

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ОПЕРАЦИЯХ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Скуратов Д.Л.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Для решения задачи научно обоснованного определения рациональных условий обработки на операциях круглого наружного и внутреннего шлифования необходимо выбрать целевую функцию, технические ограничения и на их базе разработать математическую модель, позволяющую за счет варьирования управляемых параметров подобрать наиболее приемлемые условия шлифования.

В качестве целевой функции при определении рациональных условий обработки (конструкции и характеристики круга, режима резания, СОТС и т.д.) на вышеуказанных операциях шлифования принимается себестоимость одной операции. При этом переменная доля себестоимости операции при шлифовании одним кругом определяется по формуле [1]

$$C = t_0 E + \frac{t_c}{Q} E + \frac{\mathcal{E}_u}{Q},$$

где t_0 - основное технологическое (машинное) время, мин; E - себестоимость одной минуты работы станка и станочника, руб.; t_c - время, затрачиваемое на правку круга, замену изношенного круга и подналадку станка, мин; $\mathcal{E}_u$ - затраты, связанные с эксплуатацией инструмента за период его стойкости, руб.; Q - количество деталей обработанных за период стойкости, шт.

При правильном построении производственного процесса определение рациональных условий шлифования должно основываться на экономическом периоде стойкости инструмента. При использовании в расчетах экономических периодов стойкости режимы резания, обеспечивающие наименьшее время резания, будут одновременно и наиболее экономичными [2]. Поэтому в качестве целевой функции при круглом наружном и внутреннем шлифовании заготовок целесообразно использовать уравнение, определяющее машинное время обработки.

Исходя из вышеизложенного, уравнение целевой функции будет иметь вид

$$f_{ш} = \frac{l_{ш} A}{n_{\partial} S_{np} S_x}, \quad (1)$$

где A - припуск на обработку (на сторону), мм; $l_{ш}$ - длина пути шлифовального круга в направлении продольной подачи, мм; S_{np} - продольная подача, мм/об; S_x - поперечная подача на один ход стола, мм/ход.

Как известно, большинство деталей авиационной техники работают при высоких давлениях, температурах и знакопеременных нагрузках, в связи с этим к качеству обработки этих деталей предъявляются повышенные требования. Так как в большинстве случаев операции шлифования являются финишными формообразующими методами обработки, то именно на них обеспечиваются заданные геометрические параметры и требуемое состояние поверхностного слоя деталей. Поэтому на операции круглого наружного и внутреннего шлифования должны накладываться технические ограничения, связанные с как техническими возможностями станка, так и требованиями, предъявляемыми к качеству обработки.

Ограничение, связанное со стойкостью шлифовального круга

Наиболее существенными факторами, влияющими на период стойкости шлифовального круга, являются его размеры, конструкция, характеристика, марка обрабатываемого материала и режимы резания [3-6]. Для получения технического ограничения, связанного со стойкостью шлифовального круга при круглом наружном и внутреннем шлифовании, за основу были использованы формулы, приведенные в работе [7]. Уточненные формулы для определения периода стойкости шлифовальных кругов имеют вид:

- для круглого наружного шлифования

$$T = \frac{0,029 D_a^{0,0}}{(\nu_{\partial} S_{\partial} S_x)^2} k_1^T k_2^T k_3^T, \quad (2)$$

- для круглого внутреннего шлифования

$$T = \frac{0,00001 D_{\partial}}{(\nu_{\partial} S_{\partial} S_{2x})^2} k_1^T k_2^T k_3^T, \quad (3)$$

где T - период стойкости шлифовального круга, мин; D_{∂} - диаметр обрабатываемой поверхности заготовки (детали¹), мм; ν_{∂} - скорость вра-

¹ В справочной литературе по абразивной обработке и практике заготовку часто именуют деталью.

щения детали, м/мин; S_∂ - продольная подача в долях высоты круга на один оборот детали; S_x - поперечная подача на один ход стола, мм/ход; S_{2x} - поперечная подача на двойной ход стола, мм/дв.х.; k_1^T - коэффициент, учитывающий влияние марки обрабатываемого материала на период стойкости круга; k_2^T, k_3^T - коэффициенты, учитывающие соответственно влияние размера и конструкции круга на его период стойкости.

