

Ф. В. НОВІКОВ**УТОЧНЕНИЙ РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ПЕРЕРИВЧАСТОГО ШЛІФУВАННЯ**

Розроблено математичну модель визначення температури різання під час переривчастого шліфування та обґрунтування умов її зменшення з урахуванням балансу тепла, яке виділяється в процесі шліфування та надходить до стружок і оброблюваної деталі. Проведено оптимізацію геометричних параметрів переривчастих кругів за критерієм найменшої температури різання та встановлено, що за умови рівності довжин робочого виступу і вирізу переривчастого круга досягається екстремум (мінімум) температури різання. Показано, що чим більше робочих виступів на переривчастому крузі, тим меншою може бути температура різання. Розрахунками встановлено, що за цих умов температуру різання під час переривчастого шліфування можна зменшити до 3-х разів порівняно із звичайним шліфуванням суцільним кругом. Однак, для цього необхідно забезпечити повне або часткове охолодження оброблюваної деталі за період проходження зони шліфування вирізом переривчастого круга. Інакше температура різання буде значно збільшуватися у міру збільшення кількості контактів робочих виступів переривчастого круга із оброблюваним матеріалом, що може привести до перевищення температури різання, яка досягається під час шліфування суцільним кругом. Встановлено, що найбільшу продуктивність обробки за заданої температури різання в умовах переривчастого шліфування можна досягти шляхом застосування методу глибинного шліфування із відносно невеликою швидкістю деталі. Це підтверджується практичними даними, отриманими під час розрізання переривчастими кругами заготовок на частини із значними глибинами різання (30 мм і більше), за яких на оброблених поверхнях, як правило, відсутні припикання та інші температурні дефекти завдяки виникаючим незначним температурам різання, що дозволяє забезпечити високі показники якості та продуктивності обробки.

Ключові слова: процес різання, оброблюваний матеріал, адіабатичний стержень, охолодження, швидкість круга

F. V. NOVIKOV**REFINED CALCULATION OF CUTTING TEMPERATURE DURING INTERMITTENT GRINDING**

A mathematical model for determining the cutting temperature during intermittent grinding has been developed and the conditions for its reduction have been substantiated, taking into account the balance of heat released during grinding and supplied to the chips and the workpiece. The geometric parameters of intermittent wheels have been optimized according to the criterion of the lowest cutting temperature and it has been established that, provided that the lengths of the working protrusion and the cutout of the intermittent wheel are equal, the extreme (minimum) of the cutting temperature is achieved. It has been shown that the more working protrusions there are on the intermittent wheel, the lower the cutting temperature can be. Calculations have established that under these conditions, the cutting temperature during intermittent grinding can be reduced by up to 3 times compared to conventional grinding with a solid wheel. However, for this it is necessary to ensure complete or partial cooling of the workpiece during the period of passage of the grinding zone by the cutout of the intermittent wheel. Otherwise, the cutting temperature will increase significantly as the number of contacts of the working protrusions of the intermittent wheel with the processed material increases, which can lead to an excess of the cutting temperature achieved during grinding with a solid wheel. It has been established that the highest processing performance at a given cutting temperature in intermittent grinding conditions can be achieved by using the deep grinding method with a relatively low speed of the part. This is confirmed by practical data obtained during cutting of blanks with intermittent wheels into parts with significant cutting depths (30 mm and more), in which, as a rule, there are no scorching and other temperature defects on the processed surfaces due to the arising insignificant cutting temperatures, which allows to ensure high indicators of quality and processing productivity.

Keywords: cutting process, processed material, adiabatic rod, cooling, wheel speed

Вступ Метод переривчастого шліфування отримав широке застосування у виробництві завдяки можливості зменшення температури різання і підвищення якості та продуктивності обробки. Особливо ефективним є його застосування на операціях зубошліфування, де актуальною є проблема зменшення температури різання й виключення утворення температурних дефектів на оброблюваних поверхнях. Ефект переривчастого шліфування пов'язаний, по-перше, із високою ріжучою здатністю переривчастого круга, що досягається в результаті ударно-циклічної взаємодії робочих виступів круга із оброблюваним матеріалом (за суттю – це процес виправлення круга), по-друге, із періодичністю процесу різання та можливістю охолодження оброблюваного матеріалу в момент проходження вирізами переривчастого круга зони різання, що приводить до зменшення температури різання. Таким чином, ефект переривчастого шліфування досягається за двома напрямками, що позитивно відрізняє його від інших технологічних процесів механічної обробки та відкриває широкі перспективи подальшого розвитку. Підтвердженням цьому є те, що звичайні (суцільні) абразивні круги більш високої твердості, які у звичайних умовах шліфування фактично непрацездатні внаслідок інтенсивного засалювання робочої поверхні та втрати ріжучої здатності, в умовах переривчастого шліфування працюють стабільно у режимі рівномірного зношування та не вимагають їх додаткового виправлення, забезпечують високі показники якості та продуктивності обробки. Разом з тим, технологічні можливості переривчастого шліфування на практиці використовуються недостатньо повно, існують резерви підвищення його ефективності. Це вимагає подальшого дослідження фізичної сутності переривчастого шліфування та теоретичного визначення оптимальних умов обробки, що реалізують його потенційні технологічні можливості. Тому в даній роботі наведено результати теоретичних досліджень, що спрямовані на пошук нових напрямів підвищення ефективності переривчастого шліфування.

