

УДК 621.822.681.2:369.64

Олексин М.В.

Луцький національний технічний університет

ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПЕРЕРИВЧАСТОГО ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ

В роботі проведена серія експериментальних досліджень, що підтвердила результати моделювання температурних процесів в зоні безцентрового переривчастого шліфування заготовок кілець. Побудовані поверхні відгуку залежності параметра шорсткості R_a від режимів шліфування та числа канавок шліфувального круга покладені в основу розробленої методики проектування шліфувальних операцій і інструментальних налагоджень шліфувальних верстатів. Зона контакту абразивного круга з деталлю представляє вузьку смужку прямокутної форми, що рухається вздовж поверхні деталі. Температурне поле в такому випадку можна розраховувати за схемою рухливого нескінченно довгого поверхнево-смугового джерела. Розроблено план, програму та апаратне забезпечення експериментальних досліджень зв'язків конструкторсько-технологічних чинників та показників шліфувальних операцій з параметрами якості шліфованих поверхонь, температурою шліфування, силовими параметрами процесу шліфування переривчастими шліфувальними кругами та конструктивними параметрами переривчастих шліфувальних кругів.

Ключові слова: круг, шліфування, кільце, температура, якість.

Під час шліфування температурне поле в системі координат, зв'язаної з джерелом, починає прямувати до стану теплового насичення, процес встановлюється і поле стає квазістаціонарним. Інтервал до настання наступного циклу повинен бути таким, щоб поверхня встигла охолонути до вихідної температури. Такий процес можна реалізувати, якщо поверхню абразивного круга зробити не суцільною, а переривчастою, тобто розбити її на ряд виступів, які чергуються. Для визначення розмірів різального виступу та канавок необхідно знати час теплового насичення та час охолодження до вихідної температури.

Для вирішення даної теплової задачі, пов'язаної з розрахунком температури в зоні різання у роботі було прийнято наступну розрахункову схему (рис.1) [1, 2].

Математична модель визначення температури при шліфуванні, заснована на урахуванні балансу тепла, що переходить в стружку і в заготовку. У розрахунковій схемі [1, 2, 3] припуск на обробку, за аналогією з роботами проф. Якімова О.В., представлений пакетом нескінченно тонких адіабатичних стержнів, які в процесі шліфування перерізуються зі швидкістю V_{piz} . Для моделювання теплових процесів в зоні різання прийнята умова, що за час дії теплового джерела τ відбулося перерізання адіабатичного стержня довжиною l_1 , тобто теплове джерело

перемістилося уздовж стержня на величину $l_1 = V_{piz} \cdot \tau$, і за цей час у результаті різання

виділена кількість тепла Q . Це тепло, передається на нагрівання стружки, що утворюється, тобто ділянки стержня довжиною l_1 , а кількість тепла рівне Q_1 . З іншої сторони, на нагрівання ділянки стержня довжиною l_2 завдяки теплопровідності матеріалу заготовки, витрачена кількість тепла Q_2 . Рівняння балансу тепла складатиметься з умови $Q = Q_1 + Q_2$.

Кількість тепла Q_1 визначається наступним чином. Стержень довжиною l_1 умовно розбиваємо на нескінченну множину елементарних ділянок довжиною Δl (рис.1).

Припустимо, що кожна з елементарних ділянок нагрівається до різної температури: перша – до температури θ_1 , друга – до температури θ_2 і т.д. Тоді кількість тепла, яке витрачається на нагрівання першої ділянки стержня довжиною l_1 , буде рівна:

$$Q_{l_1} = c \cdot m_1 \cdot \theta_1, \quad (1)$$

де c – питома теплоємність матеріалу заготовки, Дж/(кг·К); $m_1 = \rho \cdot V_1 = \rho \cdot S \cdot \Delta l$ – маса першої ділянки стержня довжиною Δl , кг; ρ – густина матеріалу заготовки, кг/м³; V_1 – об'єм першої ділянки стержня довжиною Δl , м³; S – площа поперечного перерізу стержня, м².

