

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРИ КРУГЛОМ ВРЕЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

*Витебский государственный технологический университет*

*Витебск, Беларусь*

Как показали исследования [1,2], при шлифовании имеют место следующие ограничения производительности: силовое, тепловое и по шероховатости и по шероховатости обработанной поверхности. Эти ограничения необходимо учитывать при организации любого рабочего цикла. В противном случае возможен брак по точности формы, по прижогам или по шероховатости шлифованной поверхности.

Как показали результаты анализа и обработки литературных данных, максимально допустимая к концу этапа предварительного шлифования упругая деформация технологической системы  $y_m$  (мм) может быть определена с помощью следующей модели:

$$y_m = 0,04 + \frac{T(d)}{0,5 + 3 \cdot T(d)}, \quad (1)$$

где  $T(d)$  – допуск на диаметр.

С учетом линейной зависимости объемной производительности и упругой деформации технологической системы от радиальной составляющей силы шлифования  $P_y$ , можно записать:

$$v_{гс} = 0,318 \cdot \frac{K_p \cdot j \cdot y_m}{d \cdot B}, \quad (2)$$

где  $v_{гс}$  – допустимая по силовому ограничению скорость съема припуска (уменьшения радиуса заготовки), мм/мин;

$K_p$  – коэффициент режущей способности, мм<sup>3</sup>/(мин·Н);

$j$  – жесткость технологической системы, Н/мм;  $d$  и  $B$  – диаметр и ширина шлифуемой поверхности, мм.

Безразмерная форма силового ограничения имеет вид:

$$\omega = \omega_c, \text{ где } \omega_c = \frac{v_{гс}}{v_{гкн}} = \frac{0,318 \cdot K_p \cdot j \cdot y_m}{d \cdot B \cdot v_{гкн}}. \quad (3)$$

Здесь  $v_{гкн}$  – начальная критическая бесприжоговая скорость съема припуска (сразу после правки).

Известно, что  $K_p$  зависит от материала заготовки и абразивных зерен шлифовального круга, от скорости шлифования, от режима правки шлифовального круга и от длительности шлифования после правки (если круг работает в режиме частичного самозатачивания или затупления). Но в этой работе будем считать  $K_p$  постоянным, так как время рабочего цикла в 15...30 раз меньше стойкости круга.

Соблюдение ограничения обеспечивает отсутствие прижогов (отпуска или вторичной закалки с отпуском) в подповерхностном слое шлифованной поверхности. В работе [2] на основании [3] для круглого врезного шлифования получена математическая модель теплового ограничения производительности в безразмерных координатах:

$$\omega_T = C_0 + C_1 \cdot \pi + C_2 \cdot \pi^2 \quad (4)$$

Здесь

$$\begin{aligned} C_0 &= 0,25 + 0,75 \cdot \omega_p; C_1 = (\omega_p - 0,13) \cdot b; \\ C_2 &= (v_1 \cdot 2 + v_1 \cdot 12 \cdot \omega_p) \cdot b^2; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\omega_k = v_{rk} / v_{rkH}; \quad \pi = \Pi / a_{кн}, \quad (6)$$

где  $v_1$  – скорость съема припуска;  $v_{rk}$  – критическая бесприжоговая скорость (съема припуска);  $a_{кн}$  – критическая бесприжоговая глубина сразу после правки;  $\Pi$  – припуск на сторону.

$$a_{кн} = \frac{d \cdot v_{гкн}}{318,3 \cdot V_{зг}}, \quad (7)$$

где  $V_{зг}$  – скорость вращения заготовки, м/мин.

$b$  – параметр тепловой активности.

$$b = (2Pe \cdot g)^{0,5} / \mu, \quad (8)$$

где  $\mu$  – параметр эмпирической модели для вычисления максимальной температуры в зоне шлифования;

$$Pe = 1,57 \cdot d \cdot v_{гкн} / a_T, \quad (9)$$

где  $a_T$  – коэффициент температуропроводности материала заготовки;

$$g = (0,00314 \cdot v_{гкн} (d \pm D) / (V_{зг} \cdot D))^{0,5}, \quad (10)$$

где  $D$  – диаметр шлифовального круга; (+) для наружного, (-) для внутреннего шлифования.

Известно, что показатель шероховатости  $R_a$  при шлифовании можно определить по следующей эмпирической модели:

$$R_a = R_{a_0} + K_R v_r, \quad (11)$$

где  $R_{a_0}$  и  $K_R$  - параметры модели, зависящие от скорости шлифования, режима правки круга, диаметра заготовки и скорости ее вращения.

