

DOI 10.32820/2079-1747-2020-25-89-98

УДК 621.923

## **ВИЯВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ НА ОСНОВІ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРУ**

**©Стрельчук Р. М.<sup>1</sup>, Шелковий О.М.<sup>2</sup>**

*Українська інженерно-педагогічна академія<sup>1</sup>*

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»<sup>2</sup>*

### **Інформація про авторів:**

**Стрельчук Роман Михайлович:** ORCID: 0000-0002-7221-031X; [r.m.strelchuk@gmail.com](mailto:r.m.strelchuk@gmail.com); кандидат технічних наук; доцент кафедри інформаційних комп'ютерних технологій і математики; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна

**Шелковий Олександр Миколайович:** ORCID: 0000-0002-7414-4854; [alnikshelk@gmail.com](mailto:alnikshelk@gmail.com); доктор технічних наук; завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М. Ф. Семка; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна

В роботі одержала подальший розвиток математична модель визначення температури при шліфуванні прямолінійного зразка, що рухається по нормалі до робочої поверхні круга з постійною швидкістю. Доведено, що при шліфуванні частка тепла, що йде в оброблюваний зразок, значно більше частки тепла, що йде в стружки, що утворюються. Тому з достатньої для практики точністю при розрахунках температури шліфування рух теплового джерела уздовж оброблюваного зразка можна не враховувати. Це значно спрощує аналітичні залежності для визначення температури та відкриває нові можливості в плані аналізу та оптимізації структури і параметрів операцій шліфування на основі температурного критерію.

Теоретично визначені основні умови зменшення температури шліфування. Вони полягають, головним чином, у зменшенні умовної напруги різання (енергоємності обробки) і в зніманні припуску невеликими частинами в процесі шліфування з метою охолодження нагрітих поверхонь оброблюваного зразка.

Температурний фактор при електроерозійному алмазному шліфуванні в багатьох випадках є основним обмеженням застосування на практиці цього ефективного методу фінішної обробки. Тому визначення шляхів зменшення теплової напруженості процесу електроерозійного алмазного шліфування має велике теоретичне і практичне значення, відкриває нові технологічні можливості високоякісної обробки деталей із загартованих сталей і інших важкооброблюваних матеріалів. Дослідження теплових процесів при електроерозійному алмазному шліфуванні вимагає розробки математичних моделей, що дозволяють робити оптимізаційні розрахунки по визначенню найбільш ефективних варіантів обробки за температурним фактором. У зв'язку із цим, метою роботи є теоретичне обґрунтування умов зменшення температури шліфування і підвищення продуктивності обробки.

**Ключові слова:** електроерозійне алмазне шліфування, температурний фактор, математична модель.

**Стрельчук Р.М., Шелковий О.М.** «Выявление закономерностей электроэрозионного алмазного шлифования на основе температурного фактора».

В работе получила дальнейшее развитие математическая модель определения температуры при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью. Доказано, что при шлифовании доля тепла, идущего в обрабатываемый образец, значительно больше доли тепла, идущего в образующуюся стружку. Поэтому с достаточной для практики точностью при расчетах температуры шлифо-

вания движение теплового источника вдоль обрабатываемого образца можно не учитывать. Это значительно упрощает аналитические зависимости для определения температуры и открывает новые возможности в плане анализа и оптимизации структуры и параметров операций шлифования на основе температурного критерия.

Теоретически определены основные условия уменьшения температуры шлифования. Они заключаются, главным образом, в уменьшении условных напряжений резания (энергоемкости обработки) и в снятии припуска небольшими частями в процессе шлифования с целью охлаждения нагретых поверхностей обрабатываемого образца.

Температурный фактор при электроэрозионном алмазном шлифовании во многих случаях является основным ограничением применения на практике этого эффективного метода финишной обработки. Поэтому определение путей уменьшения тепловой напряженности процесса электроэрозионного алмазного шлифования имеет большое теоретическое и практическое значение, открывает новые технологические возможности высококачественной обработки деталей из закаленных сталей и других труднообрабатываемых материалов. Исследования тепловых процессов при электроэрозионной алмазном шлифовании требует разработки математических моделей, позволяющих делать оптимизационные расчеты по определению наиболее эффективных вариантов обработки с температурным фактором. в связи с этим, целью работы является теоретическое обоснование условий уменьшения температуры шлифования и повышение производительности обработки.