Після перетворень залежність (1) матиме вигляд:

$$Q_{l_1} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_1. \quad (2)$$

Аналогічним чином визначається кількість тепла Q_{12} і Q_{1n} , які витрачаються на нагрівання 2-ї і n -ї ділянок стержня:

$$Q_{l_2} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_2, \quad (3)$$

$$Q_{l_n} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_n. \quad (4)$$

Аналогічною послідовністю визначаємо кількість тепла Q_2 , яке витрачається на нагрівання адіабатичного стержня довжиною l_2 :

$$Q_2 = c \cdot m \cdot \theta_2 \cdot 0,5. \quad (5)$$

Після перетворень залежність (6) матиме вигляд:

$$Q_2 = 0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot S \cdot l_2 \cdot \theta_2. \quad (6)$$

Рівняння балансу тепла складається за умови $Q = Q_1 + Q_2$ і представлено у вигляді диференціального рівняння зміни температури в часі $\theta = \theta(\tau)$:

$$\frac{d\theta}{d\tau} \cdot \theta + A \cdot \theta = B, \quad (7)$$

де $A = \frac{V_{\text{риз}} \cdot N}{\lambda \cdot S}$; $B = \frac{N^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2}$; N – потужність теплового джерела, Вт; λ – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/м·К.

Після розв'язку диференціального рівняння у відносних величинах отримаємо:

$$l_1 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{\text{риз}}} \bar{l}_1; \quad \bar{l}_1 = -\ln(1-z) - z; \quad z = \frac{\theta}{\left(\frac{\sigma}{c \cdot \rho}\right)}, \quad (8)$$

де z – безрозмірна величина, яку назовемо відносною величиною температури; $\sigma = q/V_{\text{риз}}$ – умовне напруження різання, Н/м²; q – щільність теплового потоку, Вт/м² [150].

Із залежності (3.8) випливає, що відносна величина температури z зі збільшенням довжини стержня $l_1 = V_{\text{риз}} \cdot \tau$ (або часу контакту τ шліфувального круга зі стержнем) збільшується приблизно за експонентним законом, асимптотично наближаючись до одиниці (рис. 3.2). Це свідчить про існування сталого в часі теплового процесу при шліфуванні, реалізованого при відносно великих значеннях \bar{l}_1 (або τ), наприклад, при глибинному шліфуванні.

Використовуючи отримане рішення, визначені основні параметри теплового процесу при шліфуванні: довжина стержня l_2 , рівна товщині поверхневого шару заготовки, у якому концентрується тепло; миттєва швидкість V_θ поширення тепла вглиб розглянутого адіабатичного стержня; частки тепла Q_1/Q і Q_2/Q , що передаються, відповідно в стружку, що утворюється, і в оброблювану деталь:

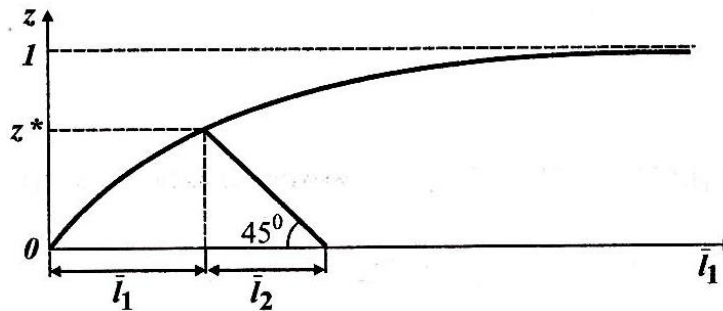


Рис. 1. Залежність відносної величини температури z від безрозмірної величини \bar{l}_1

$$l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{pi3}} \bar{l}_2; \quad \bar{l}_2 = z; \quad V_\theta = V_{pi3} + \frac{dl_2}{d\tau} = \frac{V_{pi3}}{z}, \quad (9)$$

$$\frac{Q_1}{Q} = 1 - \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}; \quad \frac{Q_2}{Q} = \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}. \quad (10)$$

З наведених залежностей витікає, що довжина стержня l_2 змінюється за законом зміни відносної величини температури z [1, 2, 3]. Миттєва швидкість V_θ , навпаки, зі збільшенням z безупинно зменшується, асимптотично наближаючись до значення V_{pi3} [4].

