

видалення одиниці об'єму оброблюваного матеріалу порівняно з процесами механічної обробки матеріалів різанням [3].

На основі отриманого теоретичного рішення розроблено та впроваджено у виробництво ефективні процеси електроерозійного правлення алмазних кругів на металевих зв'язках під час шліфування виробів, виготовлених із матеріалів підвищеної твердості (твердих сплавів, високоміцних наплавлень, кераміки, скла, кришталю, природних алмазів тощо).

### **Список використаної літератури**

1. Гасанов М. І. Підвищення ефективності алмазно-іскрового шліфування шляхом забезпечення гостроти ріжучого рельєфу круга в режимі збільшених глибин : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.03.01. Харків, 1999. 17 с.

2. Новіков Ф. В. Теплові та механічні процеси металообробних технологій : монографія. Дніпро : ЛПА, 2022. 412 с.  
<http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/28244>

3. Новіков Ф. В., Новіков Г. В. Теоретико-імовірнісний підхід у теорії шліфування : монографія. Дніпро : ЛПА, 2023. 484 с.  
<http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/30087>

УДК 621.923

**Новіков Ф. В.**

д.т.н., професор, кафедра здорового способу життя, технологій і безпеки життєдіяльності  
ХНЕУ ім. С. Кузнеця

### **ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ РІЗАННЯМ**

Сучасне машинобудування вимагає застосування ефективних технологій виробництва. Особливо це пов'язано із застосуванням високообертових металорізальних верстатів із числовим програмним управлінням (ЧПУ) типу «обробний центр», які забезпечують високоточну обробку деталей машин та значне підвищення продуктивності праці. Традиційно вибір оптимальних режимів різання здійснюють за умови забезпечення заданих параметрів якості і точності обробки [1]. Методики вибору оптимальних режимів різання наведено у роботі [2]. Однак, при цьому не завжди забезпечується повне використання технологічних можливостей металорізального верстата (його потужності), особливо на фінішних операціях обробки деталей машин. Тому важливо провести теоретичний аналіз умов обробки, за яких можна досягнути заданої потужності верстата за максимально можливою продуктивністю та заданих параметрів якості і точності механічної обробки.

Для цього проведемо теоретичний аналіз шляхів підвищення ефективності механічної обробки (наприклад, під час точіння) за критерієм потужності металорізального верстата:

$$N = P_z \cdot V, \quad (1)$$

де  $P_z = \sigma \cdot S_{зріз}$  – тангенціальна складова сили різання, Н;  $\sigma$  – умовне напруження різання, Н/м<sup>2</sup>;  $S_{зріз} = a \cdot b$  – площа поперечного перетину зрізу, м<sup>2</sup>;  $a$ ,  $b$  – товщина і ширина зрізу, м;  $V$  – швидкість різання, м/с.

Як видно, досягнути значення потужності верстата  $N$  можна шляхом збільшення параметрів  $P_z$  і  $V$ . При цьому виникає питання: який із параметрів  $P_z$  або  $V$  слід збільшувати, а який зменшувати для досягнення найбільшого ефекту обробки (для заданого значення  $N$ ) за умови досягнення максимальної продуктивності обробки  $Q = S_{зріз} \cdot V$ .

Для цього залежність (1) із урахуванням залежності  $Q = S_{зріз} \cdot V$  представимо у вигляді:

$$N = \sigma \cdot S_{зріз} \cdot V = \sigma \cdot Q. \quad (2)$$

Таким чином, основним шляхом підвищення продуктивності обробки  $Q$  для заданого значення потужності верстата  $N$  є зменшення умовного напруження різання  $\sigma$ . Це досягається, перш за все, зменшенням інтенсивності тертя ріжучого інструмента із оброблюваним матеріалом (застосуванням ефективних технологічних середовищ та оптимальної геометрії ріжучої частини інструмента). Однак, при цьому виникає питання: завдяки збільшенню яких параметрів ( $S_{зріз}$  або  $V$ ) ефективно збільшувати продуктивність обробки  $Q$ , наприклад, із точки зору досягнення заданої точності обробки, що визначається величиною пружного переміщення в технологічній системі  $y$ . Для вирішення цього питання тангенціальну складову сили різання  $P_z$  під час точіння різцем із нульовим переднім кутом подамо у вигляді [3]:

$$P_z = \frac{P_y}{f} = \frac{c \cdot y}{f}, \quad (3)$$

де  $P_y = c \cdot y$  – радіальна складова сили різання, Н;  $f$  – коефіцієнт тертя ріжучого інструмента із оброблюваним матеріалом;  $c$  – наведена жорсткість технологічної системи, Н/м.

Після підстановки залежності (3) у залежність (1), отримано:

$$N = \frac{c \cdot y}{f} \cdot V. \quad (4)$$

Як видно, досягнути заданих значень параметрів  $N$  і  $y$  можна зміною швидкості різання  $V$ . Так, якщо величина  $y$  є незначною, то швидкість різання  $V$  слід збільшувати. Це може мати місце на фінішних операціях обробки.

Відповідно, тангенціальна складова сили різання  $P_z$ , виходячи із залежності (1), повинна зменшуватися. А це приводить до зменшення величини  $S_{зріз} = a \cdot v$  і, відповідно, товщини зрізу  $a$ . Тобто, в умовах фінішної обробки швидкість різання  $V$  ефективно збільшувати, а товщину зрізу  $a$ , навпаки, зменшувати, що підтверджується практичними даними.

На попередніх операціях механічної обробки, коли величина  $y$  може приймати достатньо великі значення, навпаки, швидкість різання  $V$  необхідно зменшувати, а товщину зрізу  $a$  збільшувати, оскільки тангенціальна складова сили різання  $P_z$ , яка визначається залежністю (3), буде збільшуватися.

Таким чином, аналітично на основі фізичної залежності (1) для визначення потужності процесу різання  $N$  встановлено шляхи зміни параметрів режиму різання за умови забезпечення заданої точності обробки, що визначається величиною  $y$ .

Виконаємо аналогічний теоретичний аналіз оптимальних умов обробки під час шліфування. У цьому випадку

$$N = P_z \cdot V_{кр}, \quad (5)$$

де  $P_z = \sigma \cdot S_{мит}$ ;  $S_{мит} = Q / V_{кр}$  – миттєва сумарна площа поперечного перетину зрізу всіма одночасно працюючими абразивними зернами шліфувального круга, м<sup>2</sup>;  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$  – продуктивність обробки, м<sup>3</sup>/с;  $B$  – ширина шліфування, м;  $V_{дет}$  – швидкість деталі, м/с;  $t$  – глибина шліфування, м;  $V_{кр}$  – швидкість круга, м/с.

Після перетворень залежності (5) отримано:  $N = \sigma \cdot Q$ . Таким чином встановлено, що під час шліфування, як і під час лезової обробки, потужність різання  $N$  залежить лише від параметрів  $\sigma$  і  $Q$ . Досягнути заданого значення продуктивності обробки  $Q$  можна шляхом зміни параметрів режиму шліфування  $B$ ,  $V_{дет}$  і  $t$ .

Із урахуванням залежності  $K_{ш} = P_z / P_y$  маємо:

$$N = P_y \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} = c \cdot y \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}, \quad (6)$$

де  $K_{ш}$  – коефіцієнт шліфування.

Для заданого значення  $N$  забезпечити задане значення величини пружного переміщення  $y$ , що виникає в технологічній системі, можна, головним чином, завдяки зміні швидкості круга  $V_{кр}$ . Чим менше величина  $y$ , тобто чим вище точність обробки, тим більшою повинна бути швидкість круга  $V_{кр}$  і навпаки. Отже, досягнути заданого значення величини  $y$  за заданим значенням  $N$  і, відповідно, продуктивності обробки  $Q$  можна зміною швидкості круга  $V_{кр}$ . При цьому також можна в широких межах змінювати параметри  $B$ ,  $V_{дет}$  і  $t$  за умови  $Q = const$  (як і під час точіння).