Аналіз основних досягнень та літератури. Основним досягненням у розвитку переривчастого шліфування є роботи професора Якимова О. В. [1–3], направлені на встановлення фізичних і технологічних закономірностей цього процесу та розроблення і впровадження у виробництва прогресивних технологій

переривчастого шліфування. Теоретично доведено та експериментально підтверджено, що пульсуюче нагрівання оброблюваної деталі із мікроскопічними інтервалами охолодження, завдяки періодичному перериванню контакту переривчастого круга із деталлю, дозволяє вилучити теплове насичення поверхневих шарів оброблюваного матеріалу і зменшити температуру різання та підвищити якість обробки. Показано, що періодичне переривання процесу шліфування також збуджує високочастотні коливання у пружній системі, зменшуючи, тим самим, енергоємність процесу та забезпечуючи безперервне правлення круга, що додатково приводить до зменшення температури різання. Отримані професором Якимовим О. В. результати досліджень стали основою створення теорії переривчастого шліфування та розрахунків температури різання. На основі цієї теорії встановлено шляхи зменшення температури різання під час переривчастого шліфування завдяки застосуванню абразивних високопористих кругів [4], алмазних кругів [5] та ефективних технологічних середовищ [6]. У роботах [7, 8] наведено розрахунки температури різання та геометричних характеристик кругів під час переривчастого шліфування. Однак ці роботи виконано, по-перше, без урахування балансу тепла, яке виділяється в процесі шліфування та надходить до стружок і оброблюваної деталі, по-друге, без урахування невидаленого матеріалу, що накопився за період переривання процесу шліфування, на значення температури різання. А це обмежує можливості теоретичного обґрунтування оптимальних параметрів процесу шліфування та характеристик переривчастих кругів. У роботі [9] наведено спрощену математичну модель визначення температури різання під час переривчастого шліфування, у якій враховано невидалений матеріал, що накопився за період переривання процесу шліфування. Це дозволило більш точно підійти до аналітичного описання температури різання та оптимізації геометричних параметрів переривчастого круга. Тому важливо розробити уточнену математичну модель переривчастого шліфування із урахування також балансу тепла, яке виділяється в процесі шліфування та надходить до стружок і оброблюваної деталі, і на цій основі аналітично визначити температуру різання і оптимальні геометричні параметри переривчастих кругів.

Мета дослідження, постановка проблеми. Метою дослідження є аналітичне визначення температури різання під час переривчастого шліфування з урахуванням балансу тепла, яке виділяється в процесі шліфування і надходить до стружок і оброблюваної деталі, та обґрунтування умов зменшення температури різання для створення ефективних високопродуктивних та високоякісних технологічних процесів переривчастого шліфування.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- розробити математичну модель визначення температури різання під час переривчастого шліфування та провести оптимізацію геометричних параметрів переривчастих кругів за критерієм найменшої температури різання;
- виконати оцінювання отриманих результатів оптимізації та порівняти їх із відомими теоретичними і експериментально встановленими рішеннями щодо умов зменшення температури різання та підвищення ефективності переривчастого шліфування;
- провести порівняння умов зменшення температури різання під час переривчастого і звичайного шліфування та обґрунтувати переваги переривчастого шліфування;
- розробити практичні рекомендації щодо створення високоефективних технологічних процесів переривчастого шліфування.

Матеріали дослідження. Для досягнення поставленої мети слід застосувати наведену у роботі [10] уточнену аналітичну залежність для визначення температури різання θ під час шліфування суцільним кругом з урахуванням балансу тепла, яке виділяється в процесі шліфування та надходить до стружок і оброблюваної деталі (рис. 1):

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{pi3}^2 \cdot \tau}{\lambda}}, \quad (1)$$

де $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ – максимальна температура різання, град. σ – умовне напруження різання, Н/м²; c – питома теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/(кг·град); ρ – щільність оброблюваного матеріалу, кг/м³; λ – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/(м·град); V_{pi3} – швидкість руху теплового джерела углуб поверхневого шару оброблюваного матеріалу, м/с; τ – час перерізаня шліфувальним кругом адіабатичного стержня, якими умовно представлено припуск, що знімається, с.

