

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЧНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМ ЦИКЛОМ ПЛОСКОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Н.Н. Попок, Ю.Е. Махаринский, Д.Г. Латушкин

УДК 621.923

### РЕФЕРАТ

*ПЛОСКОЕ ВРЕЗНОЕ ШЛИФОВАНИЕ, ОГРАНИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ, РАБОЧИЙ ЦИКЛ СЪЕМА ПРИПУСКА, НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ПРИПУСКА*

*Аналитически получены математические модели, которые позволяют определять параметры граничного алгоритма управления рабочим циклом плоского врезного шлифования.*

*Большое количество исследований и разработок, посвященных различным вопросам проблемы управления процессом шлифования, характеризуется отсутствием единого системного подхода к проблеме, разобщенностью разработок и несовместимостью результатов. Реальное влияние этих работ на эффективность процессов шлифования в производственных условиях явно недостаточно. Экспериментальные и теоретические знания пока не упорядочены и не обобщены прагматической инженерной теорией, которая бы позволила обоснованно выбирать алгоритм управления и его параметры в каждом конкретном условиях. Особенно это относится к процессу плоского врезного шлифования.*

*Нерешенными аспектами проблемы управления процессом плоского врезного шлифования являются: 1) систематизация и частичная разработка математических моделей ограничений производительности; 2) разработка аналитического метода оценки параметров граничного алгоритма управления рабочим циклом.*

*Для большей универсальности исследования проводились в безразмерных величинах.*

### ABSTRACT

*EFLAT PLUNGE GRINDING, PERFORMANCE LIMITATIONS, DUTY CYCLE STOCK REMOVAL, IRREGULARITY ALLOWANCE*

*Mathematical models have been analytically obtained to define the boundary algorithm parameters of duty cycle control of the flat plunge grinding.*

*A large number of research works on various issues of the grinding process management are characterized by the absence of a single system approach to the problem, discord and the incompatibility of results. The real impact of these research works on the efficiency on the grinding process in a production environment is clearly not enough. The pilot and theoretical knowledge has not been streamlined yet. It has not been summarized by means of a pragmatic engineering theory that could make it possible to choose the reasonable control algorithm of the process and its parameters in each specific context. This especially refers to the flat plunge grinding process.*

*The outstanding aspects of the flat plunge grinding process problem are the following: 1) the systematization and partial development of mathematical models of performance limitations; 2) the development of an analytical method of evaluating the boundary algorithm parameters of duty cycle control.*

*For greater versatility studies were carried out in the dimensionless variables.*

### ВВЕДЕНИЕ

Для эффективного управления процессом врезного шлифования (или заточки) при помощи систем ЧПУ необходимы математические модели, отражающие ограничения, которые на-

кладываются на производительность тепловыми явлениями в зоне шлифования, рабочими свойствами шлифовального круга, а также требованиями к точности формы и шероховатости шлифованной поверхности. Зависимость меж-

ду глубиной шлифования и глубиной прижога, необходимая для разработки модели теплового ограничения производительности, может быть получена экспериментально или путем моделирования на ЭВМ процесса нагрева заготовки при шлифовании. Данные методы являются довольно трудоемкими, а полученные результаты являются частными – то есть их нельзя использовать при изменении условий шлифования.

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

При граничном алгоритме управления [1, 2, 3] на каждом проходе радиальная подача изменяется в соответствии с требованиями ограничений производительности.

Для плоского врезного шлифования модели ограничений производительности имеют вид [1, 3]:

1. Тепловое ограничение.

Модель теплового ограничения позволяет определить допустимую, по отсутствию прижогов на окончательной поверхности, относительную глубину шлифования  $\alpha_i$  в зависимости от оставшегося относительного припуска  $\pi_i$ :

$$\alpha_i \leq C_0 + C_1 \cdot \pi_i + C_2 \cdot \pi_i^2 \quad (1)$$

Глубина шлифования на  $i$ -ом проходе

$$\alpha_i = \frac{a_i}{a_{k0}} \quad (2)$$

где  $a_{k0}$  – критическая бесприжоговая глубина шлифования сразу после правки шлифовального круга,  $a_i$  – глубина шлифования на  $i$ -м проходе.

