

НОВИКОВ Ф. В., ПОЛЯНСЬКИЙ В. І.

ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ЛЕЗОВІЙ ОБРОБЦІ

У роботі запропоновано дві розрахункові схеми для визначення температури різання при механічній обробці. Перша розрахункова схема заснована на урахуванні безперервного рівномірного в часі зняття оброблюваного матеріалу, що досягається в умовах шліфування, коли зв'язка шліфувального круга безупинно контактує з оброблюваним матеріалом. Друга розрахункова схема заснована на тому, що процес стружкоутворення при різанні в умовах лезової обробки здійснюється шляхом періодичних зсувів елементарних об'ємів матеріалу вздовж умовної площини зсуву, яка розташована під певним кутом до напрямку руху оброблюваної деталі. Розрахунками встановлено, що при їх значному збільшенні температура різання може збільшуватися до 10 разів. Це має місце при шліфуванні в умовах безперервного контакту зв'язки шліфувального круга із оброблюваним матеріалом. При лезовій обробці кількість виникаючих в зоні різання зсувних елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу незначна, що дозволяє знизити температуру різання і підвищити якість та продуктивність обробки, привести у відповідність розрахункові та експериментальні значення температури різання. Це дозволяє з нових теоретичних позицій обґрунтувати ефективність переходу на фінішних операціях від процесу шліфування до сучасних методів лезової обробки.

Ключові слова: баланс тепла, точіння, температурний критерій, джерело тепла, інтенсивність тертя, якість та продуктивність обробки, умовне напруження різання

НОВИКОВ Ф. В., ПОЛЯНСКИЙ В. И.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

В работе предложены две расчетные схемы для определения температуры резания при механической обработке. Первая расчетная схема основана на учете непрерывного равномерного по времени съема обрабатываемого материала, достигаемого в условиях шлифования, когда связка шлифовального круга непрерывно контактирует с обрабатываемым материалом. Вторая расчетная схема основана на том, что процесс стружкообразования при резании в условиях лезвийной обработки осуществляется путем периодических сдвигов элементарных объемов материала вдоль условной плоскости сдвига, расположенной под определенным углом к направлению движения обрабатываемой детали. Расчетами установлено, что при их значительном увеличении температура резания может увеличиваться до 10 раз. Это имеет место при шлифовании в условиях непрерывного контакта связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом. При лезвийной обработке количество возникающих в зоне резания сдвиговых элементарных объемов обрабатываемого материала незначительно, что позволяет уменьшить температуру резания и повысить качество и производительность обработки, привести в соответствие расчетные и экспериментальные значения температуры резания. Это позволяет с новых теоретических позиций обосновать эффективность перехода на финишных операциях от процесса шлифования к современным методам лезвийной обработки.

Ключевые слова: баланс тепла, точение, температурный критерий, источник тепла, интенсивность трения, качество и производительность обработки, условное напряжение резания

NOVIKOV F. V., POLYANSKY V. I.

THEORETICAL DETERMINATION OF CUTTING TEMPERATURE DURING BLADE PROCESSING

The paper proposes two calculation schemes for determining the cutting temperature during mechanical processing. The first calculation scheme is based on taking into account the continuous uniform removal of the processed material over time, which is achieved in grinding conditions, when the connection of the grinding wheel is in continuous contact with the processed material. The second calculation scheme is based on the fact that the process of chip formation during cutting under the conditions of blade processing is carried out by periodic shifts of elementary volumes of the material along the conventional shear plane, which is located at a certain angle to the direction of movement of the processed part. Calculations have established that with their significant increase, the cutting temperature can increase up to 10 times. This occurs when grinding in conditions of continuous contact between the bond of the grinding wheel and the processed material. During blade processing, the number of shear elementary volumes of the processed material arising in the cutting zone is insignificant, which allows you to reduce the cutting temperature and increase the quality and productivity of processing, bring the calculated and experimental values of the cutting temperature into line. This makes it possible to justify the effectiveness of the transition from the grinding process to modern methods of blade processing in the finishing operations from new theoretical positions.

Key words: heat balance, turning, temperature criterion, heat source, friction intensity, processing quality and productivity, conventional cutting stress

Вступ. Застосування сучасних збірних ріжучих лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва відкрило широкі перспективи підвищення продуктивності та якості обробки деталей, виготовлених з матеріалів з підвищеними фізико-механічними властивостями. Тому в даний час підприємства України оснащуються сучасним технологічним обладнанням зі значними можливостями підвищення якості, точності й продуктивності механічної обробки. Однак, широке застосування сучасних збірних ріжучих твердосплавних лезових інструментів зі зносостійкими покриттями з метою їх ефективного практичного використання вимагає глибоких знань закономірностей, що відбуваються в процесі різання. В іншому випадку терміни окупності витрат на їх придбання можуть виявитися значними із-за високої собівартості обробки. Прикладом тому є досвід застосування на підприємствах України сучасних (проте достатньо коштовних) металорізальних інструментів закордонного виробництва. Як встановлено, внаслідок необґрунтованих умов їх використання собівартість обробки може в декілька разів перевищувати собівартість обробки вітчизняними інструментами, незважаючи на можливість збільшення продуктивності обробки. Тому для їх ефективного використання необхідно знати нові підходи до призначення оптимальних режимів різання, що дозволяють знизити теплову й силову напруженість процесу різання. Значною мірою це відноситься до зниження температури різання, яка визначає стійкість лезового інструменту, продуктивність і якість обробки. Тому у роботі вирішується актуальне науково-практичне завдання теоретичного визначення температури різання при лезовій обробці

та обґрунтування умов її зменшення.