У розрахунковій схемі (рис. 1) враховано рух теплового джерела углуб поверхневого шару оброблюваного матеріалу, який відбувається з швидкістю V_{pi3} у результаті перерізаня шліфувальним кругом адіабатичних стержнів, якими представлено припуск, що знімається [9, 11]. Параметр l_2 визначає глибину проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі, м; параметр l_1 – довжину зрізаної частини адіабатичного стержня, м. Запропонований теоретичний підхід дозволяє наблизити розрахункову схему температури різання до реальних умов шліфування, оскільки враховує баланс тепла, що виділяється в процесі шліфування та надходить до стружок і оброблюваної деталі. Встановлено, що згідно із залежністю (1), розходження

розрахункових і експериментальних значень температури різання під час шліфування суцільним кругом складає не більше 12 % [10]. На відміну від традиційно встановлених аналітичних залежностей для визначення температури різання під час шліфування на основі рішення класичного диференційного рівняння теплопровідності матеріалів [12–14], наведена залежність (1) дозволяє встановити кінцеве значення глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі l_2 , тобто глибину дефектного шару обробленого матеріалу. Виходячи із цього, важливо застосувати залежність (1) для визначення температури різання θ під час переривчастого шліфування та обґрунтування умов її зменшення. Важливо також провести оптимізацію геометричних параметрів переривчастого круга за критерієм найменшої температури різання θ .

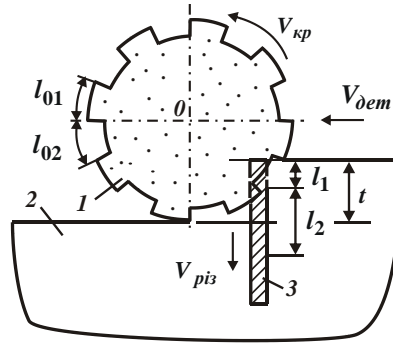


Рис. 1 – Розрахункова схема визначення температури різання під час плоского переривчастого шліфування: 1 – переривчастий шліфувальний круг; 2 – оброблюваний матеріал; 3 – адіабатичний стержень

Із залежності (1) випливає, що зменшити час τ і, відповідно, температуру різання θ можна застосуванням переривчастого шліфування. У цьому випадку час τ визначається часом контакту робочого виступу переривчастого круга з оброблюваною деталлю і його можна значно зменшити. Однак внаслідок наявності вирізу на переривчастому крузі робочий виступ повинен видалити додатково ще й невідалений матеріал, що накопився за період переривання процесу шліфування. Тому це призводить до збільшення швидкості V_{piz} . У результаті має місце більш складний екстремальний характер зміни температури різання θ . Для його розкриття розглянемо закономірності формування температури різання θ на протязі часу τ_{01} контакту робочого виступу переривчастого круга довжиною l_{01} із оброблюваним матеріалом. Тоді залежність (1) для визначення температури різання θ набуде вигляду:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{piz}^2 \cdot \tau_{01}}{\lambda}}, \quad (2)$$

де $V_{piz_{01}}$ – швидкість перерізання адіабатичного стержня переривчастим кругом, м/с.

У цьому випадку часткове перерізання адіабатичного стержня переривчастим кругом (рис. 1) відбувається лише протягом часу контакту робочого виступу переривчастого круга із оброблюваним матеріалом τ_{01} , оскільки протягом часу τ_{02} проходження зони шліфування вирізом довжиною l_{02} переривчастий круг не контактує із адіабатичним стержнем [2]. У результаті за час τ_{01} відбудеться перерізання адіабатичного стержня довжиною

$$P = \tau_{01} \cdot V_{piz_{01}}, \quad (3)$$

тобто видалення поверхневого шару оброблюваного матеріалу товщиною P .

За час $\tau_0 = \tau_{01} + \tau_{02}$ відбудеться перерізання адіабатичного стержня такої самої довжини P суцільним кругом:

$$P = \tau_0 \cdot V_{piz}, \quad (4)$$

де V_{piz} – швидкість перерізання адіабатичного стержня суцільним кругом, м/с.

Після порівняння залежностей (3) і (4), маємо:

$$V_{piz_{01}} = \left(1 + \frac{\tau_{02}}{\tau_{01}}\right) \cdot V_{piz}. \quad (5)$$

Як видно, швидкість перерізання $V_{piz_{01}}$ адіабатичного стержня переривчастим кругом більше швидкості перерізання V_{piz} адіабатичного стержня суцільним кругом V_{piz} , що підтверджується експериментальними даними, наведеними в роботах [2, 3]. Підставляючи залежність (5) у залежність (2), отримано:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{кр}^2}{\lambda} \left(\sqrt{\tau_{01}} + \frac{\tau_{02}}{\sqrt{\tau_{01}}}\right)^2} \tag{6}$$

Із залежності (6) випливає, що зі збільшенням часу τ_{01} вираз $B = \left(\sqrt{\tau_{01}} + \frac{\tau_{02}}{\sqrt{\tau_{01}}}\right)$, що входить до правої частини залежності (6), а відповідно, і функція $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$ змінюються за екстремальною залежністю. Це, наприклад, витікає із виразу $A = \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right)$, який отримано після нескладних перетворення виразу $B = \left(\sqrt{\tau_{01}} + \frac{\tau_{02}}{\sqrt{\tau_{01}}}\right)$. Виходячи із рис. 2, вираз $A = \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right)$ приймає екстремальне (мінімальне) значення [9]. Отже, за умови досягнення екстремальних значень l_{01} і τ_{01} функція $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$ і температура різання θ теж будуть приймати екстремальні значення.

