

DOI 10.32820/2079-1747-2021-27-67-75

УДК 621.923.01

ПЕРЕДУМОВИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РІЗАННЯ ПРИ СТРІЧКОВОМУ ШЛІФУВАННІ З УРАХУВАННЯМ ЗАТУПЛЕННЯ ІНСТРУМЕНТУ

©Кондратюк О.Л., Скоркін А.О.

*Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про авторів:**

Кондратюк Олег Леонідович: ORCID: 0000-0002-3263-0483; kondratyuk.mot@gmail.com; кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Скоркін Антон Олегович: ORCID: 0000-0003-3032-8341; antonskorkin20@gmail.com; кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Відмінною особливістю сучасного шліфувального обладнання є значне підвищення рівня його автоматизації на базі систем числового програмного керування. Прагнення механізувати і автоматизувати обробку складнопрофільних поверхонь деталей машин привело до створення цілої низки спеціальних і спеціалізованих шліфувальних верстатів, що працюють за методом обкатки або копіювання з використанням жорстких абразивних кіл різного профілю і абразивних інструментів на гнучкій основі (стрічок, дисків, шкурки).

Для ефективного використання верстатного обладнання необхідно призначити оптимальні режими шліфування, що враховують конкретні умови обробки і забезпечують потрібні якісні показники операції: точність деталей, шорсткість поверхонь, відсутність прижогів і тріщин та ін.

У статті розглянуті питання збільшення продуктивності обробки при одночасному підвищенні якості, надійності і довговічності виробів машинобудування і застосування у виробництві нових технологій, в тому числі на основі абразивної обробки. До таких технологій відноситься процес стрічкового шліфування криволінійних поверхонь турбінних лопаток, на багатокоординатному обладнанні з ЧПК. Даний метод обробки інтенсивно розвивається і відноситься до області високих технологій, оскільки дозволяє вийти на новий рівень виробництва, що виключає подальше доопрацювання поверхонь лопаток за допомогою ручної праці.

Представлені результати теоретичних й експериментальних досліджень процесу стрічкового шліфування криволінійних поверхонь турбінних лопаток. Відображена математична модель залежності параметра шорсткості поверхні від таких змінних факторів як зернистість стрічки, зусилля притискання стрічки й лінійна швидкість на поверхні заготовки.

Ключові слова: стрічкове шліфування, процес різання, контактна взаємодія, шорсткість поверхні, математичне моделювання, адаптивне керування.

Kondratyuk O., Skorkin A. "Prerequisites for adaptive control of the cutting process for belt grinding with regard to tool bluntness "

A distinctive feature of modern grinding equipment is a significant increase in the level of its automation based on numerical control systems. The desire to mechanize and automate the processing of complex-profile surfaces of machine parts has led to the creation of a number of

special and specialized grinding machines operating by the rolling or copying method using hard abrasive wheels of various profiles and abrasive tools on a flexible basis (belts, discs, skins).

For the effective use of machine tools, it is necessary to prescribe the optimal grinding modes, taking into account the specific processing conditions and providing the necessary quality indicators of the operation: accuracy of parts, surface roughness, absence of burns and cracks, etc.

The article discusses the issues of increasing the productivity of processing while improving the quality, reliability and durability of mechanical engineering products and the use of new technologies in production, including those based on abrasive processing. These technologies include the process of belt grinding of curved surfaces of turbine blades on multi-axis CNC equipment. This method of processing is intensively developing and belongs to the field of high technologies, since it allows reaching a new level of production, excludes further refinement of the surfaces of the blades by means of manual labor.

The results of theoretical and experimental studies of the process of belt grinding of curved surfaces of turbine blades are presented. The mathematical model of the dependence of the surface roughness parameter on such variable factors as the grain size of the tape, the pressing force of the tape and the linear velocity on the surface of the workpiece is reflected.

Keywords: belt grinding, cutting process, contact interaction, surface roughness, mathematical modeling, adaptive control.

Вступ

Перспективним напрямом вирішення завдання збільшення продуктивності обробки, при одночасному підвищенні якості, надійності довговічності виробів машинобудування є застосування у виробництві нових технологій, в тому числі на основі абразивної обробки. До таких технологій відноситься процес стрічкового шліфування турбінних лопаток на лентошліфувальних верстатах з ЧПК, який інтенсивно розвивається і приймається за основу при створенні так званих високих технологій [5, 17].

Для подібних верстатів керуючі програми складаються з метою максимального наближення одержуваного профілю до теоретичного. Від цього залежать доопрацювання на наступних операціях ручного полірування, які повинні бути повністю виключені або зведені до мінімуму.