Аналіз основних досягнень та літератури. В даний час у науково-технічній літературі опубліковано велику кількість теоретичних робіт, присвячених визначенню температури різання при механічній обробці матеріалів. У цих роботах [6, 8, 10, 13] наведено класичні рішення теплофізичних задач механічної обробки матеріалів, отримано аналітичні залежності для встановлення температури різання. Також визначено умови зменшення температури різання та обґрунтовано оптимальні параметри обробки за температурним критерієм на основі вирішення класичного диференціального рівняння теплопровідності матеріалів. Особливо це відноситься до процесів шліфування [9, 11, 12, 14], які застосовують на фінішних операціях механічної обробки, та на яких, як правило, утворюються температурні дефекти (припикання, мікротріщини тощо) на оброблюваних поверхнях деталей машин. При лезовій обробці, як показує практика, силова і теплова напруженості процесу різання нижчі, ніж при шліфуванні [13]. Тому дослідженню теплових процесів при лезовій обробці приділяється менше уваги порівняно із процесами шліфування. Виходячи із цього, важливо на основі єдиних теоретичних позицій визначити температуру різання при механічній обробці та порівняти її в умовах шліфування та лезової обробки. Це дозволить науково-обґрунтовано встановити основні напрями ефективного застосування процесів лезової обробки за температурним критерієм.

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

Для досягнення цієї мети необхідно:

- аналітично на основі єдиних теоретичних позицій визначити температуру різання при механічній обробці та порівняти її в умовах шліфування та лезової обробки;
- встановити основні принципові відмінності формування температури різання при шліфуванні та лезовій обробці;
- провести експериментальне оцінювання отриманих теоретичних рішень;
- розробити практичні рекомендації щодо зменшення температури різання при лезовій обробці та підвищення якості й продуктивності обробки деталей машин.

Матеріали дослідження. Для визначення закономірностей формування температури різання при лезовій обробці слід скористатися розрахунковою схемою плоского шліфування з урахуванням руху теплового джерела уздовж адіабатичного стержня зі швидкістю V_{piz} (рис. 1) [5]. На основі цієї розрахункової схеми аналітично встановлено розподіл тепла, яке виникає при різанні та надходить в поверхневий шар оброблюваної деталі й стружок, що утворюються, та визначено температуру різання при шліфуванні:

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

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

σ – умовне напруження різання, Н/м²;

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

ρ – щільність оброблюваного матеріалу, кг/м³;

λ – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/м·К;

τ – час перерізання адіабатичного стержня, с.

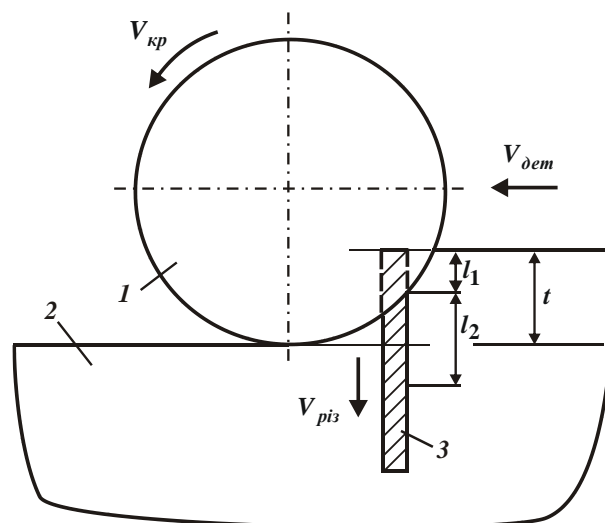


Рис. 1 – Розрахункова схема параметрів теплового процесу при плоскому шліфуванні: 1 – шліфувальний круг; 2 – оброблюваний матеріал; 3 – адіабатичний стержень (l_1 – довжина зрізаної частини адіабатичного стержня; l_2 – глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі; V_{kp} , V_{dem}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

Щодо процесу різання лезовим інструментом (процесу точіння) швидкість $V_{різ}$, що входить у залежність (1), необхідно виразити через швидкість різання V (рис. 2,а) [3]:

$$V_{різ} = V \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (2)$$

де β – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу.