Відносні величини Q_1/Q і Q_2/Q визначаються лише одним параметром – відносною величиною температури z , рис. 2. Отже, зменшення величини z припускає зменшення Q_1/Q збільшення Q_2/Q за рахунок зменшення добутку параметрів $l_1 \cdot V_{pi3}$ відповідно до залежності (8). Цим показано, що розподіл тепла між стружками, що утворюються, і поверхневим шаром оброблюваної деталі обумовлений температурою шліфування.

По адіабатичній граничній поверхні напівнескінченного твердого тіла, теплофізичні властивості якого не залежать від температури, з нульовою початковою температурою у додатньому напрямку вздовж осі Z з постійною швидкістю V_θ швидко рухається нескінченно протяжне смугове сегментоподібне джерело тепла шириною $2h$, з рівномірно розподіленою по площі контакту, постійною в часі щільністю теплового джерела g , при цьому впливом теплообміну на розподіл температури поза джерелом знехтували, та ввели припущення, що поверхня теплоізолювана, тобто $X=0$.

Для того щоб виконувати розрахунки з позитивними значеннями аргументу початок системи координат, зв'язаної з джерелом, помістимо на задню поверхню джерела. За цих умов

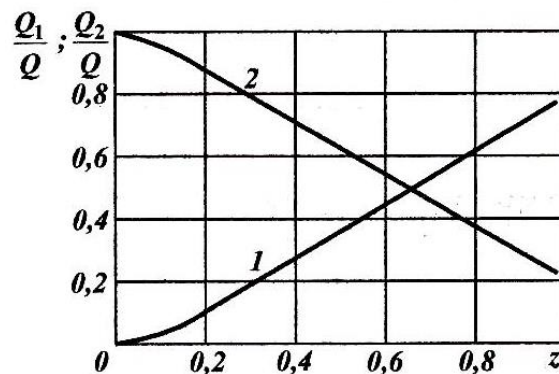


Рис. 2. Залежності величин Q_1/Q (1) і Q_2/Q (2) від

математична задача сформулюється наступним чином: маємо основне диференціальне рівняння теплопровідності, що з урахуванням руху теплового джерела має вигляд:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right) + V_\theta \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2}, \quad (11)$$

де θ – температура; a – коефіцієнт температуропровідності; V_θ – швидкість деталі (заготовки); τ – час контакту круга з заготовкою.

За граничних умов впливає, що: $\theta|_{\tau=0} = 0$, $\theta|_{X=\infty} = 0$ отже;

$$-\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{x=0, -h < z < 2h} = g; \quad \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{x=0, -h < z < 2h} = 0, \quad (12)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності; g – щільність теплового потоку.

Таким чином, задача знаходження розв'язку рівняння теплопровідності (11) зводиться до вирішення рівняння $\theta = (X, Y, Z, \tau)$ методом теплових джерел. Суть методу теплових джерел полягає в тому, що будь-який процес можна представити як суму процесів вирівнювання температури від нескінченної кількості елементарних джерел тепла, розподілених у просторі та часі. Дія елементарного джерела в нескінченному масиві характеризується функцією джерела:

$$\theta(X, Y, Z, X', Y', Z', \tau) = \frac{2Q}{c \cdot \rho \cdot (4\pi \cdot a \cdot \tau)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{(X - X')^2 \cdot (Y - Y')^2 \cdot (Z - Z')^2}{4a \cdot \tau}\right), \quad (13)$$

де Q – кількість тепла, що миттєво виділилося в точці з координатами X', Y', Z' ; c – питома теплоємність; ρ – густина матеріалу.

