

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ І ЗНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ
РІЗАННЯ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ**

Запропоновано новий теоретичний підхід до визначення температури різання при лезовій обробці. Показано, що в розрахунковій схемі процесу різання, заснованої на представленні припуску, що знімається, у вигляді пакету елементарних прямолінійних адіабатичних стрижнів, які перерізаються ріжучим інструментом, необхідно враховувати кількість зсувних елементарних обсягів оброблюваного матеріалу. По суті, необхідно перейти від обліку безперервного характеру перерізання адіабатичного стрижня до дискретного характеру його перерізання. Розрахунками встановлено, що зі збільшенням кількості зсувних елементарних обсягів оброблюваного матеріалу температура різання збільшується. Тому необхідно прагнути до їх зменшення. Це досягається при лезовій обробці, так як при шліфуванні має місце фактично безперервний характер перерізання елементарних адіабатичних стрижнів і температура різання приймає найбільші значення. Отримане рішення дозволяє обґрунтувати ефективність переходу на фінішних операціях від процесу шліфування до сучасних методів лезової обробки з метою зменшення температури різання і підвищення якості оброблюваних поверхонь.

Ключові слова: лезова обробка, шліфування, точіння, якість і продуктивність обробки, умовне напруження різання, тепла напруженість процесу різання.

Полянський В.І. Закономерности формирования и снижения температуры резания при механической обработке. В работе предложен новый теоретический подход к определению температуры резания при лезвийной обработке. Показано, что в расчетной схеме процесса резания, основанной на представлении снимаемого припуска в виде пакета элементарных прямолинейных адиабатических стержней, которые перерезаются режущим инструментом, необходимо учитывать количество образующихся сдвиговых элементарных объемов обрабатываемого материала. По сути, необходимо перейти от учета непрерывного характера перерезания адиабатического стержня к дискретному характеру его перерезания. Расчетами установлено, что с увеличением количества образующихся сдвиговых элементарных объемов обрабатываемого материала температура резания увеличивается. Поэтому в реальных условиях резания необходимо стремиться к их уменьшению. Это достигается при лезвийной обработке, так как при шлифовании имеет место фактически непрерывный характер перерезания элементарных адиабатических стержней и температура резания принимает наибольшие значения. Полученное решение позволяет обосновать эффективность перехода на финишных операциях от процесса шлифования к современным методам лезвийной обработки с целью уменьшения температуры резания и повышения качества обрабатываемых поверхностей.

Ключевые слова: лезвийная обработка, шлифовка, точение, качество и производительность обработки, условное напряжение резки, тепловая напряженность процесса резки.

V.I. Polyanskiy. Patterns of formation and reduction of cutting temperature at machining. The paper proposes a new theoretical approach to determining the cutting temperature at blade cutting. Its essence lies in the fact that in the design scheme of the cutting process, based on the representation of the removed allowance as a package of elementary straight-line adiabatic rods that are cut by the cutting tool, it is necessary to

* канд. техн. наук, ген. директор, ООО «Імперія металів», м. Харків, fokusnic1@rambler.ru

take into account the number of generated shear elementary volumes of the material being processed that affect the cutting temperature. In fact, it is necessary to change over from taking into account the continuous nature of cutting the adiabatic rod to the discrete nature of its cutting. The calculations stated that with an increase in the number of the resulting shear elementary volumes of the material being processed, the cutting temperature increases. Therefore, under real cutting conditions it is necessary to strive to reduce them in order to reduce the cutting temperature and to improve the quality and productivity of processing. This is achieved by blade cutting, since cutting of elementary adiabatic rods is basically continuous at grinding and the cutting temperature takes on the greatest values. Thus, it has been shown that when turning Steel R6M5, the cutting temperature is just slightly higher than the cutting temperature at turning Steel 45, although Steel R6M5 is several times stronger than Steel 45. Based on the calculated cutting temperature scheme proposed in the work, this may be due to a decrease in the number of the resulting shear volumes of the processed material when turning Steel R6M5 and, accordingly, with an increase in their thickness, which contributes to an increase in the nominal shear angle of the material being processed and a decrease in the conventional stress cutting, i. e. helps reduce power and heat intensities of the cutting process. Consequently, the solution proposed in this paper makes it possible to substantiate the effectiveness of the transition to finishing operations from the grinding process to modern methods of cutting with the aim of reducing the cutting temperature and improving the quality of the surfaces to be processed. Practical recommendations for further improvement of blade processing methods have been developed on the strength of this work.

