

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА НА СТАНКАХ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ СТОЛОМ

© 2018 Д.Л. Скуратов, Д.Г. Федоров, А.А. Пластинин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 23.05.2018

Представлена математическая модель для определения рациональные условия обработки на операциях плоского шлифования периферией круга на станках с прямоугольным столом, состоящая из линейной целевой функции и линейных ограничений-неравенств. В качестве целевой функции использовано уравнение, определяющее основное время обработки, а в качестве ограничений-неравенств – ограничения, связанные с функциональными параметрами и параметрами, определяющими качество обработки и кинематические возможности станка.

Ключевые слова: плоское шлифование периферией круга, математическая модель, целевая функция, технические ограничения, определение рациональных условий обработки.

ВВЕДЕНИЕ

Шлифование – прогрессивный и универсальный метод окончательного формообразования различных поверхностей деталей, к которым предъявляются высокие требования к качеству обработки. Одним из распространенных видов шлифования является плоское шлифование, которое может осуществляться периферией и торцом круга. При этом наилучшие показатели качества обработки обеспечиваются при шлифовании периферией круга [23].

Как показал анализ литературных источников, известны математические модели, позволяющие определить рациональные условия обработки при круглом наружном [13, 18, 27] и внутреннем [18] шлифовании. Применительно к процессу плоского шлифования известны зависимости, связывающие параметры режима плоского шлифования с параметрами шероховатости поверхности, приведенные, например, в работе [20], что позволяет, исходя из требуемой величины шероховатости поверхности, определить параметры режима резания. Известна также зависимость, связывающая изменение износостойкости поверхностного слоя детали с интенсивностью деформаций материала при обработке, режимами шлифования и характеристикой абразивного инструмента [2]. Из математических моделей для определения

рациональных условий обработки при плоском шлифовании можно выделить модель, представленную в работе [12], в которой в качестве целевой функции выбрана производительность обработки, а в качестве технических ограничений-неравенств – ограничения связанные с составляющими силы резания P_z , P_y , шероховатостью поверхности и отклонением от плоскостности. Представляют также интерес алгоритмы выбора оптимальных режимов плоского шлифования и оптимизации процесса обработки деталей эластичными кругами, представленные соответственно в работах [11] и [6], а также методология выбора режимов шлифования, изложенная в работе [10].

В данной работе представлена математическая модель, предназначенная для определения рациональных условий обработки на операциях плоского шлифования периферией круга на станках с прямоугольным крестовым столом и включающая линейную целевую функцию и линейные ограничения-неравенства. В этой модели в качестве целевой функции выбрано машинное время обработки, а в качестве ограничений-неравенств использованы: ограничение, связанное со стойкостью круга, а также ограничения, связанные как с функциональными параметрами процесса резания (эффективной мощностью, температурой), так и с параметрами, определяющими качество обработки (точностью, шероховатостью поверхности) и кинематические возможности станка.

ВЫБОР ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Выбор целевой функции. Как отмечено в работе [5], режимы резания, рассчитанные с использованием экономических периодов

Скуратов Дмитрий Леонидович, доктор технических наук, профессор кафедры технологий производства двигателей. E-mail: skuratov-sdl56@ya.ru

Федоров Дмитрий Геннадьевич, аспирант кафедры технологий производства двигателей.

E-mail: dmitriy.fedorov@ssau.ru

Пластинин Александр Алексеевич, магистрант кафедры технологий производства двигателей.

E-mail: makedonsqi@mail.ru

стойкости инструментов и обеспечивающие наименьшее время формообразования, будут одновременно и наиболее экономичными. Поэтому в качестве целевой функции при плоском шлифовании с учётом рекомендаций, приведенных в работе [18], целесообразно использовать уравнение, определяющее основное (машинное) время обработки и имеющее вид [24]:

$$t_o = \frac{1,1L_{uu}B_{uu}\Delta}{1000v_{\partial}S_{\partial}B_{\kappa}S_{t_x}q_{\partial}}, \quad (1)$$

где L_{uu} – длина шлифования или габаритная длина расположения шлифуемых поверхностей на столе станка, мм; B_{uu} – ширина шлифования или габаритная ширина расположения шлифуемых поверхностей на столе станка, мм; Δ – припуск на шлифование на сторону; v_{∂} – скорость движения (продольная) стола шлифовального станка, м/мин; S_{∂} – поперечная подача в долях высоты шлифовального круга; B_{κ} – высота круга, мм; S_{t_x} – подача на глубину на один ход стола, мм/ход; q_{∂} – количество одновременно обрабатываемых деталей, шт.