Отличие формул (2) и (3) от базовых формул, приведенных в работе [7], заключается в том, что в них введен коэффициент k_3^T . Результаты исследований [6, 8-10] показали, что использование на операциях шлифования абразивных кругов прогрессивных конструкций (прерывистых, композиционных, комбинированных) взамен сплошных, позволяет повысить стойкость инструмента в 1,5...3 раза.

Учитывая, что $S_\partial = \frac{S_{np}}{B_\kappa}$, $S_{2x} = 2S_x$, $v_\partial = \frac{\pi D_\partial n_\partial}{1000}$ - первое техническое ограничение, после соответствующего преобразования и решения формул (2) и (3) относительно $n_\partial S_{np} S_x$, получим в следующем виде:

- для круглого наружного шлифования:

$$n_\partial^2 S_{np}^2 (1000 S_x)^2 \leq \frac{0,029 \cdot 318000^2 B_\kappa^2}{TD_\partial^{1,4}} k_1^T k_2^T k_3^T; \quad (4)$$

- для круглого внутреннего шлифования:

$$n_\partial^2 S_{np}^2 (1000 S_x)^2 \leq \frac{0,00000275 \cdot 318000^2 B_\kappa^2}{TD_\partial} k_1^T k_2^T k_3^T; \quad (5)$$

- в общем виде для круглого наружного и внутреннего шлифования:

$$n_\partial^2 S_{np}^2 (1000 S_x)^2 \leq \frac{C_m \cdot 318000^2 B_\kappa^2}{TD_\partial^{q_m}} k_1^T k_2^T k_3^T, \quad (6)$$

где n_∂ - число оборотов детали, об/мин; S_{np} - продольная подача, мм/об; C_m - коэффициент, характеризующий условия, для которых определялся период стойкости шлифовального круга; B_κ - высота круга, мм; q_m - показатель степени, характеризующий интенсивность влияния диаметра детали на период стойкости круга.

В неравенстве (6) и последующих технических ограничениях для

удобства вычислений принято вместо $S_x \rightarrow 1000S_x$, с соответствующими поправками в правой части.

Ограничение, связанное с мощностью станка

При шлифовании, также как и при других видах механической обработки, проводимой на металлорежущих станках, необходимо, чтобы эффективная мощность $N_{эф}$ не превышала мощности, подводимой к шпинделю шлифовальной бабки станка, то есть выполнялось условие:

$$N_{эф} \leq N_{шп\ шб} \quad (7)$$

где $N_{эф}$ - эффективная мощность, кВт; $N_{шп\ шб}$ - мощность, подводимая к шпинделю шлифовальной бабки станка, кВт.

Для определения эффективной мощности при круглом наружном и внутреннем шлифовании методом продольной подачи за основу могут быть использованы формулы, приведенные в работе [11]. В уточненном и общем виде эти формулы можно представить как

$$N_{эф} = C_N (\nu_\delta S_{шп} S_x)^{0,7} D_\delta^{0,25} B_\kappa^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N \quad (8)$$

где C_N - коэффициент, характеризующий условия обработки, для которых была получена вышеприведенная эмпирическая зависимость; k_1^N, k_2^N, k_3^N - поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно влияние изменения твердости шлифовального круга, марки обрабатываемого материала и конструкции круга на эффективную мощность.

Отличие формулы (8) от базовых формул, приведенных в работе [11], заключается в том, что в формулу (8) введен коэффициент k_3^N . Результаты исследований [6, 8, 12, 13] показали, что использование на операциях шлифования абразивных кругов прогрессивных конструкций (прерывистых, композиционных, комбинированных) взамен сплошных, позволяет уменьшить эффективную мощность шлифования на 20...25%.

Подставив в неравенство (7) формулу (8) и $N_{шп\ шб} = N_{эд\ шб} \eta$, а также учитывая, что $\nu_\delta = \frac{\pi D_\delta n_\delta}{1000}$, после несложного преобразования и решения относительно $n_\delta S_{шп} S_x$ второе техническое ограничение получим в следующем виде:

$$n_d^{0,7} S_{np}^{0,7} (1000 S_x)^{0,7} \leq \frac{318000^{0,7} N_{эд шб} \eta}{C_N D_d^{0,95} B_K^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N} \quad (9)$$

где $N_{эд шб}$ - мощность электродвигателя шлифовальной бабки станка, кВт; η - КПД механизма шлифовальной бабки.

