

1. Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки /Под ред. П.Г.Петрухи. М.: Машиностроение, 1974. 614 с.
2. Бурмистров Е.В. Исследование вибраций при концевом фрезеровании высокопрочных сталей на станках с ЧПУ //Высокоэффективные методы и инструменты для механической обработки авиационных материалов: Сб. науч. тр. /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1984. С.98-III.
3. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. 179 с.
4. Бурмистров Е.В., Авдонин Г.Т., Маркушин Е.М. Роль отставания силы резания от изменения толщины среза в возбуждении вибраций при обработке резанием //Динамика станков. Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1980. С.9-II.
5. Воронцов Е.Н. Повышение производительности и качества обработки деталей из высокопрочных, коррозионно-стойких сталей и титановых сплавов за счет улучшения характеристик виброустойчивости и надежности сверл малых диаметров: Дис. канд. техн. наук. Куйбышев, 1986. 192 с.

УДК 621.923:536.5.001.24

Д.Л.Скуратов, В.Н.Трусов, А.Ф.Урывский

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ДЕТАЛЯХ
ПРИ ВНУТРЕННЕМ КРУГЛОМ ШЛИФОВАНИИ ИХ КРУГАМИ
РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Представлена математическая модель, описывающая температурное поле в деталях, возникающее при внутреннем круглом шлифовании их кругами различных конструкций, с учетом конвективного теплообмена вне зоны контакта круга с изделием. Приведена методика расчета температурного поля методом граничных элементов.

Тепловые явления, сопровождающие процесс шлифования материалов, могут оказывать решающее влияние как на протекание процесса, так и на качество шлифованных поверхностей. Анализ исследований, проведенных авторами работ [1-3] и другими, показывает, что физико-механическое состояние поверхностного слоя шлифованных деталей определяется не только контактной температурой, а всем пространственно-временным температурным полем. Более полное познание механизма формирования структуры и свойств поверхностного слоя возможно лишь на основе изучения кинетики тепловых процессов и закономерности влияния основных параметров теплового процесса на глубину и характер изменений в поверхностном слое.

Расчету температурного поля в деталях, обрабатываемых шлифованием, посвящены работы многих авторов [1-7]. В этих работах рассматриваются математические модели процессов шлифования и методы расчета стационарных и нестационарных температурных полей, возникающих в деталях при обработке их кругами конкретной конструкции: со сплошной рабочей поверхностью; прерывистыми; композиционными со специальными вставками. Универсальное решение задачи, позволяющее определять температурное поле в деталях при шлифовании их кругами различных конструкций, нам неизвестно.

В данной статье приведено решение вышеупомянутой задачи, учитывающее конвективный теплообмен внутренней поверхности детали с охлаждающей жидкостью, вне зоны контакта круга с деталью, и наружной поверхности с окружающей средой (воздухом). Тепловое поле в деталях, обрабатываемых шлифовальными кругами различных конструкций, рассчитывается на основе математической модели для процесса внутреннего круглого шлифования комбинированным кругом методом граничных элементов. Схема внутреннего круглого шлифования комбинированным кругом приведена на рис. 1. Комбинированный круг включает элементы, присущие кругам различных конструкций, поэтому решение задачи по расчету температурного поля в детали при ее шлифовании сплошным, прерывистым, композиционным кругами может рассматриваться как частный случай решения задачи по определению температурного поля при шлифовании комбинированным кругом.

При постановке и решении задачи были приняты следующие допущения:

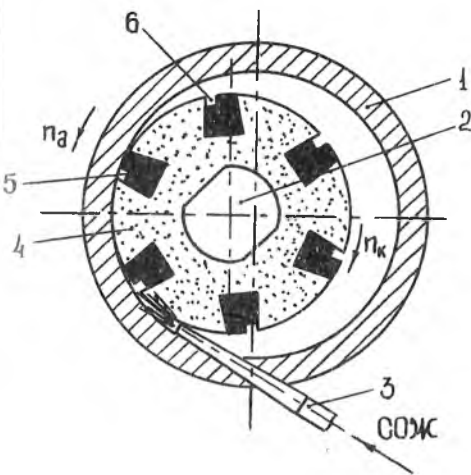
влияние теплопереноса в направлении скорости движения подачи пренебрежимо мало;

теплофизические параметры обрабатываемых материалов и смазывающе-охлаждающих элементов кругов считать постоянными;

температура охлаждающей жидкости остается постоянной, равной температуре окружающей среды;

тепловой источник имеет полосовую форму и бесконечную ширину (задача двумерная) и непрерывно действует в течение контакта режущего выступа круга с деталью. Интенсивность источника равномерна по всей площади контакта и постоянна во времени, источник движется по поверхности тела с постоянной угловой скоростью.

