

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВНУТРІШНЬОГО ШЛІФУВАННЯ ШЛЯХОМ ЗМЕНШЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ

*Наведено аналітичне рішення щодо визначення температури різання при шліфуванні, отримане з урахуванням балансу тепла, що йде в стружки, що утворюються, і поверхневий шар матеріалу оброблюваної деталі. Показано, що температура різання зі збільшенням глибини шліфування та швидкості деталі безперервно збільшується, асимптотично наближаючись до максимального значення, що визначається відношенням умовного напруження різання до добутку питомої теплоємності та щільності оброблюваного матеріалу. При досягненні температурою максимального значення все тепло надходить в стружки, що утворюються, і з'являється можливість суттєвого збільшення продуктивності обробки. Встановлено, що цю умову можна реалізувати, забезпечуючи зниження енергоємності обробки і, відповідно, максимальної температури різання до значення нижче температури плавлення оброблюваного матеріалу. Для цього ефективно збільшити поверхневу концентрацію зерен на робочій поверхні круга за рахунок застосування шліфувальних кругів з м'якою основою, наприклад, м'якого повстяного (фетрового) круга з наклеєним шаром абразивного порошку 63С 20П. Ефективно також застосування схеми внутрішнього шліфування поверхонь у пневмо- та гідروциліндрах, в якій вісь обертання шліфувального круга з індивідуальним приводом встановлюється перпендикулярно осі обертання отвору, що обробляється.*

**Ключові слова:** баланс тепла, абразивний порошок, якість та продуктивність обробки, умовне напруження різання, технологічне середовище, м'який повстяний круг.

**Постановка проблеми.** Підвищення якості та продуктивності механічної обробки є найважливішою умовою створення конкурентоспроможної машинобудівної продукції та виходу на міжнародні ринки. Однак, як відомо, якість обробки знижується зі збільшенням продуктивності, що обмежує технологічні можливості механічної обробки. Це відбувається внаслідок підвищення силової та теплової напруженостей процесу різання і, відповідно, сили та температури різання. Практика показує, що найважливішою умовою їх зменшення є застосування ефективних технологічних середовищ, що забезпечують зниження інтенсивності тертя в зоні різання та тепловідведення із зони різання. Особливо це стосується операцій внутрішнього шліфування поверхонь у пневмо- та гідроциліндрах, до якості обробки яких висуваються високі вимоги. Разом з тим проблема їх високоякісної обробки на операціях внутрішнього шліфування повною мірою не вирішена, в тому числі й у зв'язку з високою теплонапруженістю процесу різання. Тому пошук нових ефективніших методів та умов зниження температури різання при одночасному збільшенні продуктивності процесу шліфування має велике практичне значення. Це вказує на необхідність проведення подальших досліджень щодо вирішення актуальної науково-практичної проблеми підвищення якості та продуктивності процесу шліфування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням дослідження температурних явищ при шліфуванні у науково-технічній літературі приділено велику увагу. Їм присвячено роботи [1–4]. У цих роботах на основі вирішення рівняння теплопровідності аналітично визначено температуру різання та обґрунтовано умови її зниження. Ці умови полягають, головним чином, у застосуванні переривчастих, імпрегнованих та високопористих абразивних кругів. Однак у наведених теоретичних рішеннях недостатньо уваги приділено питанню розподілу тепла, що виникає при шліфуванні, у зоні різання. Згідно з отриманими аналітичними рішеннями, відсутнє кінцеве значення глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі – вона набуває нескінченного значення, що позбавлене фізичного сенсу.

Це не дозволяє аналітично ув'язати температуру різання з товщиною поверхневого шару оброблюваної деталі, порушеного внаслідок теплової дії. Відповідно, складно аналітично встановити кількість тепла, що надходить в стружки, що утворюються, та оброблювану деталь. А це не дозволяє науково обґрунтовано встановити закономірності формування температури різання та дійсні умови її зменшення. В результаті до цього часу це питання залишається невирішеним, незважаючи на те, що теоретичним дослідженням температури різання при шліфуванні приділено надзвичайно велику увагу в науково-технічній літературі. Тому є важливим і актуальним, використовуючи теоретичний підхід, запропонований в роботах [5, 6], провести подальші дослідження закономірностей формування температури різання при шліфуванні та виявити нові технологічні можливості її зменшення. Це дозволить підвищити ефективність операцій внутрішнього шліфування поверхонь у пневмо- та гідроциліндрах.

