

ВІДПОВІДНІСТЬ ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРІВ ТЕМПЕРАТУРИ І ПОТУЖНОСТІ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ

А.В. Рудик¹, В.М. Чуприна²

¹к.т.н., старший науковий співробітник відділу ППО,
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння
та військової техніки, Чернігів, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3582-9279

²д.т.н., провідний науковий співробітник відділу ОЛТЕХ,
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння
та військової техніки, Чернігів, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-4886-090X

Анотація

Вступ. Шліфування поверхонь є ефективним методом фінішної обробки інструментом, що має переривчасту робочу поверхню. Процес шліфування супроводжується подрібненням стружки при нераціональній геометрії абразивних зерен. Це робить процес енергетично витратним. Теплові явища, що супроводжують процес, визначають експлуатаційні властивості поверхонь деталей. Теоретичним та експериментальним дослідженням процесу шліфування присвячені праці ряду вчених. Інтенсивність зміни температури шліфування часто пояснюють тепловими потоками. Різні методи експериментальних досліджень сигналів зміни температури за часом методів шліфування, та їх порівняння, доводять імпульсний характер дії джерел теплоти. Вочевидь, дією постійного теплового потоку це пояснити не можливо. Теоретично визначений ряд параметрів процесу шліфування, серед яких: розміри контакту; загальний час обробки, інтервали часу між дією сусідніх кромки; швидкість підведення припуску як для попутної так і зустрічної схеми шліфування; відсоток різальних кромки серед загальної кількості. Відмічені характерні моменти часу, що відповідають початку, закінченню процесу та досягненню теплового балансу. **Мета** – перевірка адекватності наведених теоретичних викладок в працях авторів, їх узагальнення, та порівняння з відомими експериментальними дослідженнями сигналів вимірювання температури та потужності процесу круглого поздовжнього та інших методів шліфування, проведених іноземними вченими для методів як при попутній, так і зустрічній кінематиці.

Результати. Проведений аналіз та розрахунки дозволили довести відповідність запропонованої теоретичної моделі та експериментальних даних теплових сигналів для методів процесу шліфування.

Висновки. Знайдені потужність, що припадає на різальну кромку, розподілення енергії, що відводиться зі стружкою та надходить в деталь. Оцінені фактори зміни потужності за час проходження області контакту.

Ключові слова: шліфування, теоретична модель, експеримент, температура, потужність, імпульсна дія, інтенсивність.

**CORRESPONDENCE OF THE THEORETICAL MODEL
AND THE RESULTS OF TEMPERATURE AND POWER MEASUREMENTS
OF THE GRINDING PROCESS**

A.V. Rudyk¹, V.M. Chupryna²

¹PhD, Senior Researcher

*of the Department of State Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-3582-9279*

² Doctor of Engineering, Lead Researcher of the Department OLTEX
*State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing
and Certification, Chernihiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-4886-090X*

Summary

Introduction. Surface grinding is an effective method of finishing with a tool that has a discontinuous working surface. The grinding process is accompanied by the grinding of chips with an irrational geometry of abrasive grains. This makes the process energy consuming. The thermal phenomena accompanying the process determine the operational properties of the parts' surfaces. The works of a number of scientists are devoted to theoretical and experimental studies of the grinding process. The intensity of the change in temperature and power of the grinding process is often explained by heat flows. Different methods of experimental studies of signals of temperature change over time for main grinding methods, and their comparison, prove the pulsed nature of the action of heat sources. Obviously, this cannot be explained by the action of a constant heat flow. A number of parameters of the grinding process are theoretically determined, including: contact dimensions; total processing time, time intervals between the action of adjacent edges; the speed of adding the allowance for both parallel and opposing grinding schemes; the percentage of cutting edges among the total number. Characteristic moments and time intervals corresponding to the beginning, end of the process and achievement of thermal balance are noted. **Purpose.** The article is devoted to the verification of the correspondence of the theoretical explanations given in the works of the authors, their generalization, and known experimental studies of the temperature and power measurement signals of the circular longitudinal process and other methods of grinding, carried out by foreign scientists for various methods, both with accompanying and opposite kinematics. **Results.** The conducted analysis and calculations made it possible to prove the correspondence of the proposed theoretical model and experimental data of thermal signals for methods of the grinding process. **Conclusions.** The power falling on the cutting edge, the energy distribution, which is removed with the chip and enters the part, are found. Estimated power change factors during the passage of the contact area.

Key words: grinding, theoretical model, experiment, temperature, power, impulse action, intensity.

Вступ. Шліфування поверхонь є ефективним методом фінішної обробки. Шліфувальний інструмент має переривчасту робочу поверхню. Під час процесу відбувається подрібнення стружки при нераціональній геометрії зерен. Це робить процес енергетично витратним.