Тоді з урахуванням виразів $\tau = a_{зріз} / V_{різ}$ і $\sigma = \sigma_{см} / \operatorname{tg} \beta$ [3] залежність (1) набуде вигляду:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot Q_{num} \cdot \operatorname{tg} \beta}, \quad (3)$$

де $a_{зріз}$ – товщина зрізу, м;

$Q_{num} = V \cdot a_{зріз}$ – питома продуктивність обробки, м²/с;

$\sigma_{см}$ – межа міцності на стиск оброблюваного матеріалу, Н/м².

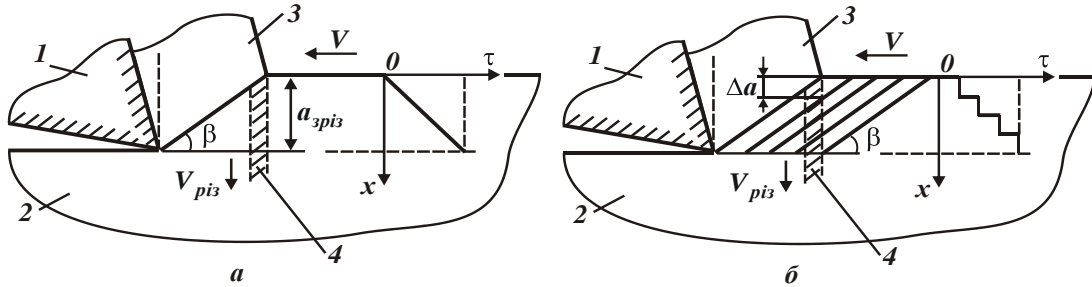


Рис. 2 – Розрахункові схеми температури різання при лезовій обробці з урахуванням рівномірного (а) та періодичного (б) переміщення в часі теплового джерела вздовж адіабатичного стержня: 1 – різець; 2 – оброблювальний матеріал; 3 – стружка; 4 – адіабатичний стержень

Залежність (3) справедлива за умови рівномірного в часі переміщення джерела тепла з постійною швидкістю вздовж адіабатичного стержня. У цьому випадку має місце безперервне рівномірне в часі зняття оброблюваного матеріалу, що досягається в умовах шліфування, коли зв'язка шліфувального круга безупинно контактує з оброблюваним матеріалом. Однак, в умовах лезової обробки процес стружкоутворення при різанні здійснюється шляхом періодичних зсувів елементарних об'ємів матеріалу вздовж умовної площини зсуву, яка розташована під кутом β до напрямку руху оброблюваної деталі (рис. 2,б). Тому переміщення джерела тепла вздовж адіабатичного стержня буде не безперервним, а періодичним (стрибкоподібним) з кроком $\Delta a = a_{зріз} / n$, де n – кількість елементарних об'ємів матеріалу, що утворюються за час переміщення оброблюваної деталі в межах зони різання довжиною $a_{зріз} / \operatorname{tg} \beta$ (кількість перерізів адіабатичного стержня). Тобто, на протязі часу $\tau = \Delta a / V_{різ}$ джерело тепла умовно залишається нерухомим, а потім стрибкоподібно переміщується на відстань Δa вздовж адіабатичного стержня і знову на протязі часу $\tau = \Delta a / V_{різ}$ залишається нерухомим. Цей процес повторюється n разів. Очевидно, закономірності формування температури різання в цьому випадку будуть відрізнятися від випадку з рівномірним в часі переміщенням джерела тепла вздовж адіабатичного стержня (рис. 2,а) у зв'язку із періодичним відокремленням елементарних об'ємів матеріалу від його основної маси. У результаті значно більша частина тепла, що виникає в момент відокремлення елементарного об'єму матеріалу (порівняно із шліфуванням), надходить в стружку, а не в залишену частину адіабатичного стержня (рис. 2,б). Це приводить до зниження температури різання θ при точінні, яка визначається на основі застосування аналітичних залежностей [3]:

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot V_{різ} \cdot l_2; \quad (4)$$

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_n}, \quad (5)$$

де τ_n, τ_{n-1} – час нагрівання адіабатичного стержня при його перерізання на величини $n \cdot V_{різ} \cdot d\tau$ та $(n-1) \cdot V_{різ} \cdot d\tau$, с;

n – кількість перерізів адіабатичного стержня;

$d\tau = \tau / n$ – час відокремлення (у результаті перерізання) елементарних об'ємів матеріалу від його основної маси, с;

$\tau = a_{зріз} / V_{різ}$ – час обробки, с;

$a_{зріз} = S \cdot \sin \varphi$ – товщина зрізу, м;

S – подача, мм/об.;

φ – головний кут різця в плані.

Час нагрівання адіабатичного стержня при його перерізанні τ_n визначається залежністю [3]:

$$\frac{\tau_n}{d\tau} = \left(\sqrt{1 + \frac{\tau_{n-1}}{d\tau}} - \alpha \right)^2, \quad (6)$$

де $\alpha = \frac{V_{\text{різ}} \cdot d\tau}{l_{20}} < 1$ – безрозмірна величина;

$l_{20} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot d\tau$ – глибина проникнення тепла в адіабатичний стержень за час $d\tau$, м.