Keywords: *blade cutting, grinding, turning, quality and productivity of processing, conditional cutting intensity, thermal intensity of the cutting process.*

Постановка проблеми. Як показує практика, основним недоліком механічної обробки деталей машин є її відносно висока теплова напруженість, яка обмежує досягнення високих показників якості та продуктивності обробки. В особливій мірі це відноситься до процесу шліфування, при якому внаслідок утворення підвищеної температури різання на оброблюваній поверхні можуть утворюватися прижоги, мікротріщини і інші температурні дефекти. При лезовій обробці температура різання менша, що дозволяє в ряді випадків відмовитися від процесу шліфування і остаточну обробку проводити ріжучими лезовими інструментами, наприклад, виготовленими із синтетичних надтвердих матеріалів, а також твердосплавними і керамічними ріжучими інструментами зі зносостійкими покриттями. В результаті з'являється можливість значного зменшення температури різання і підвищення якості та продуктивності обробки. У зв'язку з цим виникає необхідність більш ретельного теоретичного аналізу можливостей зменшення температури різання при лезовій обробці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1-4] наведені аналітичні рішення щодо визначення температури різання при шліфуванні і лезовій обробці на основі використання класичного диференціального рівняння теплопровідності матеріалів для сталого і несталого в часі режимів різання, що відкрило нові можливості науково обґрунтованого аналізу умов зменшення температури різання і, відповідно, підвищення якості та продуктивності обробки. Однак отримані рішення справедливі для цілком конкретних методів механічної обробки і не дозволяють з єдиних позицій встановити температуру різання при шліфуванні і лезовій обробці, що обмежує їх практичне застосування при виборі оптимальних методів і умов обробки. Тому важливо розробити новий теоретичний підхід до визначення температури різання як при шліфуванні, так і при лезовій обробці, щоб з єдиних позицій підійти до вибору оптимальних умов обробки з урахуванням обмеження по температурі різання. В особливій мірі це відноситься до лезової обробки, має значні технологічні можливості з точки зору зменшення силової і теплової напруженостей процесу різання і підвищення якості та продуктивності обробки.

Мета роботи – обґрунтування умов зменшення температури різання при механічній обробці деталей машин і розробка практичних рекомендацій.

Виклад основного матеріалу. При аналізі температури різання при шліфуванні традиційно розглядається розрахункова схема [5], згідно з якою знімається припуск представлений пакетом елементарних прямолінійних адиабатичних стрижнів, які в процесі шліфування перері-

заються шліфувальним кругом і за якими тепло, що утворюється при різанні, йде в поверхневий шар оброблюваного матеріалу внаслідок його теплопровідності (рис. 1). При цьому тепловий потік переміщується вздовж адіабатичного стрижня з постійною швидкістю, яка дорівнює швидкості перерізання адіабатичного стрижня шліфувальним кругом, який рівномірно зі швидкістю рухається уздовж оброблюваної деталі.