Исходя из принятых допущений задача формулируется следующим образом: на внутренней поверхности бесконечного цилиндра радиусом r в направлении, противоположном направлению вращения детали, с угловой скоростью ω движется прерывистый полосовой тепловой источник с плотностью теплового потока, равной q . Характерной особенностью теплового источника является то, что направление теплового потока в зоне контакта круга с деталью периодически изменяется. Тепло периодически передается в деталь и из детали. На внеконтактном участке комбинированного круга с деталью и во время прохождения впадинами зоны контакта происходит конвективный теплообмен между обрабатываемой поверхностью детали и охлаждающей жидкостью с коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{\text{ж}}$, а во время контакта между смазывающе-охлаждающими элементами (СОЭ) круга и поверхностью детали происходит перенос тепла с обрабатываемой поверхности в СОЭ с коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{\text{СОЭ}}$.



Р и с. 1. Схема внутреннего круглого шлифования комбинированным кругом: 1 - деталь; 2 - круг комбинированный; 3 - сопло для подачи СОЭ; 4 - режущий выступ круга; 5 - элемент смазывающе-охлаждающий; 6 - впадина

В системе координат, связанной с зоной контакта круга и детали, уравнение теплопроводности, граничные и начальные условия запишутся следующим образом:

уравнение теплопроводности ($0 \leq \varphi < 2\pi$; $z_B < z < z_H$; $t > 0$)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{1}{z^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) - \omega_{\partial} \frac{\partial T}{\partial \varphi};$$

граничные условия

($0 \leq \varphi < 2\pi$; $z = z_B$; $t > 0$)

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_B} = \beta(\varphi, t) (T - T_{\infty}) \Big|_{z=z_B} + d(\varphi, t),$$

($0 \leq \varphi < 2\pi$; $z = z_H$; $t > 0$)

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_H} = \alpha_H (T - T_{\infty}) \Big|_{z=z_H};$$

начальные условия ($0 \leq \varphi < 2\pi$; $z_B < z < z_H$; $t = 0$)

$$T(z, \varphi, 0) = T_0(z, \varphi) = T_{\infty},$$

где T — температура, К;

t — время, с;

z, z_B, z_H — радиус текущей, внутренней и наружной поверхности детали соответственно, м;

φ — угол, рад;

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;

α_H — коэффициент теплоотдачи при охлаждении наружной поверхности изделия воздухом окружающей среды, Вт/м²·К;

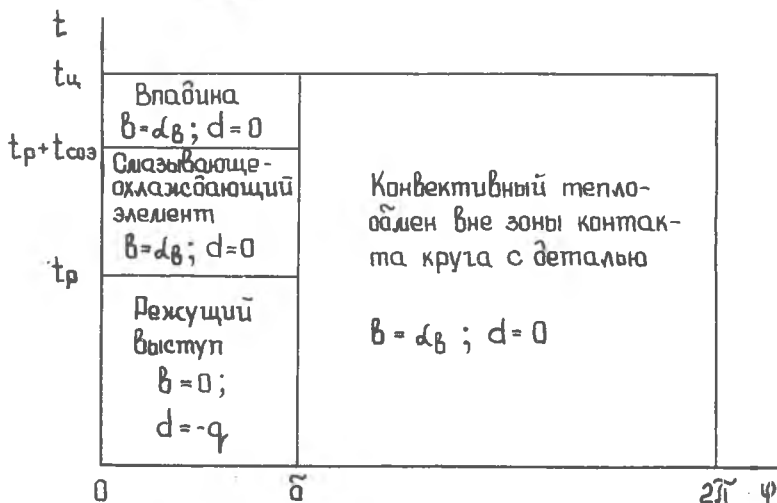
T_{∞} — температура окружающей среды, К;

ω_{∂} — угловая скорость вращения детали, рад/с,

$$\omega_{\partial} = \frac{2\pi n_{\partial}}{60},$$

n - число оборотов детали, об/мин.