В існуючому технологічному процесі шліфування операційний контроль походить від одних і тих же технологічних баз. При цьому одночасно здійснюють комплексний контроль геометричних розмірів профілю:

- зміщення профілю від кореневого перетину лопатки;
- зміщення профілів лопатки один щодо одного в тому чи іншому перерізі;
- кута розвороту профілю в кожному перетині.

Наявність жорстких допусків на кожен контрольований параметр призводить до необхідності доопрацювання проточної частини. Велика кількість одночасно контрольованих параметрів і подальша доробка профілів значно збільшують трудомісткість обробки. Основними причинами відхилення профілю лопатки від теоретичного є: вплив коливання припуску, створені на попередній операції, які повторюються на остаточно обробленій поверхні; знос стрічки призводить до зменшення знімання матеріалу в процесі обробки при цьому, похибка обробки по лопатці може досягати при чорновому шліфуванні $\delta = 0,15 - 0,25$ мм, при чистовому $\delta = 0,05-0,1$ мм; при обробці опуклих і увігнутих ділянок різної кривизни змінюється площа поверхні контакту стрічки і лопатки, що призводить до зміни контактного тиску при постійному зусиллі притиску в діапазоні $\pm 20\%$ від номінального, а це призводить до коливань знімаемого припуску; інерційність рухомих

вузлів верстата приводить до змін притискного зусилля і нерівномірного знімання металу на ділянках різкої зміни траєкторії; при обробці крайніх ділянок відбувається зменшення площі зони контакту через обмеженість заготовки, це призводить до збільшення питомого тиску в зоні контакту, в результаті відбувається підвищення глибини знімання матеріалу.

Відсутність теорії, практичних рекомендацій і методик, необхідних для отримання необхідної точності і якості оброблених поверхонь на багатокоординатних ленто-шліфувальних верстатах призводить до прямої залежності якості обробки від кваліфікації оператора і обумовлює необхідність в доопрацюванні проточної частини за допомогою ручного полірування [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Великий внесок у розвиток стрічкового шліфування і в застосування еластичного абразивного інструменту, внесли такі вчені: К. С. Мітрівіч, В. Н. Везуб, Ю. М. Зубарев, А. Ф. Бабошкін, Н. В. Костін, Л. А. Паньков, Ф. С. Юнусов, Ю. Я. Фельдман, С.Ю. Степанов, С.Г. Бішутін. Аналіз сучасного стану технології шліфування нескінченними абразивними стрічками фасонних поверхонь за літературними джерелами показує, що в цій області виконано значний обсяг наукових досліджень, що дозволили оптимізувати цей метод для різних умов обробки і широко впровадити його в промисловість [1-4].

Досить повно визначені режими стрічкового шліфування, характеристики гнучкого абразивного інструменту, їх вплив на продуктивність процесу, якість поверхні і техніко-економічні показники при шліфуванні ряду конструкційних матеріалів або певної групи деталей, що мають складну форму поверхні [16-19].

У значно меншій мірі розроблені питання теорії процесу стрічкового шліфування, не приведений аналіз конструкції інструменту, практично не вивчена кінематика і динаміка гнучкого абразивного інструменту та стрічково-шліфувальних верстатів спеціального призначення, не освітлені методи керування динамічною структурою процесу і технологічні передумови для його керування з використанням сучасних засобів програмного та адаптивного регулювання [13-15]. Відсутня загальна класифікація абразивного інструменту та стрічко-протяжних механізмів верстатів, побудованих на базі вузлового агрегування [10]. Недостатньо повно розкриті технологічні особливості і можливості нового методу стрічкового шліфування з урахуванням високих демпфуючих здібностей абразивного інструменту [7-9]. Тому тільки глибоке вивчення механіки процесу стрічкового шліфування і супутніх фізичних явищ дозволить підійти до розгляду складних взаємопов'язаних процесів, що відбуваються в контакті гнучкого абразивного інструменту з деталлю при різанні [20].

Мета і завдання дослідження

Підвищення ефективності шліфування абразивними стрічками шляхом адаптивного керування параметрами контактної взаємодії інструмента із заготовкою.

Виклад основного матеріалу

Розглянутий метод шліфування може бути реалізований у вигляді жорсткої або гнучкої схем обробки. При жорсткій (розмірної) схемі (верстата ЛШ-1А (рис.1)) за допомогою спеціального копіра або еталонної деталі весь припуск з заготовки знімається за один або кілька проходів з певною глибиною різання t_{ϕ} . При гнучкій схемі (безрозмірна обробка на верстатах з ЧПК фірми «МЕТАВО MTS 1000-6 NC» (Німеччина)(рис.2)) в якості копіра використовується сама оброблювана заготовка, до якої притискається з певною силою

притиску ($P_{\text{прит}}$) абразивний інструмент, тобто процес шліфування йде при радіальній силі різання $P_y = P_{\text{прит}} / \cos \varphi$. При цьому глибина різання $t_{\text{ф}}$ є змінною величиною, яка відрізняється від інших параметрів режиму шліфування [3].