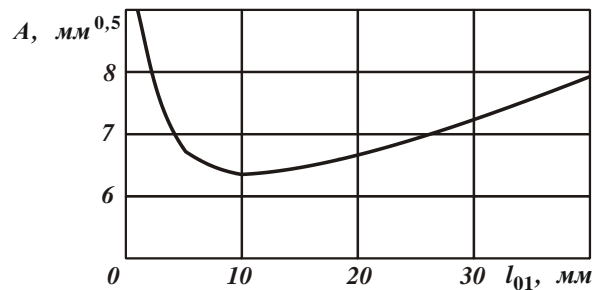


Рисунок 2 – Залежність значень виразу $A = \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right)$ від довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01}

Для аналітичного визначення екстремальних значень часу τ_{01} і довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01} підпорядкуємо вираз $B = \left(\sqrt{\tau_{01}} + \frac{\tau_{02}}{\sqrt{\tau_{01}}}\right)$ необхідній умові екстремуму, тобто візьмемо першу похідну від цього виразу за часом τ_{01} . Після нескладних математичних перетворень визначено екстремальне значення часу $\tau_{01} = \tau_{02}$. Із урахуванням відношень $\tau_{01} = l_{01} / V_{кр}$ та $\tau_{02} = l_{02} / V_{кр}$ це відповідає умові $l_{01} = l_{02}$, де $V_{кр}$ – швидкість круга, м/с.

Розрахунками також встановлено, що друга похідна часу τ_{01} від виразу $B = \left(\sqrt{\tau_{01}} + \frac{\tau_{02}}{\sqrt{\tau_{01}}}\right)$ за умови $\tau_{01} = \tau_{02}$ приймає позитивне рішення. Тому у точці екстремуму виразу $B = \left(\sqrt{\tau_{01}} + \frac{\tau_{02}}{\sqrt{\tau_{01}}}\right)$, а відповідно, і температури різання θ має місце мінімум, що відповідає розрахунковим даним, наведеним на рис. 2. Після підстановки екстремального значення часу $\tau_{01} = \tau_{02}$ у залежність (6) встановлено екстремальне (мінімальне) значення функції $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$, яке визначає мінімальне значення температури різання θ :

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{4 \cdot c \cdot \rho \cdot V_{кр}^2 \cdot \tau_{01}}{\lambda}} \tag{7}$$

Таким чином, аналітично встановлено, що під час переривчастого шліфування в залежності від відношення τ_{02}/τ_{01} та, відповідно, відношення l_{02}/l_{01} температура різання θ проходить точку мінімуму, яка досягається за умови рівності довжин робочого виступу l_{01} і вирізу l_{02} переривчастого круга, що співпадає із даними, наведеними в роботі [9].

Отже, використовуючи залежність (6), можна здійснювати розрахунки екстремальних значень параметрів теплового процесу під час переривчастого шліфування.

В умовах шліфування суцільним кругом за той же час $\tau_0 = \tau_{01} + \tau_{02}$, тобто за час одного контакту робочого виступу переривчастого круга із оброблюваним матеріалом, залежність (2) набуває вигляду:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{pi2}^2 \cdot \tau_0}{\lambda}}. \quad (8)$$

Із урахуванням екстремального значення часу $\tau_{01} = \tau_{02}$ маємо $\tau_0 = 2 \cdot \tau_{01}$. Тоді залежність (8), що визначає температуру різання θ під час шліфування суцільним кругом, приймає вигляд:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot V_{pi2}^2 \cdot \tau_{01}}{\lambda}}. \quad (9)$$

Із порівняння залежностей (7) і (9) видно, що під час переривчастого шліфування функція $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$ менше, а температура різання θ більше, ніж під час шліфування суцільним кругом. Це пов'язано із тим, що значення температури різання θ для двох випадків порівнюється у початковий час $\tau_0 = \tau_{01} + \tau_{02}$, тобто лише за один контакт робочого виступу переривчастого круга із оброблюваним матеріалом. Якщо за час проходження зони шліфування вирізом переривчастого круга відбудеться повне охолодження оброблюваного матеріалу, то під час наступних контактів робочих виступів переривчастого круга із оброблюваним матеріалом пікові значення температура різання θ не зміняться (рис. 3).