Ограничение, связанное с точностью обработки

Требуемая точность обработки поверхности заготовки обеспечивается условием [14]:

$$\frac{P_y}{j} \leq a \delta, \quad (10)$$

где P_y - радиальная составляющая силы резания, Н; $\frac{1}{j}$ - податливость системы СПИД, мм/Н; δ - допуск на размер обрабатываемой поверхности, мм; a - коэффициент, показывающий, в какую часть допуска должна укладываться погрешность, вызванная деформацией системы СПИД. Для чернового и получистового шлифования при консольном закреплении заготовки $a = 0,1$, а для чистового шлифования соответственно $a = 0,05$. Для чернового, получистового и чистового шлифования при закреплении в центрах или в патроне с поджатием центром задней бабки $a = 0,1 \dots 0,15$ [15]; для расчета по допускаемой форме, допуск на форму цилиндрических поверхностей заготовок $\delta_\phi = 0,3 \delta$, при уровне относительной геометрической точности А (ГОСТ 24643-81).

Податливость системы СПИД может быть определена по формуле

$$\frac{1}{j} = \left(\frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{ст}} + \frac{1}{j_{опр}} \right), \text{ тогда неравенство (10) примет вид}$$

$$P_y \left(\frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{ст}} + \frac{1}{j_{опр}} \right) \leq a \delta, \quad (11)$$

где $\frac{1}{j_{заг}}$, $\frac{1}{j_{ст}}$, $\frac{1}{j_{опр}}$ - податливости соответственно заготовки,

станка и оправки, на которую устанавливается круг при круглом внутреннем шлифовании (или шпинделя внутришлифовальной бабки, при установке круга непосредственно на шпиндель), мм/Н.

Для расчета податливости заготовки и оправки (или шпинделя внутришлифовальной бабки) могут быть использованы следующие зави-

симости:

- для определения податливости заготовки

$$\frac{1}{j_{\text{заг}}} = \frac{L^3}{k_1^J J E},$$

где L - свободная длина заготовки, мм; k_1^J - коэффициент, учитывающий влияние способа закрепления заготовки (при закреплении в патроне $k_1^J = 3$, в центрах - 70, в самозажимном поводковом патроне с поджатием центром задней бабки - 140 [15]); J - момент инерции наиболее опасного сечения заготовки, выбранного с учетом способа закрепления, мм⁴; для сплошного сечения - $J = 0,05D^4$, для кольцевого сечения - $J = 0,05(D^4 - d^4)$; E - модуль упругости материала обрабатываемой заготовки, МПа;

- для определения податливости оправки (или шпинделя внутришлифовальной бабки)

$$\frac{1}{j_{\text{опр}}} = \frac{l_{\text{опр}}^3}{3J_{\text{опр}}E_{\text{опр}}},$$

где $l_{\text{опр}}$ - длина оправки (или вылет шпинделя), мм; $E_{\text{опр}}$ - модуль упругости материала оправки (шпинделя), МПа; $J_{\text{опр}} = 0,05d_{\text{опр}}^4$ - момент инерции поперечного сечения оправки (шпинделя), мм⁴.

При круглом наружном шлифовании заготовок планшайба с кругом без использования каких-либо оправок непосредственно устанавливается на шпиндель шлифовальной бабки, поэтому $\frac{1}{j_{\text{опр}}} = 0$. При круг-

лом внутреннем шлифовании поверхностей заготовок жесткость оправки, как правило, оказывается существенно ниже других компонентов системы СПИД и поэтому определяет величину допустимой подачи, то есть в этом случае можно считать $\frac{1}{j_{\text{заг}}} + \frac{1}{j_{\text{ст}}} = 0$.

При шлифовании большинства материалов различными кругами радиальная составляющая силы резания всегда больше главной состав-

ляющей, а отношение $k_{ш} = \frac{P_y}{P_z}$ чаще всего находится в интервале от 2, 2 до 3,3 [16].

Главную составляющую силы резания можно определить из формулы для определения эффективной мощности при шлифовании [17].

$$P_z = \frac{1000 N_{эф}}{v_k},$$

где P_z - главная составляющая силы резания, Н; v_k - скорость круга, м/с.