Під час руху джерела в позитивному напрямку осі Z або під час руху теплопровідного середовища відносно джерела в протилежному напрямку, координата дії джерела відносно середовища Z' буде безупинно змінюватися на величину $V_\delta \cdot \tau$:

$$\theta = \frac{2Q}{c \cdot \rho \cdot (4\pi \cdot a \cdot \tau)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{(X - X')^2 \cdot (Y - Y')^2 \cdot (Z - Z' + V_\delta \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau}\right). \quad (14)$$

Інтенсивність джерела характеризується щільністю теплового потоку g , що являє собою кількість тепла, яке виділяється на одиницю довжини за одиницю часу.

Якщо до розглянутого моменту джерело рухалося протягом часу τ , то задачу можна розв'язати, провівши інтегрування виразу (14) по Y' від $-\infty$ до $+\infty$; по Z' від 0 до $2h$ і по часу від 0 до τ , тобто:

$$\theta = \int_0^{2h} dZ' \int_{-\infty}^{+\infty} dY' \int_0^\tau \frac{2Q}{c \cdot \rho \cdot (4\pi \cdot a \cdot \tau)^{3/2}} \exp\left(-\frac{(X - X')^2 \cdot (Y - Y')^2 \cdot (Z - Z' + V_\delta \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau}\right) d\tau. \quad (15)$$

Вираз (15) описує температурне поле сегментоподібного джерела в процесі насичення. Після інтегрування по Y' було отримано:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{Y - Y'}{4a \cdot \tau}\right)^2 \cdot dY' &= \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{Y - Y'}{4a \cdot \tau}\right)^2 \cdot dY' = \\ &= 2\sqrt{a \cdot \tau} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{Y - Y'}{2\sqrt{a \cdot \tau}}\right) \cdot d\left(\frac{Y - Y'}{2\sqrt{a \cdot \tau}}\right) = 2\sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau}. \end{aligned} \quad (16)$$

Оскільки $\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-u^2) = \sqrt{\pi}$ – інтеграл Гауса, то:

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{2g \cdot 2\sqrt{\pi \cdot a}}{c \cdot \rho \cdot (4\pi \cdot a)^{3/2}} \cdot \int_0^{2h} dZ \int_0^\tau \frac{\sqrt{\tau}}{\tau^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{X^2 + (Z - Z' + V_\delta \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau}\right) \cdot d\tau = \\ &= \frac{g}{2c \cdot \rho \cdot \pi \cdot a} \int_0^{2h} dZ \int_0^\tau \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{X^2 + (Z - Z' + V_\delta \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau}\right) \cdot d\tau. \end{aligned} \quad (17)$$

Розглянемо інтеграл

$$\int_0^{2h} \exp\left(-\frac{X^2 + (Z - Z' + V_\delta \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau}\right) \cdot dZ \quad (18)$$

В ході інтегрування по Z' , введемо заміну:

$$Z_1 = Z - Z'; \quad dZ_1 = -dZ \quad \text{при} \quad \begin{cases} Z' = 0; & Z_1 = Z; \\ Z' = 2h; & Z_1 = Z - 2h. \end{cases} \quad (19)$$

Згідно умови $X=0$, що відповідає поверхні шліфованої деталі отримано:

$$\int_z^{z-2h} \exp\left(-\frac{(Z_1 + V_\partial \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau}\right) \cdot dZ_1 = \int_{z-2h}^z \exp\left(-\frac{Z_1 + V_\partial \cdot \tau}{4a \cdot \tau}\right)^2 \cdot dZ_1. \quad (20)$$

Після введення позначень:

$$\frac{Z_1 + V_\partial \cdot \tau}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = U; \quad \frac{dZ_1}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = dU; \quad dZ_1 = 2\sqrt{a \cdot \tau} \cdot dU, \quad (21)$$