Для вихідних даних: точіння деталі зі сталі 45 різцем із гексаніту-Р з $\varphi = 45^\circ$; $V = 100$ м/хв.; $S = 0,07$ мм/об.; $t = 0,2$ мм; $a = 8 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\beta \approx 20^\circ$ (за даними професора Коломійця В. В.) розрахунками встановлено: $\tau = 0,824 \cdot 10^{-4}$ с; $V_{\text{різ}} = 0,607$ м/с; $a_{\text{зріз}} = 0,05$ мм (табл. 1).

У табл. 1 наведено розраховані на основі залежностей (4) – (6) значення величин τ_n , l_2 і $\theta/\theta_{\text{max}}$ в залежності від кількості перерізів адіабатичного стержня n , приймаючи для сталі 45 коефіцієнт температуропровідності $\lambda/(c \cdot \rho) = 8 \cdot 10^{-6}$ м²/с. На рис. 3 графічно наведено розрахункові значення відношення $\theta/\theta_{\text{max}}$ в залежності від кількості перерізів адіабатичного стержня n .

Таблиця 1 – Розрахункові значення параметрів теплового процесу при точінні

n	$d\tau \cdot 10^{-4}$, с	α	$\tau_n \cdot 10^{-4}$, с	l_2 , мкм	$\theta/\theta_{\text{max}}$
1	0,824	1,377	–	–	–
2	0,412	0,9737	0,000285	0,675	0,1
3	0,275	0,795	0,0145	4,817	0,3658
4	0,206	0,6885	0,02961	6,883	0,522
5	0,165	0,6158	0,041	8,1	0,6158
6	0,137	0,562	0,05	8,944	0,6729
7	0,118	0,52	0,0562	9,483	0,7191
8	0,103	0,487	0,06206	9,965	0,7558
9	0,0916	0,459	0,06648	10,313	0,7823
10	0,0824	0,435	0,07027	10,6	0,8042
11	0,075	0,415	0,073	10,81	0,8205

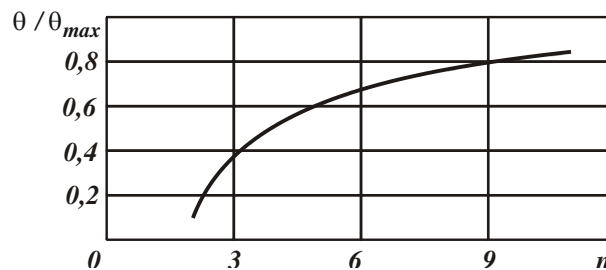


Рис. 3 – Залежність $\theta/\theta_{\text{max}}$ від кількості перерізів адіабатичного стержня n

Із табл. 1 та рис. 3 випливає, що зі збільшенням кількості перерізів адіабатичного стержня n час τ_n збільшується (починаючи із $n = 2$) в широких межах, приймаючи значення, менші часу повного перерізання адіабатичного стержня $\tau = l/V$. Збільшення часу τ_n , відповідно, приводить до збільшення величин l_2 і $\theta/\theta_{\text{max}}$. Отже, чим більше кількість перерізів адіабатичного стержня n , тим більше відношення $\theta/\theta_{\text{max}}$ й температура різання θ . В ідеалі (за умови $n \rightarrow \infty$) приходимо до рішення (3), отриманого при рівномірному перерізанні адіабатичного стержня, що має місце при шліфуванні. У цьому випадку розрахункове значення відношення $\theta/\theta_{\text{max}}$, яке визначається залежністю (3), приймає найбільше значення, рівне $\theta/\theta_{\text{max}} = 0,99$. Власне, цим можна пояснити підвищені значення температури різання при шліфуванні порівняно із процесом точіння, коли руйнування оброблюваного матеріалу відбувається окремими частинами (елементами стружки). Хоча при шліфуванні ще має місце й інтенсивне тертя зв'язки шліфувального круга з оброблюваним матеріалом, що є додатковим осередком збільшення силової напруженості процесу різання, умовного напруження різання σ й, відповідно, температури різання θ , що визначається залежністю (4).

За умови $n = 1$ все тепло, що виділяється при різанні, залишається в зрізаній частині адіабатичного стержня (рис. 2,б) та надходить в стружку, що утворюється. Отже, при різанні лезовим інструментом необхідно прагнути до зменшення кількості перерізів адіабатичного стержня n (кількості зсувів

елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу в межах зони різання). У цьому випадку більше тепла, що виділяється в процесі різання, буде надходити в стружку, що утворюється, знижуючи тим самим температуру різання й підвищуючи якість та продуктивність обробки. Тому на операціях фінішної обробки матеріалів необхідно за можливістю використовувати процеси різання лезовими інструментами замість процесів шліфування з метою забезпечення високих показників якості та продуктивності обробки.