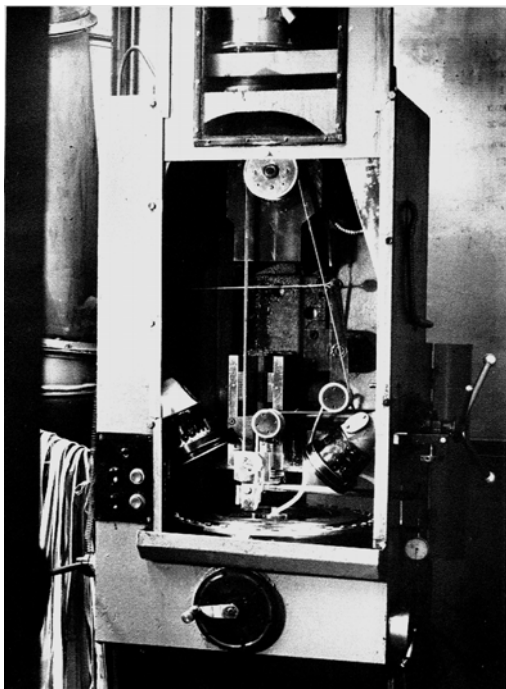


Рис. 1 - ВерстатЛШ-1А

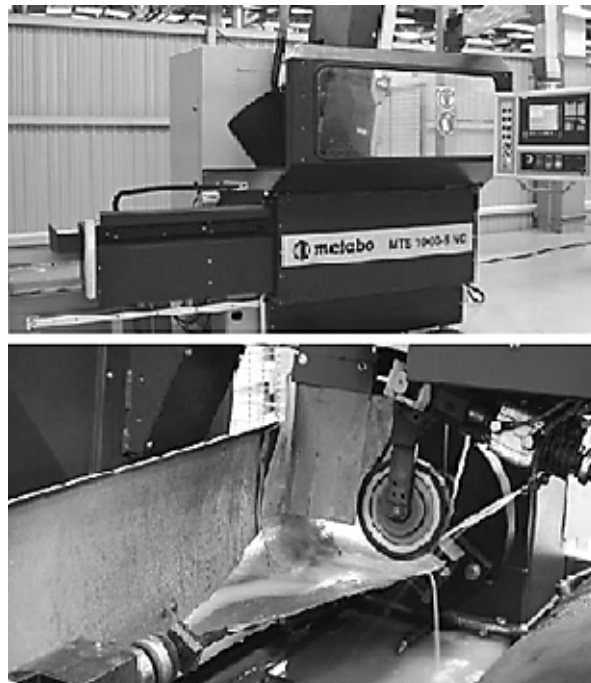


Рис. 2 - Верстат з ЧПК фірми «Metabo»

При русі абразивної стрічки зі швидкістю різання (V_c) разом з контактним роликком, що обертається щодо своєї осі O_1 (див. рис.3), лопатка переміщається уздовж своєї поздовжньої осі зі швидкістю $V_{S_{\text{позд}}}$. Після кожного поздовжнього ходу інструмент (ролик з абразивної стрічкою) зміщується в поперечному напрямку на величину $S_{\text{перп}}^{\text{абр}} / \text{мм}$. Залежно від доцільності і конструктивного виконання верстата замість поступальної поперечної подачі може здійснюватися періодична кругова подача на рядок ($S_{\text{перп}}^{\text{абр}} / \text{мм}$) з поворотом самої заготовки щодо її поздовжньої осі.

При русі столу із заготівлею в напрямку $V_{S_{\text{позд}}}$ абразивні зерна, розташовані біля краю стрічки, першими приймають на себе все навантаження по зніманню припуску товщиною $t_{\text{ф}}$ і відразу починають інтенсивно зношуватися, даючи можливість брати участь в шліфуванні і іншим зернам, розташованим ближче до середини стрічки. При зворотному ході столу після зсуву інструмента на рядок в поперечному напрямку ($S_{\text{перп}}^{\text{абр}} / \text{мм}$), відповідно більше зношуються ріжучі зерна, розташовані ближче до іншого краю стрічки. Таким чином, на поверхні стрічки з обох сторін утворюються «забірні конуси» з кутом нахилу $\alpha_{\text{з.к}} = 1 \dots 2^\circ$ при шліфуванні прямолінійного і похилого вниз, по ходу руху столу, ділянок профілю оброблюваної лопатки (див. рис.3).

