

**НОВИКОВ Ф. В., ПОЛЯНСЬКИЙ В. І.**

### **РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНОГО ПІДХОДУ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ ТА УМОВ Ї ЗМЕНШЕННЯ**

У роботі розроблено теоретичний підхід до визначення температури різання при шліфуванні та умов її зменшення із урахуванням балансу тепла, що надходить в стружки та оброблювану деталь. Встановлено, що зі збільшенням часу контакту круга з оброблюваним матеріалом температура різання безперервно збільшується, асимптотично наближаючись до максимальної температури різання, яка визначається відношенням умовного напруження різання до питомої теплоємності й щільності оброблюваного матеріалу. Виходячи з цього, запропоновано максимальну температуру різання розглядати новим універсальним технологічним параметром обробки, що визначає його потенційні можливості та дозволяє порівнювати різні методи механічної обробки за температурним критерієм й вибирати найбільш ефективні з них. На цій основі обґрунтовано основний напрям зниження температури різання та підвищення якості й продуктивності обробки, який полягає у зменшенні максимальної температури різання до рівня та нижче температури плавлення оброблюваного матеріалу. Це дозволяє здійснити шліфування зі значною продуктивністю обробки фактично без підвищення температури різання. Показано, що основною умовою зменшення максимальної температури різання є зменшення умовного напруження різання.

**Ключові слова:** баланс тепла, температурний критерій, якість та продуктивність обробки, умовне напруження різання, високошвидкісна обробка, швидкість деталі

**НОВИКОВ Ф. В., ПОЛЯНСКИЙ В. И.**

### **РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ И УСЛОВИЙ ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ**

В работе разработан теоретический подход к определению температуры резания при шлифовании и условий ее уменьшения с учетом баланса тепла, уходящего в стружки и обрабатываемую деталь. Установлено, что с увеличением времени контакта круга с обрабатываемым материалом температура резания непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальной температуре резания, которая определяется отношением условного напряжения резания к удельной теплоемкости и плотности обрабатываемого материала. Исходя из этого, предложено максимальную температуру резания рассматривать новым универсальным технологическим параметром обработки, определяющим его потенциальные возможности и позволяющим сравнивать различные методы механической обработки по температурному критерию и выбирать наиболее эффективные из них. На этой основе обосновано основное направление снижения температуры резания и повышения качества и производительности обработки, которое состоит в уменьшении максимальной температуры резания до уровня и ниже температуры плавления обрабатываемого материала. Это позволяет осуществить шлифование со значительной производительностью обработки фактически без повышения температуры резания. Показано, что основным условием для уменьшения максимальной температуры резания является уменьшение условного напряжения резания.

**Ключевые слова:** баланс тепла, температурный критерий, качество и производительность обработки, условное напряжение резания, высокоскоростная обработка, скорость детали

**NOVIKOV F. V., POLYANSKY V. I.**

### **DEVELOPMENT OF THEORETICAL APPROACH TO DETERMINATION OF CUTTING TEMPERATURE DURING GRINDING AND CONDITIONS OF ITS REDUCTION**

The paper develops a theoretical approach to determining the cutting temperature during grinding and the conditions for its decrease, taking into account the balance of heat leaving the chips and the workpiece. It has been established that with an increase in the contact time of the wheel with the material being processed, the cutting temperature continuously increases, asymptotically approaching the maximum cutting temperature, which is determined by the ratio of the conditional cutting stress to the specific heat capacity and density of the material being processed. Based on this, it is proposed to consider the maximum cutting temperature as a new universal technological processing parameter that determines its potential and allows comparing various machining methods according to the temperature criterion and choosing the most effective of them. On this basis, the main direction of reducing the cutting temperature and improving the quality and productivity of processing is substantiated, which consists in reducing the maximum cutting temperature to the level and below the melting temperature of the material being processed. This makes it possible to carry out grinding with a significant machining capacity with virtually no increase in cutting temperature. It is shown that the main condition for reducing the maximum cutting temperature is to reduce the conditional cutting stress.

**Keywords:** heat balance, temperature criterion, quality and productivity of processing, conditional cutting stress, high-speed processing, part speed

**Вступ.** Підвищення якості обробки деталей машин є важливим чинником виготовлення конкурентоспроможної машинобудівної продукції та виходу промислових підприємств на міжнародні ринки. Значною мірою це відноситься до методів фінішної обробки деталей машин, де остаточно формуються параметри якості оброблюваного матеріалу. Найбільше застосування із фінішних методів механічної обробки отримав метод шліфування, який дозволяє поряд із забезпеченням високих показників якості досягти й значної продуктивності обробки. Тому розробленню ефективних технологічних процесів шліфування постійно приділяють значну увагу. При цьому важливими питаннями є управління тепловою напруженістю процесу шліфування та зниження температури різання для підвищення якості й продуктивності обробки деталей машин. У зв'язку з цим у роботі вирішується актуальне науково-практичне завдання теоретичного обґрунтування умов зменшення температури різання при шліфуванні.