**Ключевые слова:** электроэрозионное алмазное шлифование, температурный фактор, математическая модель.

*Strelchuk R., Shelkovoy A.* «Identification of patterns of electroerosive diamond grinding based on the temperature factor»

The mathematical model for determining the temperature during grinding of a straight-line sample moving along the normal to the working surface of the circle at a constant speed was further developed. It is proved that during grinding, the fraction of heat going to the processed sample is much larger than the fraction of heat going to the generated chips. Therefore, with practical accuracy in calculating the grinding temperature, the movement of the heat source along the processed sample can be ignored. This greatly simplifies the analytical dependencies for determining the temperature and opens up new possibilities in terms of analysis and optimization of the structure and parameters of grinding operations based on the temperature criterion.

The basic conditions for reducing the grinding temperature are theoretically determined. They consist mainly in reducing the conditional stresses of cutting (processing energy intensity) and in removing the allowance in small parts during grinding to cool the heated surfaces of the processed sample.

The temperature factor during edm diamond grinding is in many cases the main limitation of the practical application of this effective finishing method. Therefore, the determination of ways to reduce the thermal tension of the edm diamond grinding process is of great theoretical and practical importance, it opens up new technological possibilities for the high-quality processing of parts from hardened steels and other difficult to process materials. The study of thermal processes during edm diamond grinding requires the development of mathematical models that allow optimizing calculations to determine the most effective processing options with a temperature factor. In this regard, the aim of the work is a theoretical justification of the conditions for reducing the grinding temperature and increasing the processing productivity.

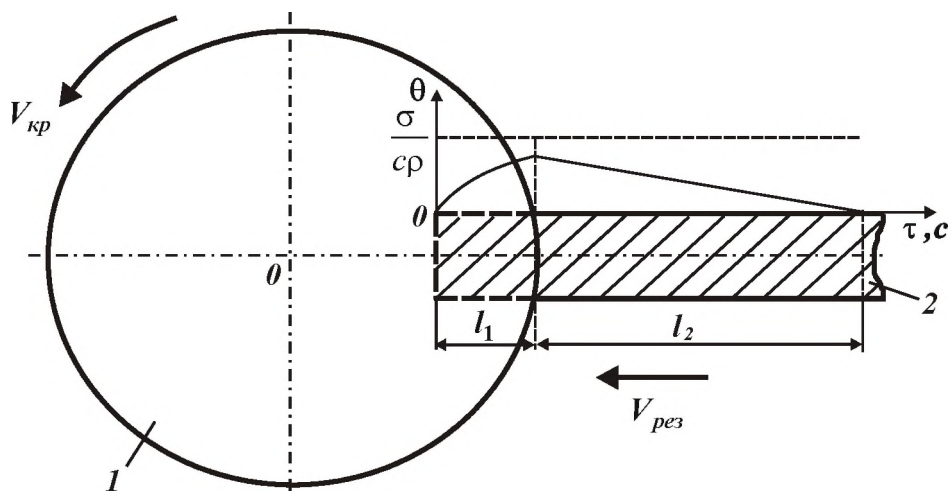
**Keywords:** electroerosive diamond grinding, temperature factor, mathematical model.

## ВСТУП

Температурний фактор при електроерозійному алмазному шліфуванні в багатьох випадках є основним обмеженням застосування на практиці цього ефективного методу фінішної обробки [1, 2]. тому визначення шляхів зменшення теплової напруженості процесу електроерозійного алмазного шліфування має велике теоретичне і практичне значення, відкриває нові технологічні можливості високоякісної обробки деталей із загартованих сталей і інших важкооброблюваних матеріалів. дослідження теплових процесів при електроерозійному алмазному шліфуванні вимагає розробки математичних моделей, що дозволяють робити оптимізаційні розрахунки по визначенню найбільш ефективних варіантів обробки за температурним фактором. у зв'язку із цим, метою роботи є теоретичне обґрунтування умов зменшення температури шліфування і підвищення продуктивності обробки.

## Матеріали і результати досліджень

Для визначення температури шліфування скористаємося теоретичним підходом, запропонованим у роботі [3], стосовно до шліфування прямолінійного зразка, що рухається по нормалі до робочій поверхні круга з постійною швидкістю (рис. 1):



**Рис. 1** Розрахункова схема процесу шліфування прямолінійного зразка, що рухається по нормалі до робочій поверхні круга: 1 - круг; 2 - зразок.