Безразмерный припуск  $\pi_i$ , оставшийся после  $i$  проходов:

$$\pi_i = \frac{\Pi_i}{a_{k0}} \quad (3)$$

где  $\Pi_i$  – припуск, оставшийся после  $i$  проходов.

Коэффициенты можно найти по следующим моделям:

$$C_0 = (0,25 + 0,75) \cdot \alpha_k \quad (4)$$

где  $\alpha_k = a_k / a_{k0}$ ,  $a_k$  – безразмерная критическая бесприжоговая глубина шлифования;

$$C_1 = (\alpha_k - 0,13) \cdot b_n \quad (5)$$

где  $b_n$  – параметр тепловой активности шлифовального круга при плоском шлифовании.

$$C_2 = (0,2 + 0,12 \cdot \alpha_k) \cdot b_n^2 \quad (6)$$

2. Силовое ограничение по допустимой силе шлифования  $P_{ym}$ .

Модель первого силового ограничения позволяет определить допустимую по упругим деформациям или режиму работы (полное или частичное самозатачивание) шлифовального круга относительную глубину шлифования  $\alpha_i$ :

$$\alpha_m \leq \frac{K_{pn} \cdot P_{ym}}{B \cdot V_x \cdot \alpha_{k0}} \quad (7)$$

где  $K_{pn}$  – коэффициент режущей способности при плоском врезном шлифовании;  $B$  – ширина шлифуемой заготовки;  $V_x$  – скорость продольной подачи заготовки.

3. Ограничение производительности по качеству поверхности

Модель второго силового ограничения позволяет определить допустимую по заданному показателю шероховатости (параметрам эмпирической модели для вычисления зависимости показателя шероховатости от радиальной силы шлифования) относительную глубину шлифования  $\alpha_i$  в зависимости от оставшегося относительного припуска  $\pi_i$ .

$$\alpha_i \leq \alpha_R + \frac{K_{pn}}{4 \cdot V_x \cdot K_{Rn}} \quad (8)$$

где  $K_{Rn}$  – коэффициент пропорциональности;

$$\alpha_R = \frac{(Ra_{30} - Ra_0) \cdot K_{pn}}{V_x \cdot K_{Rn} \cdot \alpha_{k0}} \quad (9)$$

где  $Ra_{30}$  – заданное значение параметра шероховатости.

На рисунке 1 показаны варианты схем ограничений производительности для разных соче-

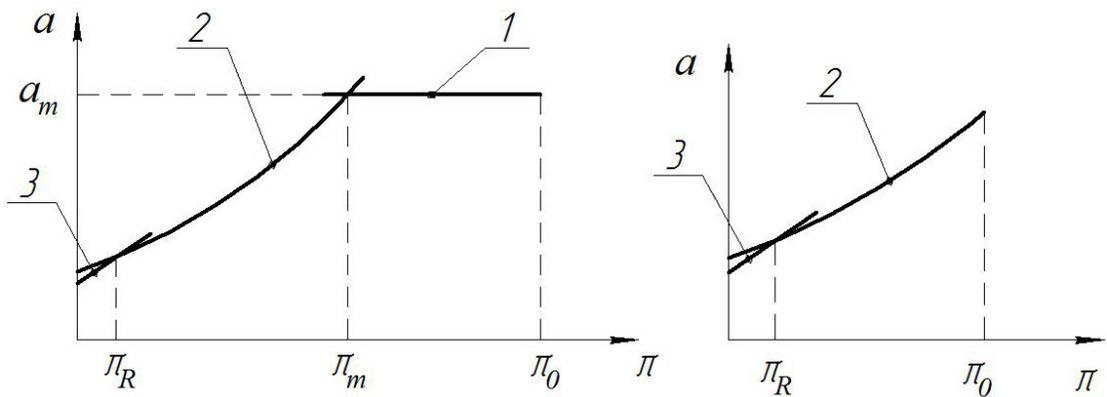


Рисунок 1 – Схемы ограничений производительности при плоском врезном шлифовании (1 – силовое ограничение, 2 – тепловое ограничение, 3 – ограничение по шероховатости)

таний значений параметров моделей (1) и (9).