Значения функций $b(\varphi, t)$ и $d(\varphi, t)$ в различных областях плоскости (φ, t) приведены на рис. 2. При этом предполагается, что зависимость от времени $b(\varphi, t)$ и $d(\varphi, t)$ носит периодический характер с периодом $t_{\text{ц}}$.



Р и с. 2. Схема для определения значений функций $b(\varphi, t)$, $d(\varphi, t)$ при внутреннем круглом шлифовании деталей комбинированным кругом (δ - угловая величина зоны контакта)

$$t_{\text{ц}} = \frac{60}{n_k N_{\text{соз}}} = t_p + t_{\text{соз}} + t_{\text{б}}$$

где $t_{\text{ц}}$ - время цикла, с;

n_k - число оборотов круга, об/мин;

$N_{\text{соз}}$ - число СОЭ, шт;

$t_p, t_{\text{соз}}$ - время контакта режущего выступа и смазывающе-охлаждающего элемента с обрабатываемой деталью, с;

$t_{\text{б}}$ - время прохождения впадиной круга зоны контакта круга с деталью, с.

При $t_{\text{воз}} = 0$, $t_{\text{в}} = 0$, $t_{\text{р}} \neq 0$ задача расчета температурного поля в детали при шлифовании комбинированным кругом сводится к задаче по определению температурного поля в детали сплошным кругом, а при $t_{\text{воз}} = 0$, $t_{\text{р}} \neq 0$, $t_{\text{в}} \neq 0$ задача, соответственно, сводится к расчету температурного поля в детали при шлифовании прерывистым кругом и т.д.

Приведем задачу к безразмерному виду, используя в качестве масштабов величины:

T_{∞} - масштаб температуры, К;

$z_{\text{в}}$ - линейный масштаб, м;

$\frac{z_{\text{в}}^2}{a}$ - масштаб времени, с.

Тогда уравнение теплопроводности, граничные и начальные условия примут следующий вид:

$$\frac{\partial \mu}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 \mu}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \mu}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \mu}{\partial \varphi^2} - \Omega \frac{\partial \mu}{\partial \varphi}, \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial \mu}{\partial R} \right|_{R=1} = B(\varphi, F_0) \mu \Big|_{R=1} + D(\varphi, F_0), \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \mu}{\partial R} \right|_{R=R_H} = -B_1^H \mu \Big|_{R=R_H}, \quad (3)$$

$$\mu(R, \varphi, 0) = 0, \quad (4)$$

где $\mu = \frac{T - T_{\infty}}{T_{\infty}}$; $R = \frac{z}{z_{\text{в}}}$; $F_0 = \frac{at}{z_{\text{в}}^2}$;

$$\Omega = \frac{\omega z_{\text{в}}^2}{a}; \quad B_1^H = \frac{\alpha_H z_{\text{в}}}{\lambda}.$$

Значения безразмерных функций $B(\varphi, F_0)$ и $D(\varphi, F_0)$ в различных областях плоскости (φ, F_0) представлены на схеме рис. 3.

Определим зависящее от времени фундаментальное решение уравнения теплопроводности (1) в полярных координатах, которое имеет вид

F_0	<p>Впадина</p> $B = B^b = \frac{\alpha_b \cdot \tau_b}{\lambda}; D = 0$ <p>Смазывающе-охлаждающий элемент</p> $B = B^{\cos} = \frac{\alpha \cos \cdot \tau_b}{\lambda}; D = 0$ <p>Режущий выступ</p> $D = -Q$ $B = 0$	<p>Конвективный тепло-обмен вне зоны контакта круга с деталью</p> $B = B^b = \frac{\alpha_b \cdot \tau_b}{\lambda}; D = 0$
F_0^{μ}		
$F_0 + F_0^{\cos}$		
F_0^p		
0	\bar{b}	$2\bar{\pi}$ φ