Виходячи із залежності (2), досягнути зменшення величини пружного переміщення у можна також завдяки збільшенню коефіцієнта різання  $K_{ш}$  шляхом підвищення ріжучої здатності шліфувального круга і зменшення інтенсивності терті у зоні шліфування.

Таким чином показано, що процес шліфування характеризується більш значними технологічними можливостями забезпечення заданої точності обробки порівняно із лезовою обробкою. Це пов'язано, перш за все, із можливістю значно змінювати величину пружного переміщення у шляхом зміни швидкості круга  $V_{кр}$  за заданих значень  $N$  і  $Q$ , тоді як під час лезової обробки можна лише змінювати параметри  $S_{зріз}$  або  $V$  за умови  $Q = const$ . Цим і пояснюється ефективність практичного застосування процесу шліфування на фінішних операціях обробки деталей машин, особливо, за умов застосування сучасних шліфувальних верстатів із ЧПУ та шліфувальних кругів, що характеризуються високою ріжучою здатністю [4].

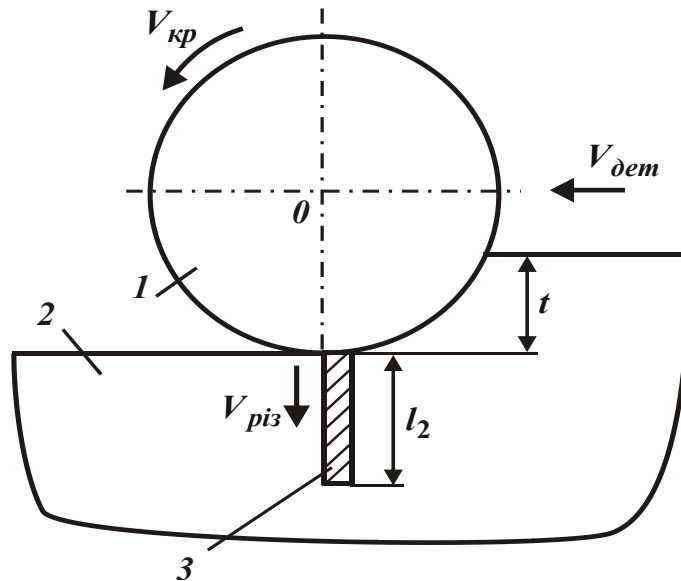
Якість обробки під час шліфування залежить, головним чином, від температури різання. За умови перевищення критичного значення температури різання на оброблюваній поверхні деталі можуть виникати температурні дефекти (припикання, мікротріщини тощо). Тому для забезпечення високої якості обробки необхідно не допускати перевищення критичного значення температури різання [5].

Для цього розглянемо можливі варіанти досягнення заданої температури різання  $\theta$  за умови заданої потужності обробки  $N$ . Температуру різання під час шліфування визначимо із застосування розрахункової схеми, згідно якої припуск, що знімається, представлено у вигляді безлічі прямолінійних адіабатичних стержнів, які перерізаються шліфувальним кругом (рис. 1). Тепло, яке виділяється під час шліфування, поширюється вздовж адіабатичних стержнів у поверхневий шар оброблюваної деталі. У результаті аналітична залежність для визначення температури різання під час шліфування  $\theta$  приймає вигляд:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda} = \frac{\sigma}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2\lambda}{c_m \cdot \rho} \cdot V_{дет} \cdot t} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}} = \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\sigma \cdot N}{B}} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}, \quad (7)$$

де  $q = \sigma \cdot V_{різ}$  – щільність теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  $V_{різ} = V_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}$  – швидкість перерізання шліфувальним кругом адіабатичного стержня, м/с;  $V_{дет}$  – швидкість деталі, м/с;  $t$  – глибина шліфування, м;  $D_{кр}$  – діаметр шліфувального круга, м;  $l_2 = \sqrt{\frac{2\lambda}{c_m \cdot \rho} \cdot \tau}$  – глибина проникнення тепла у

поверхневий шар оброблюваної деталі (в адіабатичний стержень), м;  
 $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/(м·град);  
 $c_m$  – питома теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/(кг·град);  
 $\rho$  – щільність оброблюваного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau = \frac{t}{V_{\text{різ}}}$  – час перерізання шліфувальним кругом адіабатичного стержня, с.