**Аналіз основних досягнень та літератури.** У науково-технічній літературі питанню зменшення температури різання при шліфуванні присвячені численні роботи [8; 10; 11; 13; 15]. Для цього у роботах [3; 4; 11] обґрунтовано вибір ефективних складів мастильно-охолоджуючих рідин. У ряді робіт обґрунтовано умови

© Ф. В. Новиков, В. І. Полянський, 2022

зниження тертя при шліфуванні шляхом реалізації різних фізичних ефектів. Так, у роботах [8; 13] показано ефективність введення в зону різання твердих мастил та застосування імпрегнації (спеціальної термічної обробки) шліфувальних кругів, у роботі [12] – застосування високопористих абразивних кругів, у роботах [2; 14] – застосування вібраційного та ультразвукового шліфування, у роботах [1; 2; 14] – алмазного шліфування. Серед цих робіт слід виділити роботи професора Якимова О. В. [13; 14], який запропонував нові теоретичні підходи до визначення температури різання при шліфуванні та умов її зменшення, розробив ефективний метод переривчастого шліфування, що дозволяє зменшити температуру різання та підвищити якість обробки при одночасному забезпеченні високої продуктивності. Тому дана робота є подальшим розвитком наукового напрямку, який запропонував професор Якимов О. В. У ній розглядаються питання аналітичного визначення температури різання на основі балансу тепла, яке виділяється при шліфуванні та розповсюджується в оброблювану деталь і стружки, що утворюються. Це дозволяє більш об'єктивно підійти до визначення температури різання при шліфуванні та умов її зменшення.

**Мета дослідження, постановка проблеми.** Метою дослідження є розроблення теоретичного підходу до визначення температури різання при шліфуванні й умов її зменшення та на цій основі встановлення шляхів підвищення якості й продуктивності обробки деталей машин.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- встановити аналітичні залежності для визначення основних параметрів теплового процесу при шліфуванні, включаючи температуру різання, та обґрунтувати умови її зменшення;
- теоретично обґрунтувати універсальний технологічний параметр процесу шліфування, що визначає його потенційні можливості та дозволяє вибирати найбільш раціональні умови обробки за температурним критерієм;
- теоретично обґрунтувати шляхи підвищення якості й продуктивності обробки деталей машин за температурним критерієм;
- провести експериментальне оцінювання отриманих теоретичних рішень.

**Матеріали дослідження.** Для теоретичного обґрунтування закономірностей формування температури різання при шліфуванні  $\theta$  слід скористатися математичною моделлю визначення параметрів теплового процесу при шліфуванні, яку наведено в роботах [5-7; 9]. Вона враховує перерізання шліфувальним кругом адіабатичних стержнів та рух теплового джерела углиб поверхневого шару оброблюваної деталі на задану глибину шліфування  $t$  із швидкістю  $V_{piz} = t / \tau$  (де  $\tau$  – час перерізання адіабатичного стержня, с, рис. 1).

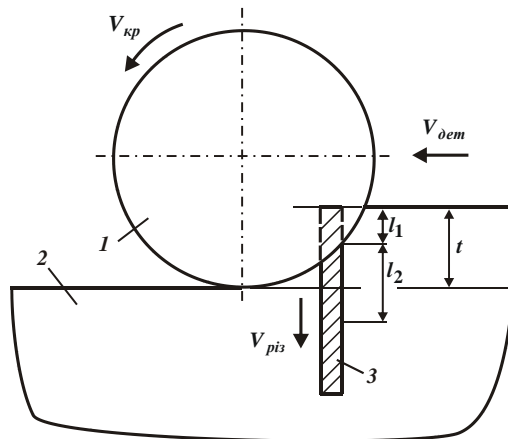


Рисунок 1 – Розрахункова схема параметрів теплового процесу при плоскому шліфуванні: 1 – шліфувальний круг; 2 – оброблюваний матеріал; 3 – адіабатичний стержень ( $l_1$  – довжина зрізаної частини адіабатичного стержня;  $l_2$  – глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі;  $V_{kp}$ ,  $V_{oem}$  – відповідно, швидкості круга і деталі)

Виходячи із цього, розрахунок температури різання  $\theta$  при шліфуванні виконано із урахуванням балансу тепла, яке надходить в стружки та в оброблювану деталь, тобто балансу тепла, що витрачається на нагрівання двох ділянок адіабатичного стержня з довжинами  $l_1$  та  $l_2$ . У результаті отримано рівняння:

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{piz} \cdot \int_0^{\tau} \theta \cdot d\tau + \int_0^{\tau} \frac{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot S^2}{N} \cdot \theta \cdot \frac{d\theta}{d\tau} \cdot d\tau = N \cdot \tau, \quad (1)$$

яке після диференціювання всіх складових за часом  $\tau$  приймає вигляд:

$$c \cdot \rho \cdot V_{piz} \cdot \theta + \frac{\lambda \cdot c \cdot \rho}{\sigma \cdot V_{piz}} \cdot \theta \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = \sigma \cdot V_{piz}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/м·К;

$c$  – питома теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/(кг·К);

$\rho$  – щільність оброблюваного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$a = \lambda / c \cdot \rho$  – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, м<sup>2</sup>/с;

$N = q \cdot S$  – потужність різання, Вт;

$q = \sigma \cdot V_{piz}$  – щільність теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;

$S$  – площа поперечного перерізу адіабатичного стержня, м<sup>2</sup>;

$\sigma$  – умовне напруження різання, Н/м<sup>2</sup>;

$V_{piz}$  – швидкість перерізання шліфувальним кругом адіабатичного стержня, м/с.