Для дальнейших расчетов, оптимизации и моделирования рабочего цикла необходимо определять значения абсцисс точек пересечения ограничений  $\pi_m$  и  $\pi_R$ . Это можно выполнить с помощью следующих моделей:

$$\pi_m = \frac{\sqrt{C_1^2 + 4 \cdot C_2 \cdot (\alpha_m - C_0)} - C_1}{2 \cdot C_2}, \quad (10)$$

$$\pi_R = \frac{C_3 - C_1 - \sqrt{(C_3 - C_1)^2 + 4 \cdot C_2 \cdot (C_0 - \alpha_R)}}{2 \cdot C_2}, \quad (11)$$

где

$$C_3 = \frac{K_p}{4 \cdot K_R \cdot V} = \frac{\alpha_R \cdot \alpha_{R0}}{4 \cdot (Ra - Ra_0)}.$$

Подачи граничного алгоритма управления плоским врезным шлифованием определяются из следующих соображений. Если ( $\pi_m \leq \pi_0 - \alpha_m$ ) (рисунок 2), то модель ускоренного врезания имеет вид:

$$\sigma_v = \alpha_m \cdot (1 + Y) = \alpha_m \cdot \left( 1 + \frac{V \cdot B}{K_{pu} \cdot j} \right). \quad (12)$$

Число проходов с подачей  $\sigma_1 = \alpha_m$  определяем из выражения

$$i_m = \frac{\pi_0 - \pi_m}{\sigma_1 - I}, \quad (13)$$

где  $i_m$  округляется до ближайшего меньшего целого числа.

А число проходов предварительного этапа рабочего цикла

$$i_1 = i_m + 1. \quad (14)$$

Часть припуска, удаленная на этом этапе, будет равна:

$$\pi_{c1} = \alpha_m \cdot i_1. \quad (15)$$

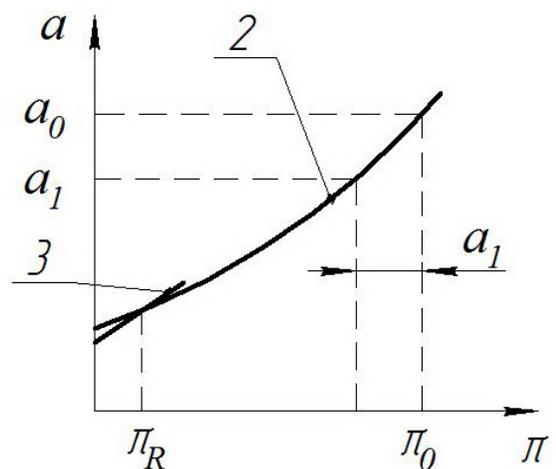


Рисунок 2 – Схема к расчету подачи ускоренного врезания

Если  $(\pi_m > \pi_o - \alpha_m)$  (см. рисунки 1 и 2), то согласно модели (1)

$$\alpha_1 = C_0 + C_1 \cdot (\pi_0 - \alpha_1) + C_2 \cdot (\pi_0 - \alpha_1)^2 .$$

Откуда

$$\alpha_1 = \frac{1 + 2 \cdot C_2 \cdot \pi_0 - C_1 - \sqrt{(1 + 2 \cdot C_2 \cdot \pi_0 - C_1)^2 + 4 \cdot C_2 \cdot \alpha_0}}{2 \cdot C_2} , \quad (16)$$