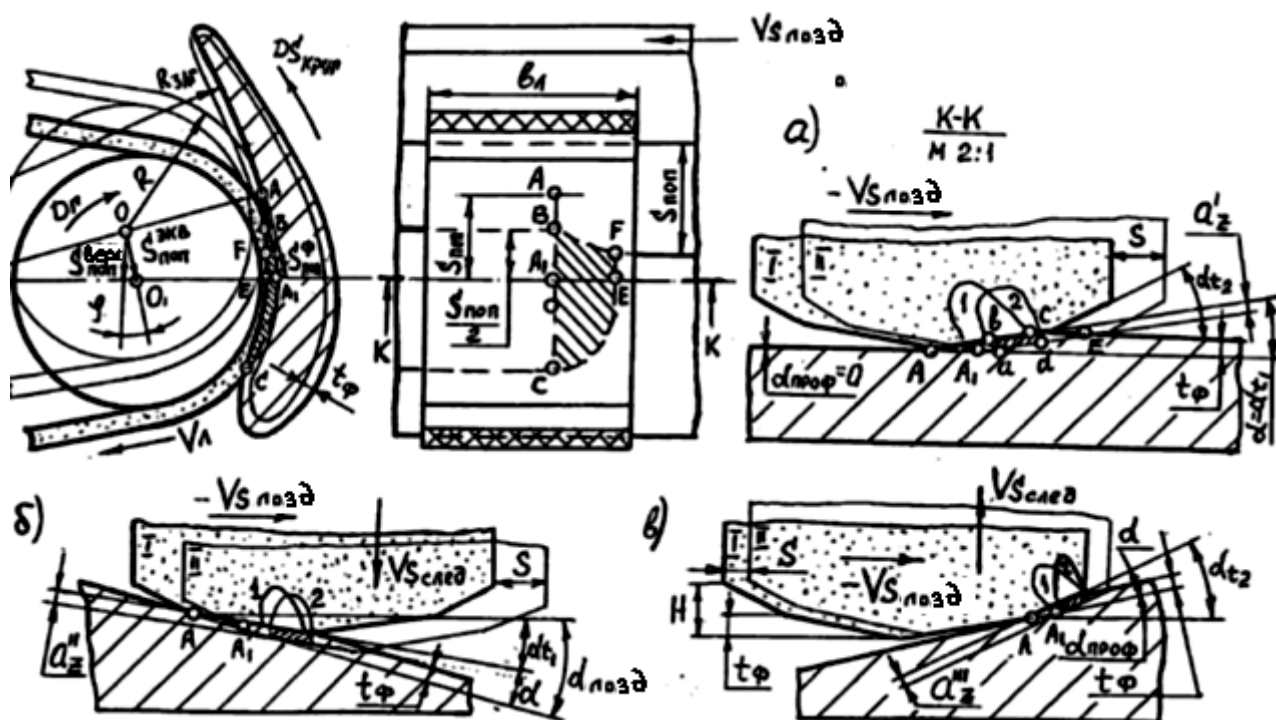


Рис. 3 - Розміри плями контакту і шарів металу, зрізаних окремими ріжучими зернами при профільному стрічковому шліфуванні поздовжніми рядками; а) шліфування горизонтальної ділянки профілю пера лопатки; б) шліфування в сторону зниження профілю; в) шліфування в сторону підйому профілю[7]

При обробці похилої вгору, по ходу шліфування, ділянки профілю оброблюваної лопатки крайні зерна додатково зношуються з утворенням ближче до краю стрічки ще одного «забірного конуса» з кутом $\alpha_{z2} = 8 \dots 10^\circ$. Пляма контакту між заготовкою і абразивної стрічкою з урахуванням «забірного конуса» і попередніх робочих проходів, має трапецієдну форму. Ширина зони контакту (в напрямку руху $V_{\text{позд}}$) - $\lambda = t_{\phi} / \sin \alpha$. Максимальний розмір плями контакту по довжині $b = \lambda_k$. Величина λ_k являє собою довжину дуги контакту між шліфувальним інструментом з радіусом зовнішньої поверхні R і заготовкою з радіусом кривизни в точці контакту $R_{\text{заг}}$. Подібно схемі круглого шліфування $\lambda_k = t_{\phi}^{0.5} \cdot [R_{\text{заг}} \cdot 2R / (R_{\text{заг}} \pm R)]^{0.5}$, де знак (+) - для випадку шліфування спинки; знак (-) - для шліфування корита. Для прямолінійних ділянок профілю $R_{\text{заг}} = \infty$. При поперечній подачі на рядок фактична подача $S_{\text{нож}}^{\phi} = \frac{S_{\text{нож}}^{\text{верт}}}{\cos \varphi} \left(\frac{R_{\text{заг}}}{K_{\text{заг}} \pm R} \right)^{1.5}$. При круговій подачі на рядок навколо поздовжньої осі заготовки $S_{\text{нож}}^{\phi} = S_{\text{верт}}^{\text{нож}} \cdot \frac{2\pi R_{\text{заг}} [R_{\text{заг}} / (R_{\text{заг}} \pm R)]^{0.5}}{360^\circ}$, град/хід. Площа зони контакту стрічки з лопаткою

$$F_k = t_{\phi}^{0.5} \cdot [R_{\text{заг}} \cdot 2R / (R_{\text{заг}} \pm R)]^{0.5} / \sin \alpha. \quad (1)$$