Рішення диференціального рівняння (2):

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{piz}^2}{\lambda} \cdot \tau}, \quad (3)$$

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

Для розкриття фізичної сутності залежності  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  розглянуто умову рівності роботи різання при шліфуванні  $A = P_z \cdot V_{kp} \cdot \tau$  та кількості тепла  $Q = c \cdot m \cdot \theta_{max}$ , яке виділяється в процесі різання та повністю переходить в стружки, що утворюються, де  $P_z = \sigma \cdot S_{сум}$  – тангенціальна складова сили різання, Н;  $S_{сум} = B \cdot V_{дем} \cdot t / V_{kp}$  – сумарна миттєва площа поперечного перерізу зрізу при шліфуванні всіма одночасно працюючими зернами круга, м<sup>2</sup> [7];  $V_{kp}$  – швидкість круга, м/с;  $m = \rho \cdot V$ ;  $V = B \cdot t \cdot l$  – відповідно, маса та об'єм матеріалу, що знімається за час  $\tau$ ;  $l = V_{дем} \cdot \tau$  – довжина переміщення шліфувального круга за час  $\tau$ , м.

Після математичних перетворень отримано:  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ . Цим доведено, що величина  $\theta_{max}$  є дійсно максимальною температурою різання, при якій все тепло, яке виділяється в процесі шліфування, повністю переходить в стружки, що утворюються.

Із залежності  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  випливає, що максимальна температура різання  $\theta_{max}$  цілком однозначно визначається умовним напруженням різання  $\sigma$ : чим менше  $\sigma$ , тим менше максимальна температура різання  $\theta_{max}$ . Зменшити умовне напруження різання  $\sigma$  можна підвищенням ріжучої здатності шліфувального круга та зниженням інтенсивності тертя в зоні різання. Виходячи із цього, максимальну температуру різання  $\theta_{max}$  слід розглядати новим універсальним технологічним параметром обробки, що визначає технологічні можливості не тільки методу шліфування, а й інших методів механічної обробки та дозволяє порівнювати їх за температурним критерієм і вибирати найбільш ефективні з них.

У разі дії на зону різання охолоджувальної рідини робота різання при шліфуванні  $A = P_z \cdot V_{kp} \cdot \tau$  буде дорівнювати різниці кількості тепла  $Q = c \cdot m \cdot \theta_{max}$ , яке виділяється в процесі різання та переходить в стружки, та кількості тепла, що відводиться охолоджувальною рідиною із зони різання  $Q_{охол.р.} = N_{охол.р.} \cdot \tau$ , де  $N_{охол.р.} = k \cdot N = k \cdot \sigma \cdot V_{piz}$  – інтенсивність відведення тепла охолоджувальною рідиною із зони різання, Вт;  $k < 1$  – частка тепла, що відводиться охолоджувальною рідиною із зони різання. Після математичних перетворень отримано:

$$\theta_{max} = \frac{\sigma \cdot (1 - k)}{c \cdot \rho}. \quad (4)$$

Як видно, чим більше величина  $k$ , тим менше максимальна температура різання  $\theta_{max}$ . Це принципове рішення, що показує, яким чином охолоджувальна рідина або інше технологічне середовище забезпечує зменшення температури різання  $\theta$  в результаті відведення тепла із зони різання. Виходячи із отриманої залежності, це досягається шляхом зменшення максимальної температури різання  $\theta_{max}$ . За певних умов охолодження зони різання максимальна температура різання  $\theta_{max}$  може стати менше температури плавлення оброблюваного матеріалу, що забезпечить здійснення шліфування зі значною продуктивністю обробки фактично без підвищення температури різання, яка в цьому разі може дорівнювати максимальній температурі різання  $\theta_{max}$ .

При плоскому шліфуванні з урахуванням відомої залежності  $V_{piz} = V_{дем} \sqrt{t / 2R_{kp}}$  залежність (3) прийме вигляд:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot Q_{sum} \cdot \sqrt{\frac{t}{2R_{kp}}}}. \quad (5)$$

де  $V_{дем}$  – швидкість деталі, м/с;

$R_{kp}$  – радіус круга, м;

$Q_{num} = V_{dem} \cdot t$  – питома продуктивність обробки, м<sup>2</sup>/с.

На рис. 2 і в табл. 1 наведено значення параметрів теплового процесу при шліфуванні сталі ШХ15 ( $a = 8,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с), розраховані за залежністю (3) за умови  $V_{piz} = 3,33 \cdot 10^{-3}$  м/с. Як видно, зі збільшенням часу обробки  $\tau$  відношення  $\theta/\theta_{max}$  безперервно збільшується, асимптотично наближаючись до максимального значення  $\theta_{max} = \sigma/(c \cdot \rho)$ .