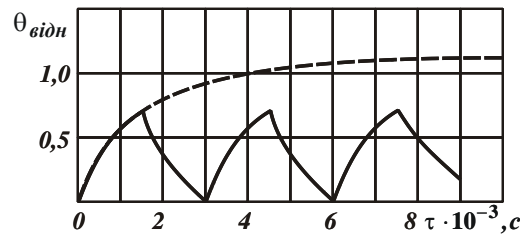


Рисунок 3– Розрахункові значення відносних температур різання $\theta_{відн}$ під час шліфування суцільним (контурна лінія) та переривчастим (суцільна лінія) кругами [2]

В умовах же шліфування суцільним кругом із часом обробки $\tau > \tau_0$ функція $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$ буде зменшуватися, а температура різання θ , навпаки, буде безперервно збільшуватися (рис. 3). У результаті температура різання θ під час шліфування суцільним кругом буде перевищувати температуру різання θ під час шліфування переривчастим кругом [2]. Тому основною умовою зменшення температури різання θ під час переривчастого шліфування слід розглядати необхідність підтримання її максимального значення (пікового значення) на заданому рівні шляхом забезпечення повного або часткового охолодження оброблюваного матеріалу за період проходження зони шліфування вирізом переривчастого круга.

У іншому випадку, тобто за умов недостатнього охолодження оброблюваного матеріалу за період проходження зони шліфування вирізом переривчастого круга, температура різання θ буде значно збільшуватися у міру збільшення кількості контактів робочих виступів переривчастого круга із оброблюваним матеріалом. Це не дозволить досягти ефекту від застосування переривчастого шліфування із точки зору зменшення температури різання.

Як показано в роботах професора Якимова О. В. [1–3], на практиці досягти умови повного охолодження оброблюваного матеріалу під час переривання контакту переривчастого шліфувального круга із оброблюваною деталлю і стабілізації в часі пікових значень температура різання θ (рис. 3) фактично неможливо. Вдається лише частково забезпечити охолодження оброблюваного матеріалу. Тому пікові значення температури різання θ не залишаються постійними в часі, а збільшуються, однак зі значно меншою інтенсивністю, чим інтенсивність збільшення температури різання θ в умовах шліфування суцільним кругом. Така закономірність

пов'язана із дуже незначним часом переривання процесу переривчастого шліфування, у результаті чого оброблюваний матеріал не встигає повністю охолоджуватися. Тому розглянемо умови зменшення температури різання θ .

Із залежності (7) випливає, що із урахуванням відношення $\tau_{01} = l_{01}/V_{кр}$ зменшити температуру різання θ під час шліфування переривчастим кругом можна зменшенням довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01} та збільшенням швидкості круга $V_{кр}$. Обмеженням зменшення довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01} слід розглядати його міцність. Отже, зменшення величини l_{01} призводить до збільшення кількості робочих виступів і, відповідно, кількості вирізів на переривчастому крузі, що є важливим чинником зменшення температури різання θ під час переривчастого шліфування.

Важливо провести кількісне порівняння температури різання θ під час шліфування сталі ШХ15 суцільним і переривчастим кругами. Коефіцієнт теплопровідності сталі ШХ15 – $a = \lambda/(c \cdot \rho) = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Для цього у табл. 1 наведено розрахункові значення часу $\tau = l/V_{дем}$ (де $l = \sqrt{2t \cdot R_{кр}}$ – довжина дуги контакту круга із оброблюваною деталлю, м; t – глибина шліфування, м; $R_{кр}$ – радіус круга, м; $V_{дем}$ – швидкість деталі, м/с), за яких відбувається повне перерізання адіабатичного стержня в умовах шліфування суцільним кругом.

Таблиця 1 – Розрахункові значення часу τ для вихідних даних: $t=0,1$ мм; $R_{кр}=100$ мм

$V_{дем}$, м/хв	1	2	5	10	20	30
τ , с	0,2683	0,1341	0,0537	0,02683	0,01341	0,00894

Для умов шліфування суцільним кругом температура різання θ визначається залежністю (1). У табл. 2 наведено розраховані за цією залежністю значення виразу $V_{різ}^2 \cdot \tau/a$. Для визначення часу τ із урахуванням отриманих значень виразу $V_{різ}^2 \cdot \tau/a$, встановлено значення $V_{різ}$ за залежністю (1) для вихідних даних: $V_{кр} = 30$ м/с; $t=0,1$ мм; $R_{кр} = 100$ мм. Розрахунками встановлено: $V_{різ} = 3,727$ мм/с. Виходячи із цього, у табл. 2 наведено розраховані значення часу τ на основі отриманих значень виразу $V_{різ}^2 \cdot \tau/a$ для різних значень відношення θ/θ_{max} .

Порівняння значення часу $\tau=0,02683$ с для $V_{дем}=10$ м/хв (табл. 1) зі значеннями часу τ (табл. 2) показало, що відношення θ/θ_{max} змінюється у межах 0,2 ... 0,4. Тому для більш точного визначення відношення θ/θ_{max} для часу $\tau=0,02683$ с проведено розв'язання рівняння (1) відносно відношення θ/θ_{max} числовим методом. У результаті встановлено: $\theta/\theta_{max}=0,215$.

