\sin \psi = \frac{\vec{D}_E \times \vec{V}_{\text{oi}}}{|\vec{D}_E| \cdot |\vec{V}_{\text{oi}}|} \cdot \vec{i} \quad (11)$$

Тут векторний добуток визначає орт нормалі до площини, дотичної до фрагмента поверхні деталі.

Ефективну обробку ступінчастих циліндричних поверхонь валів також можливо проводити, використовуючи керування міжосьовою висотою (отримано патент України на спосіб шліфування [6]).

Круг працює у режимі глибинного шліфування, яке забезпечує значні розміри контакту та завантаження його профілю. Таким чином, за один робочий хід можливо проводити багатопрхідну обробку, як це, наприклад, здійснено на верстаті «Quickpoint 1002» E. Junker [10; 11].

Таким же чином виділено формотворну ділянку інструмента (Рис. 6).

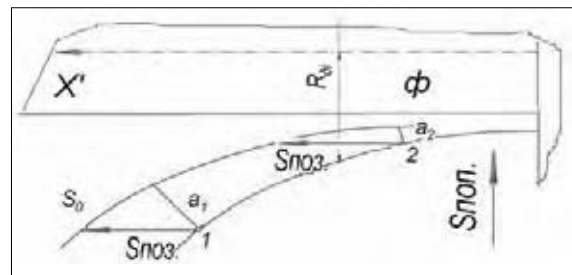


Рис. 6. Зменшення товщини зрізів a_1 та a_2 вздовж профілю круга у бік формотворної точки Φ між сусідніми поверхнями різання для утворення фрагмента деталі

Профіль деталі отримують комбінацією подач: радіальної для обробки фасонного профілю або торця та поздовжньої для циліндричного ступеня. Для кожного ступеня, торці яких спрямовані в один бік, послідовно проводять урізне та поздовжнє глибинне шліфування. Під час обробки одного ступеня, в міру наближення до нього, для збільшення радіуса кривизни міжосьову відстань зменшують. Таким чином можливо обробляти вали з однаковим напрямком ступенів.

Для обробки протилежно спрямованих торців ступенів вісь шліфувального круга слід дзеркально повернути щодо площини обертання деталі.