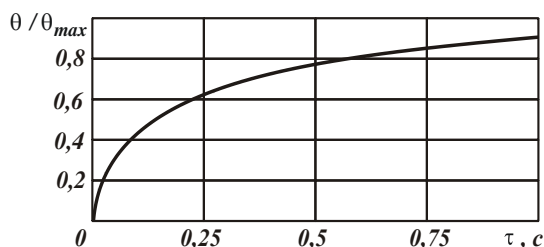


Рисунок 2 – Залежність відношення  $\theta/\theta_{max}$  від часу обробки  $\tau$

Таблиця 1 – Розрахункові значення параметрів теплового процесу шліфування

$\theta/\theta_{max}$	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
$(1 - \theta/\theta_{max}) \times e^{\theta/\theta_{max}}$	1	0,9771	0,8951	0,7288	0,4451	0,24596	0
$V_{piz}^2 \cdot \tau / a$	0	0,02	0,11	0,32	0,81	1,4	$\infty$
$\tau, c$	0	0,0152	0,0833	0,2424	0,6136	1,061	$\infty$
$Q_{num} = 1000 \text{ мм}^2/\text{хв}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,04	1,23	10,41	66,99	199,15	$\infty$
$V_{dem}, \text{ м/хв}$	$\infty$	25,0	0,813	0,096	0,015	0,005	0
$Q_{num} = 2000 \text{ мм}^2/\text{хв}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,01	0,3075	2,602	16,665	49,788	$\infty$
$V_{dem}, \text{ м/хв}$	$\infty$	200,0	6,5	0,768	0,12	0,04	0
$Q_{num} = 4000 \text{ мм}^2/\text{хв}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,0025	0,0769	0,6505	4,1663	12,447	$\infty$
$V_{dem}, \text{ м/хв}$	$\infty$	1600	52	6,144	0,96	0,32	0

Виходячи із табл. 1, у діапазоні зміни відношення  $\theta/\theta_{max} = 0 \dots 0,4$  в залежності від  $Q_{num} = V_{dem} \cdot t$  ефективно на практиці застосовувати технологічний процес багатопрхідного шліфування периферією круга із збільшеною швидкістю деталі та незначною глибиною шліфування. Також ефективно зменшувати максимальну температуру шліфування  $\theta_{max} = \sigma/(c \cdot \rho)$  за рахунок зменшення параметра  $\sigma$  шляхом зменшення тертя зв'язки круга із оброблюваним матеріалом та підвищення різальної здатності круга.

У діапазоні зміни відношення  $\theta/\theta_{max} = 0,4 \dots 1,0$  ефективно застосовувати: технологічні процеси глибинного шліфування периферією круга із незначною швидкістю деталі та торцем круга із шириною шліфування, рівною діаметру круга; технологію розрізування матеріалів відрізним кругом; технологічні процеси фрезкування циліндричною та торцевою фрезами, а також 3D-фрезкування із шириною різання, рівною діаметру фрези.

Розрахунками встановлено, що частка тепла, яке надходить в стружки при шліфуванні, визначається виразом  $\alpha_1 = \theta/\theta_{max}$ , а частка тепла, яке надходить в поверхневий шар оброблюваної деталі, – виразом  $\alpha_2 = 1 - \theta/\theta_{max}$  (табл. 1, рис. 3).

За умови  $\theta/\theta_{max} \rightarrow 1$  фактично все тепло, що виділяється при шліфуванні сталі ШХ15 ( $V_{dem} = 15$  м/хв), надходить в стружки. Для практичного здійснення цієї умови необхідно використовувати технології високошвидкісної обробки, які фактично виключають перенесення тепла, що утворюється при різанні, в поверхневий шар оброблюваної деталі та дозволяють підвищити якість та продуктивність обробки. Отже, використовуючи залежність (5), можна аналітично визначити кількість тепла, яке надходить в оброблювану деталь та в стружки. Це має велике практичне значення, оскільки при розрахунках температури різання характер розподілу тепла встановлюють на основі експериментальних даних, справедливих для конкретних

технологічних умов обробки. У результаті не вдається в узагальненому вигляді визначити температуру різання в широких діапазонах зміни параметрів режиму різання, включаючи технології шліфування та лезової обробки.

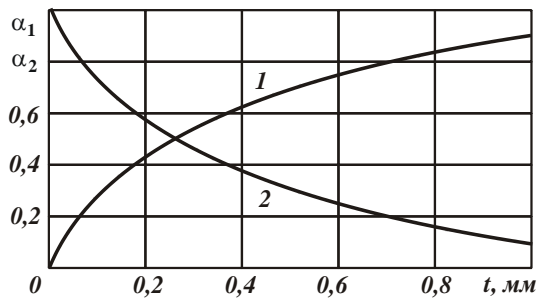


Рисунок 3 – Залежності  $\alpha_1$  (1) та  $\alpha_2$  (2) від глибини шліфування  $t$

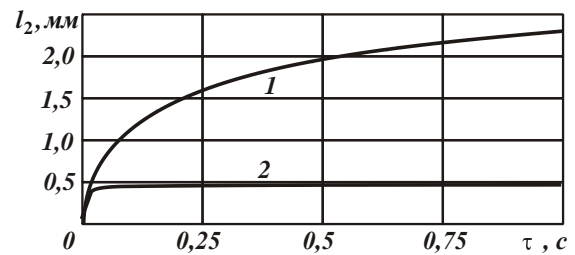


Рисунок 4 – Залежність параметра  $l_2$  від часу  $\tau$  при шліфуванні сталі ШХ15: 1; 2 –  $V_{piz} = 3,33 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $16,65 \cdot 10^{-3}$  м/с

Розрахунками встановлено, що глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі визначається залежністю

$$l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{V_{piz}} \cdot \frac{\theta}{\theta_{max}} \quad (6)$$

та змінюється за законом зміни відношення  $\theta / \theta_{max}$  (рис. 4).