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot z, \quad (1)$$

де  $\sigma$  – умовна напруга різання, Н/м<sup>2</sup>;  $z$  – відносна величина температури (0...1), визначається з рівняння:  $\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot l_1 \cdot V_{pes} = -\ln(1-z) - z$ ;  $\bar{l}_1$  – безрозмірна величина;  $l_1$  – товщина шару сошлифованного матеріалу, м;  $c$  – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К);  $\rho$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/м·К.

Необхідно відзначити, що відносна величина температури  $z$  по фізичній суті визначає частку тепла, що йде в стружки при шліфуванні. Очевидно, при  $z \rightarrow 0$  фактично все тепло, що

утворюється при різанні, іде в оброблювану деталь  $z \rightarrow$ , а при 1, навпаки, усі тепло йде в стружки.

Згідно з наведеною залежністю, температура шліфування  $\theta$  визначається відносною величиною температури  $z$ , яка є функцією параметрів шліфування. Таким чином, температура шліфування  $\theta$  неявно виражена через параметри шліфування, що утрудняє проведення аналізу й оптимізації процесу шліфування за температурним критерієм. У зв'язку із цим важливо одержати аналітичний розв'язок, що дозволяє в явному виді виразити  $\theta$  щодо параметрів шліфування. Для цього звернемося до вихідного інтегрального рівняння [3] для визначення температури шліфування  $\theta(\tau)$ , складеному на основі балансу тепла, що йде в, що утворюються стружки й оброблюваний зразок із площею поперечного переріза стрижня  $S$ :

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{рез} \cdot \int_0^{\tau} \theta(\tau) \cdot d\tau + \frac{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2}{N} \cdot [\theta(\tau)]^2 = N \cdot \tau, \quad (2)$$

де  $\tau$  – час обробки, з;  $N$  – потужність теплового джерела, Вт.

Спростимо рівняння (2), прийнявши перший доданок у лівій частині рівним нулю. З фізичної точки зору це означає, що теплове джерело не переміщається вглиб поверхневого шару оброблюваної деталі зі швидкістю  $V_{рез}$  (рис. 1), а залишається нерухливим у початковій крапці протягом часу  $\tau_1$ . Тоді з урахуванням співвідношень [3]:  $q = N / S = \sigma \cdot V_{рез}$  температура шліфування  $\theta$  визначиться

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \tau_1} = \sigma \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_1}, \quad (3)$$

де  $q$  – щільність теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>.

Ухвалюючи  $z = \frac{\theta}{\left(\frac{\sigma}{c \cdot \rho}\right)}$ , одержимо  $z = V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \tau_1}$ . Звідки

$$\tau_1 = \frac{\lambda \cdot z^2}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2}. \quad (4)$$

Залежність (4) відрізняється від аналогічної залежності  $\tau = \frac{\lambda \cdot \bar{l}_1}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2}$  [3], що враховує

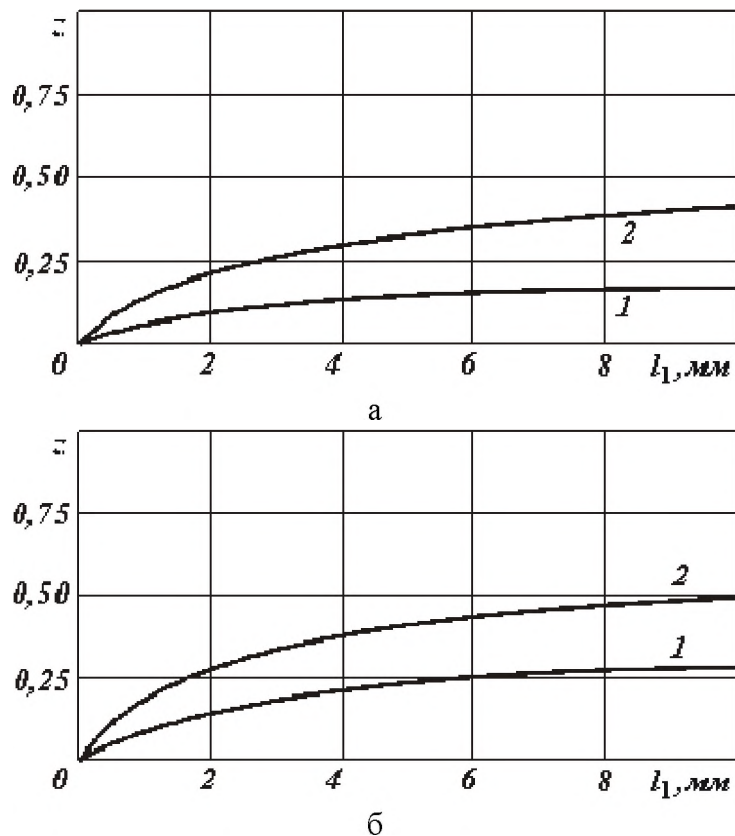
рух теплового джерела уздовж оброблюваного зразка зі швидкістю  $V_{рез}$ . Для оцінки ступеня їх відмінності розглянемо відношення  $\tau_1 / \tau$ :

$$\frac{\tau_1}{\tau} = \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}. \quad (5)$$