**Рис. 1 Розрахункова схема температури різання під час плоского шліфуванні: 1 – круг; 2 – деталь; 3 – адіабатичний стержень**

Як витікає із залежності (7), зменшити температуру різання  $\theta$  за заданого значення потужності шліфування  $N$  можна зменшенням глибини шліфування  $t$ . При цьому швидкість деталі  $V_{\text{дет}}$  необхідно пропорційно збільшувати за залежністю  $V_{\text{дет}} = Q/(B \cdot t)$ , оскільки потужність шліфування  $N$  визначається залежністю  $N = \sigma \cdot Q$ .

Таким чином, досягнути одночасно заданих значень потужності шліфування  $N$ , продуктивності обробки  $Q$ , температури різання  $\theta$  і величини пружного переміщення  $y$  можна зменшенням глибини шліфування  $t$  та, відповідно, підвищенням швидкості деталі  $V_{\text{дет}}$ , тобто застосуванням багатопрхідного шліфування. При цьому ефективно збільшувати ширину шліфування  $B$  до значення висоти круга. Це узгоджується із практикою застосування процесу шліфування.

Температура різання  $\theta$  під час точіння за заданих значень  $N$  і  $Q$  визначається залежністю:

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{q \cdot l_2}{\lambda} = \frac{\sigma \cdot V \cdot \operatorname{tg}\beta}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2\lambda}{c_m \cdot \rho} \cdot \frac{a}{V \cdot \operatorname{tg}\beta}} = \frac{\sigma}{c_m \cdot \rho} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot c_m \cdot \rho}{\lambda} \cdot a \cdot V \cdot \operatorname{tg}\beta} = \\ &= \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\sigma \cdot N}{v} \cdot \operatorname{tg}\beta}.\end{aligned}\quad (8)$$

У цьому випадку заданих значень температури різання  $\theta$  і потужності шліфування  $N$  можна досягнути збільшенням ширини зрізу  $v$  та, відповідно, зменшенням товщини зрізу  $a$  за умови  $Q = \text{const}$ . Порівнюючи залежності (7) і (8), видно, що процес шліфування характеризується більш значними технологічними можливостями забезпечення заданих значень параметрів  $N, Q, \theta$  і величини пружного переміщення  $y$  (що визначає точність обробки) порівняно із процесом точіння.

Таким чином, визначено та обґрунтовано найбільш ефективні шляхи досягнення значень потужності металорізального верстата під час лезової обробки та шліфування за умов забезпечення заданих параметрів якості і точності обробки та максимально можливої продуктивності. Це дозволило науково обґрунтовано підійти до визначення оптимальних параметрів режимів різання під час лезової обробки і шліфування та розроблення ефективних технологій механічної обробки, в особливості стосовно обробки на фінішних операціях.

### **Список використаної літератури**

1. Лавріненко В. І. Надтверді матеріали в механообробці / В. І. Лавріненко, М. В. Новіков; за ред. М. В. Новікова. Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. 456 с.
2. Теплофізика механічної обробки : підручник / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник, Д. В. Іоргачов. Одеса: Астропринт, 2000. 256 с.
3. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування : монографія. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2014. 412 с. URL: <http://www.repository.hneu.edu.ua/jspui/handle/123456789/10068>
4. Новіков Ф. В., Полянський В. І. Технологічні закономірності підвищення точності та продуктивності механічної обробки. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні*: зб. наук. праць: Нац. техн. ун-т "ХПІ". Харків : НТУ "ХПІ", 2022. № 2 (6) 2022. С. 64–71.
5. Новіков Ф. В. Теплові та механічні процеси металообробних технологій [Електронний ресурс] : монографія / Ф. В. Новіков. – Дніпро : ЛПРА, 2022. – 412 с.