Середня товщина, зрізаних окремими ріжучими зернами шарів металу, залежить від зернистості стрічки, ступеня її зносу, режимів обробки і кута нахилу поздовжньої утворюючої профілю пера лопатки.

$$\alpha_{\text{затуп}} = 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot V_{\text{позд}} \cdot N / (V_s \cdot K_3^{0.75}), \text{ мм}, \quad (2)$$

де K_3 - коефіцієнт затуплення стрічки; на середніх ділянках стрічки $K_3 = 0,5 \dots 1,0\%$; на крайніх ділянках стрічки $K_3 = 1,5 \dots 2,0\%$; N - зернистість стрічки 10^{-2} мм.

На основі виконаного дослідження зміни стану робочої поверхні стрічок у міру зносу з урахуванням впливу температури на теплофізичні характеристики матеріалу оброблюваних деталей і самого інструменту, визначені функціональні залежності основних вихідних параметрів процесу стрічкового шліфування від режимів обробки, фізичних і розмірних характеристик деталі і інструменту, ступеня його затуплення і умов застосування змащувально-охолоджувальної рідини (ЗОР) [5].

Схема шліфування по копіру (розмірна обробка)

Максимальна контактна температура в зоні шліфування

$$\theta_k = 50 \cdot K_{\text{ЗОР}} \left[\frac{\sigma_b \cdot d_p (300 + V_c \cdot V_{\text{спозд}}^{-0.5} \cdot N \cdot M_2) \cdot N^{-1}}{M + 5.4 / (V_{\text{спозд}} \cdot t_{\text{ф}})^{0.8}} \right]^{0.4}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

де σ_b - тимчасовий опір розриву, МПа; α_b - коефіцієнт введення тепла в деталь з урахуванням його відводу в інструмент і контактний ролик $\alpha_b = 0,7 \dots 0,8$; V_c - швидкість стрічки, м/с; $V_{\text{спозд}}$ - швидкість поздовжньої подачі, м/хв; $t_{\text{ф}}$ - фактична глибина різання з урахуванням жорсткості технологічної системи, мм; M - розмірний коефіцієнт, що враховує теплофізичні характеристики матеріалу деталі: для жароміцних сталей $M_{\text{ж}} = 1,9$; для вуглецевих, низько- і середньо легованих сталей $M_{\text{вугл}} = 3,1$; $K_{\text{ЗОР}}$ коефіцієнт використання ЗОР: при сухому шліфуванні $K_{\text{ЗОР}} = 1,1$; при охолодженні поливом $K_{\text{ЗОР}} = 1$.

Дотична складова сили різання при $\theta_k \leq 600^\circ\text{C}$

$$P_{\text{дат}}^{600} = \sigma_s \cdot t_{\text{ф}}^{1.5} \left(\frac{R_{\text{зад}} \cdot R}{R_{\text{зад}} + R} \right)^{0.5} \left(\frac{24 \cdot V_{\text{зад}}}{V_c \cdot N} + 0,08 \cdot K_2 \right), \text{H}, \quad (4)$$

при $\theta_k > 600^\circ\text{C}$

$$P_{\text{дат}} = P_{\text{дат}}^{600} \cdot 3 \cdot 10^3 \theta_k^{-1.25}, \text{H}. \quad (5)$$

Радіальна складова сили різання при $\theta_k \leq 600^\circ\text{C}$

$$P_{\text{рад}}^{600} = \sigma_s \cdot t_{\text{ф}}^{1.5} \left(\frac{R_{\text{зад}} \cdot R}{R_{\text{зад}} + R} \right)^{0.5} \left(\frac{29 \cdot V_{\text{зад}}}{V_c \cdot N} + 0,5 \cdot K_2 \right), \text{H}, \quad (6)$$

при $\theta_k > 600^\circ\text{C}$

$$P_{\text{рад}} = P_{\text{рад}}^{600} \cdot 3 \cdot 10^3 \theta_k^{-1.25}, \text{H}. \quad (7)$$

Ефективна потужність різання

$$N_e = P_{\text{дат}} \cdot V \cdot 10^{-3}, \text{кВт} \quad (8)$$

Інтенсивність шліфування

$$Q_s = 16,7 V_{\text{зад}} \cdot t_{\text{ф}} \cdot S_{\text{перп}}^{\text{спрот}} \left(\frac{R_{\text{зад}}}{R_{\text{зад}} + R} \right)^{1.5} / \text{свс } \varphi, \text{мм}^3/\text{с}. \quad (9)$$