На основі отриманих результатів теоретично обґрунтовано умови розширення технологічних можливостей високопродуктивних методів шліфування за температурним критерієм. Виходячи із табл. 1, це досягається за рахунок застосування глибокого шліфування, оскільки при багатопрхідному шліфуванні зі збільшенням  $Q_{num}$  потрібно значно збільшувати  $V_{dem}$ , що не завжди можна здійснити. При глибокому

шліфуванні також менше градієнт температури  $\frac{\theta}{l_2} = \frac{\sigma}{\lambda} \cdot \frac{Q_{num}}{\sqrt{2t \cdot R_{kp}}}$  та більше параметр  $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{t \cdot \sqrt{2t \cdot R_{kp}}}{Q_{num}}}$ ,

що вказує на можливість підвищення якості обробки.

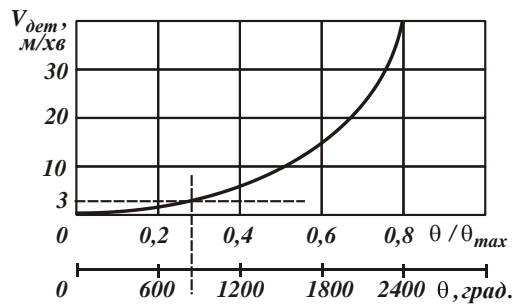


Рисунок 5 – Залежність  $V_{dem}$  від  $\theta / \theta_{max}$  і  $\theta$

Для здійснення прогресивної технології зубошліфування за методом профільного копіювання розраховано швидкість деталі  $V_{dem}$  за вихідних даних: оброблюваний матеріал – сталь 18ХГН2МФБ;  $t = 0,4$  мм; температура різання  $\theta = 1000$  °С. Встановлено, що  $V_{dem} = 3$  м/хв. (рис. 5), тобто для здійснення цих умов обробки необхідно застосовувати технологію глибокого шліфування.

Для оцінювання достовірності отриманих теоретичних рішень проведено порівняння розрахункових та експериментальних значень параметрів теплового процесу  $\theta$ ,  $\theta_{max}$ ,  $\theta / \theta_{max}$  та  $l_2$  при плоскому шліфуванні сплаву ЖС6К ( $a = \lambda / (c \cdot \rho) = 3,73 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda = 16,6$  Дж/(м·с·град),  $c \cdot \rho = 4,46 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град)) із режимом різання:  $V_{dem} = 0,1$  м/с;  $t = 0,02$  мм;  $R_{kp} = 0,1$  м (рис. 6 [15]).

Як видно із рис. 6, при досягненні певної глибини проникнення тепла в поверхневий шар деталі, що відповідає параметру  $l_2$ , температура приймає найменше значення та в подальшому залишається незмінною. Для розрахунку параметра  $l_2$  за залежністю (6) необхідно знати відношення  $\theta / \theta_{max}$ , яке визначається за залежністю (3), в якій  $V_{piz} = t / \tau$ , де  $\tau = l / V_{dem} = \sqrt{2t \cdot R_{kp}} / V_{dem}$  – час контакту круга з оброблюваною деталлю, с;  $l = \sqrt{2t \cdot R_{kp}}$  – довжина контакту круга з оброблюваною деталлю, м. У результаті розрахунків за залежністю

(3) із урахуванням  $\tau = 0,02$  с встановлено:  $\theta / \theta_{max} = 0,095$ . Відповідно, за залежністю (6) отримано:  $l_2 = 0,354$  мм.

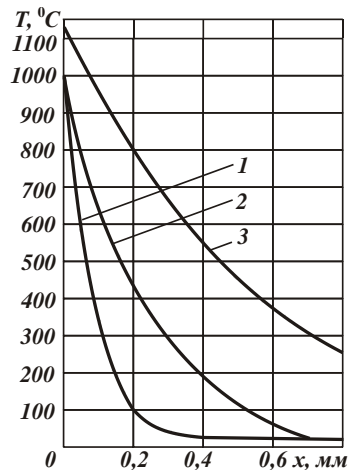


Рисунок 6 – Температурне поле деталі із сплаву ЖС6К при різному тепловому стані зони контакту: 1 – із охолодженням; 2 – без охолодження; 3 – із попереднім підігрівом на 100 °С [15]

На рис. 7 графічно показано встановлені значення параметрів теплового процесу при шліфуванні.