Р и с. 3. Схема для определения значений безразмерных функций $B(y, F_0)$ и $D(y, F_0)$ при внутреннем круглом шлифовании деталей комбинированным кругом: $F_0^{\mu}, F_0^p, F_0^{\cos}$ - критерии Фурье при t_y, t_p, t_{\cos} соответственно

$$\omega(M^*, M; F_0^*, F_0) = \frac{2(F_0^* - F_0)}{4\pi(F_0^{*2} - F_0^2)} e^{-\frac{R^2 + R_*^2 - 2RR_* \cos[\Omega(F_0^* - F_0) + y - y_*]}{4(F_0^* - F_0)}}$$

где M^*, M - точки с координатами (R_*, y_*) и (R, y) .

Основное интегральное тождество метода граничных элементов для области и границы цилиндра с учетом граничных условий (2), (3) запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} \nu(R_*) \mathcal{U}(R_*, y_*, F_0) &= \int_{F_0^k}^{F_0^*} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\partial \omega}{\partial R} - B\omega \right) \Big|_{R=1} \mathcal{U}(1, y, F_0) dy dF_0 - \\ &- \int_{F_0^k}^{F_0^*} \int_0^{2\pi} (D\omega) \Big|_{R=1} dy dF_0 - \int_{F_0^k}^{F_0^*} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\partial \omega}{\partial R} + B_1^H(\omega) \right) \Big|_{R=R_H} \mathcal{U}(R_H, y, F_0) \times \\ &\times R_H dy dF_0 + \int_1^{R_H} \int_0^{2\pi} \mathcal{U}(R, y, F_0^k) \omega(M^*, M; F_0^*, F_0^k) R dy dR, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\nu(R^*)=1$, если $l < R^* < R_H$ (для точек, лежащих внутри области),

$$\nu(l) = \nu(R_H) = \frac{1}{2} \quad (\text{для точек, лежащих на границе области}).$$

Поставленную задачу решим вышеуказанным методом.

Если распределение температуры в области известно в момент времени F_0^K , то для определения температуры на поверхности в момент времени $F_0^{K+1} = F_0^K + \tau$ следует решить интегральное уравнение (5), в котором необходимо положить

$$R_* = l, \quad R_* = R_H \quad \text{и} \quad F_0^* = F_0^K.$$

Затем можно определить температуру внутри области в момент времени F_0^{K+1} из того же уравнения (5), в котором следует взять $l < R < R_H$ и $F_0^* = F_0^{K+1}$. Далее этот процесс можно повторить, взяв в качестве начального временного слоя момент времени F_0^{i+1} , а в качестве конечного временного слоя момент времени F_0^{K+2} .

Таким образом можно определить температурное поле в любые заданные моменты времени.

Основная сложность состоит в определении температуры на границе области, т.е. в решении интегрального уравнения (5) при $R_* = l$ и $R_* = R_H$.

Для решения интегрального уравнения (5) границу области разобьем на n участков — конечных элементов и будем предполагать, что на каждом участке температура остается постоянной.

Обозначим:

$\varphi_j, \varphi_j', \varphi_j''$ — соответственно середина, нижняя и верхняя граница j -го участка границы;

$$U_i^B = U(l, \varphi_i, F_0^{K+1}); \quad U_i^H = U(R_H, \varphi_i, F_0^{K+1});$$

$$B_i = B(\varphi_i, F_0^{K+1}); \quad D_i = D(\varphi_i, F_0^{K+1}); \quad B_i^H = B_i^H(\varphi_i, F_0^{K+1}).$$

Тогда интегральное уравнение (5) примет вид

$$\frac{1}{2} U_i^B = \sum_{j=1}^n (\beta_{ij}^{BB} - \beta_{ij} \alpha_{ij}^{BB}) U_j^B - \sum_{j=1}^n D_j \alpha_{ij}^{BB} - \sum_{j=1}^n (\beta_{ij}^{BH} + \beta_{ij}^H \alpha_{ij}^{BH}) U_j^H + J_i^B;$$