Таким чином, виходячи з табл. 1 та рис. 3, встановлено, що зі зменшенням кількості перерізів n адіабатичного стержня температура різання θ зменшується. За умови $n \rightarrow \infty$ приходимо до розрахункової схеми температури різання з рівномірним переміщенням в часі джерела тепла вздовж адіабатичного стержня (рис. 2,а). Однак це призводить до підвищених значень температури різання θ при лезовій обробці. Тому розрахунок температури різання при лезовій обробці необхідно виконувати за схемою різання з періодичним переміщенням в часі джерела тепла вздовж адіабатичного стержня (рис. 2,б). Це буде відповідати експериментальним даним, наведеним у роботі [4]. Так, при обробці деталі зі сталі 45 ($c \cdot \rho = 5 \cdot 10^6$ Дж/(м³·град.) = 5 Н/(мм²·град.)) експериментально встановлено $\sigma = 7 \cdot 10^3$ Н/мм². Тоді розрахункове значення максимальної температури різання $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho) = 1400$ °С. За умови $\theta / \theta_{max} = 0,522$ (для $n = 4$) отримано $\theta = 730,8$ °С. Експериментальне значення температури різання дорівнює $\theta = 700$ °С при швидкості різання $V = 100$ м/хв (за даними професора Коломійця В. В. [2]). Отже, має місце незначне розходження розрахункового та експериментального значень температури різання (в межах 10 %), рис. 4.

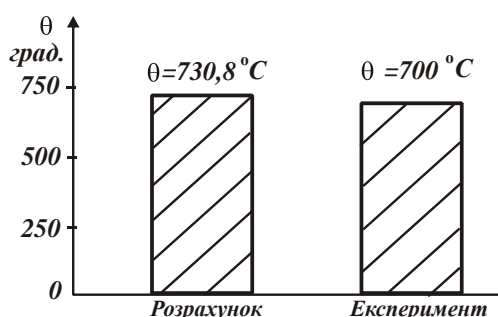


Рис.4 – Розрахункове та експериментальне значення температури різання при точінні деталі зі сталі 45

На рис. 5 наведено фото стружок, які утворюються в процесі точіння деталей зі сталі У10 та сталі Р6М5 за наведених вище умов обробки (отримані професором Коломійцем В. В. [2]). Як видно, мають місце періодичні зсуви елементарних об'ємів матеріалу вздовж умовної площини зсуву, яка розташована під кутом β до напрямку руху оброблюваної деталі (рис. 2,б). Це вказує на достовірність розробленої математичної моделі визначення температури різання при лезовій обробці з урахуванням періодичного переміщення в часі теплового джерела вздовж адіабатичного стержня (рис. 2,б).

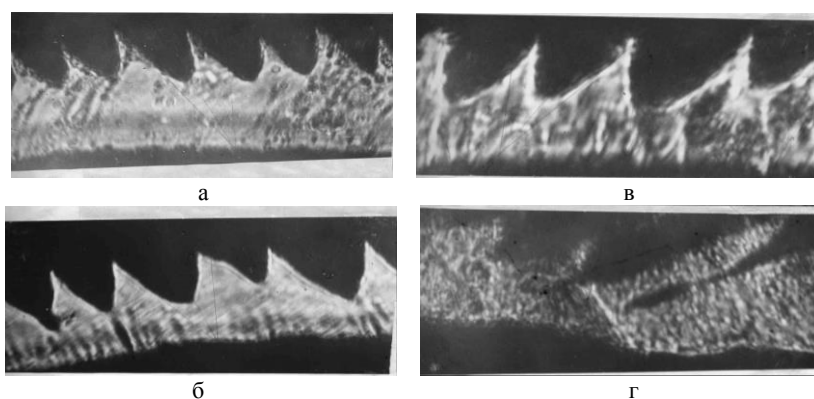


Рис. 5 – Типи стружок [2]: сталь У10 – $V = 70$ м/хв (а); сталь У10 – $V = 100$ м/хв (б); сталь Р6М5 – $V = 90$ м/хв (в); сталь Р6М5 – $V = 180$ м/хв (г)

Таким чином встановлено, що в реальних умовах лезової обробки слід розрахунок температури різання здійснювати із урахуванням дискретного характеру перерізання адіабатичного стержня в процесі різання, оскільки при безперервному характері перерізання адіабатичного стержня температура різання θ приймає підвищені значення, які мають місце в процесі шліфування (рис. 6).