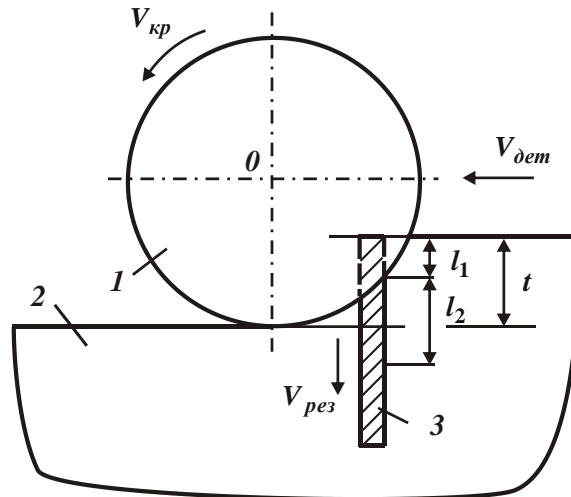


Рис. 1 – Розрахункова схема температури різання при плоскому шліфуванні з урахуванням перерізання кругом адіабатичних стрижнів, набором яких представлений припуск, що знімається: 1 – шліфувальний круг; 2 – опрацьований матеріал; 3 – адіабатичний стрижень; l_1 – довжина зрізаної частини адіабатичного стрижня; l_2 – глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі; $V_{кр}$ – швидкість кола

При точінні адіабатичні стрижні, якими також умовно можна уявити припуск, що знімається, перерізаються в результаті зсувних деформацій оброблюваного матеріалу уздовж умовної площини зсуву, розташованої під кутом β до напрямку руху інструменту (рис. 2). При цьому вони перерізаються не безупинно, а періодично (дискретно), оскільки знімання матеріалу проводиться внаслідок періодичного відділення елементарних обсягів матеріалу, що утворюються. Чим твердіше і міцніше опрацьований матеріал, тим більші за обсягом утворюються елементи зсуву матеріалу. Тому зазначені відмінності в характері перерізання адіабатичних стрижнів при шліфуванні і лезовій обробці необхідно враховувати при розрахунку температури різання.

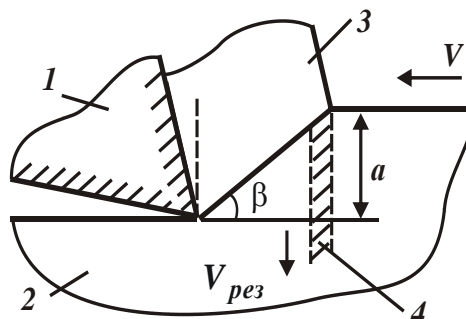


Рис. 2 – Розрахункова схема параметрів теплового процесу при точінні: 1 – різець; 2 – опрацьований матеріал; 3 – утворюється стружка; 4 – адіабатичний стрижень

У роботах [5, 6] приведена аналітична залежність для визначення температури різання з урахуванням безперервного перерізання адіабатичного стрижня зі швидкістю $V_{рез}$ стосовно процесу різання лезовим інструментом (рис. 2):

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

де $\theta_{\max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ – максимальна температура різання, град; σ – умовне напруження різання, Н/м²; c – питома теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/(кг·град); ρ – щільність оброблюваного матеріалу, кг/м³; λ – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/(м·град); a – товщина зрізу, м.

При дискретному перерізання адіабатичного стрижня з урахуванням вищесказаного залежність (1) вимагає уточнення. Для цього слід скористатися наведеним в роботі [7] аналітичним рішенням, отриманим стосовно дискретного характеру перерізання адіабатичного стрижня. Суть цього рішення полягає в тому, що безперервний рівномірний рух теплового джерела зі швидкістю $V_{\text{рез}}$ вздовж адіабатичного стрижня розглядається періодичним з кроком $V_{\text{рез}} \cdot d\tau$, де $d\tau$ – нескінченно малий час, с. Глибина проникнення тепла в адіабатичний стрижень за час $d\tau$ визначається залежністю [7]:

$$l_{2_0} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot d\tau. \quad (2)$$

Тоді в результаті перерізання частини адіабатичного стрижня довжиною $V_{\text{рез}} \cdot d\tau$ параметр l_{2_0} зменшується на величину $V_{\text{рез}} \cdot d\tau$:

$$l_{2_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot d\tau - V_{\text{рез}} \cdot d\tau \quad (3)$$

або з урахуванням часу нагріву τ_1 адіабатичного стрижня при його перерізання на величину $V_{\text{рез}} \cdot d\tau$ параметр l_{2_0} стане рівним:

$$l_{2_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau_1. \quad (4)$$

Час нагріву стрижня τ_1 визначається на основі порівняння залежностей (3) і (4):

$$\tau_1 = \frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda} \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot d\tau - V_{\text{рез}} \cdot d\tau \right)^2 = d\tau \cdot (1 - \alpha)^2, \quad (5)$$

де $\alpha = \frac{V_{\text{рез}} \cdot d\tau}{l_{2_0}} < 1$ – безрозмірний коефіцієнт.