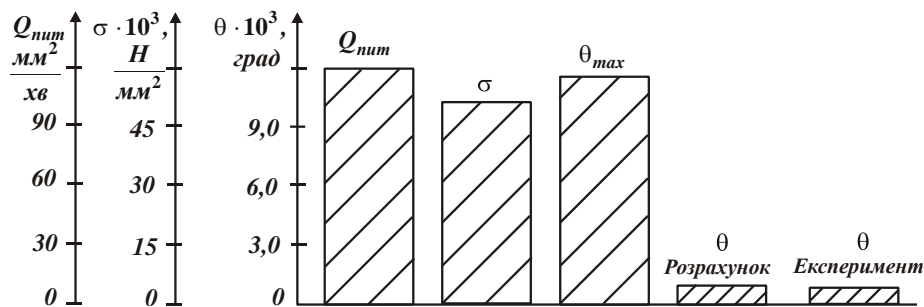


Рисунок 7 – Значення параметрів теплового процесу при плоскому шліфуванні сплаву ЖС6К

Для визначення температури різання  $\theta$  за залежністю  $\theta = q \cdot l_2 / \lambda$  [7] необхідно знати щільність теплового потоку  $q$ . У роботі [15] наведено графіки експериментальних значень  $q$  для розглянутих умов обробки ( $V_{dem} = 0,1$  м/с;  $t = 0,02$  мм;  $R_{кр} = 0,1$  м), звідки встановлено  $q = 52 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Після підстановки цих значень в залежність  $\theta = q \cdot l_2 / \lambda$ , отримано:  $\theta = 1109$  °С. Це розрахункове значення температури різання  $\theta$  на 11 % перевищує експериментальне значення  $\theta = 1000$  °С (рис. 7), що цілком прийнятно для практичних розрахунків та вказує на достовірність отриманого теоретичного рішення.

Максимальна температура різання  $\theta_{max}$  за умови  $\theta / \theta_{max} = 0,095$  дорівнює  $\theta_{max} = 11673,7$  °С. Цим встановлено, що максимальна температура різання  $\theta_{max}$  значно перевищує температуру плавлення оброблюваного металу. Тому питому продуктивність обробки  $Q_{num}$  можна збільшувати лише в межах збільшення температури різання  $\theta$  до температури плавлення оброблюваного металу, тобто до значення  $Q_{num} = V_{dem} \cdot t = 0,1 \cdot 10^3$  мм/с  $\cdot$  0,02 мм = 120 мм<sup>2</sup>/хв. Для визначення максимальної температури різання  $\theta_{max}$  слід скористатися залежністю  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ . Знаючи експериментальне значення щільності теплового потоку  $q = 52 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, із урахуванням потужності шліфування  $N = \sigma \cdot Q$ , продуктивності обробки  $Q = B \cdot V_{dem} \cdot t$  (де  $B$  – ширина шліфування, м) можна аналітично визначити  $q$  та умовне напруження різання  $\sigma$ :

$$q = \frac{N}{B \cdot l} = \frac{\sigma \cdot Q}{B \cdot l} = \frac{\sigma \cdot V_{dem} \cdot t}{l}, \text{ звідки } \sigma = \frac{q \cdot l}{V_{dem} \cdot t}.$$

Розрахунками встановлено (розмірність довжини – мм):  $\sigma = \frac{52 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,02 \cdot 100}{0,1 \cdot 10^3 \cdot 0,02} = 52 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup>.

Як видно, умовне напруження різання  $\sigma$  приймає надзвичайно велике значення, що пов'язано із інтенсивним тертям зв'язки круга із оброблюваним матеріалом (рис. 7).

Після підстановки значень  $\sigma = 52 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup> та  $c \cdot \rho = 4,46 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град) в залежність  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$

маємо:  $\theta_{max} = 11660 \text{ }^\circ\text{C}$ . Це значення несуттєво відрізняється від раніше встановленого іншим методом значення  $\theta_{max} = 11673,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , тобто справедливе відношення  $\theta / \theta_{max} = 0,095$ .

Таким чином встановлено, що наведені в роботі [15] умови шліфування дозволяють використати лише 9,5 % теплового балансу процесу шліфування, який визначається, переважно, енергією тертя зв'язки круга із оброблюваним матеріалом. Енергія процесу "чистого" різання складає незначний відсоток у тепловому балансі процесу шліфування. Слід зазначити, що подальше збільшення продуктивності обробки шляхом збільшення швидкості деталі  $V_{дет}$  або глибини шліфування  $t$  приведе до збільшення температури різання  $\theta$  та появи на оброблюваній поверхні температурних дефектів.

Параметр  $l_2$  також можна визначити за спрощеною залежністю  $l_2 = \sqrt{(2 \cdot \lambda \cdot \tau) / (c \cdot \rho)}$ . Із урахуванням  $\tau = 0,02 \text{ с}$  встановлено:  $l_2 = 0,386 \text{ мм}$ . Це значення параметра  $l_2$  несуттєво відрізняється від раніше встановленого іншим методом значення  $l_2 = 0,354 \text{ мм}$ . Також розраховані за залежностями (3) і  $\theta = q \cdot l_2 / \lambda$  значення температури різання  $\theta$  відрізняються несуттєво від експериментально встановленого значення  $\theta = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 6). Це вказує на достовірність отриманих аналітичних залежностей. При цьому доведено, що розрахунки температури різання  $\theta$  можна виконувати за двома методами: на основі експериментальних значень щільності теплового потоку  $q$  та умовного напруження різання  $\sigma$ , оскільки в обох випадках отримано фактично однакові значення температури різання  $\theta$ .