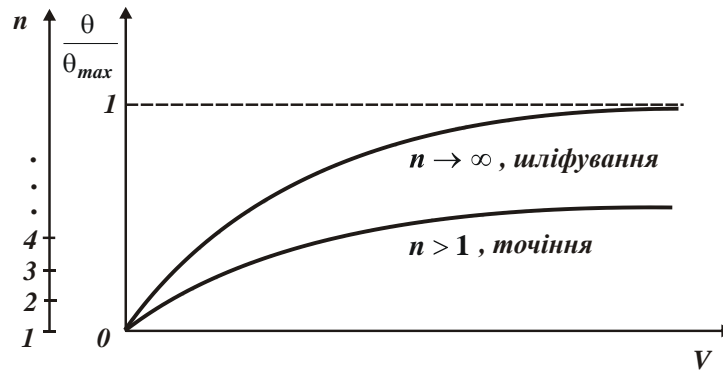


Рис. 6 – Залежність відношення θ/θ_{max} від швидкості різання V при точінні (або швидкості деталі V_{dem} при шліфуванні)

Основною умовою зменшення кількості перерізів адиабатичного стержня n (кількості зсувів елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу в межах зони різання) слід розглядати збільшення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β шляхом застосування більш досконалих різальних лезових інструментів, що характеризуються високою продуктивністю різання та забезпечують зниження інтенсивності тертя в зоні різання. Очевидно, чим більше товщина елементарного об'єму елемента оброблюваного матеріалу, що відділяється внаслідок його зсуву вздовж умовної площини зсуву, тим менше ступінь його деформації й, відповідно, менше умовне напруження різання σ , яке пов'язане з умовним кутом зсуву оброблюваного матеріалу β залежністю: $\sigma = \sigma_{cm}/tg\beta$. Як випливає з цієї залежності, зі зменшенням умовного напруження різання σ збільшується умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β . Це призводить до збільшення товщини елементарного об'єму елемента оброблюваного матеріалу, що відділяється, й зменшення кількості перерізів адиабатичного стержня n . У свою чергу, зменшення умовного напруження різання σ сприяє зменшенню максимальної температури різання $\theta_{max} = \sigma/(c \cdot \rho)$ й, відповідно, поточного значення температури різання θ для заданих умов обробки. Цим показано більш складний зв'язок параметрів теплового процесу при різанні матеріалів.

Таким чином, аналітична залежність (1) для визначення температури різання справедлива за умови рівномірного в часі переміщення джерела тепла з постійною швидкістю V_{piz} вздовж адиабатичного стержня. У цьому випадку має місце безперервне рівномірне в часі зняття оброблюваного матеріалу, що досягається в умовах шліфування, коли зв'язка шліфувального круга безупинного контакту з оброблюваним матеріалом.

При шліфуванні справедливі аналітичні залежності [3]: $\tau = t/V_{piz}$; $V_{piz} = V_{dem} \cdot \sqrt{0,5 \cdot t/R_{kp}}$, де t – глибина шліфування, м; R_{kp} – радіус шліфувального круга, м. При точінні $\tau = a_{zriz}/V_{piz}$; $V_{piz} = V \cdot tg\beta$, де a_{zriz} – товщина зрізу, м; V – швидкість різання, м/с; β – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу. У результаті показник ступеня числа $e \approx 2,72$ в правій частині залежності (1) дорівнює: при шліфуванні – $(c \cdot \rho / \lambda) \cdot V_{dem} \cdot t \cdot \sqrt{0,5 \cdot t/R_{kp}}$; при точінні – $(c \cdot \rho / \lambda) \cdot a_{zriz} \cdot V \cdot tg\beta$.

Виконані розрахунки температури різання θ при шліфуванні на основі залежності (1) показали на достатньо високу ступінь її збіжності з експериментальними даними (розбіжність в межах 10 %). При точінні деталей зі сталі (як показано вище) має місце розбіжність розрахункових і експериментальних значень температури різання θ до 2 разів і більше, що знижує точність розрахунків. Причиною цьому є періодичний (дискретний) характер перерізання різальним інструментом елементарних прямолінійних адиабатичних стержнів (рис. 2,б), який не враховується в розрахунках на основі залежності (1).

Процес шліфування здійснюється з відносно невеликою швидкістю деталі V_{dem} й, відповідно, невеликою швидкістю перерізання елементарного прямолінійного адиабатичного стержня шліфувальним кругом

(рис. 1). Тому формування температури різання θ відбувається фактично в умовах безперервного характеру перерізання шліфувальним кругом елементарних прямолінійних адиабатичних стержнів. Отже, розрахунок температури різання θ при шліфуванні на основі залежності (1) можна здійснювати без урахування періодичного (дискретного) характеру перерізання шліфувальним кругом елементарних прямолінійних адиабатичних стержнів.

При точінні, по-перше, швидкість різання V значно більше швидкості деталі V_{dem} при шліфуванні. По-друге, більше товщина зрізу й товщина елементарного об'єму матеріалу, який відділяється від основної маси матеріалу в результаті його зсувної деформації. У результаті значна частина тепла, яка виділяється при різанні, постійно відноситься стружкою, що утворюється. Це принципово змінює закономірності формування температури різання θ при точінні й, відповідно, призводить до її зменшення. Тому розрахунок температури різання при точінні на основі залежності (1) повинен відрізнятися від аналогічного розрахунку,

що виконується при шліфуванні. Для цього необхідно отримати розрахункові значення температури різання θ зменшувати в залежності від кількості перерізів адіабатичного стержня n , тобто в залежності від кількості елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу, що утворюються за час проходження різцем зони різання (табл. 1).