Із залежності (5) випливає умова $\tau_1 < d\tau$, що свідчить про зменшення часу нагріву стрижня τ_1 , оскільки певна частина тепла, що виділяється при різанні, залишається в зрізаній частині адіабатичного стрижня. В результаті відбувається зменшення параметра l_{2_1} :

$$l_{2_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot d\tau \cdot (1 - \alpha)^2 = l_{2_0} \cdot (1 - \alpha). \quad (6)$$

Аналогічно визначаються значення часу нагріву стрижня $\tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n$ при його перерізання, відповідно, на 2, 3, ..., n часток, тобто на величини $2 \cdot V_{\text{рез}} \cdot d\tau, 3 \cdot V_{\text{рез}} \cdot d\tau, \dots, n \cdot V_{\text{рез}} \cdot d\tau$. Так, при n -ому перерізання адіабатичного стрижня час його нагріву визначається з рівняння [7]:

$$\frac{\tau_n}{d\tau} = \left(\sqrt{1 + \frac{\tau_{n-1}}{d\tau}} - \alpha \right), \quad (7)$$

де τ_n, τ_{n-1} – час нагрівання адіабатичного стрижня при його перерізання, відповідно, на величини $n \cdot V_{\text{рез}} \cdot d\tau$ и $(n-1) \cdot V_{\text{рез}} \cdot d\tau$, с.

Як видно, розрахунок часу τ_n з використанням рівняння (7) можливий чисельним методом для конкретних вихідних даних. Для цього спочатку визначається значення часу τ_1 , приймаючи час $\tau_0 = 0$. Потім для відомого значення τ_1 визначається значення τ_2 і т. д.

Як приклад розглянемо процес поздовжнього точіння циліндричної деталі зі Сталі 45 різцем з гексаніта-Р з головним кутом в плані $\varphi = 45^\circ$, глибиною різання $t = 0,2$ мм, подачею $S = 0,07$ мм/об, швидкістю різання $V = 100$ м/хв [8].

Час повного перерізання адіабатичного стрижня визначається залежністю $\tau = l/V$, де $l = a / \operatorname{tg} \beta$ – довжина зони контакту різця з оброблюваним матеріалом за період повного перерізання адіабатичного стрижня, м; $a = S \cdot \sin \varphi$ – товщина зрізу, м; β – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу (рис. 2). Тоді елементарний час $d\tau = \tau/n$, де n – кількість перерізання адіабатичного стрижня, тобто кількість елементарних обсягів оброблюваного матеріалу, що утворюються за час проходження різцем зони різання довжиною $l = a / \operatorname{tg} \beta$.

Експериментально встановлено [8], що для зазначених вище умов обробки умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу $\beta \approx 20^\circ$. Тоді $\tau = 0,824 \cdot 10^{-4}$ с; $V_{\text{рез}} = 0,607$ м/с, а безрозмірний коефіцієнт α в залежності від кількості перерізання адіабатичного стрижня n приймає значення, наведені в табл. і на рис. 3.