Если учесть, что $S_{\partial} = \frac{S_x}{B_{\kappa}}$, где S_x – поперечная подача на один ход стола, мм/ход, то уравнение (1) примет вид:

$$t_o = \frac{1,1L_{uu}B_{uu}\Delta}{1000v_{\partial}S_xS_{t_x}q_{\partial}}. \quad (2)$$

Ограничение, связанное со стойкостью шлифовального круга. Для получения технического ограничения, связанного со стойкостью инструмента при плоском шлифовании периферией круга, за основу была использована формула, приведенная в работе [24], которая не учитывает влияние конструкции круга на период стойкости. Уточненная формула для определения периода стойкости шлифовального круга имеет следующий вид:

$$T_{\kappa} = \frac{0,35}{(v_{\partial}S_{\partial}S_{t_x})^2} k_1^T k_2^T k_3^T, \quad (3)$$

где T_{κ} – период стойкости шлифовального круга, мин; k_1^T – коэффициент, учитывающий влияние физико-механических свойств группы сталей и сплавов, к которой относится обрабатываемый материал, на период стойкости круга; k_2^T, k_3^T – коэффициенты, учитывающие соответственно влияние геометрических размеров и конструкции круга на его период стойкости.

Отличие формулы (3) от базовой формулы, представленной в работе [24], заключается в том, что в неё введен коэффициент k_3^T . Анализ результатов исследований, приведенных в работах [18, 26], показал, что период стойкости абразивных кругов с прерывистой рабочей поверхностью (прерывистых, композиционных,

комбинированных) примерно в 1,5...3 раза выше периода стойкости кругов со сплошной режущей поверхностью. Поэтому коэффициент k_3^T для сплошных кругов можно принять равным 1, для прерывистых кругов – 2 и для композиционных и комбинированных кругов – 2,5.

Если учесть, что $S_{\partial} = \frac{S_x}{B_{\kappa}}$, то первое техни-

ческое ограничение, после соответствующего преобразования формулы (3) и решения относительно $v_{\partial}S_xS_{t_x}$, будет иметь вид:

$$v_{\partial}^2(10S_x)^2(1000S_{t_x})^2 \leq \frac{0,35 \cdot 10^8 B_{\kappa}^2}{T_{\kappa}} k_1^T k_2^T k_3^T. \quad (4)$$

В неравенстве (4) и последующих технических ограничениях для удобства расчетов принято вместо $S_x \rightarrow 10S_x$, а вместо $S_{t_x} \rightarrow 1000S_{t_x}$, с соответствующими поправками в правой части.

Ограничение, связанное с мощностью станка. При плоском шлифовании необходимо, чтобы эффективная мощность $N_{эф}$, затрачиваемая на процесс резания, не превышала мощности, подводимой к шпинделю плоскошлифовального станка, то есть выполнялось условие:

$$N_{эф} \leq N_{unn}, \quad (5)$$

где $N_{эф}$ – эффективная мощность резания, кВт; N_{unn} – мощность, подводимая к шпинделю плоскошлифовального станка, кВт.

Для определения эффективной мощности при плоском шлифовании периферией круга на станке с прямоугольным столом за основу взята формула, приведенные в работе [24]. В уточненном виде эту формулу можно представить как

$$N_{эф} = 0,63(v_{\partial}S_xS_{t_x})^{0,7} B_{\kappa}^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N, \quad (6)$$

где k_1^N, k_2^N, k_3^N – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние соответственно изменения твердости шлифовального круга, физико-механических свойств группы сталей и сплавов, к которой относится обрабатываемый материал, и конструкции круга на эффективную мощность.

Отличие уточненной формулы (6) от базовой формулы, приведенной в работе [24], состоит в том, что в формулу (6) введен коэффициент k_3^N . Результаты исследований, представленные в работах [17-19, 26], показали, что использование на операциях шлифования абразивных кругов специальных конструкций с прерывистой режущей поверхностью (прерывистых, композиционных, комбинированных [18]) взамен сплошных позволяет уменьшить эффективную мощность шлифования примерно на 20...25%. Поэтому, исходя из ранее изложенного, коэффициент k_3^N для сплошных кругов следует принять равным 1, для прерывистых и комбинированных кругов – 0,75-0,85 и для композиционных кругов – 0,7-0,8.