де $S_{\text{перп}}^{\text{спрот}}$ - поперечна подача столу верстата, мм/хід;

Питома робота шліфування

$$A_{\text{пит}} = N_e / Q_s, \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{мм}^3} \left(\frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{мм}^3} \right). \quad (10)$$

Глибина поширення прижогів від поверхні деталі, що шліфується

$$h_{\text{прижж}} = \frac{At_{\text{ф}}^{0,8}}{V_{\text{шліф}}^{0,8}} \cdot \theta_{\text{к}}^x \cdot \ln \frac{\theta_{\text{к}}}{500}, \text{мм} \quad (11)$$

де для жароміцних сталей $A_{\text{ж}} = 0,3$; $X_{\text{ж}} = 0,25$; для вуглецевих і нержавіючих сталей $A_{\text{вугл}} = 2,102$; $X_{\text{вугл}} = -0,75$.

Безрозмірне шліфування (верстати «Metabo»)

Для даної схеми шліфування характерно те, що глибина шліфування $t_{\text{ф}}$ безпосередньо залежить від сили притиску ($P_{\text{прижж}}$) стрічки до деталі. Тому, в першу чергу, визначається $P_{\text{прижж}}$, необхідна для зняття шару металу $t_{\text{ф}}$

$$P_{\text{прижж}}^{600} = P_{\text{рад}}^{600} \cdot \cos \varphi \cdot t_{\text{ф}}^{1,8} \cdot \cos \varphi \cdot \sigma_s \left(\frac{R_{\text{заг}}/R}{R_{\text{заг}} \pm R} \right)^{0,5} \left(\frac{29 \cdot V_{\text{шліф}}}{V_{\text{с}} \cdot N} + 0,5 \cdot K_z \right), \text{Н} \quad (12)$$

Значення $P_{\text{прижж}}^{600}$ коригується з урахуванням величини контактної температури, що розраховується за виразом (3).

При $\theta_{\text{к}} > 600^\circ\text{C}$.

$$P_{\text{прижж}} = P_{\text{прижж}}^{600} \cdot 3 \cdot 10^3 \theta_{\text{к}}^{-1,25}, \text{Н} \quad (13)$$

Дотична складова сили різання при

$$P_{\text{зан}}^{600} = \frac{P_{\text{прижж}} (24V_{\text{шліф}} + 0,08K_z \cdot V_{\text{с}} \cdot N)}{\cos \varphi (29V_{\text{шліф}} + 0,08K_z \cdot V_{\text{с}} \cdot N)} \cdot \text{Н} \quad (14)$$

Ефективна потужність різання (N_e), питома робота ($A_{\text{пит}}$), інтенсивність шліфування (Q_s) і глибина прижогів ($h_{\text{прижж}}$) визначаються відповідно за виразами (8) ... (11), а контактна температура - по (3) [3-4, 9].

Для рівномірного зняття припуску товщиною $t_{\text{ф}}$ на різних ділянках профілю пера лопатки зі змінними радіусами кривизни $R_{\text{заг}}$ і кутом тиску ролика φ , необхідно відповідно регулювати силу притиску ролика $P_{\text{прижж}}$. Крім того силу притиску треба збільшувати і в міру затуплення абразивної стрічки, тобто при збільшенні K_z [18, 19].

Висновки

Встановлені нами функціональні залежності вихідних параметрів процесу стрічкового шліфування від технологічних умов дозволяють зробити висновок про необхідність створення адаптивної системи регулювання сили притиску ролика в залежності від зміни ріжучих властивостей абразивної стрічки [10].

Список використаних джерел:

1. Experimental Research on the Abrasive Belt Grinding Turbine Blades Material 1Cr13 Stainless Steel / H. L. Wu, Y. Huang, Z. Huang, G. J. Cheng // *Key Engineering Materials*. – 2011. – Vol. 487. – Pp. 452–456.
2. Hong L. Research on Accuracy of Abrasive Belt Grinding / Li Hong // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Vol. 101-102. – Pp. 1101–1104.
3. Бишутин С. Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании / С. Г. Бишутин. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 144 с.
4. Грабченко А. И. Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали (Монография) / Грабченко А. И., Кальченко В. И., Кальченко В. В. — Чернигов: ЧГТУ, 2009. — 356 с.