Таблиця

Розрахункові значення параметрів теплового процесу при точінні

n	$d\tau \cdot 10^{-4}$, с	α	$\tau_n \cdot 10^{-4}$, с	l_2 , мкм	θ / θ_{\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

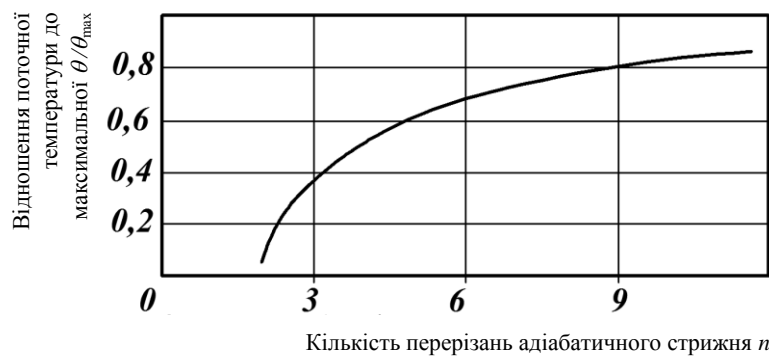


Рис. 3 – Залежність відношення θ / θ_{\max} від кількості перерізів адіабатичного стрижня n

Глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваного матеріалу l_2 визначається залежністю [7]:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_n}, \quad (8)$$

а температура різання – залежністю:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}, \quad (9)$$

де $q = \sigma \cdot V_{рез}$ – щільність теплового потоку, Вт/м²; σ – умовне напруження різання, Н/м².

З урахуванням наведеного вище співвідношення $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ остаточно залежність для визначення температури різання θ набуде вигляду:

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot V_{рез} \cdot l_2. \quad (10)$$

У таблиці наведені розраховані на основі залежностей (7), (8) і (10) значення величин τ_n , l_2 і θ / θ_{max} в залежності від кількості перерізання адіабатичного стрижня n , приймаючи для Сталі 45 коефіцієнт температуропровідності $\lambda / (c \cdot \rho) = 8 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Як видно, зі збільшенням n час τ_n збільшується (починаючи з $n = 2$) в широких межах, приймаючи значення менші часу повного перерізання адіабатичного стрижня $\tau = l / V$. Збільшення часу τ_n , відповідно, призводить до збільшення величин l_2 і θ / θ_{max} . Отже, чим більша кількість перерізання адіабатичного стрижня n , тим більше відношення θ / θ_{max} і температура різання θ . В ідеалі (за умови $n \rightarrow \infty$) приходимо до рішення (1), отриманого при рівномірному перерізання адіабатичного стрижня, що має місце при шліфуванні. В цьому випадку розрахункове значення відношення θ / θ_{max} , яке визначається залежністю (1), приймає найбільше значення, рівне $\theta / \theta_{max} = 0,99$.

Власне цим, почасти, можна пояснити підвищені значення температури різання при шліфуванні в порівнянні з процесом точіння. Хоча при шліфуванні ще має місце і інтенсивне тертя зв'язки шліфувального круга з оброблюваним матеріалом, що є додатковим осередком збільшення силової напруженості процесу різання, умовної напруги різання σ і, відповідно, температури різання θ , яка визначається залежністю (10).

При $n = 1$ все тепло, що виділилося при різанні, залишається в зрізаній частині адіабатичного стрижня (рис. 2), а потім йде в стружку, що утворюється.

Отже, при різанні лезовим інструментом необхідно прагнути до зменшення кількості перерізання адіабатичного стрижня n (кількості зрушень елементарних обсягів оброблюваного матеріалу в межах зони різання). У цьому випадку більше тепла, яке виділяється в процесі різання, буде йти в стружку, що утворюється, знижуючи тим самим температуру різання і підвищуючи якість і продуктивність обробки. Тому на операціях фінішної обробки матеріалів необхідно по можливості використовувати процеси різання лезовими інструментами замість процесів шліфування з метою забезпечення високих показників якості та продуктивності обробки.

Таким чином, встановлено, що в реальних умовах лезової обробки розрахунок температури різання слід проводити з урахуванням дискретного характеру перерізання адіабатичного стрижня в процесі різання, оскільки при безперервному характері перерізання адіабатичного стрижня температура різання θ приймає підвищені значення, що справедливо стосовно процесу шліфування.