межі інтегрування набули вигляду:

$$\text{при } Z_1 = Z - 2h; \quad \frac{Z - 2h + V_\partial \cdot \tau}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = U_1; \quad \text{при } Z_1 = Z; \quad \frac{Z + V_\partial \cdot \tau}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = U_2.$$

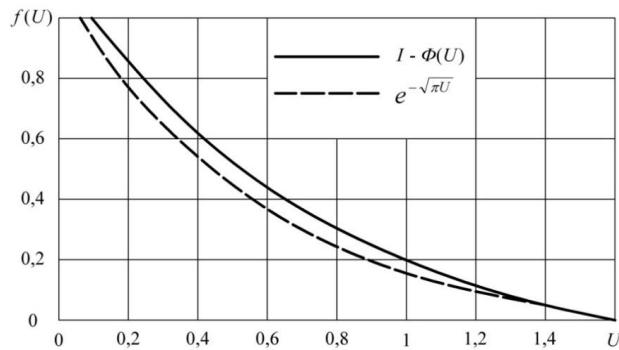


Рис. 3. Порівняльні графіки основної та апроксимуючої функцій

Другим етапом теоретичних розрахунків температури в зоні різання під час оброблення абразивним переривчастим інструментом є визначення величини зниження температури залежно від часу припинення процесу шліфування [3, 4, 5, 6].

Розглянемо задачу про зміну температури вільної поверхні шляхом теплообміну. Зміну середньої температури вважаємо постійною для фіксованого моменту часу. Для оцінки процесу охолодження вільної поверхні приймемо наступну теплову схему: оскільки швидкості охолодження поверхні за рахунок теплообміну з ЗОР після припинення дії джерела тепла великі, то можна знехтувати розсіюванням тепла по осі Z за рахунок теплопровідності. За рахунок введення цього припущення розрахунковий процес охолодження поверхні буде відбуватися дещо повільніше, ніж реальний.

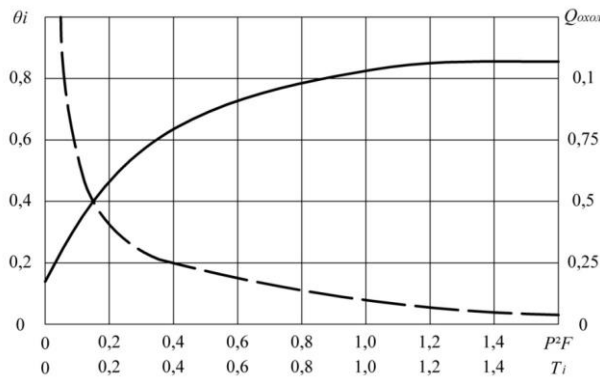


Рис. 4. Зміна температури за часом теплового насичення:

“— — —” - залежність Q_n від комплексу $P^2 \cdot F$; “—” - залежність Q_{oxol} від комплексу θ_i .

Час досягнення визначеної температури залежить від швидкості джерела, що дозволяє змінювати цей час у широких межах. Після того, як процес шліфування припинився, настає невеликий часовий проміжок, протягом якого поверхня охолоджується потоком ЗОР. Проміжок часу між двома сусідніми робочими виступами повинен бути таким, щоб поверхня могла охолонути на визначену величину. Оскільки поверхня в перерві між робочими циклами вільна, теплообмін здатний істотно змінити її температуру.

Висновки. Теоретичне дослідження температур для різних схем шліфування дозволяє зробити висновок, що граничний стан температурного поля (теплового насичення) настає не відразу після початку процесу шліфування. Від початку процесу до встановлення граничного стану існує малий, але фізично відчутний проміжок часу, протягом якого шліфування протікає в нестационарному режимі. Наявність цього тимчасового проміжку можна підтвердити експериментально, шляхом визначення температури. Нестационарний режим роботи в процесі шліфування відкриває принципову можливість зниження контактних температур за рахунок періодичного переривання процесу.