**Мета роботи** – теоретичний аналіз розподілу тепла, що надходить в стружки, що утворюються, і оброблювану деталь при шліфуванні, та на цій основі визначення температури різання, умов її зменшення й підвищення ефективності операцій внутрішнього шліфування поверхонь у пневмо- та гідроциліндрах.

**Викладення основного матеріалу.** Для досягнення поставленої мети слід скористатися розрахунковою схемою параметрів теплового процесу при плоскому шліфуванні, що наведена в роботі [5], рис. 1. У ній припуск, що знімається, представлений пакетом елементарних адіабатичних стержнів, які в процесі шліфування перерізаються шліфувальним кругом зі швидкістю  $V_{piz}$ .

На рис. 1 показано довжину частини зрізаного адіабатичного стержня  $l_1$  та глибину проникнення тепла вздовж адіабатичного стержня  $l_2$ . Максимальна глибина проникнення тепла вздовж адіабатичного стержня (або максимальна глибина проникнення тепла в поверхневий шар матеріалу оброблюваної деталі)  $l_2$ , досягається в момент повного перерізання адіабатичного стержня шліфувальним кругом.

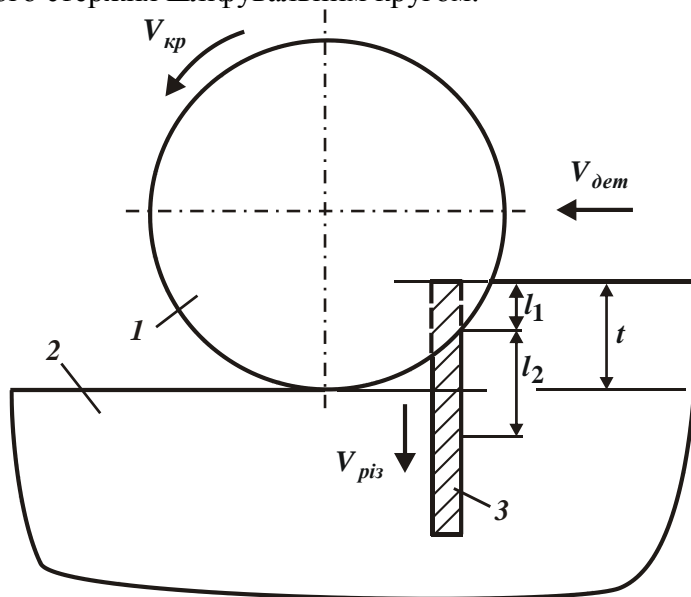


Рисунок 1 – Розрахункова схема параметрів теплового процесу при плоскому шліфуванні: 1 – шліфувальний круг; 2 – оброблюваний матеріал; 3 – адіабатичний стержень

Тепло, що виділяється при шліфуванні,  $Q_T = N \cdot \tau$  надходить в стружки, що утворюються, та в поверхневий шар матеріалу оброблюваної деталі на кінцеву глибину  $l_2 = \sqrt{2a \cdot \tau}$  [5], де  $N = P_z \cdot V_{кр}$  – потужність шліфування, Вт;  $P_z$  – тангенціальна складова сили різання, Н;  $V_{кр}$  – швидкість круга, м/с;  $\tau$  – час обробки, с;  $a = \lambda / (c \cdot \rho)$  – коефіцієнт температуропровідності оброблюваного матеріалу, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності

оброблюваного матеріалу, Вт/м·К;  $c$  – питома теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/(кг·К);  $\rho$  – щільність оброблюваного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>.