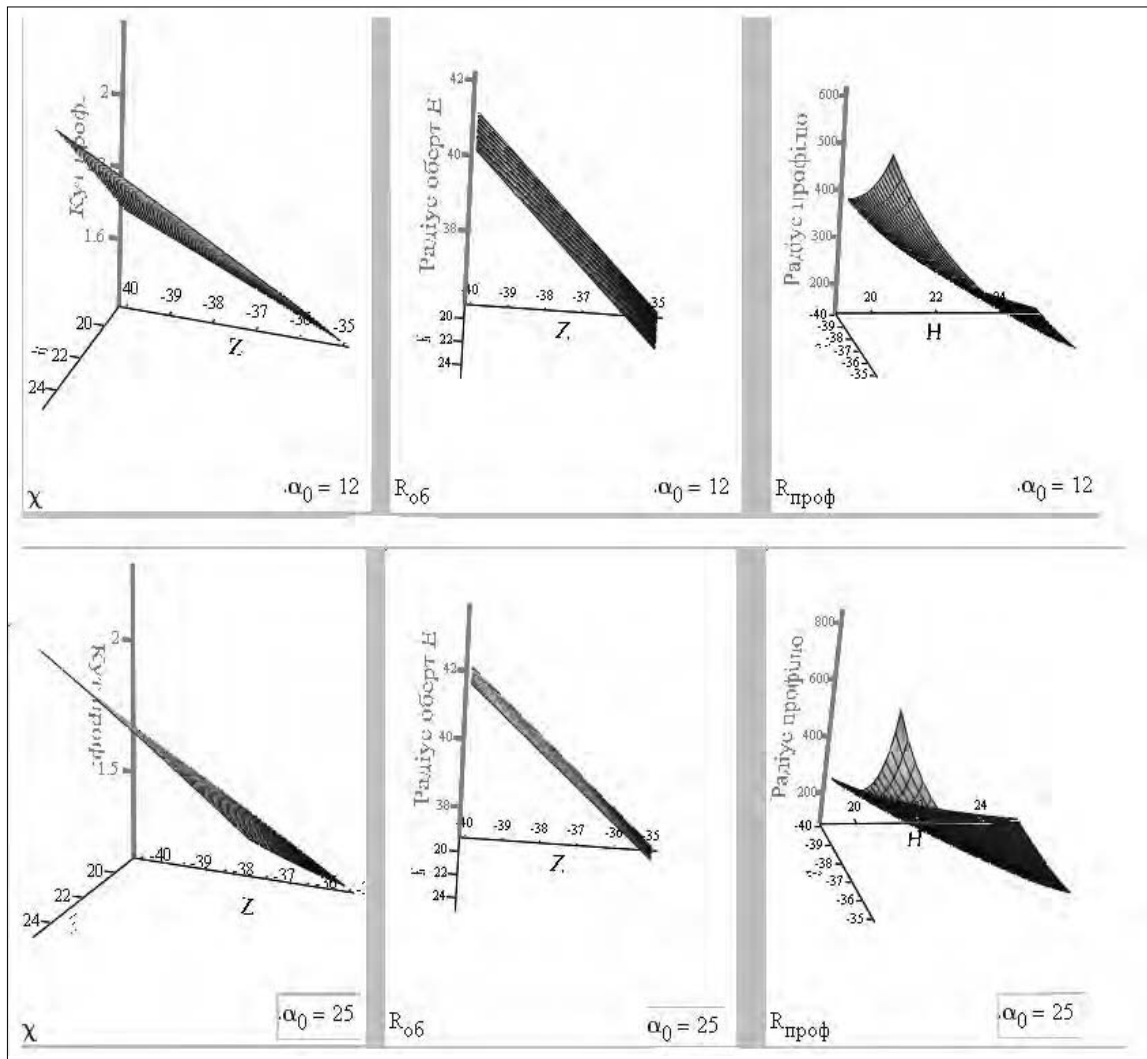


Рис. 7. Зміна профілю заготовки за шириною рядка при кутах правки круга $\alpha = 12^\circ$ та $\alpha = 25^\circ$ залежно від відстаней міжосьової H та z

Режими шліфування визначають аналогічно до урізних методів згідно з відомою методикою [9]. Вочевидь доцільно, як це виконують на верстаті «Quickpoint» фірми «Junker maschinen», проводити швидке обертання деталі для збільшення хвилинної подачі. Якість торців ступенів, як і під час шліфування тарілчастими кругами, виходить кращою, без припалів, порівняно з обробкою торцем круга.

Висновки. Отримана система рівнянь та робочих програм дають змогу з урахуванням усіх кінематичних складників визначити режимні параметри та товщину зрізів для навантаження інструмента до рівня, який визначається різальною здатністю.

Матеріали теоретичних досліджень, розрахунків та їх порівняння доводять можливість зна-

чного збільшення ефективності обробки шліфуванням поверхонь обертання, спрямованого на конус торцем круга.

Завдання вибору всіх потрібних параметрів оптимізації χ , $R_{об}$, $R_{проф}$ у межах рядка є багатоваріантним, а точність дотримання факторів (H , Z , α , D) забезпечується верстатом і вибором інструмента. Слід зробити раціональний вибір діаметрального розміру інструмента та кута його правки α з урахуванням заданих розмірів деталі.

Усі залежності параметрів оптимізації є взаємопов'язаними. Так забезпечується широкий діапазон їх регулювання.

Результати роботи можуть бути впровадженими на наявному обладнанні після незначної модернізації.