Актуальність роботи. Теплові явища, що супроводжують процес визначають експлуатаційні властивості поверхонь деталей. Тому теоретичним та експериментальним дослідженням процесу шліфування присвячені праці ряду вчених.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Крім теоретичних напрацювань авторів роботи, існує значна кількість експериментальних досліджень різних методів шліфування проведених як вітчизняними, так і закордонними вченими [1–4]. В роботі С.М.Корчака температуру вперше [1] розглядають як результат сумарної дії теплових імпульсів, інтенсивність і кількість яких залежить від характеристик круга, заготовки, режиму різання. Враховано вплив температури поверхневих шарів на зміну опору пластичному деформуванню, а тому, на інтенсивність тепловиділень. Роботи [2; 3] присвячені термомеханічному підходу до процесів обробки. Кінематичний ефект швидкісного шліфування досліджений в роботі [4]. Проф. Криворучко Д. В. [5] виникнення теплоти пояснює наслідком адиабатичного стиснення. Побудовані складні математичні моделі [5; 6], що обмежує їх практичне використання. В роботі Смірнова В.А. [7] врахований імпульсний характер дії теплоти. Автор пропонує теплоту вважати такою, що складається з рівномірно розподіленої та імпульсної частин.

В попередніх роботах авторів [8; 9] в якості вхідних для розрахунків теплових явищ прийняті: витрачена потужність, стан робочої поверхні круга (РПК), величина припуску t , кінематика, що крім швидкості шліфування $V_{кр}$ описує проекцію на нормаль відносного руху V_d кругової подачі деталі ω_d (або поступальної стола $V_{ст}$); радіуси $R=D/2$, r круга та деталі. Врахований відносний напрям швидкостей подачі та різання: зустрічна чи попутна обробка. Теоретично визначені кутові розміри θ_n круга та довжину контакту:

$$\theta_n = \sqrt{\frac{2 \cdot t \cdot r}{R \cdot (R + r)}}, \quad L_k = R \cdot \theta_n. \quad (1)$$

Звідси, загальний час обробки визначають різницею між кінцевим та початковими моментами часу $T_o = \tau_k - \tau_0$, або відношенням довжини контакту до швидкості руху подачі

$$T_o = L_k / V_o \quad (2)$$

Проекція швидкості підведення припуску на напрям нормалі до поверхні круга $V_{n,max} = V_n(\theta_n)$, як локальний показник інтенсивності процесу за рахунок суми поступального та обертового рухів подачі у функції центрального кута $\theta_0 \leq \theta \leq \theta_n$ інструмента в межах контакту:

$$V_{n,поз} = \omega_d \cdot (R + r)(\theta_2 - \theta_1) + n_d \cdot S_0 \cdot \alpha, \quad (3)$$

де $V_o = \omega_o \cdot r$ – швидкість кругової подачі деталі.

Локальний показник проекції на нормаль відносного руху подачі V_n краще ніж усереднений питомої продуктивності, який широко використовують для опису інтенсивності процесу. Проекція швидкості відносного руху подачі на нормаль V_n до поверхні інструмента знаходиться в межах $0 \leq V_n(\theta_n) \leq V_{n,max}$. Максимальне значення $V_{n,max} = V_n(\theta_n)$ визначають крайнім (або більшим кутовим розміром) для умов як зустрічного, так і попутного шліфування.

Для процесу шліфування (фрезерування) розрізняють *попутну та зустрічну обробку* – теплова напруженість та стійкість яких відрізняються, та є кращими для попутної схеми, коли підведення припуску зменшується до нуля за кутом повороту інструмента [8; 9]. Глибину проникнення кромки за час $d\tau$ повороту деталі на кут контакту. $d\tau = d\phi / \omega_\phi$ для *зустрічної* схеми різання визначають:

$$z^{звч}(\phi_1) = \int_0^{\tau_1} V_n d\tau = \int_0^{\phi_1} \left[\omega_\phi \cdot (R+r) \cdot \left(\frac{r}{R} \cdot \phi \right) \right] \frac{d\phi}{\omega_\phi} = (R+r) \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{\phi_1^2}{2} \quad (4з)$$

Для *попутної* обробки змінюється напрям обертання деталі, тому границі інтегрування:

$$z^{non}(\phi_1) = \int_{(\phi_n - \phi_1)}^{\phi_n} V_n d\phi = (R+r) \cdot \frac{r}{2 \cdot R} \cdot [2 \cdot \phi_n \cdot \phi_1 - \phi_1^2] \quad (4п)$$

Товщину зрізу знаходять через ймовірність контакту [8] кромки з припуском. Згідно закону Пуассона, який вірний для одинарних (що відбуваються по одинці) процесів появи подій, ймовірність визначають:

$$P_0(\tau) = e^{-\tau_k \cdot v_{кр} \cdot \int_0^{\tau_k} N(x(\tau)) \cdot d\tau} \quad (5)$$

де $P_0(\tau)$ – ймовірність відсутності контакту кромки з металом на протязі часу τ , $\frac{\partial P_0(\tau)}{\partial \tau} d\tau$ – елемент ймовірності, $N(z)$ – питома кількість кромок РПК в межах деякої висоти z РПК висотою профілю H_n [4; 8], $x(\tau) = V_n \cdot m_{\Delta\tau} / H_n$ z – відносне заглиблення вглиб РПК. Інтервали часу $m_{\Delta\tau}$ між контактами кромки з припуском знаходять через елемент ймовірності як математичне сподівання.

$$m_{\Delta\tau}(\tau_k) = \int_0^{\tau_k} \tau \cdot \frac{\partial P_0(\tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad (6)$$

Відсоток різальних кромки серед загальної кількості за час проходження області контакту представлений на рис. 1:

$$\%_p(\tau) = 100 * \left(1 - \frac{pbeta_\tau(\tau)}{pbeta_\tau(\tau_k)} \right), \quad \%_{pиз} = \%_p(\tau_R). \quad (7)$$

де моменти часу: біжучий τ , переходу до процесу різання τ_R та кінцевий τ_k ; $pbeta(\tau)$ – інтегральна функція бета розподілення зміни інтервалу часу впродовж від початкового τ_0 до біжучого моменту τ .