Виходячи з рис. 6, чим більше величина n , тим більше відношення θ/θ_{max} . Очевидно, при точінні величина n значно менше, ніж при шліфуванні. Отже, при точінні менше відношення θ/θ_{max} й температура різання θ . Це приводить у відповідність розрахункові та експериментальні значення температури різання θ . Із урахуванням цього рішення, отриманого на основі залежності (1), необхідно коригувати, множачи розрахункове значення θ на відношення θ/θ_{max} , що наведено в табл. 1, для заданої величини n .

При шліфуванні величина n приймає достатньо великі значення й, виходячи з табл. 1, відношення $\theta/\theta_{max} \rightarrow 1$. Тому залежність (1) не вимагає корегування. Цим і пояснюється те, що розрахунки температури різання θ при шліфуванні за залежністю (1) приводять до результатів, що відповідають експериментальним даним, а при точінні має місце розбіжність розрахункових та експериментальних значень температури різання θ .

Таким чином, у роботі обґрунтовано відмінні риси формування температури різання при точінні та шліфуванні. Отримані результати дозволяють уточнити розрахунки температури різання θ при точінні. Із наведеного рішення випливає важливий практичний висновок, який полягає в тому, що для зниження температури різання при точінні слід зменшувати величину n до мінімально можливого значення $n = 2$. Тоді, згідно табл. 1, відношення θ/θ_{max} й, відповідно, температуру різання θ можна зменшити до 10 разів. Це досягається, головним чином, за рахунок збільшення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β шляхом зниження інтенсивності тертя в зоні різання [1] та підвищення ріжучої здатності інструменту.

Отже, урахування величини n є важливим чинником у формуванні температури різання при лезовій обробці. Це дозволяє науково обґрунтовано підійти до встановлення умов її зменшення й оцінювання можливостей ефективного переходу на фінішних операціях від процесу шліфування до сучасних методів лезової обробки із метою зниження температури різання й підвищення якості оброблюваних поверхонь [7]. Отримані теоретичні рішення також дозволяють із єдиних позицій проводити аналіз і кількісно оцінювати технологічні можливості різних методів механічної обробки з точки зору підвищення продуктивності обробки для заданої температури різання.

Висновки. 1. У роботі запропоновано дві розрахункові схеми для визначення температури різання при механічній обробці. Перша розрахункова схема заснована на урахуванні безперервного рівномірного в часі зняття оброблюваного матеріалу, що досягається в умовах шліфування, коли зв'язка шліфувального круга безупинного контакту з оброблюваним матеріалом. Друга розрахункова схема заснована на тому, що процес стружкоутворення при різанні (в умовах лезової обробки) здійснюється шляхом періодичних зсувів елементарних об'ємів матеріалу вздовж умовної площини зсуву, яка розташована під певним кутом до напрямку руху оброблюваної деталі. У цьому випадку переміщення джерела тепла вздовж адіабатичного стержня відбувається не безперервно, а періодично з певним кроком.

2. Встановлено, що при безперервному рівномірному в часі знятті оброблюваного матеріалу температура різання фактично досягає значень максимальної температури різання при відносно невеликих значеннях продуктивності обробки. Це приводить до розбіжності розрахункових і експериментальних значень температури різання. Так, при шліфуванні розбіжність розрахункових і експериментальних значень температури різання невелика – в межах 10 %, а при точінні вона збільшується до 2 разів і більше, що знижує точність розрахунків. Причиною цьому є періодичний (дискретний) характер перерізання ріжучим інструментом елементарних прямолінійних адіабатичних стержнів, який не ураховується в розрахунковій схемі. Тому для більш точного розрахунку температури різання при точінні слід урахувувати кількість перерізів адіабатичного стержня, тобто кількість елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу, що утворюються за час проходження різцем зони різання. Підведення тепла до елементарного прямолінійного адіабатичного стержня слід розглядати дискретно зі зміною в часі.

3. Розрахунками встановлено, що зі збільшенням кількості виникаючих зсувних елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу температура різання збільшується. При здійсненні точіння з мінімально можливою кількістю елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу, що утворюються за час проходження різцем зони різання, рівною 2, температура різання може бути зменшена до 10 разів щодо максимальної температури різання при шліфуванні. Урахування цієї закономірності дозволило привести у відповідність розрахункові та експериментальні значення температури різання при точінні.

4. Показано, що в реальних умовах різання необхідно прагнути до зменшення кількості виникаючих зсувних елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу з метою зменшення температури різання й підвищення якості та продуктивності обробки. Це досягається в умовах лезової обробки, оскільки при шліфуванні має місце фактично безперервний характер перерізання елементарних адіабатичних стержнів і температура різання приймає найбільші значення. Це пов'язано з тим, що зв'язка шліфувального круга фактично безупинного контакту з оброблюваним матеріалом. Отже, запропоноване в роботі рішення дозволяє з нових теоретичних позицій обґрунтувати ефективність переходу на фінішних операціях від процесу шліфування до сучасних методів лезової обробки з метою зменшення температури різання й

підвищення якості оброблюваних поверхонь.