Подставив в неравенство (5) формулу (6) и $N_{шп} = N_{эд, шп} \eta$, после преобразования и решения относительно $v_0 S_x S_{t_x}$ второе техническое ограничение получим в следующем виде:

$$v_0^{0,7} (10S_x)^{0,7} (1000S_{t_x})^{0,7} \leq \frac{10^{2,8} \cdot N_{эд, шп} \eta}{0,63 B_k^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N}, \quad (7)$$

где $N_{эд, шп}$ – мощность электродвигателя шпинделя плоскошлифовального станка, кВт; η – КПД кинематической цепи механизма главного движения.

Ограничение, связанное со среднеконтактной температурой шлифования. При шлифовании выделяется значительное количество теплоты, что обусловлено большими скоростями резания. Анализ результатов исследований, представленных в работах [7, 16, 21, 27 и др.], показывает, что состояние поверхностного слоя шлифованных деталей определяется не только среднеконтактной температурой, которая имела место в процессе обработки, а всем пространственно-временным температурным полем. В связи с этим введение в математическую модель для определения рациональных условий обработки при плоском шлифовании технического ограничения по температуре, в качестве которой в первом приближении может использоваться температура, соответствующая точке A_{C_1} – аллотропического изменения материала, является обязательным, но не достаточным условием. Нахождение области рациональных условий обработки, исключающих возможность возникновения структурных и фазовых превращений в поверхностном слое шлифованных заготовок, предполагает использование как результатов исследования кинетики тепловых процессов, так метастабильных диаграмм состояния материалов.

Исходя из ранее изложенного, должно выполняться условие

$$\theta_{max} \leq \theta_{кр}, \quad (8)$$

где θ_{max} и $\theta_{кр}$ – соответственно максимальная среднеконтактная и критическая температуры в зоне резания, °С.

Максимальную среднеконтактную температуру можно определить по формуле

$$\theta_{max} = \theta_0 + \Delta\theta_{max}, \quad (9)$$

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

После подстановки в неравенство (8) формулы (9), получим техническое ограничение, связанное с температурой шлифования:

$$\Delta\theta_{max} \leq \theta_{кр} - \theta_0. \quad (10)$$

Максимальное приращение температуры поверхности заготовки в зоне контакта определим по формуле, приведенной в работе Сипайлова В.А. [16], которая имеет вид:

$$\Delta\theta_{max} = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{\frac{aL_k}{\pi v_0}}, \quad (11)$$

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_0 – скорость движения (продольная) стола шлифовального станка, м/с.

Плотность теплового потока при шлифовании заготовок, в частности плоском периферией круга, может быть определена по следующей формуле:

$$q = \frac{N_{эф}}{F_k} k_Q = \frac{N_{эф}}{L_k \cdot B_k} k_Q, \quad (12)$$

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 заготовки, м; B_k – высота шлифовального круга, м; k_Q – коэффициент, показывающий, какая доля выделившейся при шлифовании тепловой мощности поступила в заготовку.

В условиях плоского шлифования заготовок периферией круга значения коэффициента k_Q следует принимать равными: 0,88 – при обработке коррозионно-стойких, жаростойких и жаропрочных сталей, 0,85 – при резании жаростойких и жаропрочных сплавов на никелевой основе и 0,86 – при обработке титановых сплавов.

В формуле (12) эффективная мощность, затрачиваемая на процесс шлифования, рассчитывается по эмпирической зависимости (6), в которой значения параметров B_k и v_0 задаются соответственно в мм и м/мин, поэтому в формулах (11) и (12) значения L_k , B_k и v_0 также следует задавать в мм и м/мин, введя соответствующие переводные коэффициенты. Тогда формула (11) после подстановки в нее формул (12) и (6), с учетом того, что $L_k = \sqrt{D_k S_{t_x}}$ (где D_k – диаметр шлифовального круга, мм), примет вид:

$$\Delta\theta = \frac{5,508 \cdot 10^{7,5} v_0^{0,2} S_x^{0,7} S_{t_x}^{0,7} a^{0,5} k_Q k_1^N k_2^N k_3^\theta}{\lambda B_k^{0,75} D_k^{0,25}}. \quad (13)$$