Если задано требуемое значение показателя шероховатости  $R_{a_n}$ , то требуемое значение безразмерной скорости съема припуска  $\omega_R$  в конце рабочего цикла можно определить из модели:

$$\omega_R = \frac{R_{a_n} - R_{a_0}}{K_R v_{гкн}} \quad (12)$$

В любой момент шлифования оставшийся для удаления припуск  $\Pi$  должен быть больше текущего значения показателя шероховатости  $R \max$  (или  $Rz$ ). Это требование можно отразить следующей моделью:

$$\Pi \geq 0,001 \cdot (Rz - Rz_n) = 0,004 \cdot (R_a - R_{a_n}), \quad (13)$$

где  $Rz$  и  $R_a$  - текущие значения показателей шероховатости, мкм.

Из моделей (10) и (12), где правую и левую часть делим на  $a_{гкн}$ , получим:

$$\omega = \omega_R + \frac{0,392d}{V_{gr} \cdot K_R} \cdot \pi = \omega_R + K_{ш} \cdot \pi \quad (14)$$

Модель (14) адекватна только в конце рабочего цикла, когда оставшийся припуск соответствует модели (13). В безразмерной форме модель (11) имеет вид:

$$R_a = R_{a_0} + \frac{3,14 \cdot d \cdot K_R \cdot v_{гкн}}{K_p} \cdot \omega = R_{a_0} + K_1 \cdot \omega; \quad (15)$$

модель (13):

$$\pi_r = \frac{1,91 \cdot V_{gr}}{d \cdot v_{гкн}} (R_a - R_{a_n}) = K_2 \cdot (R_a - R_{a_n}) \quad (16)$$

Значение  $\pi_r$ , при превышении которого модель (14) становится неадекватной, можно определить методом интегриации с помощью моделей (4), (15) и (16).

$$\begin{aligned} \omega_q &= C_0 + C_1 \cdot \pi_q + C_2 \cdot \pi_{q-1}^2; \\ R_{a_q} &= R_{a_0} + K_1 \cdot \omega_q; \\ \pi_{q} &= K_2 \cdot (R_{a_q} - R_{a_n}) \end{aligned} \quad (17)$$

где  $q$  - номер итерации.

Начальное значение  $\pi_0 = 0$ . Проверка метода показала, что через 6 итераций получаем  $\pi_r$  с точностью до 1, а через 15 итераций - с точностью до 0,01.

Координату  $\pi_R$  точки пересечения теплового ограничения и ограничения по шероховатости можно найти как решение системы моделей (4) и (14) ( $\omega_T = \omega_{ш}$ ):

$$\pi_R = ((K_{\text{ш}} - C_1) - \sqrt{D_u}) / C_2, \quad (18)$$

где 
$$D_u = (K_{\text{ш}} - C_1)^2 - 4 \cdot C_2 \cdot (C_0 - \omega_R).$$

Решение имеет смысл при  $K_{\text{ш}} > C_1, D_u \geq 0$  и  $C_0 > \omega_R$ .

Если  $\pi_R \leq \pi_r$ , то ограничение по шероховатости действует при  $\pi \leq \pi_R$ . Если  $\pi_R > \pi_r$ , то ограничение по шероховатости действует при  $\pi \leq \pi_r$ . Если  $D_u < 0$ , то тепловое ограничение не пересекается с ограничением по шероховатости и последнее действует при  $\pi \leq \pi_r$ .

Так как при шлифовании незакаленных сталей тепловое ограничение отсутствует, то, координату пересечения силового ограничения и ограничения по шероховатости можно найти, решая систему модулей (4) и (3) ( $\omega_{\text{ш}} = \omega_R$ ):

$$\pi_c = (\omega_c - \omega_R) / K_{\text{ш}} \quad (19)$$

Если  $\pi_c < \pi_r$ , то ограничение по шероховатости действует при  $\pi \leq \pi_c$ . Если  $\pi_c > \pi_r$ , то ограничение по шероховатости действует при  $\pi \leq \pi_r$ .

На рис.1 показаны некоторые из 10 возможных вариантов ограничений производительности при круглом врезном шлифовании.

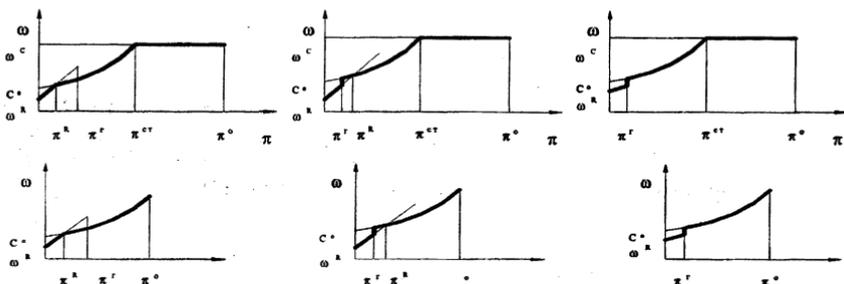


Рис.1. Варианты ограничений производительности при круглом врезном шлифовании

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. – М.: Машиностроение, 1975. – 252 с.
2. Махаринский Е.И. Технологические основы управления процессом шлифования. – М.: СНИО СССР, 1990. – 28 с.
3. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 227 с.