Тогда формула для определения радиальной составляющей силы резания будет иметь вид

$$P_y = \frac{1000 N_{эф}}{v_k} k_{ш},$$

где P_y - радиальная составляющая силы резания, Н.

Величину коэффициента $k_{ш}$ можно рассчитать по приближенной формуле [18]

$$k_{ш} = 5 - \frac{50 \rho_z^{0,7}}{v_k^{0,53}},$$

где ρ_z - радиус закругления вершины зерна, мм.

Подставив формулу для определения силы P_y в неравенство (11), а затем в полученное неравенство последовательно формулу (8) и формулу для определения скорости вращения детали v_d , после соответствующего преобразования и решения относительно $n_d S_{np} S_x$ получим третье техническое ограничение:

$$n_d^{0,7} S_{np}^{0,7} (1000 S_x)^{0,7} \leq \frac{318000^{0,7} v_k a \delta}{1000 C_N \left[\frac{1}{J_{анг}} + \frac{1}{J_{см}} + \frac{1}{J_{опр}} \right]} D_d^{0,95} B_k^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N k_{ш} \quad (12)$$

Ограничение, связанное с предельно допустимой шероховатостью обрабатываемой поверхности

При круглом наружном и внутреннем шлифовании с продольной подачей среднее арифметическое отклонение профиля поверхности Ra может быть определено по формуле, полученной на основании анализа и обобщения данных работ [19-22] и собственных исследований автора,

$$Ra = C_{Ra} \left(\frac{v_d}{60v_k} \right)^{0,5} \left(\frac{S_v}{D_k} \right)^{0,25} \left(\frac{S_{sp}}{B_k} \right)^{0,5} k_{обш}^{0,5} d_z^{0,5} n^{m_{ш}} \quad (13)$$

где Ra - среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; $C_{Ra} \cdot m_{Ra}$ - коэффициент и показатель степени, зависящие от марки обрабатываемого материала и вида шлифования; v_k - скорость вращения круга, м/с; D_k - диаметр круга, мм; $k_{обш}$ - коэффициент, учитывающий влияние марки абразивного материала, поверхностной пористости [19] и структуры круга, а также условий его правки на формирование шероховатости поверхности: при обработке сталей и сплавов электрокорундовыми кругами твердостью МЗ...СМ2 и структурой 6...8 $k_{обш}$ можно принимать равным 0,2942, при обработке титановых сплавов кругами из карбида кремния вышеуказанной твердости и структуры $k_{обш}$ можно принимать, соответственно, равным 0,2148; d_z - размер зерна, мм; n - число ходов выхаживания.

После несложного преобразования и решения формулы (13) относительно $n S_{sp} S_v$, учитывая, что $v_d = \frac{\pi D_\delta n_d}{1000}$, четвертое техническое ограничение примет вид:

$$n_d^{0,5} S_{sp}^{0,5} (1000 S_v)^{0,25} \leq \frac{Ra (60 \cdot 1000 v_k B_k)^{0,5} (1000 D_k)^{0,25}}{C_{Ra} (\pi D_\delta k_{обш} d)^{0,5} n^{m_{ш}}} \quad (14)$$

Ограничение, связанное с температурой шлифования

Тепловые явления, сопровождающие процесс шлифования материалов, могут оказывать решающее влияние, как на протекание самого процесса, так и на качество шлифованных поверхностей. Анализ исследований, проведенный многими авторами [17, 22-24 и др.] 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 закономерностей влияния основных параметров теплового процесса на глубину и характер изменений в поверхностном слое. Поэтому при решении задач, связанных с определением рациональных условий резания, использование в качестве технического ограничения максимальной температуры в зоне контакта круга с деталью, которая не должна превосходить критических точек температурных аллотропических изменений A_1 и A_{C_1} , воз-

можно лишь в первом приближении. С целью определения возможности появления структурно-фазовых превращений при шлифовании детали необходимо после определения рациональных условий шлифования (конструкции и характеристики круга, режима резания и т.д.) исследовать кинетику теплового процесса и, используя метастабильную диаграмму состояния обрабатываемого материала, сделать соответствующее заключение.