При плоском шлифовании заготовок кругами с прерывистой режущей поверхностью, также как и при других видах шлифования данными абразивными инструментами, наблюдается существенное снижение среднеконтактной температуры в зоне резания по сравнению со среднеконтактной температурой, имеющей место при шлифовании кругами со сплошной рабочей поверхностью [18]. Влияние конструкции круга

на среднеконтактную температуру оценивается посредством коэффициента k_3^θ (см. формулу 13). Данный коэффициент введен в формулу (13) вместо коэффициента k_3^N (см. формулу 6), так как он более корректно учитывает факторы, влияющие на снижение температуры. Средние значения коэффициента k_3^θ , полученные на основе обобщения результатов исследований, приведенных в работах [1, 9, 18, 22, 25] для случая шлифования заготовок кругами различных конструкций твердостью J...L с применением СОЖ, подаваемой свободно падающей струей, равны: 1 – для сплошных кругов, 0,75-0,85 – для прерывистых и комбинированных кругов и 0,6-0,7 – для композиционных кругов.

Подставив формулу (13) в неравенство (10), после соответствующего преобразования и решения относительно $v_d S_x S_{t_x}$ получим третье техническое ограничение:

$$v_d^{0,2} (10S_x)^{0,7} (1000S_{t_x})^{0,45} \leq \frac{0,1816 \cdot 10^{-5,45} \lambda B_k^{0,75} D_k^{0,25} (\theta_{кр} - \theta_0)}{a^{0,5} K_Q K_1^N K_2^N K_3^\theta}. \quad (14)$$

Ограничение, связанное с точностью обработки. Для обработки заданной поверхности заготовки с погрешностью, не превышающей допуск на получаемый размер, можно воспользоваться зависимостью, представленной в работе [15]:

$$S_{t_x} = C_S \frac{D_k \Delta^{0,32}}{v_d S_x T^{0,75}} K_H K_B K_l K_D K_\delta K_M, \quad (15)$$

где C_S – коэффициент для определения величины подачи; Δ – припуск на обработку при шлифовании, мм; K_H – коэффициент, учитывающий толщину детали; K_B – коэффициент, учитывающий ширину детали; K_l – коэффициент, учитывающий длину детали; K_D – коэффициент, учитывающий диаметр шлифовального круга детали; K_δ – коэффициент, учитывающий точность (кавалитет) обработки; K_M – коэффициент, учитывающий группу сталей и сплавов, к которой относится обрабатываемый материал.

Значения коэффициентов $C_S, K_H, K_B, K_l, K_D, K_\delta, K_M$ приведены в работе [15].

После решения зависимости (15) относительно $v_d S_x S_{t_x}$ получим четвертое техническое ограничение

$$v_d (10S_x)(1000S_{t_x}) \leq \frac{C_S D_k \Delta^{0,32} \cdot 10^4}{T^{0,75}} K_H K_B K_l K_D K_\delta K_M. \quad (16)$$

Ограничение, связанное с предельно допустимой шероховатостью обрабатываемой поверхности. При плоском шлифовании периферией круга среднее арифметическое отклонение профиля поверхности Ra может быть опре-

делено по формуле, приведенной в работе [18] и адаптированной применительно к процессу плоского шлифования

$$Ra = C_{Ra} \left(\frac{v_d}{60v_k} \right)^{0,5} \left(\frac{S_{t_x}}{D_k} \right)^{0,25} \times \left(\frac{S_x}{B_k} \right)^{0,5} k_{общ}^{0,5} k_{Ra} d_{зеп}^{0,5} n^{m_{Ra}}, \quad (17)$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; C_{Ra}, m_{Ra} – коэффициент и показатель степени, зависящие от группы, к которой принадлежит обрабатываемый материал; D_k – диаметр круга, применяемого при шлифовании, мм; $k_{общ}$ – коэффициент, учитывающий влияние марки абразивного материала, поверхностной пористости [14] и структуры круга, а также условий его правки на формирование шероховатости поверхности; при обработке сталей и сплавов кругами из электрокорунда твердостью J...L и структурой 6...8 $k_{общ}$ можно принять равным 0,2942, а при обработке титановых сплавов кругами из карбида кремния (черного или зелёного) вышеуказанной твердости и структуры $k_{общ}$ можно принять, соответственно, равным 0,2148; k_{Ra} – коэффициент, учитывающий влияние конструкции круга на шероховатость поверхности, значение которого равно: 1 – для сплошных кругов, 1,15 – для прерывистых и комбинированных кругов и 1,25 – для композиционных кругов; $d_{зеп}$ – размер зерна, мм; n – число ходов выхаживания.