Зміну за часом τ_1 проходження області контакту інтегральної функції відсотка різальних кромки $F\%$ щодо їх загальної кількості показаний на рисунку 1. Даний приклад розрахований для режимних параметрів [4; 8]: круг марки 25СМ1 після правки, швидкості різання та подачі відповідно $V_{кр} = 50$ м/с; $V_d = V_{кр}/60$; глибина $t = 0,05$ мм.

Відмітимо вплив проекції швидкості V_n на усі розглянуті параметри.

Мета – це перевірка відповідності теоретичних залежностей, наведених в працях авторів [8; 9], та експериментальних досліджень теплової напруженості методів процесу шліфування проведених іноземними вченими [7; 10; 11].

Мету можна досягнути шляхом виконання *завдань дослідження*.

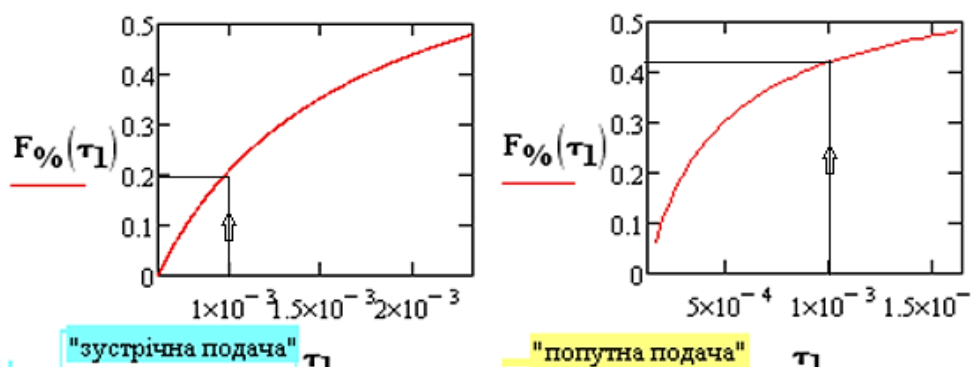


Рис. 1. Зміна за часом τ_1 відсотка різальних кромок для зустрічного та попутного шліфування

Дослідити дослідні графіки зміни температури процесів шліфування, виділити на них характерні точки, як то τ_0 початку, τ_k закінчення та τ_B досягнення теплового балансу та характерних відповідних інтервалів.

Дослідити вплив проекції швидкості відносної подачі V_n на температуру протікання процесу шліфування.

Результати. Графіки вимірювання температури процесу шліфування [7; 10; 11] (рис. 3) доводять імпульсний характер дії теплових джерел та дозволяють порівнювати методи вимірювання. Досліди дозволяють визначити характерні моменти й інтервали часу між контактами. Можна знайти співвідношення між кількістю кромок як на початку різання, так і при виході з контакту.

Розглянемо декілька прикладів.

1. В роботі Смірнова В.А. [7] для круглого поздовжнього шліфування досліджувався характер теплових виділень за допомогою термопар отриманий експериментом тепловий сигнал [7]. Однак не наведені усі потрібні данні. Так, не вказані значення радіусів деталі та круга, стан РПК. За виміряним часом контакту данні визначені розрахунком [8]. Умови досліду (рисунок 2,а), вказані у другому стовпчику таблиці. Відмітимо імпульсну дію теплових джерел та задовільний збіг теоретичних та дослідних даних.

2. Урізне шліфування можна розглядати як ефективний різновид (3) круглого [2–4], де урізання відбувається по спіралі Архімеда із параметром, що дорівнює $t = \frac{S_{non}}{n_\phi}$. Ефективність методу пояснюється додатковою спрямованою радіально

складовою нормальної швидкості S_{non} та значним збільшенням розмірів контакту.

3. В роботі англійських вчених Ху Хіпенга та Стіва Малкіна [10] (рис. 2,б) та (рис. 3–5) були експериментально отримані та порівняні між собою теплові сигнали від природної, штучної термопар та інфрачервоного датчика для умов дослідів при плоскому попутному шліфуванні призматичного бруска без використання МОР.

Детальні умови досліду наведені у третьому стовпчику таблиці. Основні теоретичні залежності залишаються подібними, вважаючи радіус деталі $r \rightarrow \infty$. Стан

РПК для оцінки параметрів зрізу прийнято подібним до використаного [4] ельборового круга із урахуванням даних роботи [10].

Як для вбудованих термопари так і для фотоелемента, реальну глибину знаходження датчиків, що впливала на значення температури, у кожному експерименті розраховували числом проходів до закінчення шліфування. Сигнали подавали в комп'ютер через фільтр низьких частот і аналого-цифровий перетворювач.