Для більш повного аналізу наведеного в роботі теоретичного рішення проведено його оцінювання за результатами досліджень температури різання при плоскому шліфуванні, які отримані професором Якимовим О. В. [13]. Вихідні дані для розрахунку: оброблюваний матеріал – сталь 12Н2Н4А ( $a = \lambda / (c \cdot \rho) = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda = 16,6 \text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{град})$ ,  $c \cdot \rho = 5,57 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$ ). Режим різання:  $V_{кр} = 30 \text{ м/с}$ ;  $V_{дет} = 0,21 \text{ м/с}$ ;  $t = 0,04 \text{ мм}$ ;  $R_{кр} = 0,1 \text{ м}$ ;  $Q_{num} = V_{дет} \cdot t = 0,21 \cdot 10^3 \text{ мм/с} \cdot 0,04 \text{ мм} = 504 \text{ мм}^2/\text{хв}$ . Щільність теплового потоку  $q = 57 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ . За цими даними професор Якимов О. В. розрахунками (із урахуванням поправочних коефіцієнтів) встановив, що температура різання дорівнює  $876 \text{ }^\circ\text{C}$ . Це значення температури різання погодиться зі встановленим експериментальним значенням.

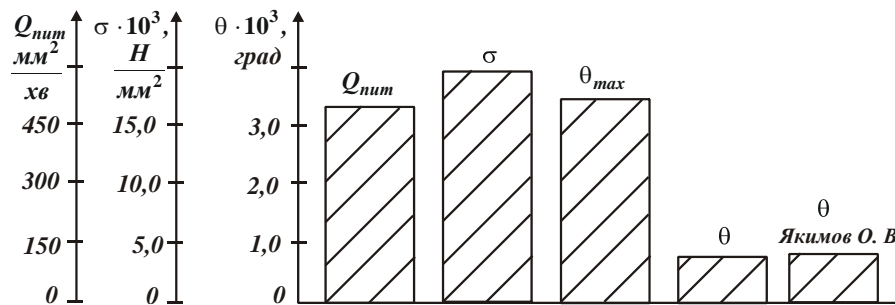


Рисунок 8 – Значення параметрів теплового процесу при шліфуванні

Розрахунками параметрів теплового процесу при плоскому шліфуванні за залежністю (3) встановлено:  $\theta / \theta_{max} = 0,25$ . Умовне напруження різання  $\sigma$ , виходячи із залежності (8), дорівнює:  $\sigma = 19193 \text{ Н/мм}^2$ . Тоді  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho) = 3446 \text{ }^\circ\text{C}$ . Відповідно, температура різання  $\theta = 0,25 \cdot \theta_{max} = 862 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Порівнюючи це значення зі значенням, встановленим професором Якимовим О. В. (яке дорівнює  $876 \text{ }^\circ\text{C}$ ), видно, що вони несуттєво відрізняються (в межах 2 %). Це вказує на достовірність отриманого в роботі теоретичного рішення, що аналітично описується залежністю (3). На рис. 8 графічно показано встановлені значення параметрів теплового процесу при шліфуванні.

**Висновки.** 1. У роботі розроблено теоретичний підхід до визначення температури різання при шліфуванні та умов її зменшення із урахуванням балансу тепла, що надходить в стружки та оброблювану деталь. Це дозволило наблизити розрахункову схему температури різання до реальних умов обробки й привести у відповідність теорію та практику механічної обробки шліфуванням. Розходження розрахункових та експериментальних значень температури різання при шліфуванні складає не більше 12 %.

2. Розрахунками встановлено, що зі збільшенням часу контакту круга з оброблюваним матеріалом температура різання безперервно збільшується, асимптотично наближаючись до максимальної температури різання, яка визначається відношенням умовного напруження різання до питомої теплоємності й щільності оброблюваного матеріалу. Виходячи з цього запропоновано максимальну температуру різання розглядати новим універсальним технологічним параметром обробки, що визначає його потенційні можливості та дозволяє порівнювати різні методи механічної обробки за температурним критерієм й вибирати найбільш ефективні з них. На цій основі обґрунтовано основний напрям зниження температури різання та підвищення якості й продуктивності обробки, який полягає у зменшенні максимальної температури різання до рівня та нижче

температури плавлення оброблюваного матеріалу. Це дозволяє здійснити шліфування зі значною продуктивністю обробки фактично без підвищення температури різання.

3. Розрахунками встановлено, що зі збільшенням питомої продуктивності обробки ефективно шліфування здійснювати за схемою глибокого шліфування із відносно невеликою швидкістю деталі. При відносно невеликій питомій продуктивності обробки доцільно використовувати багатопрохідне шліфування зі збільшеною швидкістю деталі. Встановлено також, що в реальних умовах шліфування відношення заданої й максимальної температур шліфування може змінюватися лише в межах 0 ... 0,4 в зв'язку із перевищенням максимальною температурою різання температури плавлення оброблюваного матеріалу через значне збільшення умовного напруження різання при шліфуванні. Тому основною умовою зменшення максимальної температури різання є зменшення умовного напруження різання.