Розрахунками встановлено, що при  $z < 0,1$  розбіжність значень  $\tau_1$  і  $\tau$  становить до 6%, при  $0,1 < z < 0,2$  – до 14%, при  $0,2 < z < 0,3$  – до 20%, при  $0,3 < z < 0,4$  – до 27%, а при

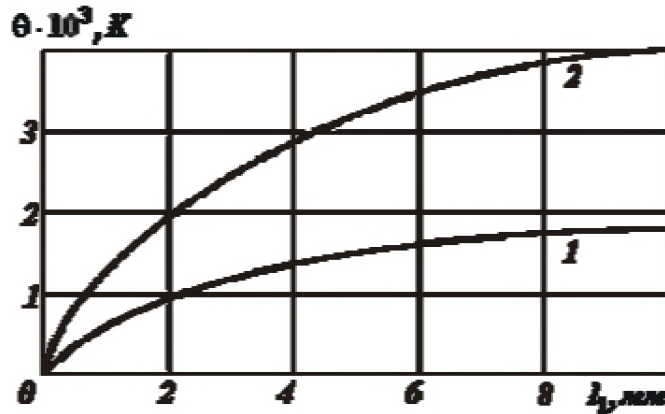
$0,4 < z < 0,5$  – до 35%. На рис. 2,а наведені розрахункові значення відносної величини температури  $z$  залежно від величини  $l_1$  для різних значень  $V_{рез}$  при шліфуванні твердого сплаву ВК8 ( $c = 175,9$  Дж/кг·К;  $\rho = 15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 50$  Вт/м·К; коефіцієнт температуропровідності  $a = \lambda / c \cdot \rho = 18,9 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с). Як видно, величина  $z$  ухвалює відносно невеликі значення, які менше одиниці. Це свідчить про те, що основна частина тепла, що виділяється, іде в оброблювану деталь, у стружки, що утворюються, іде значно менше тепла. Чим більше параметри  $l_1$  та  $V_{рез}$ , тим більше  $z$  і відповідно більше частка тепла, що йде в стружки, що утворюються.

Для порівняння на рис. 2,б наведені розрахункові значення  $z$  при шліфуванні сталі ШХ15 ( $a = \lambda / c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с). Як бачимо, при шліфуванні сталі значення  $z$  більше, чим при шліфуванні твердого сплаву. Це пов'язане з меншим коефіцієнтом температуропровідності  $a$  в сталі ШХ15. Таким чином, розрахунками встановлено, що при шліфуванні величина  $z$  змінюється в невеликих межах – 0,1...0,2 і лише при електроерозійному алмазному шліфуванні досягає значення 0,5. Цим показано, що у зв'язку з невеликими значеннями швидкості  $V_{рез}$  і величини  $z$  в першому наближенні рух теплового джерела уздовж оброблюваного зразка (рис. 1) можна не розглядати і розрахунки температури шліфування  $\theta$  вести по залежності (3). Це спрощує розрахунки, не порушуючи фізичні закономірності поширення тепла і формування температури при шліфуванні. Однак при цьому в кожному конкретному випадку необхідно оцінювати  $z$  і відповідно точність розрахунків температури шліфування.



**Рис. 2** Залежність від величини припуску, що знімається при шліфуванні твердого сплаву ВК8 (а) і сталі ШХ15 (б): 1 –  $V_{рез} = 2$  мм/хв; 2 –  $V_{рез} = 10$  мм/хв.