5. Волков Д. И. Разработка модели абразивной ленты, учитывающей стохастические факторы / Д. И. Волков, А. А. Коряжкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 6. – С. 28–35.
6. Зубарев Ю. М. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов / Ю. М. Зубарев, А. В. Приемщев. – СПб. : Лань, 2010. – 303 с.
7. Ищенко Г. И. О финишной обработке рабочей части лопаток паровых турбин / Г. И. Ищенко, Р. М. Стрельчук // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Харків, 2018. – № 6. – С. 119–126.
8. Калинин Е. П. Теория и практика управления производительностью шлифования без прижогов с учетом затупления инструмента / Е. П. Калинин. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 358 с.
9. Калинин Е. П. Физические закономерности процесса шлифования / Е. П. Калинин // *Диагностика, ремонт, эксплуатация, восстановление, модернизация оборудования*. Современные технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – СПб. : ПИМаш, 2005. – С. 129–131.
10. Кондратюк О. Л. Создание технологической системы для шлифования сложнопрофильных поверхностей крупногабаритных лопаток турбин на основе адаптивного управления процессом / О. Л. Кондратюк // *Резание и инструмент в технологических системах*. – 2013. – Вып. 83. – С. 146–154.
11. Кондратюк О. Л. Высокотехнологическое обеспечение шлифования сложнопрофильных поверхностей крупногабаритных лопаток турбин / О. Л. Кондратюк // *Машинобудування* : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2013. – № 11. – С. 98–102.
12. Кондратюк О. Л. Технологическая система для высокопроизводительной механической обработки лопаток паровых турбин / О. Л. Кондратюк, А. О. Скоркин // *Машинобудування* : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2012. – № 10. – С. 105–114.
13. Коряжкин А. А. Оптимизация процесса ленточного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ // *Вестник УГАТУ*. 2011. Т. 15, № 3. С. 84–89.
14. Коряжкин А. А. Повышение точности ленточного шлифования широкохордных лопаток компрессора ГТД на станках с ЧПУ / А. А. Коряжкин, В. В. Михрютин // *Инженерный журнал*. – 2008. – № 7. – С. 7–11.
15. Макаров В. Ф. Математическое моделирование процесса полирования лопаток газотурбинных двигателей / В. Ф. Макаров, Е. Н. Бычина, А. О. Чуян // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 8. – С. 11–14.
16. Полетаев В. А. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога / В. А. Полетаев, Д. И. Волков. – М. : Машиностроение, 2009. – 272 с.
17. Полетаев В. А. Ленточное шлифование крупногабаритных лопаток газотурбинных двигателей на станках ЧПУ / В. А. Полетаев, В. В. Михрютин, А. А. Коряжкин // *Инженерный журнал*. – 2005. – № 12. – С. 7–11.
18. Соколова Л. С. Шлифование абразивными лентами с постоянной силой прижима / Л. С. Соколова. – М. : Спутник, 2005. – 146 с.
19. Тарасюк А. П. Оптимізація траєкторії руху інструменту при обробці поверхні пера лопаток парових турбін / А. П. Тарасюк, О. Л. Кондратюк // *Резание и инструменты в технологических системах* : междунар. научн.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2012. – Вып. 82. – С. 270–280.
20. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения : в 10 т. Т. 7: Точность обработки деталей машин / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. – Одесса : ОНПУ, 2004. – 546 с.

References:

1. Wu, HL, Huang, Y, Huang, Z & Cheng, GJ 2011, 'Experimental Research on the Abrasive Belt Grinding Turbine Blades Material 1Cr13 Stainless Steel', *Key Engineering Materials*, vol. 487, pp. 452-456.
2. Hong Li 2012, 'Research on Accuracy of Abrasive Belt Grinding', *Applied Mechanics and Materials*, vol. 101-102, pp. 1101-1104.
3. Bishutin, SG 2004, *Obespechenie trebuemoj sovokupnosti parametrov kachestva poverhnostnyh sloev detalej pri shlifovanii* [Providing the required set of quality parameters for the surface layers of parts during grinding], Mashinostroenie-1, Moskva.
4. Grabchenko A. I. Grinding with crossing axes of the tool and parts (Monograph) / Grabchenko A. I., Kalchenko V. I., Kalchenko V. V. - Chernigov: ChSTU, 2009. - 356 p.
5. Volkov, DI & Koryazhkin, AA 2021, 'Razработка модели абразивной ленты, uchityvajushhej stohasticheskie faktory' [Development of a model of an abrasive belt that takes into account stochastic factors], *Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii*, no. 6, pp. 28-35.