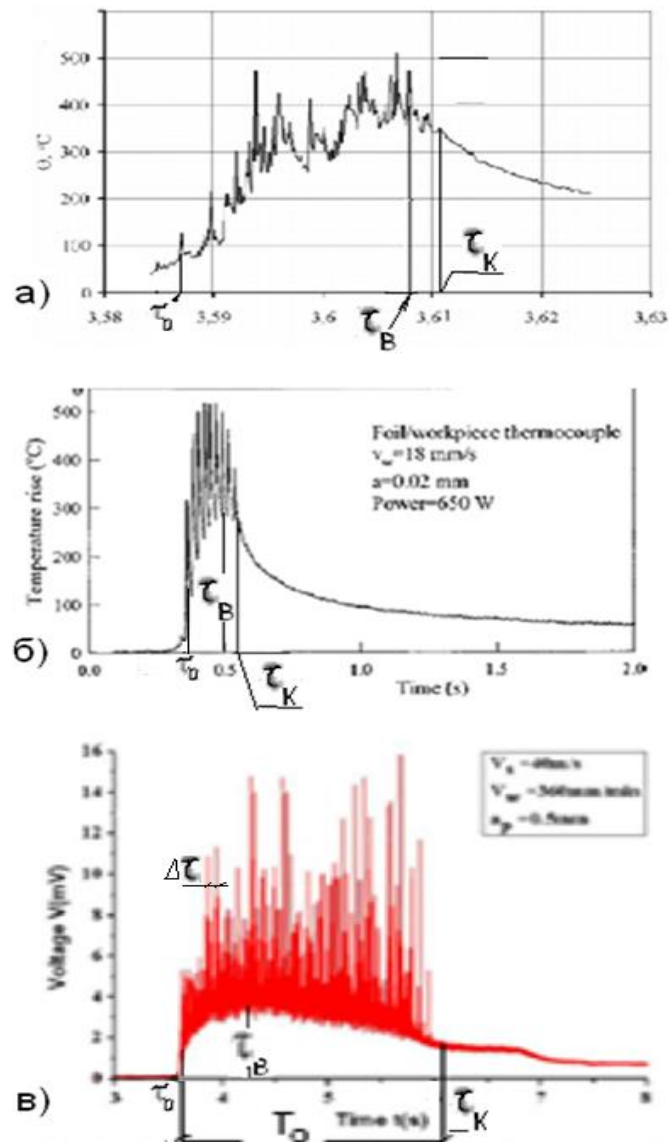


Рис. 2. Результати вимірювання температури методів шліфування:
а) круглого поздовжнього [7]; б) попутного плоского [10]; в) плоского [11]

Режимні параметри	Метод обробки, дослідники		
	Поздовжнє	Плоске	
	Смірнов В.А. [7]	Ху Хіпенг, Стів Малкін [10]	китайські вчені [11]
Шліфувальний круг D×H	Ø550*(орієнтовно), 25 СМ1	КНБ, Ø406×12.5 зернист. 91, 100%	КНБ, Ø400×10
Заготовка	вуглецева сталь 9ХС	вуглецева сталь НВ 88	Нікелевий сплав Inconel 718
Розміри заготовки: Висота *Ш*Д	поверхня обер- тання Ø180	Н×W×L= = 25×19×44	Н×W×L= = 60×5×50
Припуск, t, мм	0,01	0,02	0,5
Кутові розміри контакту: $\theta_n = L_k / R$			
розрахована довжина L_k	1,65	2,85	14,15 мм
Швидкість			
різання $V_{кр}$ м/с	35*	58	40 (130÷30)
заготовки V_d мм/с	50*	18	360/60
нормальна V_n 1000* V_{nMAX} мкм/с	417	253	4243
Знайдені з рисунку 3 моменти та інтервали часу, с			
початковий момент τ_0	3,583	0,3	3,55
Час τ_B досягнення теплового балансу	3,607	0,5	4,3
момент закінчення різання τ_k	3,612	0,6	6,05
Інтервали часу, с			
Вимірний час $T_0 = \tau_k - \tau_0$	0,026	0,15	2,5
Розрахований час $T_0^* = L_k / V_d$	0,025	0,158	2,36
Між тепловими імпульсами	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$2,42 \cdot 10^{-4}$
Потужність процесу, Вт	-	650	1050

Усі теплові сигнали, отримані різними експериментальними методами (рис. 2,б), мають порівнянні результати та імпульсний характер дії джерел.

При ідентичних умовах шліфування поверхні без використання МОР, кругом із кубічного нітриду бору були зіставлені три названі методи вимірювання температури.

На рис. 3 показані схема установки вимірювання температури та потужності; результати вимірювання температури (рис.4) вбудованою термopарою (а), інфрачервоним датчиком (б) і термopарою із фольги у заготовці (в). Результати вимірювання температури можна порівняти із аналітичними розрахунками по інтенсивності процесу шліфування.

Усі методи, при плоскому шліфуванні, показали порівнянні результати.

Термопара із фольги у заготовці також реєструвала періодичні піки миттєвої температури при обертанні шліфувального круга. Інфрачервоні вимірювання показували піки більш низької інтенсивності, ніж ті що виникають на тій же частоті. Як було запропоновано раніше, миттєва температура може бути пов'язана із різанням окремими зернами шліфувального круга [2]. Отже, фізична природа піків, які спостерігають, не відома і вимагає подальших досліджень. Даний експеримент не пояснює чим викликані як стрімкі піки температури, так і її зниження.