Список літератури:

12. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 343 с.
13. Коломиец В. В. Точение закаленных сталей резаками из эльбора-Р. Том 3 "Резание материалов лезвийными инструментами", часть 2, глава 1 // *Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения* / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. Одесса: ОНПУ, 2003. С. 157–226.
14. Новиков Ф. В., Жовтобрюх В. А., Шкурупий В. Г. Оптимальные решения в технологии машиностроения : монография. Днепр: ЛИРА, 2018. 424 с.
15. Новиков Ф. В., Полянский В. И., Коломиец В. В. Математическая модель определения температуры резания при лезвийной обработке. *Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте*: материалы 20-го Междунар. научн.-техн. семинара (г. Тбилиси, 23–28 марта 2020 г.). Киев: АТМ України, 2020. С. 123–127.
16. Новіков Ф. В., Полянський В. І. Розроблення теоретичного підходу до визначення температури різання при шліфуванні та умов її зменшення // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Технології в машинобудуванні*. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. № 2 (6) 2022. С. 92–100.
17. Оборский Г. А., Дашченко А. Ф., Усов А. В., Дмитришин Д. В. Моделирование систем : монография. Одесса: Астропринт, 2013. 664 с.
18. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко, В. В. Коломиец, М. Л. Хейфец и др.; под общей редакцией С. А. Клименко. Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. 353 с.
19. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
20. Сизый Ю. А., Сталинский Д. В. Динамика и теплофизика шлифования. Харьков: ГП УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. 448 с.
21. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
22. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 166 с.
23. Степанов М. С. Теплообмін при шліфуванні з застосуванням ЗОР. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харків, 2002. Вип. 19. С. 62–67.
24. Теплофизика механической обработки: учебник / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник та ін. Одеса: Астропринт, 2000. 256 с.
25. 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. Bobrov V. F. Osnovy teorii rezaniya metallov. M.: Mashinostroyeniye, 1975. 343 s.
2. Kolomiyets V. V. Tocheniyе zakalennykh staley reztsami iz el'bora-R. Tom 3 "Rezaniye materialov lezviynymi instrumentami", chast' 2, glava 1 / *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya* / pod obshch. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. V desyati tomakh. Odessa: ONPU, 2003. S. 157–226.
3. Novikov F. V., Zhovtobryukh V. A., Shkurupiy V. G. Optimal'nyye resheniya v tekhnologii mashinostroyeniya : monografiya. Dnepr: LIRA, 2018. 424 s.
4. Novikov F. V., Polyanskiy V. I., Kolomiyets V. V. Matematicheskaya model' opredeleniya temperatury rezaniya pri lezviynoy obrabotke. *Sovremennyye voprosy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte*: materialy 20-go Mezhdunar. nauchn.-tekhn. seminar (g. Tbilisi, 23–28 marta 2020 g.). Kiyev: ATM Ukrainy, 2020. S. 123–127.
5. Novikov F. V., Polyans'kyy V. I. Rozroblennya teoretychnoho pidkhdou do vyznachennya temperatury rizannya pry shlifuvanni ta umov yiyi zmenshennya / *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPI"*. Seriya: *Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni*. Kharkiv: NTU "KHPI", 2022. № 2 (6) 2022. S. 92–100.
6. Oborskiy G. A., Dashchenko A. F., Usov A. V., Dmitrishin D. V. Modelirovaniye sistem : monografiya. Odessa: Astroprint, 2013. 664 s.
7. Obrabotka rezaniyem detaley s pokrytiyami / S. A. Klivenko, V. V. Kolomiyets, M. L. Kheyfets i dr.; pod obshchey redaktsiyey S. A. Klivenko. Kiyev: ISM im. V. N. Bakulya NAN Ukrainy, 2011. 353 s.
8. Reznikov A. N. Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov. M.: Mashinostroyeniye, 1981. 279 s.
9. Sizyy YU. A., Stalinskiy D. V. Dinamika i teplofizika shlifovaniya. Khar'kov: GP UkrNTTS "Energostal'", 2016. 448 s.
10. Silin S. S. Metod podobiya pri rezanii materialov. M.: Mashinostroyeniye, 1979. 152 s.
11. Sipaylov V. A. Teplovyeye protsessy pri shlifovanii i upravleniye kachestvom poverkhnosti. M.: Mashinostroyeniye, 1978. 166 s.
12. Stepanov M. S. Teploobmin pry shlifuvanni z zastosuvannya ZOR. *Visnyk NTU "KHPI"*. Kharkiv, 2002. Vyp. 19. S. 62–67.
13. Teplofizyka mekhanichnoyi obrobky: pidruchnyk / O. V. Yakymov, A. V. Usov, P. T. Slobodyanyk ta in. Odesa: Astroprynt, 2000. 256 s.
14. 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) 05.01.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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, ORCID: 0000-0003-2841-9455