Виходячи з цього, рівняння балансу тепла, що надходить в стружки, що утворюються, та в поверхневий шар матеріалу оброблювану деталь за час шліфування  $\tau$ , набуває вигляду [7]:

$$P_z \cdot V_{кр} \cdot \tau = c \cdot m_{сmp} \cdot \theta + 0,5 \cdot c \cdot m_M \cdot \theta, \quad (1)$$

де  $P_z = \sigma \cdot S_{сум}$ ;  $\sigma$  – умовне напруження різання, Н/м<sup>2</sup>;  $S_{сум} = Q/V_{кр}$  – сумарна миттєва площа поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими абразивними зернами шліфувального круга, м<sup>2</sup>;  $Q$  – продуктивність обробки, м<sup>3</sup>/с;  $m_{сmp} = \rho \cdot \mathcal{G}_{сmp}$ ;  $m_M = \rho \cdot \mathcal{G}_M$  – відповідно, нагріті маси стружок, що утворюються, та поверхневого шару матеріалу оброблюваної деталі товщиною  $l_2$ , кг;  $\mathcal{G}_{сmp} = B \cdot l \cdot t$ ;  $\mathcal{G}_M = B \cdot l \cdot l_2$  – відповідно, нагріті об'єми стружок, що утворюються, та поверхневого шару матеріалу оброблюваної деталі товщиною  $l_2$ , м<sup>3</sup>;  $B$  – ширина шліфування, м;  $t$  – глибина шліфування, м;  $l = \sqrt{2t \cdot R_{кр}}$  – довжина дуги контакту шліфувального круга з оброблюваною деталлю, м;  $R_{кр}$  – радіус шліфувального круга, м;  $\theta$  – температура різання, К.

Із урахуванням співвідношення  $Q \cdot \tau = \mathcal{G}_{сmp}$  рівняння (1) після нескладних перетворень набуває вигляду:

$$\theta = \theta_{max} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\mathcal{G}_M}{2 \cdot \mathcal{G}_{сmp}}\right)} = \theta_{max} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{l_2}{2t}\right)}, \quad (2)$$

де  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  – максимальна температура різання, К.

Із урахуванням співвідношень  $l_2 = \sqrt{2a \cdot \tau}$ ;  $\tau = l/V_{дем}$  та  $l = \sqrt{2t \cdot R_{кр}}$  залежність (2) набуває вигляду:

$$\theta = \theta_{max} \cdot \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{a}{V_{дем} \cdot t}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{2t}}\right)} = \theta_{max} \cdot \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{a}{Q_{num}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{2t}}\right)}, \quad (3)$$

де  $V_{дем}$  – швидкість деталі, м/с;  $Q_{num} = V_{дем} \cdot t$  – питома продуктивність обробки, м<sup>2</sup>/с.

Із залежності (3) випливає, що зі збільшенням параметрів  $V_{дем}$ ,  $t$  та  $Q_{num}$  температура різання  $\theta$  безперервно збільшується, асимптотично наближаючись до значення  $\theta_{max}$  (рис. 2). Отже, основною умовою зменшення температури різання  $\theta$  при одночасному суттєвому збільшенні питомої продуктивності обробки  $Q_{num} = V_{дем} \cdot t$  є зменшення значення  $\theta_{max}$  шляхом зменшення умовного напруження різання  $\sigma$ . Це досягається зниженням інтенсивності тертя в зоні різання в результаті застосування ефективних технологічних середовищ та методів правлення шліфувальних кругів.

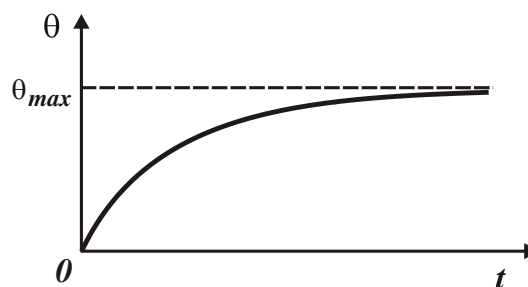


Рисунок 2 – Загальний вигляд залежності температури різання  $\theta$  від глибини шліфування  $t$

Зменшити температуру різання  $\theta$  за умови  $Q_{num} = const$  також можна зменшенням глибини шліфування  $t$  (при пропорційному зменшенні швидкості деталі  $V_{дет}$ ), тобто. застосуванням схеми багатопрхідного шліфування.