После несложного преобразования и выражения зависимости (17) относительно $v_d S_x S_{t_x}$ пятое техническое ограничение примет следующий вид:

$$v_d^{0,5} (10S_x)^{0,5} (1000S_{t_x})^{0,25} \leq \frac{Ra (60 \cdot 10 v_k B_k)^{0,5} (1000 D_k)^{0,25}}{C_{Ra} (k_{общ} d_{зеп})^{0,5} k_{Ra} n^{m_{Ra}}}. \quad (18)$$

Ограничения, связанные с кинематическими возможностями станка. При плоском шлифовании периферией круга на станках с прямоугольным столом скорость движения стола, поперечная подача на один ход стола и подача на глубину на один ход стола должны быть ограничены, соответственно, наибольшей и наименьшей скоростью движения стола, а также наибольшей и наименьшей поперечными подачами и подачами на глубину, приведенными в паспорте станка. Тогда технические ограничения, обусловленные кинематическими возможностями станка, будут иметь вид:

$$v_d \geq v_{d.cm \min}, \quad (19)$$

где $v_{d.cm \min}$ – минимальная скорость движения стола станка, м/мин;

$$v_d \leq v_{d.cm \max}, \quad (20)$$

где $v_{d.cm \max}$ – максимальная скорость движения стола станка, м/мин;

$$10S_x \geq 10S_{x\,cm\,min}, \quad (21)$$

где $S_{x\,cm\,min}$ – минимальная поперечная подача станка, мм/ход;

$$10S_x \leq 10S_{x\,cm\,max}, \quad (22)$$

где $S_{x\,cm\,max}$ – максимальная поперечная подача станка, мм/ход;

$$1000S_{t_x} \geq 1000S_{t_x\,cm\,min}, \quad (23)$$

где $S_{t_x\,cm\,min}$ – минимальная подача на глубину станка, мм/ход;

$$1000S_{t_x} \leq 1000S_{t_x\,cm\,max}, \quad (24)$$

где $S_{t_x\,cm\,max}$ – максимальная подача на глубину станка, мм/ход.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Представленные ранее целевая функция и технические ограничения позволяют с определенной степенью точности описать процесс резания заготовок абразивным инструментом и построить математическую модель для определения рациональных условий обработки на операциях плоского шлифования заготовок периферией круга на станках с прямоугольным столом. Учитывая то, что целевая функция и технические ограничения могут быть приведены к линейному виду, то, следовательно, математическая модель также может быть получена в виде линейной (целевой) функции и системы линейных ограничений-неравенств, решаемых методом линейного программирования [3-5, 8]. В том случае, если уравнения целевой функции и технических ограничений или хотя бы одно из них будет представлять собой полином n -го порядка, то решение задачи будет осуществляться итерационными (поисковыми) методами.

Математическую модель для процесса плоского шлифования можно также представить в графическом виде. В этом случае каждое техническое ограничение-неравенство представляется граничной прямой, которая определяет полуплоскость, где возможно существование решений системы ограничений-неравенств. Граничные прямые, пересекаясь, образуют многоугольник решений, внутри которого любая точка удовлетворяет всем неравенствам.

Аналитическое или графическое решение полученной системы линейных уравнений, при заданных определяющих и управляемых параметрах, позволит на стадии проектирования технологического процесса определить рациональные условия обработки на операциях плоского шлифования заготовок периферией круга на станках с прямоугольным столом.