Основною умовою зменшення кількості перерізання адіабатичного стрижня n (кількості зрушень елементарних обсягів оброблюваного матеріалу в межах зони різання) слід розглядати збільшення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β за рахунок застосування більш досконалих ріжучих лезових інструментів, які характеризуються високою продуктивністю різання та забезпечують зниження інтенсивності тертя в зоні різання. Очевидно, чим більша товщина елементарного обсягу елемента оброблюваного матеріалу, що відділяється внаслідок його зсуву по умовній площині зсуву, тим менша ступінь його деформації і, відповідно, менша умовна напруга різання σ , яка пов'язана з умовним кутом зсуву оброблюваного матеріалу β залежністю [9]:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\text{tg } \beta}, \quad (11)$$

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

Як випливає з наведеної залежності (11), зі зменшенням умовної напруги різання σ збільшується умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β , що призводить до збільшення товщини елементарного обсягу елемента оброблюваного матеріалу, який відділяється, і зменшен-

ня кількості перерізання адіабатичного стрижня n . У свою чергу, зменшення умовної напруги різання σ сприяє зменшенню максимальної температури різання $\theta_{\max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ і, відповідно, поточного значення температури різання θ для заданих умов обробки.

Цим показаний більш складний зв'язок параметрів теплового процесу при різанні матеріалів в закономірності формування температури різання, ніж це прийнято в відомих розрахункових схемах температури різання.

Облік кількості перерізання адіабатичного стрижня n дозволяє уточнити відомі аналітичні рішення щодо визначення температури різання. Наприклад, експериментально встановлено, що при точінні Сталі 45 і Сталі Р6М5 різцями з гексаніта-Р температура різання відрізняється незначно, хоча Сталь Р6М5 міцніша за Сталь 45 в кілька разів [8]. Отже, теоретично з цих позицій температура різання при точінні Сталі Р6М5 повинна також в кілька разів перевищувати температуру різання при точінні Сталі 45. Однак цього не відбувається внаслідок того, що, як встановлено експериментально, умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу при обробці Сталі Р6М5 наближається до 45° , тоді як при точінні Сталі 45 він складає всього 20° . Тому кількість перерізання адіабатичного стрижня при точінні Сталі Р6М5 менша, ніж при точінні Сталі 45, що призводить до зниження температури різання Сталі Р6М5 до рівня температури різання Сталі 45.

Як видно, в даному випадку внаслідок більш високої міцності Сталі Р6М5 «поліпшуються» умови її обробки: зменшується ступінь деформації і, відповідно, умовне напруження різання σ , збільшується умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β . У сукупності зі зменшенням кількості перерізання адіабатичного стрижня n це і призводить до зниження температури різання Сталі Р6М5 фактично до рівня температури різання Сталі 45.

Таким чином, облік величини n є важливим фактором у формуванні температури різання при лезовій обробці, що дозволяє науково-обґрунтовано підійти до встановлення умов її зменшення і оцінці можливостей ефективного переходу на фінішних операціях від процесу шліфування до сучасних методів лезової обробки з метою зниження температури різання і підвищення якості оброблюваних поверхонь.

Висновки

У роботі запропоновано новий теоретичний підхід до визначення температури різання при лезовій обробці. Його суть полягає в тому, що в розрахунковій схемі процесу різання, заснованої на представленні припуску, що знімається, у вигляді пакету елементарних прямолінійних адіабатичних стрижнів, які перерізаються ріжучим інструментом, необхідно враховувати кількість зсувних елементарних обсягів оброблюваного матеріалу, які виникають, що впливають на температуру різання. По суті, необхідно перейти від обліку безперервного характеру перерізання адіабатичного стрижня до дискретного характеру його перерізання. Розрахунками встановлено, що зі збільшенням кількості зсувних елементарних обсягів оброблюваного матеріалу, що утворюються, температура різання збільшується. Тому в реальних умовах різання необхідно прагнути до їх зменшення з метою зменшення температури різання і підвищення якості та продуктивності обробки. Це досягається при лезовій обробці, так як при шліфуванні має місце фактично безперервний характер перерізання елементарних адіабатичних стрижнів, і температура різання приймає найбільші значення.