Для більш детального аналізу закономірностей зменшення температури різання  $\theta$  оцінимо частки тепла, що надходить в стружки, що утворюються,  $\alpha_{стр}$  та в поверхневий шар матеріалу  $\alpha_m$  оброблюваної деталі. Виходячи з рівняння (1), параметри  $\alpha_{стр}$  і  $\alpha_m$  визначаються залежностями:

$$\alpha_{стр} = \frac{c \cdot m_{стр} \cdot \theta}{P_z \cdot V_{кр} \cdot \tau} = \frac{\theta}{\theta_{max}}; \quad (4)$$

$$\alpha_m = 1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}. \quad (5)$$

Таким чином встановлено, що параметр  $\alpha_{стр}$  змінюється за законом зміни температури різання  $\theta$ : чим більше  $\theta$ , тим більше  $\alpha_{стр}$ . За умови  $\theta = \theta_{max}$ , маємо  $\alpha_{стр} = 1$ , тобто в цьому випадку до стружок, що утворюються, надходить все тепло, яке виділяється в процесі шліфування. Для виконання цієї умови та, по суті, необмеженого збільшення продуктивності обробки (рис. 2) необхідно забезпечити суттєве зменшення другого доданку в знаменнику залежності (3). Це досягається збільшенням глибини шліфування  $t$  та пропорційним зменшенням швидкості деталі  $V_{дет}$ , тобто застосуванням схеми глибинного шліфування. Однак значення  $\theta_{max}$  при шліфуванні, як встановлено розрахунково-експериментальним методом [6], багаторазово перевищує температуру плавлення оброблюваного металу. Тому необхідно прагнути до зменшення  $\theta_{max}$  шляхом зниження інтенсивності тертя у зоні різання.

Проведений аналіз значень умовного напруження різання  $\sigma$  показав, що при шліфуванні вони можуть змінюватися в межах до 150 000 Н/мм<sup>2</sup>, а при точінні – в межах всього 1000 ... 8000 Н/мм<sup>2</sup> [6]. Відповідно, максимальна температура різання  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  при шліфуванні досягає значень 10 000 °С, а при лезовій обробці змінюється лише в межах 1500 °С. Отже, при шліфуванні у зв'язку з високими значеннями умовного напруження різання  $\sigma$  фактично неможливо реалізувати умову  $\theta = \theta_{max}$ . Її можна досягти лише при лезовій обробці.

Виходячи з цього, максимальна температура різання  $\theta_{max}$  є основним параметром процесу різання, який визначає його потенційні можливості та дозволяє порівнювати різні методи механічної обробки за температурним критерієм й вибирати найбільш ефективні з них. Це пов'язано з тим, що параметр  $\theta_{max}$  не залежить від режимів різання – це фактично умовна температурна величина, яку важко реалізувати на практиці, тобто змусити все тепло, що виділяється в процесі різання, надходити лише в стружки, оскільки обов'язково частина тепла буде надходити в поверхневий шар оброблюваної деталі, а також невелика частина тепла буде надходити ще і в ріжучий інструмент.

Слід зазначити, що розглянуті в роботі два узагальнюючі параметри механічної обробки  $\sigma$  та  $\theta_{max}$  є дуже важливими для подальшого розвитку технології машинобудування та теорії різання матеріалів, за ними можна кількісно оцінювати силову та теплову напруженості обробки абразивними та лезовими інструментами. Параметр  $\theta_{max}$ , в першу чергу, важливий для вирішення проблеми проектування маршрутної технології (структурної оптимізації, аналізу та синтезу), а температура різання  $\theta$ , яка аналітично визначається через параметр  $\theta_{max}$ , важлива для проектування операційних технологій (визначення оптимальних параметрів режимів різання, характеристик інструментів та інших умов обробки). Тому вихід

на параметр  $\theta_{max}$  дозволяє підійти до вирішення питань вибору ефективної структури технологічних процесів механічної обробки – вибору найкращих із них за найменшим значенням  $\theta_{max}$ . На цій основі можна оцінювати, наприклад, ефективність застосування нових закордонних верстатів з ЧПУ типу "обробний центр" та нових різальних інструментів (в тому числі збірних лезових інструментів зі зносостійкими покриттями), які дозволяють підприємствам збільшити продуктивність до 10 разів (та приблизно в стільки ж разів зменшити трудомісткість та собівартість обробки при забезпеченні високої якості та точності) і впевнено почуватися в умовах, по суті, одиничного виробництва – успішно виходити на закордонні ринки та отримувати прибуток.