Исходя из вышесказанного, должно выполняться условие

$$\theta_{\max} \leq \theta_{кр} \quad (15)$$

где $\theta_{\max}$ и $\theta_{кр}$ - соответственно максимальная и критическая температуры в зоне контакта круга с деталью, °С.

Максимальную температуру в зоне контакта круга с деталью можно определить по формуле

$$\theta_{\max} = \theta_0 + \Delta\theta_{\max} \quad (16)$$

где θ_0 - начальная температура поверхности детали, °С; $\Delta\theta_{\max}$ - максимальное приращение температуры поверхности детали в зоне контакта за счет тепла, поступающего в деталь при шлифовании, °С.

Подставив формулу (16) в неравенство (15), получим техническое ограничение, связанное с температурой шлифования:

$$\Delta\theta_{\max} \leq \theta_{кр} - \theta_0 \quad (17)$$

Максимальное приращение температуры поверхности детали в зоне контакта можно определить по формуле, приведенной в работе [17]:

$$\Delta\theta_{\max} = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{\frac{aL_k}{\pi v_d}} \quad (18)$$

где q - плотность теплового потока, Вт/м²; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); a - коэффициент температуропроводности, м²/с; L_k - длина дуги контакта круга с заготовкой (деталью), м; v_d - скорость детали, м/с.

Независимо от используемой системы единиц физических величин (СИ или МКС) числовое значение приращения температуры одинаково, так как по размеру градус Цельсия равен градусу Кельвина. При шлифовании деталей плотность теплового потока может быть определена по следующей формуле:

$$q = \frac{N_{эф}}{F_k} k_Q = \frac{N_{эф}}{L_k \cdot B_k} k_Q, \quad (19)$$

где q - плотность теплового потока, Вт/м²; $N_{эф}$ - эффективная мощность, Вт; F_k - площадь контакта круга с заготовкой, м²; L_k - длина дуги контакта круга и детали, м; B_k - высота шлифовального круга, м; k_Q - коэффициент, показывающий, какая доля выделившейся при шлифовании тепловой мощности поступила в деталь.

Учитывая, что мощность резания подсчитывается по эмпирической формуле (8), в которой значения D_d, B_k задаются в мм, то в формулах (18) и (19) значения L_k и B_k также целесообразно задавать в мм, введя соответствующие переводные коэффициенты. Тогда формула (18) после подстановки в нее формул (19) и (8) с учетом, что $v_d = \frac{\pi D_d n_d}{60 \cdot 1000}$, после преобразования примет вид

$$\Delta\theta = \frac{8,729 \cdot 10^7 C_N D_d^{0,45} n_d^{0,2} S_{np}^{0,7} S_x^{0,7} a^{0,5} k_Q k_1^N k_2^N k_3^\theta}{\lambda B_k^{0,75} L_k^{0,5}}, \quad (20)$$

где k_3^θ - коэффициент, учитывающий влияние конструкции шлифовального круга на приращение температуры в зоне контакта круга с деталью.

При шлифовании деталей кругами с прерывистой режущей поверхностью происходит существенное снижение максимальной температуры в зоне контакта по сравнению с температурой, имеющей место при шлифовании сплошными кругами. Это обусловлено, во-первых, уменьшением эффективной мощности затрачиваемой на процесс резания, во-вторых, периодическим прерыванием поступающего в деталь теплового потока и, в-третьих, отводом тепла из зоны резания смазывающе-охлаждающими элементами композиционных и комбинированных кругов благодаря их высокой теплопроводности. Как видно, в формуле (20) отсутствует коэффициент k_3^N (см. формулу 8), его влияние на снижение температуры учитывает коэффициент k_3^θ .

Подставив формулу (20) в неравенство (17), предварительно выразив L_k для наружного и внутреннего шлифования по формулам Маслова Е.Н. [14], после соответствующего преобразования и решения относительно $n_d S_{np} S_x$ получим пятое техническое ограничение:

- для круглого наружного шлифования

$$n_{\delta}^{0,2} S_{np}^{0,7} (1000 S_x)^{0,45} \leq \frac{1,2328 \cdot 10^{-6} (\theta_{кр} - \theta_0) \lambda B_{\kappa}^{0,75} D_{\kappa}^{0,25}}{D_{\delta}^{0,2} a^{0,5} (D_{\kappa} + D_{\delta})^{0,25} k_Q k_1^N k_2^N k_3^{\theta}}; \quad (21)$$