Інформаційні джерела

1. Якимов А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов, Ю.А. Бояршинов и др. // Вестник машиностроения. – 1967. – №3. – С. 76-78.
2. Марчук В.І. Класифікація та походження температурних дефектів на операціях безцентрового шліфування поверхонь обертання / Марчук, І.В. Марчук, М.В. Олексин, А.М. Ештеїві / Матеріали Шістнадцятої міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї-наука-виробництво», м. Суми, 26-29 жовтня 2016 р. – Суми: Сумський державний університет, 2016. – С. 102–103.
3. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Новый упрощенный подход к расчету температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке. – Физические и компьютерные технологии. – Труды 11-й Международной научно-технической конференции, 2-3 июня 2005 г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2005. – С.137–146.
4. Джугурян Т.Г. Марчук І.В. Технологічне забезпечення точності та якості поверхонь обертання в підшипниковому виробництві/ «Перспективні технології та прилади». Збірник наукових праць. – Луцьк: ЛНТУ, 2017. – Випуск №12(1). - С. 111-119.
5. Марчук І.В., Марчук В.І., Модель стабілізації високочастотних коливних процесів в динамічній системі круглого врізного шліфування. Збірник наукових праць. – Луцьк: ЛНТУ, 2016. – Перспективні технології та прилади №9. - С.75-83.
6. Марчук І.В. Керування температурою на безцентрово-шліфувальних операціях / М.В. Олексин, А.М. Ештеїві // “Перспективні технології та прилади”. Збірник наукових праць. Випуск 10(1). м. Луцьк, червень 2017 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 133–138.
7. Марчук І.В. Технологічне керування температурою під час безцентрового шліфування функціональних поверхонь обертання/ Марчук В.І. // «Наукові нотатки». Випуск 61. м. Луцьк, 2018 – Луцьк: Луцький НТУ, 2018. – С. 142-147

N. Oleksin

Lutsk National Technical University

TO DETERMINE THE TEMPERATURE OF INTERMITTENT GRINDING OF SURFACES BY ROTATION OF ROLLER BEARING RINGS

The paper presents a series of experimental studies confirmed the results of the simulation of the thermal processes in the zone of discontinuous centerless grinding of workpieces of the rings. The surfaces of the response of the dependence of the roughness parameter Ra on the grinding modes and the number of grooves of the grinding wheel are built on the basis of the developed method of designing grinding operations and tool settings of grinding machines. The contact area of the abrasive wheel with the part is a narrow strip of rectangular shape, moving along the surface of the part. The temperature field in this case can be calculated according to the scheme of a moving infinitely long surface-band source. Plan, program and hardware of an experimental consideration of engineering factors and indicators grinding operations with quality parameters of ground surfaces, the grinding temperature and force parameters of the process grinding of the intermittent grinding wheels.

Keywords: circle, grinding, ring, temperature, quality.

Олексин Н.В.

Луцкий национальный технический университет

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕЦ РОЛИКОПОДШИПНИКОВ

В работе проведена серия экспериментальных исследований, подтвердила результаты моделирования температурных процессов в зоне бесцентрового прерывистого шлифования заготовок колец. Построены поверхности отклика зависимости параметра шероховатости Ra от режимов шлифования и числа канавок шлифовального круга положены в основу разработанной методики проектирования шлифовальных операций и инструментальных настроек шлифовальных станков. Зона контакта абразивного круга с деталью представляет узкую полосу прямоугольной формы, движущуюся вдоль поверхности детали. Температурное поле в таком случае можно рассчитывать по схеме подвижного бесконечно долгого поверхностно-полосового источника. Разработан план, программу и аппаратное обеспечение экспериментальных исследований связей конструкторско-технологических факторов и показателей шлифовальных операций с параметрами качества шлифованных поверхностей, температурой шлифования, силовыми параметрами процесса шлифования прерывистыми шлифовальными кругами и конструктивными параметрами прерывистых шлифовальных кругов.

Ключевые слова: *круг, шлифовка, кольцо, температура, качество.*

Стаття надійшла до редакції 16.10.2018