Слід зазначити, що основною причиною надзвичайно високої енергоємності обробки при шліфуванні (умовного напруження різання  $\sigma$ ) є інтенсивне тертя зв'язки шліфувального круга з оброблюваним матеріалом. Тому, зменшуючи його, можна зменшити енергоємність обробки. Це підтверджується відомими експериментальними даними [8], за якими при забезпеченні ефективного правлення шліфувального круга та суттєвого зниження енергоємності обробки максимальна температура різання  $\theta_{max}$  може приймати значення менше температури плавлення оброблюваного матеріалу. З'являється можливість реалізації умови  $\theta = \theta_{max}$  та, виходячи з рис. 2 й залежності (3), значного підвищення продуктивності обробки в умовах глибинного шліфування. При цьому, як встановлено експериментально, фактично все тепло, що виділяється при глибинному шліфуванні, надходить в стружки, що утворюються. Це дозволяє одночасно підвищити якість поверхневого шару оброблюваної деталі (виключити припикання та мікротріщини).

Наведене в цій роботі теоретичне рішення щодо визначення температури різання  $\theta$  також узгоджується з уточненим аналогічним аналітичним рішенням, наведеним у роботі [6]:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{\frac{c \cdot \rho}{\lambda} Q_{num} \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}}} \quad (6)$$

Відмінність розрахункових значень температури різання  $\theta$ , отриманих на основі використання залежностей (3) і (6), становить всього 1,26 % при шліфуванні сплаву ЖС6К із режимом різання:  $V_{дем} = 0,1$  м/с;  $t = 0,02$  мм;  $R_{кр} = 0,1$  м;  $\sigma = 52065$  Н/мм<sup>2</sup>;  $a = \lambda / (c \cdot \rho) = 3,73 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

За залежністю (3) встановлено:  $\theta / \theta_{max} = 0,0938$ ;  $\theta = 1095$  °С;  $\theta_{max} = 11673,7$  °С. За залежністю (6) встановлено:  $\theta / \theta_{max} = 0,095$ ;  $\theta = 1109$  °С.

Для тих самих вихідних даних експериментально встановлено в роботі [9] значення температури різання  $\theta$  становить 1000 °С. Як видно, розбіжність розрахункових та експериментального значень температури різання  $\theta$  не перевищує 11 %. Це свідчить про достовірність отриманого в роботі теоретичного рішення для визначення температури різання  $\theta$  та можливість його практичного застосування.

Для зниження інтенсивності тертя зв'язки шліфувального круга з оброблюваним матеріалом у даній роботі запропоновано суттєво збільшити поверхневу концентрацію абразивних зерен на робочій поверхні круга за рахунок застосування шліфувальних кругів з м'якою основою, наприклад, м'якого повстяного (фетрового) круга з наклеєним шаром абразивного порошку 63С 20П [10]. В цьому випадку фактично відсутній контакт зв'язки круга з оброблюваним матеріалом – із матеріалом контактують в основному абразивні зерна, що знижує інтенсивність тертя в зоні шліфування та температуру різання.

Із залежності (3) випливає, що зі збільшенням радіусу шліфувального круга  $R_{кр}$  температура різання  $\theta$  зменшується. Тому доцільно шліфування здійснювати зі збільшеною довжиною дуги контакту шліфувального круга з оброблюваною деталлю  $l$ . Ефективним рішенням у цьому напрямку є застосування схеми внутрішнього шліфування, в якій вісь

обертання шліфувального круга з індивідуальним приводом встановлюється перпендикулярно осі обертання оброблюваного отвору (рис. 3 [10]).

Порівняно із традиційно застосовуваною схемою круглого внутрішнього шліфування, довжина дуги контакту шліфувального круга з оброблюваною деталлю  $l$  в цьому випадку може бути збільшена в декілька разів, що створює умови зменшення температури різання  $\theta$  та, відповідно, підвищення якості й продуктивності обробки.



Рисунок 3 – Схема внутрішнього шліфування

Найважливішим фактором підвищення продуктивності обробки  $Q$  або зменшення температури різання  $\theta$  в цьому випадку необхідно розглядати зменшення умовного напруження різання  $\sigma$  за рахунок застосування шліфувальних кругів з м'якою основою, що знижують інтенсивність тертя в зоні шліфування.