Список літератури:

1. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. Москва, 1986, 336 с.
2. Кальченко В.И. Научные основы шлифования криволинейных поверхностей с управляемой ориентацией абразивного инструмента: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01. Харьков, 1994. 329 с.
3. Равська Н.С., Родін П.Р., Ніколаєнко Т.П., Мельничук П.П. Основи формування поверхонь під час механічної обробки. Житомир, 2000, 163 с.
4. Рудик А.В., Рудик В.А. Формування поверхонь обертання торцем круга чашкової форми. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2016. № 1(56). С. 77–83.
5. Пат. 117066 Україна МПК В24В5/04. Спосіб шліфування ступінчастих поверхонь обертання кінчними поверхнями абразивного інструмента. Заявл. № u201700546 В24В 5/04. Пріоритет від 20.01.2017.
6. Пат. № 92147 Україна МПК В24В5/04. Спосіб шліфування впалих поверхонь обертання кінчною поверхнею торця абразивного інструмента. Заявл. № u201310754 В24В 5/04. Пріоритет від 06.09.2013.
7. Рудик А.В., Венжега В.І. Продуктивність високоефективного поздовжнього та глибинного шліфування поверхонь обертання периферією та торцем орієнтованим абразивним інструментом. Вісник Чернігівського національного технологічного університету. 2014. № 72. С. 76–80.
9. Рудик А.В., Следнікова О.С., Подзолкіна А.П., Куций О.Л. Вибір режимів ефективного шліфування поверхонь обертання. Вісник Чернігівського національного технологічного університету. 2016. № 4(6). С. 62–70.
10. Quickpoint. Все в одном закреплении: Erwin Junker: Maschinenfabrik GmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. Nordrash, 2006. 12 p.
11. Рудик А.В., Пасов Г.В., Венжега В.І., Рудик В.А. Ефективне шліфування ступінчастих поверхонь на верстаті з ЧПК моделі В3208Ф3. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали VII міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 24–26 квітня 2017 р.). Чернігів, 2017. С. 60–62.
12. Рудик А.В., Венжега В.І., Пасов Г.В. Дослідження теплової напруженості обробки торцевих поверхонь на верстаті 3342 АДО. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 26–29 квітня 2016 р.). Чернігів, 2016. С. 60–62.
13. Рудик А.В., Рудик В.А. Ефективне формування поверхонь обертання торцем круга. Технічні науки та технології. 2017. № 4(10). С. 33–43.
14. Корн М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва, 1985. 720 с.

**ЭФФЕКТИВНОЕ ШЛИФОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ
ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ КОНТАКТОМ**

В статье предложены новые принципы повышения эффективности процесса и способы шлифования как ступенчатых, так и фасонных поверхностей вращения запрограммированным на конус торцом абразивного инструмента чашечной формы. Указанные способы позволяют повысить производительность и качество обработанных поверхностей при рациональной загрузке круга вдоль пятна контакта. Повышения эффективности возможно достигнуть управлением межосевым расстоянием, выбором угла правки торца, что позволяет увеличить размеры контакта и возможную подачу на строку. Улучшение качества обусловлено выделением защищенной базовой формообразующей точки и появлением шероховатости в виде сетки. Новые способы имеют лучшую динамику и позволяют экономить энергию вследствие меньшего времени машинной обработки и использования менее габаритных инструментов и станка. В статье предоставлен выбор зависимостей параметров настройки станка с числовым программным управлением с целью обеспечения их необходимых выходных значений.

Ключевые слова: *точность, производительность, качество, эффективность, формообразование, линия контакта, кривизна поверхности, междуосевое расстояние, профиль детали, управление контактом.*

EFFECTIVE GRINDING OF ROTATION SURFACES BY THE CONTACT CONTROL

Having considered the proposals for new ways of grinding as a shaped rotation, surfaces such as the step of the refilled tapered butt end abrasive tool forms the cup. The method allows increasing both productivity and the quality of the treated surfaces at a rational loading of the working surface of the wheel along the contact patch. Efficiency gains can be achieved by controlling the center distance, choosing the angle changes end. This allows you to increase the size of the contact and the possibility of per line. Quality improvement is due to secure the release of the base forming the point of roughness and the appearance of a grid. New ways to have better dynamics and saves energy due to less time machining and use less of dimensional tool and machine tools. The article contains a selection of dependencies of the setup parameters of the CNC machine to ensure their desired output values.

Key words: *accuracy, productivity, quality and efficiency, shape formation, contact line, curvature of the surface, distance between axes, details profile, contact control.*