Таблиця 2 – Розрахункові значення параметрів теплового процесу під час плоского шліфування для $V_{дем} = 10$ м/хв

θ/θ_{max}	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$e^{\theta/\theta_{max}}$	1	1,2214	1,4918	1,8221	2,2255	2,4596	2,7183
$(1-\theta/\theta_{max}) \cdot e^{\theta/\theta_{max}}$	1	0,9771	0,8951	0,7288	0,4451	0,24596	0
$V_{різ}^2 \cdot \tau/a$	0	0,02314	0,11	0,3163	0,81	1,4	∞
τ , с (для $V_{різ} = 3,727 \cdot 10^{-3}$ м/с)	0	0,014	0,0665	0,1913	0,4898	0,8466	∞

Для умов шліфування переривчастим кругом ($l_{01} = 20$ мм; $V_{кр} = 30$ м/с) температуру різання θ слід визначати залежністю (7) із урахуванням часу $\tau_{01} = l_{01}/V_{кр} = 0,63 \cdot 10^{-3}$ с. Після розв'язання рівняння (7) відносно відношення θ/θ_{max} числовим методом встановлено: $\theta/\theta_{max} = 0,07$. Це значення θ/θ_{max} менше значення $\theta/\theta_{max} = 0,215$, що отримано для умов шліфування суцільним кругом. Виходячи із цього, встановлено відношення температур різання під час шліфування переривчастим і суцільним кругами: $\theta_{перерив}/\theta_{суціль} = 0,07/0,215 = 0,325$. Як видно, застосування переривчастого шліфування дозволяє суттєво (до 3-х разів) зменшити температури різання θ . Однак, реальний ефект зменшення температури різання θ досягається, як

показано раніше, завдяки забезпеченню повного (або часткового) охолодження оброблюваного матеріалу за період проходження зони шліфування вирізом переривчастого круга.

На основі залежності (7) можна встановити умови реалізації екстремуму (мінімуму) температури різання θ під час переривчастого шліфування. Для цього слід виразити швидкість V_{piz} залежністю:

$V_{piz} = V_{dem} \cdot \sqrt{t / 2R_{kp}}$, а час $\tau_{01} = l_{01} / V_{kp}$. Тоді залежність (7) прийме вигляд:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot V_{dem}^2 \cdot t \cdot l_{01}}{\lambda \cdot R_{kp} \cdot V_{kp}}} \tag{10}$$

або

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot V_{dem} \cdot Q_{num} \cdot l_{01}}{\lambda \cdot R_{kp} \cdot V_{kp}}}, \tag{11}$$

де Q_{num} – питома продуктивність обробки, м²/с.

Як випливає із табл. 2, температура різання θ тим менше, чим менше показник ступеня експонентної функції ($V_{piz}^2 \cdot \tau / a$), що входить до правої частини залежності (2) і, відповідно, залежностей (10) і (11). Тому зменшити температуру різання θ під час плоского переривчастого шліфування за умови $Q_{num} = const$ можна зменшенням швидкості деталі V_{dem} та, відповідно, збільшенням глибини шліфування t , тобто застосуванням методу глибинного шліфування. Чим менше швидкість деталі V_{dem} , тим більше глибина шліфування t , і тим менше температура різання θ [9]. Це підтверджується також практичними даними, отриманими під час розрізання переривчастими кругами заготовок на частини із значними глибинами різання (30 мм і більше), за яких на оброблених поверхнях, як правило, відсутні припикання та інші температурні дефекти. Це вказує на незначні температури різання, які виникають в процесі різання, та можливість забезпечення високих показників якості та продуктивності обробки. Тому забезпечити суттєве збільшення питомої продуктивності обробки Q_{num} можна, головним чином, зменшенням швидкості деталі V_{dem} , збільшенням глибини шліфування t і швидкості круга V_{kp} .

Традиційно переривчасті круги застосовують в умовах багатопрхідного шліфування із відносно великими значеннями швидкості деталі V_{dem} та невеликими глибинами шліфування t . У цих умовах досягаються відносно невеликі значення питомої продуктивності обробки Q_{num} і температури різання θ , що забезпечують високу якість обробки, наприклад, на операціях зубошліфування [2]. Однак, при цьому температура різання θ зменшується лише в межах 50%, тоді як показано вище розрахунками температуру різання θ під час переривчастого шліфування можна зменшити до 3 –х разів. Отже, в умовах багатопрхідного шліфування недостатньо використовуються потенційні можливості процесу переривчастого шліфування з точки зору продуктивності обробки, оскільки з переходом до умов глибинного шліфування можна значно підвищити продуктивність обробки без збільшення температури різання θ .

Із залежності (11) також випливає, що зменшити температура різання θ та збільшити питому продуктивність обробки Q_{num} можна зменшенням довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01} . Однак,

як встановлено розрахунками, вираз $A = \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right)$, незначно збільшується після перевищення

екстремального значення $l_{01} = 6.32$ мм (табл. 3), а отже, незначно збільшується і температура різання θ . Тому на практиці довжину робочого виступу l_{01} , як правило, встановлюють більше довжини вирізу l_{02} на робочій поверхні переривчастого круга [1–3]. Це дозволяє значно зменшити зношування шліфувальних переривчастих кругів, особливо коштовних алмазних кругів, без значного збільшення температури різання θ .