- для круглого внутреннего шлифования

$$n_{\delta}^{0,2} S_{np}^{0,7} (1000 S_x)^{0,45} \leq \frac{1,1105 \cdot 10^{-6} (\theta_{кр} - \theta_0) \lambda B_{\kappa}^{0,75} D_{\kappa}^{0,25}}{D_{\delta}^{0,2} a^{0,5} (D_{\delta} - D_{\kappa})^{0,25} k_Q k_1^N k_2^N k_3^{\theta}}. \quad (22)$$

В общем виде для круглого наружного и внутреннего шлифования пятое техническое ограничение можно представить как

$$n_{\delta}^{0,2} S_{np}^{0,7} (1000 S_x)^{0,45} \leq \frac{C_{\theta} (\theta_{кр} - \theta_0) \lambda B_{\kappa}^{0,75} D_{\kappa}^{0,25}}{D_{\delta}^{0,2} a^{0,5} k_Q k_1^N k_2^N k_3^{\theta}}, \quad (23)$$

где для круглого наружного шлифования $C_{\theta} = \frac{1,2328 \cdot 10^{-6}}{(D_{\kappa} + D_{\delta})^{0,25}}$, а для

круглого внутреннего $C_{\theta} = \frac{1,1105 \cdot 10^{-6}}{(D_{\delta} - D_{\kappa})^{0,25}}$.

Ограничения, связанные с кинематическими возможностями шлифовального станка

При круглом наружном и внутреннем шлифовании заготовки частота ее вращения, продольная и поперечная подачи должны быть ограничены соответственно наибольшим и наименьшим числом оборотов шпинделя (планшайбы) передней бабки, наибольшей и наименьшей продольной и поперечной подачами, приведенными в паспорте станка. Тогда технические ограничения, обусловленные кинематическими возможностями станка, будут иметь вид:

- шестое техническое ограничение:

$$n \geq n_{cm \min}, \quad (24)$$

где $n_{cm \min}$ - минимальная частота вращения шпинделя (планшайбы) передней бабки станка, об/мин;

- седьмое техническое ограничение:

$$n \leq n_{cm \max}, \quad (25)$$

где $n_{cm \max}$ - максимальная частота вращения шпинделя (планшайбы) передней бабки станка, об/мин;

- восьмое техническое ограничение:

$$S_{np} \geq S_{np \text{ см min}}, \quad (26)$$

где $S_{np \text{ см min}}$ - минимальная продольная подача станка, мм/об;

- девятое техническое ограничение:

$$S_{np} \leq S_{np \text{ ст max}} \quad (27)$$

где $S_{np \text{ ст max}}$ - максимальная продольная подача станка, мм/об;

- десятое техническое ограничение:

$$1000S_x \geq 1000S_{x \text{ ст min}} \quad (28)$$

где $S_{x \text{ ст min}}$ - минимальная поперечная подача станка, мм/ход;

- одиннадцатое техническое ограничение:

$$1000S_v \leq 1000S_{v \text{ ст max}} \quad (29)$$

где $S_{v \text{ ст max}}$ - максимальная поперечная подача станка, мм/ход.

Преобразуем полученные выше неравенства, связывающие технические ограничения с элементами режима резания, а также целевую функцию в линейные ограничения-неравенства и линейную целевую функцию. Решение полученной системы линейных уравнений при заданных определяющих и управляемых параметрах позволит на стадии проектирования технологического процесса определить рациональные условия обработки на операциях круглого шлифования.

Для получения системы линейных ограничений-неравенств и линейной целевой функции, моделирующих процессы круглого наружного и внутреннего шлифования методом продольной подачи, прологарифмируем зависимости (6), (9), (12), (14), (23)-(29) и (1), которые после введения обозначений будут иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{ll} 2x_1 + 2x_2 + 2x_3 \leq b_1 \\ 0,7x_1 + 0,7x_2 + 0,7x_3 \leq b_2 \\ 0,7x_1 + 0,7x_2 + 0,7x_3 \leq b_3 \\ 0,5x_1 + 0,5x_2 + 0,25x_3 \leq b_4 \\ 0,2x_1 + 0,7x_2 + 0,45x_3 \leq b_5 \\ x_1 \geq b_6 \\ x_1 \leq b_7 \\ x_2 \geq b_8 \\ x_2 \leq b_9 \\ x_3 \geq b_{10} \\ x_3 \leq b_{11} \end{array} \right. \quad (30)$$