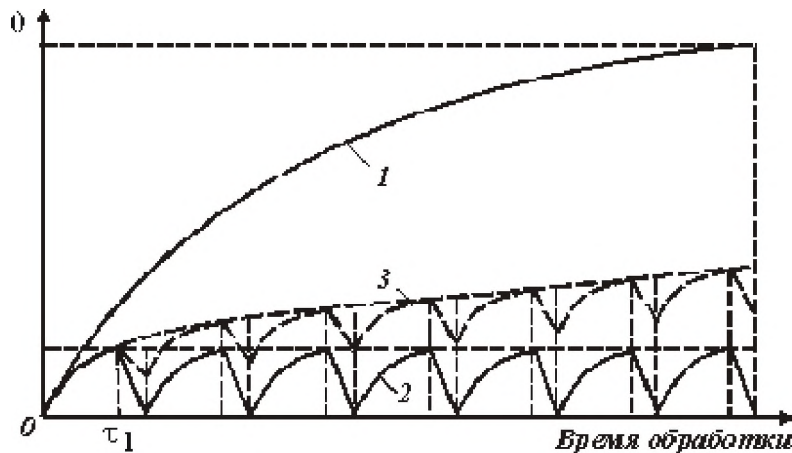
Зробимо теоретичний аналіз умов зменшення температури шліфування та експериментальну оцінку вірогідності отриманих розв'язків. На рис. 3 показані розраховані по залежності (1) значення температури шліфування  $\theta$  твердого сплаву ВК8 з урахуванням значень  $Z$ , наведених на рис. 2,а. Умовна напруга різання  $\sigma$  визначена по відомій залежності [4]:  $\sigma = 2 \cdot \sigma_{сж} / K_{рез}$ , де  $\sigma_{сж}$  – межа міцності на стиск оброблюваного матеріалу, Н/м<sup>2</sup>;  $K_{рез}$  – коефіцієнт різання, дорівнює відношенню тангенціальної й радіальної складових сили різання. У розрахунках прийняте:  $\sigma_{сж} = 4 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>;  $K_{рез} = 0,3$ ;  $\sigma = 26,7 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>.



**Рис. 3** Залежність температури  $\theta$  від величини  $l_1$  шліфуванні твердого сплаву ВК8: 1 –  $V_{рез} = 2$  мм/хв; 2 –  $V_{рез} = 10$  мм/хв.

З рис. 3 випливає, що при  $V_{рез} = 2$  мм/хв зі збільшенням величини  $l_1$  температура шліфування  $\theta$  збільшується, досягаючи при  $l_1 = 10$  мм значення 1500С, при якому на оброблюваних поверхнях ще не будуть утворюватися температурні дефекти. При  $V_{рез} = 10$  мм/хв температура шліфування  $\theta$  ухвалює значно більші значення, при яких гарантовано на оброблюваних поверхнях будуть утворюватися температурні дефекти. Щоб їх виключити, природно необхідно зменшити температуру шліфування  $\theta$ . Це може бути досягнуте за рахунок зменшення величини  $l_1$  шляхом розбивки припуску, що знімається, на частині і здійснення багатопрохідної обробки, що забезпечує періодичне переривання процесу шліфування з метою створення умов для остигання оброблюваної деталі. Переривання процесу шліфування в часі можна забезпечити шляхом відводу на певний час кола від деталі або ж роблячи переміщення деталі по дотичній до робочої поверхні кола, тобто забезпечуючи поздовжню або кругову подачі. Дана умова реалізована, по суті, у всіх схемах шліфування (кругле зовнішнє, внутрішнє і плоске шліфування). На рис. 4 показаний характер зміни температури шліфування  $\theta$  від часу обробки  $\tau$  для різних умов нагрівання та остигання зразка. Як видно, при обробці в  $n$  переходів температура шліфування  $\theta$  менше, чим при обробці в один перехід. Важливою умовою зниження температури шліфування за рахунок періодичного переривання процесу слід розглядати застосування процесу електроерозійного алмазного шліфування зі зміною полярністю електродів [5]. Як установлено експериментально, періодична зміна полярності електродів дозволяє до 50% зменшити температуру шліфування і тим самим підвищити якість обробки. Зміна полярності електродів в часі процесу шліфування є важливим, але не єдиним шляхом зменшення температури

шліфування. Виходячи з наведених залежностей, основним параметром, що впливають на температуру  $\theta$ , є умовна напруга різання  $\sigma$ . Чим менше ця величина, тем менше температура. По фізичній суті  $\sigma$  відповідає енергоємності обробки, що визначає кількість енергії, затрачуваної на знімання одиниці об'єму матеріалу. Як відомо, при шліфуванні енергія витрачається на здійснення процесу різання зернами кола, а також на подолання сили тертя зв'язування кола з оброблюваним матеріалом.