6. Zubarev, YuM & Priemyshev, AV 2010, *Teoriya i praktika povysheniya jeffektivnosti shlifovaniya materialov* [Theory and practice of increasing the efficiency of grinding materials], Lan, Sankt-Peterburg.
7. Ishchenko, GI & Strelchuk, RM 2018, 'O finishnoj obrabotke rabochej chasti lopatok parovyh turbin' [On the finishing treatment of the working part of steam turbine blades], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Kharkivskiy politekhnichnyi instytut, Seriya Tekhnolohii v mashynobuduvanni*, Kharkiv, no. 6 (1282), pp. 119-126.
8. Kalinin, EP 2009, *Teoriya i praktika upravleniya proizvoditelnostju shlifovaniya bez prizhigov s uchetom zatupleniya instrumenta* [Theory and practice of grinding performance management without burns, taking into account the bluntness of the instrument], *Izdatelstvo Politehnicheskogo universiteta*, Sankt-Peterburg.
9. Kalinin, EP 2005, 'Fizicheskie zakonomernosti procesa shlifovaniya' [Physical laws grinding process], *Diagnostika, remont, jekspluatacija, vosstanovlenie, modernizacija oborudovaniya. Sovremennye tehnologii*, PIMash, Sankt-Peterburg, pp. 129 -131.
10. Kondratyuk, OL 2013, 'Cozdanie tehnologicheskoy sistemy dlja shlifovaniya slozhnoprofilnyh poverhnostej krupnogabaritnyh lopatok turbin na osnove adaptivnogo upravleniya processom' [Creation of a technological system for grinding complex-profile surfaces of large-sized turbine blades on the basis of adaptive process control], *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah*, iss. 83, pp. 146-154.
11. Kondratyuk, OL 2013, 'Vysokotehnologicheskoe obespechenie shlifovaniya slozhnoprofilnyh poverhnostej krupnogabaritnyh lopatok turbin' [High-tech support for grinding of complex-profile surfaces of large-sized turbine blades], *Mashynobuduvannia*, no. 11, pp. 98-102.
12. Kondratyuk, OL & Skorkin, AO 2012, 'Tehnologicheskaja sistema dlja vysokoproizvoditelnoj mehanicheskoy obrabotki lopatok parovyh turbin' [Technological system for high-performance machining of steam turbine blades], *Mashynobuduvannia*, no. 10, pp. 105-114.
13. Koryazhkin, AA 2011, 'Optimizacija processa lentochnoho shlifovaniya na mnogokoordinatnyh stankah s ChPU' [Optimization of the belt grinding process on multi-axis CNC machines], *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta*, *Vestnik* vol. 15, no. 3, pp. 84-89.
14. Koryazhkin, AA & Mikhryutin, VV 2008, 'Povyszenie tochnosti lentochnoho shlifovaniya shirokohordnyh lopatok kompressora GTD na stankah s ChPU' [Increasing the accuracy of belt grinding of wide-chord blades of a GTE compressor on CNC machines], *Inzhenernyj zhurnal*, no. 7, pp. 7-11.
15. Makarov, VF, Bychina, EN & Chuyan, AO 2011, 'Matematicheskoe modelirovanie processa polirovaniya lopatok gazoturbinyh dvigatelej' [Mathematical modeling of the process of polishing the blades of gas turbine engines], *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, no. 8, pp. 11-14.
16. Poletaev, VA & Volkov, DI 2009, *Glubinnoe shlifovanie lopatok turbin: biblioteka tehnologa* [Deep grinding of turbine blades: the technologist's library], *Mashinostroenie*, Moskva.
17. Poletaev, VA, Mikhryutin, VV & Koryazhkin, AA 2005, 'Lentochnoe shlifovanie krupnogabaritnyh lopatok gazoturbinyh dvigatelej na stankah ChPU' [Belt grinding of large-sized blades of gas turbine engines on CNC machines], *Inzhenernyj zhurnal*, no. 12, pp. 7-11.
18. Sokolova, LS 2005, *Shlifovanie abrazivnymi lentami s postojannoju siloj prizhima* [Grinding abrasive belts with constant clamping force], *Sputnik*, Moskva.
19. Tarasyuk, AP & Kondratyuk, OL 2012, 'Optimizatsiia traektorii rukhu instrumentu pry obrobtsti poverkhni pera lopatok parovykh turbin' [Optimization of the trajectory of the tool during the cutting of the surface of the airfoil of the blades of steam turbines], *Rezanie i instrumenty v tehnologicheskikh sistemah*, *Nacionalnyj tekhnicheskij universitet Harkovskij politehnicheskij institut*, Harkov, iss. 82, pp. 270-280.
20. Novikov, FV & Yakimova, AV (eds.) 2004, *Fiziko-matematicheskaja teoriya processov obrabotki materialov i tehnologii mashinostroenija*, vol. 7 *Tochnost obrabotki detalej mashin* [Physical and mathematical theory of materials processing and mechanical engineering technology. V. 7. Accuracy of processing of machine parts], *National Polytechnic University*, Odessa.

Стаття надійшла до редакції 28 квітня 2021 року