$$f_0 = c_0 - x_1 - x_2 - x_3.$$

где $x_1 = \ln n_j$; $x_2 = \ln S_n$; $x_3 = \ln(1000 S_x)$;

$$b_1 = \ln \frac{C_m \cdot 318000^2 B_K^2}{TD_{\partial}^{q_m}} k_1^T k_2^T k_3^T ;$$

$$b_2 = \ln \frac{318000^{0,7} N_{\partial} \eta}{C_N D_{\partial}^{0,95} B_K^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N} ;$$

$$b_3 = \ln \frac{318000^{0,7} \nu_a \delta}{1000 C_N \left(\frac{1}{j_{зас}} + \frac{1}{j_{см}} + \frac{1}{j_{онр}} \right) D_{\partial}^{0,95} B_K^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N k_{ш}} ;$$

$$b_4 = \ln \frac{Ra (60 \cdot 1000 \nu_K B_K)^{0,5} (1000 D_K)^{0,25}}{C_{Ra} (\pi D_{\partial} k_{общ} d)^{0,5} n^{m_{ш}}} ;$$

$$b_5 = \ln \frac{C_{\theta} (\theta_{кр} - \theta_0) \lambda B_K^{0,75} D_K^{0,25}}{D_{\partial}^{0,2} a^{0,5} k_Q k_1^N k_2^N k_3^{\theta}} ;$$

$$b_6 = \ln n_{см\text{ мин}} ; \quad b_7 = \ln n_{см\text{ макс}} ; \quad b_8 = \ln S_{нр\text{ см мин}} ;$$

$$b_9 = \ln S_{нр\text{ см макс}} ; \quad b_{10} = \ln 1000 S_{x\text{ см мин}} ; \quad b_{11} = \ln 1000 S_{x\text{ см макс}} ;$$

$$f_0 = \ln f_{ш} ; \quad c_0 = \ln(1000 l_{ш} A) .$$

Полученная система линейных ограничений-неравенств (30) и линейная функция f_0 представляют собой математическую модель для определения рациональных условий обработки на операциях круглого наружного и внутреннего шлифования методом продольной подачи одним шлифовальным кругом.

Решение задачи может быть упрощено за счет приведения системы (30) с тремя неизвестными к системе с двумя неизвестными, в результате чего аналитическое и графическое решение задачи осуществляется в двухмерном пространстве. Для проведения преобразований выразим x_1 из ограничения-неравенства, связанного с температурой шлифования

$$x_1 = 5b_5 - 3,5x_2 - 2,25x_3 ,$$

и подставим его значение во все остальные неравенства системы (30). Выбор этого ограничения-неравенства обусловлен тем, что именно тем-

пература при шлифовании наиболее часто является основным ограничивающим фактором. В результате получим новую систему, содержащую два неизвестных x_2 и x_3

$$\left\{ \begin{array}{l} -5x_2 - 3x_3 \leq b_1 - 10b_5 \\ -1,75x_2 - 0,875x_3 \leq b_2 - 3,5b_5 \\ -1,75x_2 - 0,875x_3 \leq b_3 - 3,5b_5 \\ -1,25x_2 - 0,875x_3 \leq b_4 - 2,5b_5 \\ -3,5x_2 - 2,25x_3 \geq b_6 - 5b_5 \\ -3,5x_2 - 2,25x_3 \leq b_7 - 5b_5 \\ x_2 \geq b_8 \\ x_2 \leq b_9 \\ x_3 \geq b_{10} \\ x_3 \leq b_{11} \end{array} \right. \quad (31)$$

$$f_0 = c_0 - 5b_5 + 2,5x_2 + 1,25x_3.$$

Так как в условиях конкретной задачи $c_0 - 5b_5$ является величиной постоянной, то f_0 достигнет минимального значения в том случае, когда примут минимально допустимые значения неизвестные x_2 и x_3 , удовлетворяющие системе ограничений (31).

На основании полученной математической модели созданы алгоритм и программа расчета для определения рациональных условий резания при круглом наружном и внутреннем шлифовании заготовок.