**Рис. 4** Залежність температури шліфування від часу при обробці в один перехід і відсутності охолодження оброблюваного зразка (1) і при обробці в  $n$  переходів при повному (2) і частковому (3) охолодженні зразка.

При цьому енергія, затрачувана на подолання сили тертя зв'язування кола з оброблюваним матеріалом, перевершує енергію, затрачувану на здійснення процесу різання. Виходячи із цього,  $\sigma$  буде в більшій мірі обумовлене процесом тертя зв'язування кола з оброблюваним матеріалом, чому процесом різання. Отже, з'являється можливість зменшення  $\sigma$  за рахунок зниження інтенсивності тертя в зоні шліфування, застосовуючи для цього ефективні технологічні середовища й методи виправлення кола, оптимальні режими шліфування і т.д.

Проведемо аналіз температури шліфування по спрощеній залежності (3), розглядаючи в ній част  $\tau_1 = l_1 / V_{рез}$ , тоді

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_{рез} \cdot l_1}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \quad (6)$$

Температура шліфування  $\theta$  залежить від трьох параметрів:  $\sigma$ ,  $V_{рез}$  і  $l_1$ . Найбільший вплив на  $\theta$  виявляє  $\sigma$ . Температура шліфування  $\theta$  може бути описана відомої з курсу фізики формулою теплопровідності тіла:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda} \quad (7)$$

З урахуванням співвідношення  $q = \sigma \cdot V_{рез}$  залежність (7) прикмет вид

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V_{рез} \cdot l_2}{\lambda} \quad (8)$$

Звідки товщина поверхневого шару оброблюваної деталі  $l_2$ , у якому концентрується тепло, що виділяється при шліфуванні (мал. 1), виразиться

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot V_{рез}} \quad (9)$$

Підставляючи в залежність (9) залежність (3), одержимо

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau_1 \quad (10)$$

Із залежності (10) випливає, що параметр  $l_2$  цілком однозначно визначається часом  $\tau_1$ . Чим більше  $\tau_1$ , тим більше товщина поверхневого шару зразка, у який проникнуло тепло. Заслуговує на особливу увагу той факт, що щільність теплового потоку  $q = \sigma \cdot V_{рез}$  не виявляє впливу на параметр  $l_2$ . З обліком  $\tau_1 = l_1 / V_{рез}$  залежність (10) прикмет вид

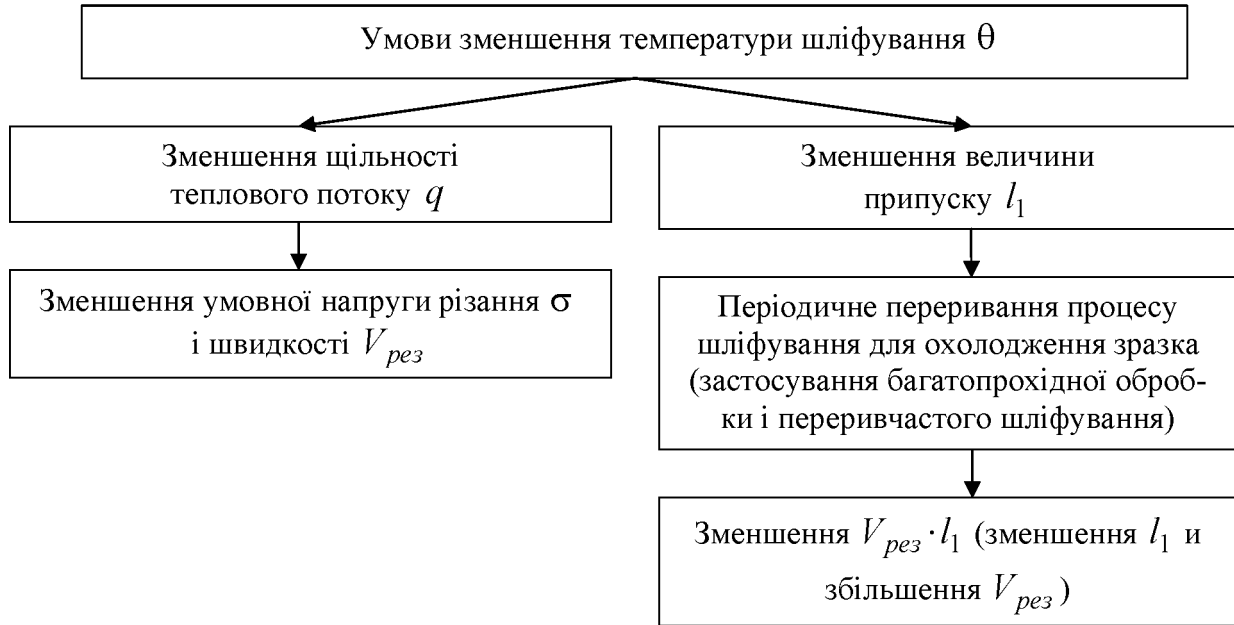
$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{l_1}{V_{рез}}} \quad (11)$$