Як показано у роботі [11], ця схема внутрішнього шліфування дозволяє також зменшити шорсткість поверхні, що забезпечує високоякісну обробку.

Результати практичного застосування запропонованої схеми внутрішнього шліфування поверхонь у пневмо- та гідроциліндрах показали на її високу ефективність. За показниками якості та продуктивності обробки ця схема внутрішнього шліфування перевершує застосовану на практиці схему звичайного внутрішнього шліфування та дозволяє здійснювати фінішну обробку з більш високою продуктивністю без утворення на оброблюваних поверхнях прип'якань, мікротріщин та інших температурних дефектів.

## Висновки

У роботі наведено аналітичне рішення щодо визначення температури різання при шліфуванні, отримане з урахуванням балансу тепла, що йде в стружки, що утворюються, та поверхневий шар матеріалу оброблюваної деталі. Показано, що температура різання зі збільшенням глибини шліфування та швидкості деталі безперервно збільшується, асимптотично наближаючись до максимального значення, що визначається відношенням умовного напруження різання до добутку питомої теплоємності та щільності оброблюваного матеріалу. При цьому частка тепла, що надходить в стружки, що утворюються, безперервно збільшується – аж до 100% і змінюється за законом зміни температури різання. При досягненні температурою максимального значення все тепло надходить в стружки, що утворюються, і з'являється можливість суттєвого збільшення продуктивності обробки. Встановлено, що цю умову можна реалізувати, забезпечуючи зниження енергоємності обробки та, відповідно, максимальної температури різання до значення нижче температури плавлення оброблюваного матеріалу. Для цього ефективно збільшити поверхневу концентрацію зерен на робочій поверхні круга за рахунок застосування шліфувальних кругів з м'якою основою, наприклад, м'якого повстяного (фетрового) круга з наклеєним шаром абразивного порошку 63С 20П. Ефективним є також застосування схеми внутрішнього шліфування поверхонь у пневмо- та гідроциліндрах, в якій вісь обертання шліфувального

круга з індивідуальним приводом встановлюється перпендикулярно осі обертання оброблюваного отвору.

### Список використаних джерел:

1. Якимов А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – Киев–Одесса : Изд. объедин. "Вища школа", 1986. – 175 с.
2. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
3. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков: ГП УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. – 448 с.
4. Моделирование систем: монография / Г. А. Оборский, А. Ф. Дашенко, А. В. Усов и др. – Одесса: Астропринт, 2013. – 664 с.
5. Современные технологии и техническое перевооружение предприятий: монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, А. А. Андилахай, Д. Ф. Новиков, В. И. Полянский. – Днепр : ЛИРА, 2018. – 400 с.
6. Полянський В. І. Основи забезпечення якості та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08 – технологія машинобудування. – Харків: НТУ "ХПІ", 2021. – 40 с.
7. Технологии производства: проблемы и решения : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, С. А. Дитиненко, А. Г. Крюк, Н. Ф. Савченко, В. Г. Шкурупий, В. И. Полянский, И. А. Рябенков, Д. Ф. Новиков. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 536 с.
8. Werner G. Technologische und Konstruktive Voraussetzungen für das Tiefschleifen. "Werkstattstechnik", 1979. Nr. 10. s. 613–620.
9. Ящерицын П. И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П. И. Ящерицын, А. К. Цокур, М. Л. Еременко. – Минск: Наука и техника, 1973. – 184 с.
10. Сергеев А. С. Высокоэффективная технология внутреннего шлифования отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах / А. С. Сергеев // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф., присвяченої 90-річчю заснування кафедри обробки металів тиском, 20–22 листопада 2019 р. Харків. – Харків: НТУ "ХПІ", 2019. – С. 144–145.
11. Новиков Ф. В. Условия уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке отверстий в цилиндрах / Ф. В. Новиков, А. А. Андилахай, А. С. Сергеев // Инженер-механик: Республиканский межотраслевой производственно-практический журнал. – №3(84), июль – сентябрь 2019. – Беларусь, Минск, 2019. – С. 26–27.