Список литературы

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
2. Горанский Г.К. Расчет режимов резания при помощи электронно-вычислительных машин. Минск: Госиздательство БССР, 1963. 192 с.
3. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, 1979. 248 с.
4. Филимонов Л.Н. Плоское шлифование. Л.: Машиностроение, 1985. 109 с.
5. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. Л.: Машино-

- строение, 1973. 134 с.
6. Скуратов Д.Л. Повышение эффективности внутреннего круглого шлифования кругами с прерывистой режущей поверхностью деталей авиационных ГТД из жаропрочных, высокопрочных сталей и титановых сплавов: Дис. ... канд. техн. наук. Самара, 1991. 274 с.
 7. ЦБПНТ. Общемашиностроительные нормативы режимов резания и времени для технического нормирования работ на шлифовальных станках. Серийное производство. М.: Машгиз, 1959. 196 с.
 8. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. М.: Машиностроение, 1975. 176 с.
 9. Скуратов Д.Л. Внутреннее шлифование стали 12Х2Н4А составными композиционными кругами // Методы повышения эффективности использования режущих инструментов при обработке деталей летательных аппаратов и двигателей: Сб. науч. тр.; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1986. С. 61-66.
 10. Скуратов Д.Л., Трусов В.Н. Внутреннее круглое шлифование длинномерных деталей ГТД из жаропрочной стали 15Х12Н2МВФАБ-Ш составными композиционными кругами // Совершенствование технологии изготовления деталей в авиастроении: Межвуз. сб. науч. тр.; Самарск. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1996. С. 133-137.
 11. Справочник инструментальщика /И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; Под общ. ред. И.А. Ординарцева. Л.: Машиностроение, 1987. 846 с.
 12. Исследование внутреннего круглого шлифования жаропрочной стали ЭП517-Ш абразивными кругами с прерывистой рабочей поверхностью // Прогрессивные инструменты и методы обработки резанием авиационных материалов: Межвуз. сб. науч. тр.; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев. 1989. С. 20-25.
 13. Создание процесса бесприжоговой абразивной обработки профиля лопаток из титановых сплавов и деталей ГТД из жаропрочных сплавов на никелевой основе с целью повышения их прочности, надежности: Отчет о НИР (промежуточ.) / Самарский гос. аэрокосм. ун-т. (СГАУ); Руководитель Трусов В.Н. – тема 156-3; № гр. У56447; инв. № Г03872. – Куйбышев, 1980. 86 с.
 14. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
 15. Носов Н.В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулирования их функциональных показателей: Дис. ... док. техн. наук. Самара, 1997. 452 с.
 16. Попов С.А. Шлифовальные работы. М.: Высшая школа, 1987. 383 с.
 17. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление

- качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.
18. Богомолов Н.И. Исследование прочности абразивных зерен в процессе микрорезания // Заводская лаборатория. 1966. №3. С. 353-354.
 19. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 144 с.
 20. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.
 21. Шлифование легированных и жаропрочных сталей / В.Ф. Совкин, Е.В. Быков, А.М. Бударин и др.; Под ред. В.Ф. Совкина Куйбышев. Куйбышев. кн. изд-во, 1968. 160 с.
 22. Ящерицын П.И., Цокур А.К., Еременко М.Л. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. Минск: Наука и техника, 1973. 184 с.
 23. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 128 с.
 24. Урывский Ф.П. Влияние параметров термического цикла на формирование свойств поверхностного слоя при шлифовании титановых сплавов и закаленных сталей // Высокоэффективные методы механической обработки жаропрочных и титановых сплавов: Межвуз. сб.; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1981. С. 71-78.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОБЪЕМНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ

Газизуллин Р.М., Юнусов Ф.С., Газизуллин К.М.

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева,
г. Казань

В настоящее время наметилась тенденция создания на базе вибростанков автоматизированных модулей и комплексов, входящих в единую производственную систему предприятия. Пока это относится к станкам с плоскостной и объемной вибрацией контейнера.

Недостаточно развиты системы по контролю и управлению технологическим процессом обработки. Отсутствуют автоматизированные системы контроля и управления, выполненные на базе современных электронных приборов и устройств.

Необходим дальнейший анализ возможных дефектов, возникаю-