Неважко бачити, що швидкість  $V_{рез}$  визначає параметри  $q$  й  $l_2$ . Зі збільшенням швидкості  $V_{рез}$  щільність теплового потоку  $q$  збільшується, а параметр  $l_2$ , навпаки, зменшується, причому з меншою інтенсивністю, що приводить до збільшення  $\theta$ . Із цього можна укласти, що визначальним фактором у формуванні температури шліфування  $\theta$  є щільність теплового потоку  $q$ . Тому зменшити  $\theta$  можна, насамперед, за рахунок зменшення  $q$ , зменшуючи умовну напругу різання  $\sigma$  й швидкість  $V_{рез}$ . Безсумнівно, для зниження  $\theta$ , виходячи із залежності (6), необхідно зменшувати й параметр  $l_1$ , дорівнює величині припуску, що знімається (рис. 5). Із цього випливають два напрямки зменшення температури шліфування  $\theta$  – це зменшення параметрів  $\sigma$  і  $V_{рез} \cdot l_1$ . Основний шлях зменшення  $\sigma$  полягає в підвищенні ріжучої здатності шліфувального кола й зменшенні інтенсивності тертя зв'язування й зерен кола з оброблюваним матеріалом. Зменшення добутку параметрів  $V_{рез} \cdot l_1$  вимагає проведення оптимізації структури й параметрів операції шліфування за найменшим часом обробки з урахуванням обмеження по температурі шліфування, оскільки тільки зменшення швидкості  $V_{рез}$  зв'язане зі зниженням продуктивності обробки  $Q = V_{рез} \cdot S$ , що не ефективно.

З метою оцінки вірогідності отриманих залежностей для визначення температури шліфування  $\theta$  була зроблена їхня експериментальна перевірка на прикладі шліфування торцем алмазного кола на керамічному зв'язуванні 12A2 150×10×3 AC4 200/160 4 пластинки шириною  $B=7$  мм із твердого сплаву ВК6 з режимом:  $V_{кр}=15$  м/с;  $S_{non}=0,06$  мм/дв.хід ( $t=0,06$  мм);  $S_{np}=2$  м/хв [6]. Експериментально встановлене, що тангенціальна складова сили різання для даних умов шліфування рівна  $P_z=75$  Н. Тоді умовна напруга різання  $\sigma = P_z \cdot V_{кр} / Q=80,35 \cdot 10^3$  МПа, де



$Q = B \cdot S_{np} \cdot t$  – продуктивність обробки,  $\text{мм}^3/\text{с}$ . Як видно, величина  $\sigma$  ухвалює досить велике значення. Отже, формування величини  $\sigma$  відбувається як у результаті процесу різання, так і процесу тертя в зоні шліфування. Для заданих умов обробки по залежності (6) була визначена температура шліфування  $\theta$ .



**Рис. 5** Структурна схема умов зменшення температури шліфування  $\theta$ .

У результаті встановлене, що  $\theta = 342,7$  до або  $70,70^\circ\text{C}$ . Це незначно відрізняється від експериментально встановленого значення температури, рівного  $\theta = 362$  До або  $900^\circ\text{C}$ , і свідчить про вірогідність отриманих спрощених залежностей для визначення температури шліфування  $\theta$ . Відносна величина температури  $z$  рівна  $0,011$ . Досить малі значення  $z$  вказують на те, що фактично все тепло, що утворюється при шліфуванні, іде в оброблювану деталь. Параметр  $l_2$ , обумовлений залежністю (11), рівний  $10,66$  мм, тобто при шліфуванні нагрівається вся оброблювана пластинка. Саме цим можна пояснити те, що температура поверхневого шару пластинки ухвалює відносно невелике значення –  $700^\circ\text{C}$ . При зменшенні параметра  $l_2$  внаслідок зменшення відводу тепла в оброблювану пластинку, температура була б вище. Отже, з одного боку, зменшення швидкості  $V_{рез}$  дозволяє збільшити параметр  $l_2$  по залежності (11), а з іншого сторони, зменшує щільність теплового потоку  $q = \sigma \cdot V_{рез}$ , що в остаточному підсумку приводить до зменшення температури шліфування  $\theta$ . Як показано вище, зменшення параметра  $l_1$  при зніманні заданого припуску  $\Pi > l_1$  пов'язане з періодичним перериванням процесу шліфування на час, достатнє для остигання оброблюваного зразка, і здійсненням обробки в кілька переходів. Зменшення  $l_1$ , виходячи із залежності (6), допускає збільшення швидкості  $V_{рез}$  (при заданій температурі шліфування  $\theta$ ) і продуктивності обробки.