На рис.4,а та 4,б відмічено кольором зменшення температури процесу по проходах (при зменшенні глибини), або від інтенсивності V_n . Отже, досліді доводять значний вплив проекції V_n швидкості відносного руху подачі на температуру.

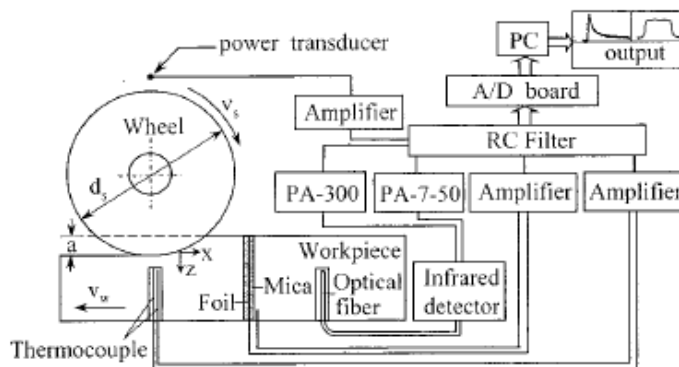


Рис. 3. Схема установки вимірювання температури та потужності шліфування [10]

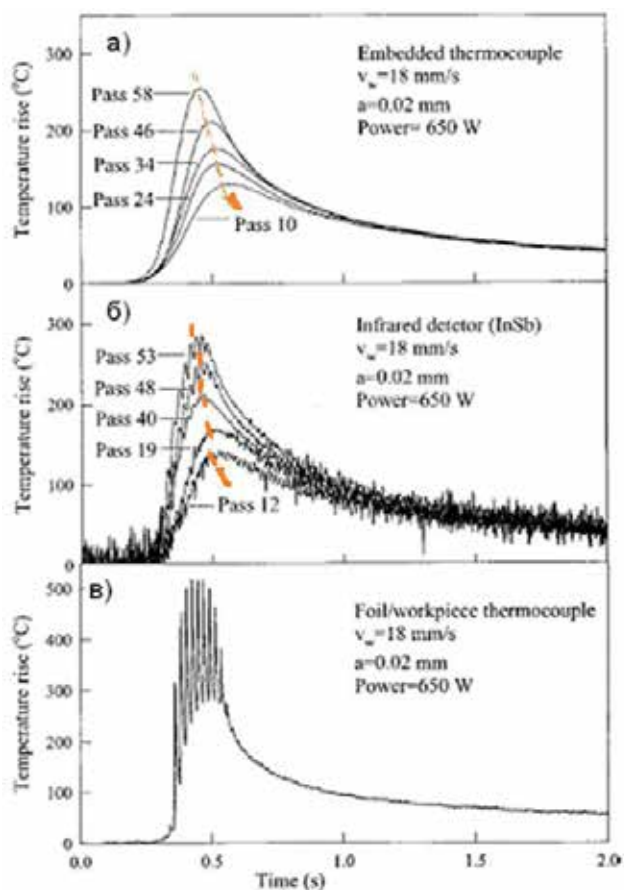


Рис. 4 – вимірювання температури трьома методами [10]

Одночасно з температурою вимірювали потужність шліфування.

Середнє значення сталої потужності процесу шліфування, рівне 650 Вт, було отримано із урахуванням втрат холостого ходу (рис. 5). Це значення перевірено чисельними паралельними дослідями при однакових умовах режимів шліфування. Значення потужності, що припадає на одну кромку для умов шліфування периферією круга, визначають по площі контакту $S(\tau) = W \cdot \theta(\tau) \cdot R$.

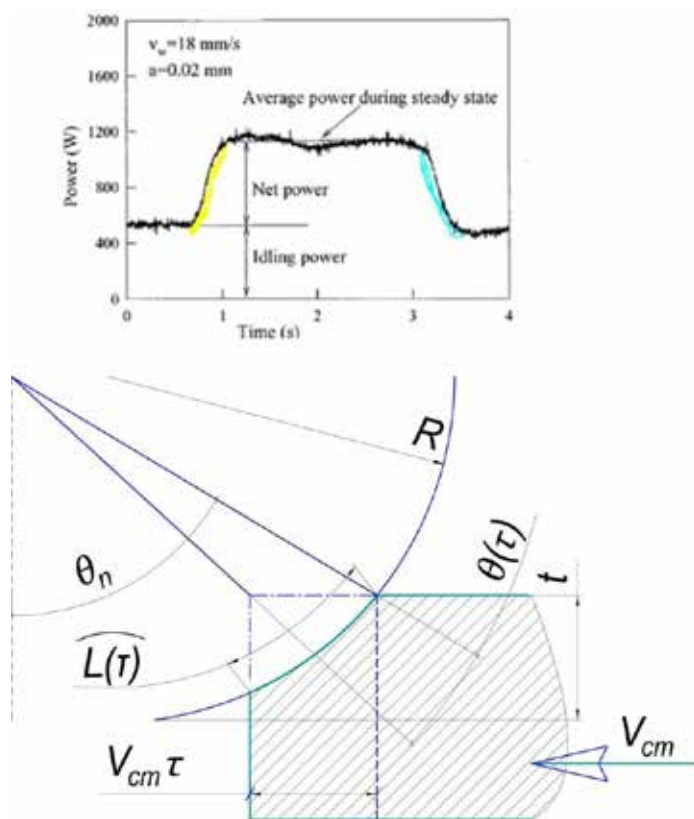


Рис. 5. Зміна потужності [11] та схема знаходження кількості теплових імпульсів для моментів врізання, сталого процесу та виходу із контакту