Таблиця 3 – Розрахункові значення виразу $A = \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right)$ за умови $l_{02} = 10$ мм

l_{01} , мм	0	5	10	15	20	25	30	35	40
A , мм ^{0,5}	∞	6,71	6,32	6,46	6,71	7,0	7,3	7,6	7,9

Слід зазначити, що застосування переривчастих кругів, у яких $l_{01} < l_{02}$, неефективно, оскільки в цьому разі значно збільшується вираз A (табл. 3) і, відповідно, температура різання θ .

Зменшення довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01} за екстремальної умови $l_{01} = l_{02}$ указує на можливість значного збільшення кількості робочих виступів на поверхні переривчастого круга. Це рішення також знаходить застосовують на практиці для зменшення температури різання θ .

Таким чином, на основі проведеного теоретичного аналізу можна в узагальненому вигляді сформулювати основні умови зменшення температури різання під час переривчастого шліфування. Вони полягають, по-перше, у збільшенні до певного значення кількості робочих виступів на переривчастому крузі, по-друге, у виконанні умови $l_{01} = l_{02}$. Аналогічне аналітичне рішення отримано в роботі [7]. На основі накопиченого практичного досвіду також рекомендується застосовувати умову $l_{01} = l_{02}$, що підтверджує достовірність отриманого теоретичного рішення [11].

Порівняно із шліфуванням суцільним кругом, ефективність переривчастого шліфування досягається завдяки значному зменшенню часу формування максимальної температури різання θ . Так, в процесі переривчастого шліфування цей час дорівнює τ_{01} , а в процесі шліфування суцільним кругом – часу перерізання шліфувальним кругом адіабатичного стержня $\tau = l/V_{dem} = \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}} / V_{dem}$. Тоді відношення

$$\frac{\tau}{\tau_{01}} = \frac{\sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}}{V_{dem}} \cdot \frac{V_{кр}}{l_{01}} = \frac{\sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}}{l_{01}} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{dem}}. \quad (12)$$

Як витікає із залежності (12), відношення $\tau/\tau_{01} > 1$, тому температура різання θ під час переривчастого шліфування менше, ніж під час шліфування суцільним кругом. В умовах глибинного шліфування (із незначною швидкістю деталі V_{dem} та збільшеною глибиною шліфування t) відношення τ/τ_{01} суттєво збільшується, що вказує на ефективність застосування переривчастого шліфування. Зі зменшенням довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01} і збільшенням швидкості круга $V_{кр}$ також збільшується відношення τ/τ_{01} , що вказує на переваги переривчастого шліфування.

Висновки. У роботі отримано теоретичні рішення щодо аналітичного визначення температури різання під час переривчастого шліфування та обґрунтування умов її зменшення, які засновано на урахуванні балансу тепла, що виділяється в процесі шліфування та надходить до стружок і оброблюваної деталі. Проведено оптимізацію геометричних параметрів переривчастого круга за критерієм найменшої температури різання. Встановлено, що зі зміною довжини робочого виступу переривчастого круга температура різання змінюється за екстремальною залежністю, проходячи точку мінімуму. Екстремум (мінімум) температури різання досягається за умови рівності довжин робочого виступу і вирізу переривчастого круга. Показано, що чим більше робочих виступів на переривчастому крузі, тим меншою може бути температура різання. Розрахунками встановлено, що за цих умов температуру різання під час переривчастого шліфування можна зменшити до 3-х разів порівняно із звичайним шліфуванням суцільним кругом. Однак, для цього необхідно забезпечити повне або часткове охолодження оброблюваної деталі за період проходження зони шліфування вирізом переривчастого круга. Інакше температура різання буде значно збільшуватися у міру збільшення кількості контактів робочих виступів переривчастого круга із оброблюваним матеріалом, що може привести до перевищення температури різання, яка досягається під час шліфування суцільним кругом. Встановлено, що найбільшу продуктивність обробки за заданої температури різання в умовах переривчастого шліфування можна досягти шляхом застосування методу глибинного шліфування із відносно невеликою швидкістю деталі. Це підтверджується практичними даними, отриманими під час розрізання переривчастими кругами заготовок на частини із значними глибинами різання (30 мм і більше), за яких на оброблених поверхнях, як правило, відсутні припикання та інші температурні дефекти, що вказує на незначні температури різання, які виникають в процесі різання, та можливість забезпечення високих показників якості та продуктивності обробки.