### **Висновки**

У роботі одержала подальший розвиток математична модель визначення температури при шліфуванні прямолінійного зразка, що рухається по нормалі до робочої поверхні кола з постійною швидкістю. Доведене, що при шліфуванні частка тепла, що йде в оброблюваний зразок, значно більше частки тепла, що йде в стружки, що утворюються. Тому з достатньої для практики точністю при розрахунках температури шліфування рух теплового джерела уздовж оброблюваного зразка можна не враховувати. Це значно спрощує аналітичні залежності для визначення температури й відкриває нові можливості в плані аналізу й оптимізації структури й параметрів операцій шліфування на основі температурного критерію.

Теоретично визначені основні умови зменшення температури шліфування. Вони полягають, головним чином, у зменшенні умовної напруги різання (енергоємності обробки) і в зніманні припуску невеликими частинами за рахунок періодичної зміни полярності електродів з метою охолодження нагрітих поверхонь оброблюваного зразка.

### **Список використаної літератури:**

1. Лавриненко В. И. Электрошлифование инструментальных материалов / В. И. Лавриненко. – Київ : Наук. думка, 1993. – 156 с.
2. Левченко Е. А. Экспериментальные исследования радиального износа отрезного круга при абразивной разрезке труб / Е. А. Левченко // *Вісник СевНТУ* : зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – 2013. – Вип. 139. – С. 148–153.
3. Новиков Ф. В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф. В. Новиков, С. М. Яценко // *Физические и компьютерные технологии: междуна. научн.-техн. конф.* (Харьков, 19-20 апреля 2007 г.). – Харьков : ХНПК “ФЭД”, 2007. – С. 8–20.
4. Effect of phase transition on micro-grinding-induced residual stress / Zishan Ding, Gaoxiang Sun, Miaoxian Guo // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – Vol. 281. – Pp. 63–72.
5. Пат. України на корисну модель №131894, МПК (2018.01) B24B 1/00. Спосіб електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів / Стрельчук Р. М., Узунян М. Д. – № u 201806851; заявл. 18.06.2018; опубл. 11.02.2019. – Бюл. № 3.
6. Probing the effect of grinding-heat on material removal mechanism of rail grinding / Pengfei Zhang, Wulin Zhang, Yongjie Yuan // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 147. – Pp. 131–139.

### **References**

1. Lavrinenko, VI 1993, *Jelektroshlifovanie instrumentalnyh materialov*, Naukova dumka, Kiev.
2. Levchenko, EA 2013, *Jeksperimentalnye issledovanija radialnogo iznosa otreznogo kruga pri abrazivnoj razrezke trub*, *Visnyk SevNTU*, Seriiia Mashynopryladobuduvannia ta transport, iss. 139, pp. 148-153.
3. Novikov, FV & Jacenko, SM 2007, ‘Povyshenie jeffektivnosti tehnologii finishnoj obrabotki detalej par trenija porshnevnyh nasosov’, *Fizicheskie i kompjuternye tehnologii*, FJeD, Harkov.
4. Zishan Ding, Gaoxiang Sun & Miaoxian Guo 2020, ‘Effect of phase transition on micro-grinding-induced residual stress’, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 281, pp. 63–72.
5. Strelchuk, RM & Uzunian, MD 2019, *Sposib elektroeroziinoho almaznogo shlifuvannia zi zminnoiu poliarnistiu elektrodov*, UA Patent 131894.
6. Pengfei Zhang, Wulin Zhang & Yongjie Yuan 2020, Probing the effect of grinding-heat on material removal mechanism of rail grinding, *Tribology International*, vol. 147, pp. 131–139.

Стаття надійшла до редакції 10 квітня 2020 р.