Для інтервалів τ часу врізання (виділений жовтим кольором), сталого процесу та виходу із контакту (виділений синім), отримують (рис. 5,а):

$$S(\tau) = W \cdot R \cdot \theta(\tau) = W \cdot R \cdot \begin{cases} \tau \cdot V_{cm} / R \\ \theta_n \\ (\theta_n - \tau \cdot V_{cm} / R) \end{cases} \quad (8)$$

де W – ширина заготовки, $\theta(\tau)$ – кутовий розмір контакту для деякого моменту τ часу, враховуючи врізання, сталий процес різання та вихід круга з контакту із заготовкою.

Із урахуванням умов досліду (рисунок 5,а. та відомої висоти H_n профілю РПК) знаходять кількість кромок, що контактують на протязі l с у деякий момент часу τ :

$$n_{\text{конт}}(\tau) \approx (v_{\text{кр}} \cdot 10^3) \cdot S(\tau) \cdot \left[N_s \left(\frac{V n_{\text{max}} \cdot m_{\tau}}{H_n} \right) \right], \quad (9)$$

де $N_s \left(\frac{V n_{\text{max}} \cdot m_{\tau}}{H_n} \right)$ питома кількість кромок на мм^2 та відносному заглибленні, що

викликане нормальною швидкістю V_n [4; 10].

Для сталих умов процесу шліфування кутовий розмір, який обмежений границями контакту, має постійне значення $\theta(\tau) = \text{const}$. Тому площа контакту $S(\tau) = \text{const}$, кількість кромок, що проникають вглиб припуску та приймають участь у деформації металу й різанні, також не змінні.

Під час врзання та вибігу майже лінійно змінюється кут $\theta(\tau)$, що викликає відповідну зміну дослідної залежності вимірної потужності на рисунку 5,а. Як видно з графіку зміни потужності за часом обробки $N_{\Sigma}(\tau)$, та проведених у роботі чисельних дослідів ці данні добре корелюють.

Рисунок дозволяє через миттєву потужність N_{Σ} дії усіх кромок знайти кількість теплових імпульсів, що знаходяться у зоні контакту, та оцінити значення теплового імпульсу однієї кромки. Отже, отримують:

$$N_1(\tau) = \frac{N_{\Sigma}}{n_{\text{конт}}(\tau)}, \quad (10)$$

Для умов досліду $N_{\Sigma} / H = 650 / 12,5 = 52 \text{ Bm}$, $\theta_n = \sqrt{2t / R} \approx 0.0141$ тут N_{Σ} / H – питома потужність процесу шліфування, що припадає на 1 мм висоти круга. Питому кількість кромок, що припадає на одиницю площі контакту (мм^2), та приймає участь у процесі визначають по глибині розташування, меншій від рівня проникнення.

Для подібної РПК [10], описаної з дослідів методом дряпання похилої площинки інструментом у стані РПК круга ЛД20К після правлення питому кількість кромок на одиницю площі для глибини проникнення, визначену через нормальну швидкість при математичному сподіванні імовірного інтервалу між контактами $m_{\Delta\tau} = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ знаходять $V n_{\text{max}} / H_n = 1000 \cdot V_c \cdot \theta_n / H_n = 1000 \cdot 18 \cdot 0.0141 / 178 \approx 1.43$.

Умову теплового балансу спостерігають в момент часу τ_B , коли кількість теплоти, що надходить в зону різання від деформацій кромками дорівнює тій, що відбирається різальними кромками.

$$n_{\text{різ}} \cdot \Phi_{\text{стр.утв}} \approx n_{\text{конт}} \cdot \Phi_{\text{з.п}} \quad (11)$$

де $\Phi_{\text{стр.утв}}$, та $\Phi_{\text{з.п}}$ – кількість теплоти, що виділяється кромкою, що контактує, у площині стружка утворення та на задній поверхні (рис.4).

Однак, співвідношення між кількостями теплоти не наведені.

Враховуючи, що $n_{\text{різ}} / n_{\text{конт}} \approx \%_{\text{різ}}$, отримують

$$\Phi_{\text{з.п}} \approx \%_{\text{різ}} \cdot \Phi_{\text{стр.утв}} \quad (12)$$

утворення теплоти [4; 10] навколо різальної кромки інструмента.

4. В роботі китайських вчених [11] наведені отримані типові графіки температури процесу, питомої енергії, розподілення теплового балансу у функції швидкості під час глибинного шліфування сплаву Inconel 718.

Шліфування здійснювали кругами із СВН при наявності охолодження на основі водного розчину. Режимні параметри: швидкість різання 40–130 м/с, глибина різання 0,5 мм, подача 360 мм/хв. внесені до 5 стовпчику таблиці та на рисунок 6, який свідчить про чітко виражений імпульсний характер дії сигналу та поступове зниження температури у момент після теплового насичення.