Для получения системы линейных ограничений-неравенств и линейной целевой функции, моделирующей процесс плоского шлифования

периферией круга на станках с прямоугольным столом, прологарифмируем зависимости (4), (7), (14), (16), (18-24) и (2), которые после введения обозначений будут иметь вид

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

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

где

$$x_1 = \ln v_\delta; \quad x_2 = \ln(10S_x); \quad x_3 = \ln(1000S_{t_x});$$

$$b_1 = \ln \frac{0,35 \cdot 10^8 B_k^2 k_1^T k_2^T k_3^T}{T_k}; \quad b_2 = \ln \frac{10^{2,8} \cdot N_{эд.ун} \eta}{0,63 B_k^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N};$$

$$b_3 = \ln \frac{0,1816 \cdot 10^{-5,45} \lambda B_k^{0,75} D_k^{0,25} (\theta_{кр} - \theta_0)}{a^{0,5} K_Q K_1^N K_2^N K_3^\theta};$$

$$b_4 = \ln \frac{C_S D_k \Delta^{0,32} \cdot 10^4}{T^{0,75}} K_H K_B K_I K_D K_\delta K_M;$$

$$b_5 = \ln \frac{Ra(60 \cdot 10 v_k B_k)^{0,5} (1000 D_k)^{0,25}}{C_{Ra} (k_{обш} d_{зеп})^{0,5} k_{Ra} n^{m_{Ra}}};$$

$$b_6 = \ln v_{\delta,cm\,min}; \quad b_7 = \ln v_{\delta,cm\,max};$$

$$b_8 = \ln(10S_{x\,cm\,min}); \quad b_9 = \ln(10S_{x\,cm\,max});$$

$$b_{10} = \ln(1000S_{t_x\,cm\,min}); \quad b_{11} = \ln(1000S_{t_x\,cm\,max});$$

$$f_0 = \ln t_0; \quad c_0 = \ln \frac{11 \cdot L_{ш} B_{ш} \Delta}{q_\delta}.$$

Полученная система линейных ограничений-неравенств (25) и линейная функция f_0 представляют собой математическую модель для определения рациональных условий обработки при плоском шлифовании периферией круга на станках с прямоугольным столом.

Решение задачи может быть существенно упрощено за счет приведения системы (25) с тремя неизвестными к системе с двумя неиз-

вестными, в результате чего аналитическое и графическое решение задачи будет осуществляться в двухмерном пространстве. Для проведения преобразований выразим x_1 из ограничения-неравенства, связанного с температурой шлифования:

$$x_1 = 5b_3 - 3,5x_2 - 2,25x_3,$$

после чего, подставим его значение во все остальные неравенства системы (25). Выбор данного ограничения-неравенства обусловлен тем, что среднетемпературная температура при шлифовании весьма часто является основным ограничивающим фактором при определении условий обработки. В результате получим новую систему, содержащую два неизвестных x_2 и x_3 :

$$\left\{ \begin{array}{l} -5x_2 - 2,5x_3 \leq b_1 - 10b_3 \\ -1,75x_2 - 0,875x_3 \leq b_2 - 3,5b_3 \\ -2,5x_2 - 1,25x_3 \leq b_4 - 5b_3 \\ -1,25x_2 - 0,875x_3 \leq b_5 - 2,5b_3 \\ -3,5x_2 - 2,25x_3 \geq b_6 - 5b_3 \\ -3,5x_2 - 2,25x_3 \leq b_7 - 5b_3 \\ x_2 \geq b_8 \\ x_2 \leq b_9 \\ x_3 \geq b_{10} \\ x_3 \leq b_{11} \end{array} \right. \quad (26)$$

$$f_0 = c_0 - 5b_3 + 2,5x_2 + 1,25x_3.$$

Так как применительно к конкретной задаче $c_0 - 5b_3$ является величиной постоянной, то f_0 достигнет своего минимального значения в том случае, когда примут минимально допустимые значения неизвестные x_2 и x_3 , удовлетворяющие системе ограничений (26).

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа и обобщения литературных данных, а также собственных исследований авторов определена целевая функция и получены технические ограничения на операции плоского шлифования периферией круга на станках с прямоугольным столом.

2. Разработана математическая модель для определения рациональных условий резания (конструкции и характеристики инструмента, режимов резания, СОТС и т.д.) на операциях плоского шлифования периферией круга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баскин Л.Х., Коротин Б.С. Исследование зависимости контактной температуры от количества вставок в прерывистом шлифовальном круге //

Высокоэффективные методы механической обработки жаропрочных и титановых сплавов: межвуз. сб. Куйбышев, 1981. С. 49-51.

2. Бишутин С.Г. Методика выбора режимов финишного шлифования поверхностей трения деталей машин с учетом требуемой износостойкости // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 2 (46). С. 17-21.