Список літератури:

1. Теплофізика механічної обробки : підручник / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник, Д. В. Юргачов. Одеса: Астропринт, 2000. 256 с.
2. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования. М.: Машиностроение, 1975. 175 с.
3. Якимов А. В. Прерывистое шлифование. Киев – Одесса: Изд. объедин. Выпш школа, 1986. 175 с.
4. Kalashnikov A.S., Morgunov Y.A., Kalashnikov P.A., Filippov V.V. (2013). Features of intermittent profile grinding cylindrical gears. Izvestiya MGTU MAMI. Vol. 7. N. 1-2. P. 51-54.
5. Лаврінченко В. І. Надтверді матеріали в механообробці / В. І. Лаврінченко, М. В. Новіков; за ред. М. В. Новікова. Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. 456 с.
6. Larshin, V. P., Lishchenko, N. V., Pitel, J. (2020). Intermittent grinding temperature modeling for grinding system state monitoring. Applied Aspects of Information Technology. Simulation of Physical Objects and Processes. 2020; Vol.3 No.2: 58–73.
7. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 166 с.
8. Снижение теплового фактора при плоском абразивном шлифовании / Тонконогий В., Якимов А., Бовнегра Л., Безнос С., Добровольский В. // Технічні науки та технології. 2017. № 4. С. 16–26.
9. Novikov, F., Hutorov, A., Yermolenko, O., Dytynenko, S., Halahan, Y. (2022). Evaluation of a Decrease in Temperature Conditions upon Intermittent Grinding. In: Tonkonogiy, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 190-199 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_18

10. Новіков Ф. В. Технологічне забезпечення високоякісної та високоточної механічної обробки : монографія. Дніпро : ЛІРА, 2024. 460 с. ISBN 78-966-981-990-1
11. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. Т. 2. "Теплофизика резания материалов". Одесса: ОНПУ, 2003. 625 с.
12. Моделирование систем : монография / Г. А. Оборский, А. Ф. Дашенко, А. В. Усов, Д. В. Митришин. Одесса: Астропринт, 2013. 664 с.
13. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. Харьков: ГП "УкрНТЦ "Енергосталь", 2016. 448 с.
14. Стрельчук Р. М. Регулювання тепловими процесами під час електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. № 2 (10) 2024. С. 41-49. ISSN 2079-004X, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).05

Bibliography (transliterated):

- 1 Yakimov, O.V., Usov, A.V., Slobodyanik, P.T. (2000). Thermal Physics of Mechanical Processing. Odesa, Astroprint.
2. Yakimov A. V. (1975). Optimization of the grinding process. M.: Mechanical Engineering. 175.
3. Yakimov A.V. (1986). Intermittent grinding. Kyiv – Odessa: Publishing house. ed. Vishcha school. 175.
4. Kalashnikov A.S., Morgunov Y.A., Kalashnikov P.A., Filippov V.V. (2013). Features of intermittent profile grinding cylindrical gears. Izvestiya MGTU MAMI. Vol. 7. N. 1-2. P. 51-54.
5. Lavrinenko, V.I., Novikov, M.V. (2013). Superhard Materials in Machining. Kyiv, V. Bakul Institute for Superhard Materials. 456.
6. Larshin, V. P., Lishchenko, N. V., Pitel, J. (2020). Intermittent grinding temperature modeling for grinding system state monitoring. Applied Aspects of Information Technology. Simulation of Physical Objects and Processes. 2020; Vol.3 No.2: 58–73.
7. Sipaylov, V.A. (1978). Thermal Processes During Grinding and Surface Quality Control. Moscow, Mashinostroenie. 166.
8. Tonkonogiy, V., Yakimov, A., Bovnegra, L., Beznos, S., Dobrovolskiy, V. (2017). Reduction of the Heat Factor in Flat Abrasive Grinding. Technical Science and Technology, 4, 16–26.
9. Novikov, F., Hutorov, A., Yermolenko, O., Dytynenko, S., Halahan, Y. (2022). Evaluation of a Decrease in Temperature Conditions upon Intermittent Grinding. In: Tonkonogiy, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskiy, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 190-199 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_18
10. Novikov F. V. (2024). Technological support of high-quality and high-precision machining: monograph. Dnipro: LIRA. 460.
11. Novikov, F.V., Yakimov, A.V. (eds.): Physical and Mathematical Theory of Materials Processing and Mechanical Engineering Technologies. Vol. 2. "Thermal Physics of Cutting Materials". Odessa, ONPU (2003).
12. Oborskii, G.A, Dashchenko, A.F., Usov, A.V., Mitrichin, D.V. (2013). Systems Modeling. Odessa, Astroprint. 664.
13. Sizyi, Yu.A., Stalinskii, D.V. (2016). Dynamics and Thermal Physics of Grinding. Kharkiv, State Enterprise UkrNTPC "Energestal". 448.
14. Strelchuk R. M. (2024). Regulation by thermal processes during electroerosion grinding with variable electrode polarity / Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: collection of scientific papers / National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Kharkiv: NTU "KhPI". № 2 (10) 2024. 41-49. ISSN 2079-004X, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).05

Надійшла (received) 02.02.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Новіков Федір Васильович (Novikov Fedir) – доктор технічних наук, професор кафедри здорового способу життя, технологій і безпеки життєдіяльності Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-067-68-90-342; e-mail: novikovfv@i.ua ORCID: 0000-0001-6996-3356