Вимірювання температури проводили напівприродною термопарою.

Table 1 Conditions for grinding tests

Wheel speed v_s	Workpiece speed v_w	Depth of cut a_p	Wheel diameter d_s	Wheel width b
30–130m/s	360mm/min	0.5mm	400mm	10mm
Grinding mode	Dressing tool	Dressing parameter	Coolant type	Coolant pressure
Down-grinding	Diamond Plate wheel	Ud1 ^[4]	water-based coolant	13–15bar

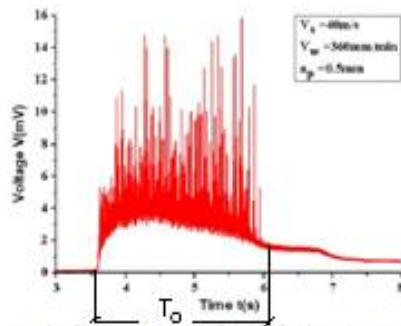


Fig.1 Typical temperature signal during creep feed grinding.

Рис. 6. Сигнал температури та режимні параметри плоского шліфування зі швидкістю 40 м/с [11]

Отримані графіки (рис. 7) зміни питомої енергії та теплового балансу.

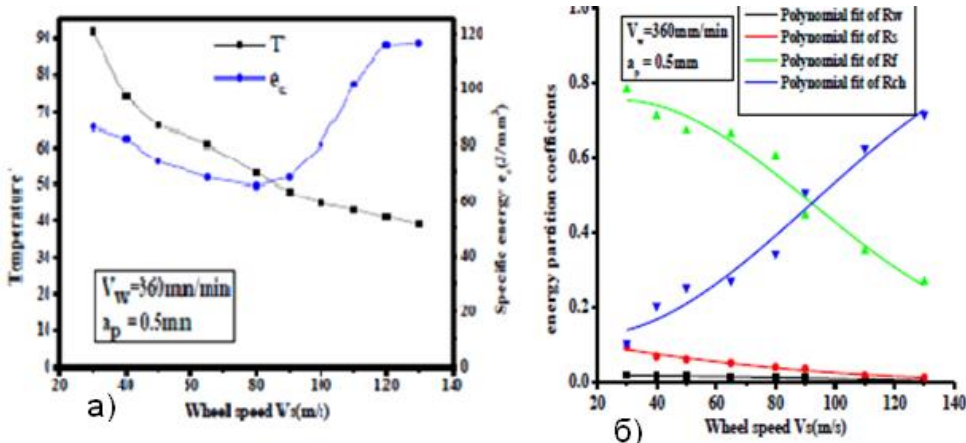


Рис. 7. Зміна температури заготовки, питомої енергії (а) та теплового балансу (б) у функції швидкості шліфування [11]

Під час збільшення швидкості шліфування нікелевого сплаву значна частина енергії відводиться зі стружкою R_{ch} та охолоджувальною рідиною МОР R_f . Інша частина тепла потрапляє у заготовку R_w і круг R_s – скорочується. Це зменшує температуру як заготовки, так і зерен круга з матеріалу CBN, який має значну вартість порівняно з іншим абразивним матеріалом.

Дослідами визначена питома енергія e_c зрізання одиниці об'єму сплаву для швидкості $V_k=40$ м/с. Звідси можна визначити потужність, яку потребує процес шліфування (без урахування ККД приводу):

$$N = e_c \cdot V_w \cdot a_p \cdot W = 70 \cdot \frac{360}{60} \cdot 0,5 \cdot 5 \approx 1.050 \text{ кВт}. \quad (13)$$

Авторами проведені дослідні одночасного вимірювання температури та потужності процесу торцевого шліфування двох торців на верстаті моделі 3342 АДО [9]. Досліди свідчать про імпульсний характер дії джерел тепла на торцеву поверхню деталі. Вимірювання потужності дозволяє визначити енергетичну напруженість за кутом β повороту барабану подачі верстату. Для досягнення кращої точності обробки кути орієнтації γ та ν шліфувальних бабок верстату були пов'язані співвідношенням $\nu = \gamma / 1,57$.

Результати досліджень. Дослідження запропонованих теоретичних залежностей свідчать про імпульсний характер та можливість використовувати залежності для різних методів шліфування, включно з обробкою торцевої поверхні деталі. Інтенсивність процесу шліфування впливає не лише на температуру, а й на точність обробки [9].

Наведені в таблиці параметри задовільно збігаються за результатом розрахунку та тими, що виміряні дослідним шляхом. Деяким виключенням з правила є різні інтервали між імпульсами, що спостерігають. Пояснити це можна малим відсотком різальних кромки. Решта кромки виконує роботу видавлювання метала. Питомий показник інтенсивності процесу, нормальна швидкість, використаний для описання теплової напруженості дослідних сигналів. Іншою причиною деяких розбіжностей результатів є використана в роботі модель робочого профілю круга, отримана іншим автором [10].

Запропоновані ввести моменти часу, що відповідають за початок та закінчення контакту, досягнення температурного балансу та відсоток різальних кромки серед загального числа.