**Новиков Ф. В., Сергеев А. С., Андилахай А. А. Повышение эффективности внутреннего шлифования путем уменьшения температуры резания.** Приведено аналитическое решение об определении температуры резания при шлифовании на операциях внутреннего шлифования поверхностей в пневмо- и гидроцилиндрах, к качеству обработки которых предъявляются высокие требования. Это аналитическое решение получено с учетом баланса тепла, возникающего в процессе шлифования и уходящего в образующиеся стружки и поверхностный слой материала обрабатываемой детали. Показано, что температура резания с увеличением глубины шлифования и скорости детали непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальному значению, определяемому отношением условного напряжения резания к произведению удельной теплоемкости и плотности обрабатываемого материала. При этом доля тепла, уходящего в образующиеся стружки, непрерывно увеличивается вплоть до 100 % и изменяется по закону изменения температуры резания. Расчетами установлено, что при достижении температурой максимального значения

все тепло, возникающее в процессе шлифования, уходит в образующиеся стружки, в результате чего появляется возможность существенного увеличения производительности обработки. Установлено, что это условие можно реализовать, обеспечивая снижение энергоемкости обработки и, соответственно, максимальной температуры резания до значения, ниже температуры плавления обрабатываемого материала. Для этого необходимо снизить интенсивность трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом путем повышения режущей способности шлифовального круга, применяя для этого эффективные методы его правки. Эффективным направлением решения этой важной научно-практической задачи является увеличение поверхностной концентрации абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга за счет применения шлифовальных кругов с мягкой основой, например, мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П. Показано, что эффективно в этом случае применять схему внутреннего шлифования поверхностей в пневмо- и гидроцилиндрах, в которой ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия. Наряду с уменьшением максимальных высот микронеровностей на обрабатываемой поверхности, эта схема внутреннего шлифования обеспечивает снижение силовой и тепловой напряженностей процесса шлифования, что позволяет снизить силы и температуру резания и повысить качество обработанной поверхности, исключить образование на ней прижогов, микротрещин и других температурных дефектов.

**Ключевые слова:** баланс тепла, абразивный порошок, качество и производительность обработки, условное напряжение резания, технологическая среда, мягкий войлочный круг.

**Novikov F.V., Serhieiev O.S., Andilakhai O.O. Increasing the efficiency of internal grinding by reducing the cutting temperature.** An analytical solution for determining the cutting temperature during grinding in relation to the operations of internal grinding of surfaces in pneumatic and hydraulic cylinders, the quality of processing of which is subject to high requirements. The analytical solution is obtained taking into account the heat balance that arises in the grinding process and enters the formed chips, and the surface layer of the material of the workpiece. It is shown that the cutting temperature with increasing grinding depth and speed of the part continuously increases, asymptotically approaching the maximum value, which is determined by the ratio of the conditional cutting stress to the product of specific heat and density of the processed material. At the same time the share of heat going to the formed shavings continuously increases - up to 100% and changes according to the law of change of temperature of cutting. Calculations have shown that when the temperature reaches the maximum value, all the heat generated during the grinding process enters the formed chips, and therefore there is a possibility of a significant increase in processing productivity. It is established that this condition can be realized by reducing the energy consumption of the processing and, accordingly, the maximum cutting temperature to a value below the melting point of the processed material. To do this, it is necessary to reduce the intensity of friction of the connection of the grinding wheel with the processing material by increasing the cutting ability of the grinding wheel, using effective methods of its control. An effective way to solve this important scientific and practical problem is also to increase the surface concentration of abrasive grains on the working surface of the grinding wheel through the use of grinding wheels with a soft base, such as soft felt (felt) wheel with an adhesive layer of abrasive powder 63С 20P. It is shown that it is effective in this case to use the scheme of internal grinding of surfaces in pneumatic and hydraulic cylinders, in which the axis of rotation of the grinding wheel with individual drive is set perpendicular to the axis of rotation of the machined hole. Along with reducing the maximum heights of microroughnesses on the treated surface, this scheme of internal grinding reduces the force and thermal stresses of the grinding process, which



reduces the force and cutting temperature and improves the quality of the treated surface, eliminates the formation of cauterization, microcracks and other temperature defects.

**Key words:** heat balance, abrasive powder, quality and productivity of processing, conditional cutting stress, technological environment, soft felt circle.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. ГБУЗ "ПГТУ"

*Статья поступила 12.11.2021 г.*