#### Список літератури:

1. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов. – К.: Наукова думка, 1978. – 207 с.
2. Захаренко И. П. Алмазные инструменты и процессы обработки. – К.: Техника, 1980. – 212 с.
3. Ларшин В. П., Гречиха А. А. Проблемы применения смазывающе-охлаждающих средств в технике и технологии // Вісник Харківського держ. техн. ун-ту сільського господарства. – Харків: ХДТУСГ, 2002. – Вип. 10. – С. 54–59.
4. Оборский Г. А., Дашченко А. Ф., Усов А. В., Дмитришин Д. В. Моделирование систем: монография. – Одесса: Астропринт, 2013. – 664 с.
5. Новиков Ф. В., Жовтобрюх В. А., Андилухай А. А., Новиков Д. Ф., Полянський В. И. Современные технологии и техническое перевооружение предприятий : монография. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 400 с.
6. Новиков Ф. В. Определение условий высокопроизводительного низкотемпературного шлифования // Перспективні технології та прилади: збірник наукових праць // м. Луцьк, червень 2020. – Луцьк: Луцький НТУ, 2020. – Випуск 16. – С. 92–99.
7. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки: монография. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 400 с.
8. Островский В. И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 139 с.
9. Полянський В. И. Математическая модель теплового процесса при шлифовании материалов. Високі технології в машинобудуванні: зб. наук, праць. – Харків, НТУ "ХПІ", 2018. Вип. 1 (28). С. 120–130.
10. Сизый Ю. А., Сталинский Д. В. Динамика и теплофизика шлифования. – Харьков: ГП УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. – 448 с.
11. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
12. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
13. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
14. Якимов А. В., Паршаков А. Н., Свиричев В. И., Ларшин В. П. Управление процессом шлифования. – К.: Техника, 1983. – 182 с.
15. Ящерицын П. И., Цокур А. К., Еременко М. Л. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. – Минск: Наука и техника, 1973. – 184 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Baykalov A. K. Vvedeniye v teoriyu shlifovaniya materialov. – K.: Naukova dumka, 1978. – 207 s.
2. Zakharenko I. P. Almaznyye instrumenty i protsessy obrabotki. – K.: Tekhnika, 1980. – 212 s.
3. Larshin V. P., Grechikha A. A. Problemy primeneniya smazyvayushche-okhlazhdayushchikh sredstv v tekhnike i tekhnologii // Visnyk Kharkivsk'koho derzh. tekhn. un-tu sil's'koho hospodarstva. – Kharkiv: KHD TUS-H, 2002. – Vyp. 10. – S. 54–59.
4. Oborskiy G. A., Dashchenko A. F., Usov A. V., Dmitrishin D. V. Modelirovaniye sistem: monografiya. – Odessa: Astroprint, 2013. – 664 s.
5. Novikov F. V., Zhovtobryukh V. A., Andilakhay A. A., Novikov D. F., Polyanskiy V. I. Sovremennyye tekhnologii i tekhnicheskoye perevoorzheniye predpriyatiy : monografiya. – Dnepr: LIRA, 2018. – 400 s.
6. Novikov F. V. Opredeleniye usloviy vysokoproizvoditel'nogo nizkotemperaturnogo shlifovaniya // Perspektivny tekhnolohiyi ta prylyady: zbirnyk naukovykh prats' // m. Luts'k, cherven' 2020. – Luts'k: Luts'kyi NTU, 2020. – Vypusk 16. – S. 92–99.
7. Novikov F. V. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki: monografiya. – Dnepr: LIRA, 2018. – 400 s.
8. Ostrovskiy V. I. Teoreticheskiye osnovy protsessa shlifovaniya. – L.: Izd-vo Leningr. un-ta, 1981. – 139 s.
9. Polyanskiy V. I. Matematicheskaya model' teplovogo protsessa pri shlifovanii materialov. Vysoki tekhnolohiyi v mashynobuduvanni: zb. nauk, prats'. – Kharkiv, NTU "KHPI", 2018. Vyp. 1 (28). S. 120–130.
10. Sizyy YU. A., Stalinskiy D. V. Dinamika i teplofizika shlifovaniya. – Khar'kov: GP UkrNTTS "Energostal", 2016. – 448 s.
11. Sipaylov V. A. Teplovyeye protsessy pri shlifovanii i upravleniye kachestvom poverkhnosti. – M.: Mashinostroyeniye, 1978. – 166 s.
12. Starkov V. K. Shlifovaniye vysokoporistymi krugami. – M.: Mashinostroyeniye, 2007. – 688 s.
13. Yakimov A. V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya / A. V. Yakimov. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 175 s.
14. Yakimov A. V., Parshakov A. N., Svirshchev V. I., Larshin V. P. Upravleniye protsessom shlifovaniya. – K.: Tekhnika, 1983. – 182 s.
15. Yashcheritsyn P. I., Tsokur A. K., Yeremenko M. L. Teplovyeye yavleniya pri shlifovanii i svoystva obrabotannykh poverkhnostey. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1973. – 184 s.

Поступила (received) 15.03.2022

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir Vasilivich)** – доктор технічних наук, професор кафедри "Технологій і безпеки життєдіяльності" Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-067-68-90-342; e-mail: [novikovfv@i.ua](mailto:novikovfv@i.ua)  
ORCID: 0000-0001-6996-3356

**Полянський Володимир Іванович (Полянский Владимир Иванович, Polyansky Vladimir Ivanovich)** – доктор технічних наук, Генеральний директор, ТОВ "Імперія металів", м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: [tools@imperija.com](mailto:tools@imperija.com), ORCID: 0000-0003-2841-9455