Висновки. Проведені розрахунки дозволили довести адекватність запропонованої теоретичної моделі та отриманих експериментальних сигналів, проведених вченими [7; 10; 11] для різних методів шліфування та оцінити теплову та енергетичну напруженість процесу шліфування. Знайдені потужність, що припадає на різальну кромку, розподілення енергії, що відводиться зі стружкою та потрапляє в деталь. Оцінені фактори зміни потужності за час проходження області контакту. Вочевидь, дією постійного теплового потоку коливання температури пояснити не можливо. На нашу думку – теплота з поверхні деталі відводиться різальними кромками, а додається тими, що лише деформують метал. Співвідношення між цими тепловими потоками залежить від відсотка різальних кромки серед їх загальної кількості.

Створена математична модель здатна проводити розрахунки для різноманітної кінематики поздовжнього та торцевого шліфування. Вона враховує вплив на температуру, товщину зрізу, часу між контактами, зерен.

Досліди доводять значний вплив на зменшення температури процесу по проходах (зменшення глибини. проекції Vn швидкості відносного руху.

ЛІТЕРАТУРА

1. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М. : М-е, 1974, 280 с.
2. Верещака А.С., В.С.Кушнер. Резание материалов : монография. М. : Высшая школа, 2009, 536 с.
3. David A. Stefenson, John S. Agapion. Metal Cutting Theory and Practice. *CRC Press New York*. 2016. 932 с.
4. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование : монография. Л. : Машиностроение, 1979, 248 с.
5. Криворучко Д.В., Залога В.О., Корбач В.Г. Основы 3D-моделирования процесів механічної обробки методом скінченних елементів : монографія. Суми : СумДУ, 2009, 208 с.
6. Aurich I.C., Biermann A.D., Blum E.H. Modeling and simulation of process machine iteration in grinding. *Production Engineering Research and Development*, 2009. 3. P. 111–120.
7. Смирнов В.А. Решение тепловой задачи при шлифовании с учетом импульсного характера теплового потока. *Известия Томского политехнического университета*, 2011. Т. 319. № 2. С. 46–49.
8. Рудик А.В., Пасов Г.В. Залежність параметрів зрізів від режимів при зустрічному та попутному шліфуванні. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського*. Т. 30 (69) № 7, 2019. С. 712.
9. A.V.Rudyk, V. M. Chupryna, V.A. Rudyk. Effect of shape formation on the accuracy of grinding ends while compensating for machine tool errors/ *EEJET*, № 2/1 (110), 2021, p. 90–97. DOI: 10.155871729-4061.2021226479.
10. Сравнение методов измерения температуры шлифования Khu Khipeng, Stiven Malkin. URL: <https://www.km.ru/referats/334607-sravnenie-metodov-izmereniya-temperatury-shlifovaniya>
11. PING Bo, FU Yucana, ZHANG Zhiwei and ZHAO Zhengcai. Effect of Grinding Speed on Energy Partition for Grinding of Inconel 718 with Vitrified CBN Wheels. *Advances in Materials Manufacturing Science and Technology XV*, Materials Science Forum. Vol. 770. P. 263–270.

REFERENCES

1. Korchak S.N. (1974) The grinding process productivity of steel parts – M. Engineering, 280 p.
2. Vereschaka A.S., Kushner V.S. (2009). Cutting materials. M. : High school. 536 p.
3. David A. Stefenson, John S. (2016). Agapion. Metal Cutting Theory and Practice. *CRC Press New York*. 932 p.
4. Filimonov L.N. (1979). High-speed grinding. L. : Mashinostroenie, 248 p.

5. Kryvoruchko D.V., Zaloga V.O., Korbach V.G. (2009). Fundamentals of 3D-machining processes modeling by finite element method. Sumy : SumSU, 208 p.
6. Aurich I.C., Biermann A.D., Blum E.H. (2009). Modeling and simulation of process machine iteration in grinding. *Production Engineering Research and Development*. V. 3. Pp. 111–120.
7. Smirnov V.A. (2011). Solving the heat problem during Grinding, taking into account the pulsed nature of the heat flow. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, V. 319, No. 2, pp. 46–49.
8. Rudik A.V., Pasov G.V. (2019). Dependence of the section parameters on the modes of counter and back grinding. *Scientific notes of the VI Tavrida National University Vernadsky*. Volume 30 (69) No. 7. Pp. 7–12.
9. A.V.Rudyk, V. M. Chupryna, V.A. Rudyk. (2021) Effect of shape formation on the accuracy of grinding ends while compensating for machine tool errors. *EEJET*. № 2/1 (110), pp. 90–97. DOI: 10.15587/1729-4061.2021226479.
10. Hu Hipeng Comparison methods for measuring the grinding temperature. Hu Hipeng, Stephen Malkin URL: <https://www.km.ru/referats/334607-sravnienie-metodov-izmereniya-temperatury-shlifovaniya>.
11. PING Bo, FU Yucana, ZHANG Zhiwei, ZHAO Zhengcai. (2013). Effect of Grinding Speed on Energy Partition for Grinding of Inconel 718 with Vitrified CBN Wheels. *Advances in Materials Manufacturing Science and Technology XV, Materials Science Forum* Vol. 770. Pp. 263–270.