$$\frac{1}{2} U_i^H = \sum_{j=1}^n (\beta_{ij}^{HB} - B_j \alpha_{ij}^{HB}) U_j^B - \sum_{j=1}^n D_j \alpha_{ij}^{HB} - \sum_{j=1}^n (\beta_{ij}^{HB} + B_j^H \alpha_{ij}^{HH}) U_j^H + J_i^H,$$

$$(i=1, 2, \dots, n);$$

$$\alpha_{ij}^{BB} = \int_{F_0^K}^{F_0^{K+1}} \int_{\mathcal{Y}_j'}^{\mathcal{Y}_j''} \omega(1, \mathcal{Y}_i; 1, \mathcal{Y}; F_0^{K+1}, F_0) dF_0 d\mathcal{Y};$$

$$\beta_{ij}^{BB} = \int_{F_0^K}^{F_0^{K+1}} \int_{\mathcal{Y}_j'}^{\mathcal{Y}_j''} \frac{\partial}{\partial R} \omega(1, \mathcal{Y}_i; 1, \mathcal{Y}; F_0^{K+1}, F_0) dF_0 d\mathcal{Y};$$

$$\alpha_{ij}^{BH} = \int_{F_0^K}^{F_0^{K+1}} \int_{\mathcal{Y}_j'}^{\mathcal{Y}_j''} \omega(1, \mathcal{Y}_i; R_H, \mathcal{Y}; F_0^{K+1}, F_0) R_H dF_0 d\mathcal{Y};$$

$$\beta_{ij}^{BH} = \int_{F_0^K}^{F_0^{K+1}} \int_{\mathcal{Y}_j'}^{\mathcal{Y}_j''} \frac{\partial}{\partial R} \omega(1, \mathcal{Y}_i; R_H, \mathcal{Y}; F_0^{K+1}, F_0) R_H dF_0 d\mathcal{Y};$$

$$\alpha_{ij}^{HB} = \int_{F_0^K}^{F_0^{K+1}} \int_{\mathcal{Y}_j'}^{\mathcal{Y}_j''} \omega(R_H, \mathcal{Y}_i; 1, \mathcal{Y}; F_0^{K+1}, F_0) dF_0 d\mathcal{Y};$$

$$\beta_{ij}^{HB} = \int_{F_0^K}^{F_0^{K+1}} \int_{\mathcal{Y}_j'}^{\mathcal{Y}_j''} \frac{\partial}{\partial R} \omega(R_H, \mathcal{Y}_i; 1, \mathcal{Y}; F_0^{K+1}, F_0) dF_0 d\mathcal{Y};$$

$$\alpha_{ij}^{HH} = \int_{F_0^K}^{F_0^{K+1}} \int_{\mathcal{Y}_j'}^{\mathcal{Y}_j''} \omega(R_H, \mathcal{Y}_i; R_H, \mathcal{Y}; F_0^{K+1}, F_0) R_H dF_0 d\mathcal{Y};$$

$$\beta_{ij}^{HH} = \int_{F_0^K}^{F_0^{K+1}} \int_{\mathcal{Y}_j'}^{\mathcal{Y}_j''} \frac{\partial}{\partial R} \omega(R_H, \mathcal{Y}_i; R_H, \mathcal{Y}; F_0^{K+1}, F_0) R_H dF_0 d\mathcal{Y};$$

$$J_i^B = \int_1^R \int_0^{2\pi} u(R, \varphi, F_0^K) \omega(1, \varphi_i; R, \varphi; F_0^{K+1}, F_0^K) R dR d\varphi;$$

$$J_i^H = \int_1^R \int_0^{2\pi} u(R, \varphi, F_0^K) \omega(R_H, \varphi_i; R, \varphi; F_0^{K+1}, F_0^K) R dR d\varphi.$$