3. Горанский Г.К. и др. Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении. М.: Машиностроение, 1976. 240 с.

4. Горанский Г.К., Владимиров Е.В., Ламбин Л.Н. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ. М.: Машиностроение, 1970. 224 с.

5. Горанский Г.К. Расчет режимов резания при помощи электронно-вычислительных машин. Минск: Госиздательство БССР, 1963. 192 с.

6. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Оптимизация процесса обработки деталей эластичными абразивными кругами // Вестник машиностроения. 2014. №8. С. 65-69.

7. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 128 с.

8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1977. 832 с.

9. Исследование качества поверхностей, обработанных кругами новой конструкции / Г.А. Кулаков, Г.М. Мещеряков, И.Г. Попов, Ю.А. Шабалин, В.И. Стебихов // Высокоэффективные методы механической обработки жаропрочных и титановых сплавов: межвуз. сб. Куйбышев, 1981. С. 51-54.

10. Методология выбора режимов шлифования / М.В. Ненашев, В.В. Борисов, В.Н. Воронин, А.Н. Журавлев, И.Д. Ибатуллин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. №4(2). С. 387-390.

11. Алгоритм выбора оптимальных режимов плоского шлифования нежестких заготовок / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, А.В. Саразов, С.В. Орлов // Системы. Методы. Технологии. 2017. №1. С. 34-38.

12. Оптимальные условия шлифования торцевых поверхностей колец крупногабаритных подшипников / А.В. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, А.В. Саразов // Вестник машиностроения. 2015. №4. С. 60-66.

13. Носов Н.В., Кравченко Б.А. Технологические основы проектирования абразивных инструментов. М.: Машиностроение -1, 2003. 257 с.

14. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 144 с.

15. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: справочник / В.И. Баранчиков, А.В. Жаринов, Н.Д. Юдина и др. [под общ. ред. В.И. Баранчикова]. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.

16. Синайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.

17. Скуратов Д.Л., Трусов В.Н., Копытин Ю.А. 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, 1989. С. 20-25.

18. Скуратов Д.Л., Трусов В.Н. Определение рациональных условий обработки при производстве деталей ГТД. Самара: Самар. науч. центр РАН, 2002. 152 с.
19. 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. № ГО3872. Куйбышев, 1980. 86 с.
20. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
21. 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, 1981. С. 71-78.
22. Урывский Ф.П., Попов И.Г., Ю.А. Шабалин. Исследование внутреннего шлифования закаленной стали 30ХГСН2А композиционными кругами // Методы повышения эффективности использования режущих инструментов при обработке деталей летательных аппаратов и двигателей: сб. науч. тр. Куйбышев, 1986. С. 56-61.
23. Филимонов Л.Н. Плоское шлифование [под общ. ред. В.И. Мутянка]. Л.: Машиностроение, 1985. 109 с.
24. ЦБПНТ. Общемашиностроительные нормативы режимов резания и времени для технического нормирования работ на шлифовальных станках. Серийное производство. М.: Машгиз, 1959. 196 с.
25. Шабалин Ю.А., Волков А.Н. Исследование прижогов и остаточных напряжений при шлифовании титановых сплавов // Повышение эффективности использования режущих инструментов при обработке авиационных материалов: сб. науч. тр. Куйбышев, 1983. С. 91-94.
26. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. М.: Машиностроение, 1975. 176 с.
27. Ящерицын П.И., Цокур А.К., Еременко М.Л. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. Минск: Наука и техника, 1973. 184 с.

MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING RATIONAL PROCESSING CONDITIONS FOR FLAT GRINDING PERIPHERY OF THE CIRCLE ON MACHINES WITH A RECTANGULAR TABLE

© 2018 D.L. Skuratov, D.G. Fedorov, A.A. Plastinin

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

Mathematical model is presented for determining the rational processing conditions for flat grinding operations by the periphery of a circle on machines with a rectangular table consisting of a linear objective function and linear inequality constraints. The objective function is the equation determining the main processing time, and as inequality constraints, the limitations associated with the functional parameters and parameters that determine the processing quality and the kinematic capabilities of the machine.

Keywords: flat grinding by the periphery of the circle, mathematical model, objective function, technical limitations, determination of rational processing conditions.