Так, показано, що при точінні Сталі Р6М5 температура різання незначно перевищує температуру різання, що виникає при точінні Сталі 45, хоча Сталь Р6М5 в кілька разів міцніша за Сталь 45. Виходячи із запропонованої в роботі розрахункової схеми температури різання, це пов'язано зі зменшенням кількості зсувних елементарних обсягів оброблюваного матеріалу, що утворюються при точінні Сталі Р6М5, і, відповідно, зі збільшенням їх товщини, що сприяє збільшенню умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу і зменшення умовної напруги різання, тобто сприяє зниженню силової і теплової напруженостей процесу різання. 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 і підвищення якості оброблюваних поверхонь. На цій основі розроблено практичні рекомендації щодо подальшого вдосконалення методів лезової обробки.

Перелік використаних джерел:

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М. : Машиностроение, 1978. – 166 с.
3. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
4. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. – М. : Машиностроение, 1979. – 152 с.
5. Современные технологии и техническое перевооружение предприятий : монография / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх, А.А. Андилахай, Д.Ф. Новиков, В.И. Полянский. – Днепр : Лира, 2018. – 400 с.
6. Полянский В.И. Теоретический анализ параметров теплового процесса при шлифовании / В. И. Полянский // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : Зб. наук. пр. / ДДМА. – Краматорськ, 2018. – № 1 (43). – С. 170-175.
7. Новиков Ф.В. Оптимальные решения в технологии машиностроения : монография / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх, В.Г. Шкурупий. – Днепр : Лира, 2018. – 424 с.
8. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения : в 10 т. Т. 3. Резание материалов лезвийными инструментами / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – Одесса : ОНПУ, 2003. – 546 с.
9. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения : в 10 т. Т. 1. Механика резания материалов / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 580 с.

References:

1. Iakimov A.V. *Optimizatsiia protsessa shlifovaniia* [Grinding process optimization]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 175 p. (Rus.)
2. Sipailov V.A. *Teplovyie protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti* [Grinding thermal processes and surface quality control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 166 p. (Rus.)
3. Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoi obrabotki materialov* [Thermophysics of the processes of mechanical processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 279 p. (Rus.)
4. Silin S.S. *Metod podobiia pri rezanii materialov* [Similarity method when cutting materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 152 p. (Rus.)
5. Novikov F.V., Zhovtobriukh V.A., Andilakhai A.A., Novikov D.F., Polianskii V.I. *Sovremennye tekhnologii i tekhnicheskoe perevooruzhenie predpriatii : monografiia* [Modern technologies and technical re-equipment of enterprises: monograph]. Dnipro, Lira Publ., 2018. 400 p. (Rus.)
6. Polianskii V.I. Teoreticheskii analiz parametrov teplovogo protsessu pri shlifovanii [Theoretical analysis of the parameters of the thermal process during grinding]. *Visnik Donbas'koï derzhavnoi mashinobudivnoiï akademii – Herald of the Donbass State Engineering Academy*, 2018, no. 1 (43), pp. 170-175. (Rus.)
7. Novikov F.V., Zhovtobriukh V.A., Shkurupii V.G. *Optimal'nye resheniia v tekhnologii mashinostroeniia: monografiia* [Optimal solutions in engineering technology: a monograph]. Dnipro, Lira Publ., 2018. 424 p. (Rus.)
8. After ed. Novikov F.V., Iakimov A.V. *Fiziko-matematicheskaia teoriia protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniia. Tom 3: Rezanie materialov lezviinymi instrumentami* [Physicomathematical theory of materials processing processes and engineering technology. Vol. 3: Cutting materials with blade tools]. Odessa, 2003. 546 p. (Rus.)
9. After ed. Novikov F.V., Iakimov A.V. *Fiziko-matematicheskaia teoriia protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniia. Tom 1: Mekhanika rezaniia materialov* [Physicomathematical theory of materials processing processes and engineering technology. Vol. 1 : Material cutting mechanics]. Odessa, 2002. 580 p. (Rus.)

Рецензент: В.В. Суглобов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 26.10.2019