Введем матричные обозначения:

$$U = \begin{bmatrix} U_1^B \\ U_2^B \\ \vdots \\ U_n^B \\ \hline U_1^H \\ \vdots \\ U_n^H \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} \overset{BB}{a_{11}} \dots \overset{BB}{a_{1n}} & \overset{BH}{a_{11}} \dots \overset{BH}{a_{1n}} \\ \vdots & \vdots \\ \overset{BB}{a_{n1}} \dots \overset{BB}{a_{nn}} & \overset{BH}{a_{n1}} \dots \overset{BH}{a_{nn}} \\ \hline \overset{HB}{a_{11}} \dots \overset{HB}{a_{1n}} & \overset{HH}{a_{11}} \dots \overset{HH}{a_{1n}} \\ \vdots & \vdots \\ \overset{HB}{a_{n1}} \dots \overset{HB}{a_{nn}} & \overset{HH}{a_{n1}} \dots \overset{HH}{a_{nn}} \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} F_1^B \\ F_2^B \\ \vdots \\ F_n^B \\ \hline F_1^H \\ \vdots \\ F_n^H \end{bmatrix}, \quad \text{где}$$

$$\begin{aligned} \overset{BB}{a_{ij}} &= \beta_{ij} - B_j^B \alpha_{ij} \\ \overset{BH}{a_{ij}} &= \beta_{ij} - B_j^H \alpha_{ij} \\ \overset{HB}{a_{ij}} &= \beta_{ij} - B_j^B \alpha_{ij} \\ \overset{HH}{a_{ij}} &= \beta_{ij} - B_j^H \alpha_{ij} \end{aligned}$$

$$F_i^B = - \sum_{j=1}^n D_j \alpha_{ij}^{BB} + J_i^B; \quad F_i^H = - \sum_{j=1}^n D_j \alpha_{ij}^{HB} + J_i^H.$$

В матричных обозначениях полученная система будет иметь вид

$$\left(\frac{1}{2}E - A\right)U = F.$$

Основные затраты времени, как видно из приведенных формул, приходятся на вычисление α_{ij}^B и β_{ij}^B . Однако, если шаг по времени τ не меняется, то эти коэффициенты остаются постоянными и не требуют вычисления на каждом шаге. Если при этом шаг τ достаточно мал, то матрица A принимает трехдиагональный вид и может быть эффективно решена методом прогонки, что в десятки раз снижает вычислительные затраты.

Вывод. Представленная математическая модель позволяет рассчитать температурное поле в детали при внутреннем круглом шлифовании ее кругами различных конструкций с учетом конвективного теплообмена вне зоны контакта.

Библиографический список

1. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1975. 128 с.
2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.
3. Ящерицын П.И., Цокур А.К., Еременко М.Л. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. Минск: Наука и техника, 1973. 184 с.
4. Урывский Ф.П., Маркушин Е.М. Расчет температурных полей при шлифовании с охлаждением // Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов: Межвуз. сб. / Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1976. Вып. 4. С. 77-81.

5. Напарьин Ю.А. К расчету характеристик прерывистых кругов при внутреннем шлифовании цилиндров //Тез. докл. конф. Секция. Теплофизика шлифования, сент. 1972 г. Тольятти, 1972. С. 16-19.

6. Напарьин Ю.А., Якимов А.В., Ярмонов Н.А. Некоторые результаты расчета температурных полей в пластине при прерывистом шлифовании //Тез. докл. конф. Секция. Математические методы и моделирование, сент. 1972 г. Тольятти, 1972. С. 66-69.

7. Напарьин Ю.А., Якимов А.В., Ярмонов Н.А., Нарыгин В.А. О температурном поле в детали при шлифовании композиционными кругами //Теплофизика технологических процессов: Межвед. науч. сб. /Тольяттин. политехн. ин-т. 1976. Вып. 3. С.84-88.

УДК 621.914.25.7:620.179.5

Е.Н.Воронов, А.Н.Волков

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДИСКОВЫХ ФРЕЗ ПРИ ОБРАБОТКЕ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖЛ14Н

Исследована стойкость твердосплавных фрез при дисковом фрезеровании жаропрочного сплава. Проведено сопоставление стойкости инструмента для сборных и составных фрез и различных видов СОЖ, а также получены зависимости стойкости от скорости резания и подачи.

Процесс дискового фрезерования нежестких деталей из жаропрочного сплава ВЖЛ14Н характеризуется малой стойкостью режущего инструмента и низкой производительностью обработки. В связи с требованиями производства основные исследования были направлены на нахождение зависимостей стойкости инструмента от параметров режима резания, определение оптимального режима резания и разработку наиболее производительной конструкции фрезы.

ISSN 5-230-16902-8. Методы обработки авиаматериалов. Самара, 1991