где

$$\alpha_0 = C_0 + C_1 \cdot \pi_0 + C_2 \cdot \pi_0^2 .$$

Участок действия теплового ограничения зависит от следующих условий. Если  $\alpha_R < \alpha_K$ , то  $\pi_m \geq \pi \geq \pi_R$ , где значение  $\pi_R$  можно вычислить по модели (11); в противном случае  $\pi_m \geq \pi \geq 0$ . Для этого участка согласно модели (1) можем записать

$$\alpha_i = C_0 + C_1 \cdot (\pi_{i-1} - \alpha_i) + C_2 \cdot (\pi_{i-1} - \alpha_i)^2 . \quad (17)$$

Откуда, учитывая, что  $\pi_{i-1} = \pi_0 - \pi_{c(i-1)}$ , где

$\pi_{c(i-1)} = \sum_{i=1}^{i-1} \alpha_i$  – часть удаленного припуска, получим

$$\alpha_i = \frac{C_1 \cdot D_i}{2 \cdot C_2} , \quad (18)$$

где

$$D_i = C_i^2 - M_i , \quad C_i = 1 + C_1 + 2 \cdot C_2 \cdot (\pi_0 - \pi_{c(i-1)}) ,$$

$$M_i = C_0 + C_1 \cdot (\pi_0 - \pi_{c(i-1)}) + 2 \cdot C_2 \cdot (\pi_0 - \pi_{c(i-1)})^2$$

и

$$\sigma_i = \alpha_i \cdot (1 + Y) - Y \cdot \alpha_{(i-1)} . \quad (19)$$

Вычисления продолжают до тех пор, пока соблюдается неравенство

$$\pi_0 - \pi_{c(i-1)} - \alpha_i > \pi_R . \quad (20)$$

Если действует ограничение по параметру шероховатости, то в соответствии с моделями (10) и (11)

$$\alpha_i = \alpha_R + C_3 \cdot \pi_i / (1 + C_3) , \quad (21)$$

$$\sigma_i = \alpha_i \cdot (1 + Y) - Y \cdot \alpha_{(i-1)} ,$$

где  $\pi_i < \alpha_R$ . Если  $(\pi_0 - \pi_{c(i-1)}) < \alpha_R$ , то подача на последнем проходе определяется из выражения

$$\sigma_i = \alpha_R \cdot (1 + Y) - Y \cdot \alpha_{(i-1)} . \quad (22)$$

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уточнен метод определения относительных (безразмерных) показателей граничного алгоритма управления рабочим циклом плоского врезного шлифования.

Достоинством уточненных моделей ограничений производительности шлифования является то, что значительная часть их параметров имеет физический смысл.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Махаринский, Е.И. (1990), *Технологические основы управления процессом шлифования*, Москва, СНИО СССР, 53 с.
2. Михелькевич, В.Н. (1975), *Автоматическое управление шлифованием*, Москва, Машиностроение, 1975, 304 с.
3. Ящерицын, П.И., Махаринский, Е.И., Махаринский, Ю.Е. (1997), Модели ограничений производительности при плоском врезном шлифовании, *Вести Академии наук Беларуси*, серия физико-технических наук, №3, С. 31–34.

## REFERENCES

1. Maharinsky, E.I. (1990), *Tehnologicheskie osnovy upravlenija processom shlifovaniya* [Technological bases of control by process of grinding], Moscow, SNIO USSR, 53 p.
2. Mihelkevich, V.N. (1975), *Avtomaticheskoe upravlenie shlifovaniem* [Automatic control of grinding], Moscow, Mechanical engineering, 304 p.
3. Yashcheritsyn, P.I., Maharinsky, E. I., Maharinsky, Y. E. (1997), Models of restrictions of productivity at flat cut-in grinding [Modeli ogranichenij proizvoditel'nosti pri ploskom vreznom shlifovanii], *Vesci Akadjemii navuk Belarusi, seryja fizika-tjehnichnyh navuk № 3 – To conduct Academies of Sciences of Belarus, a series of physics and technology sciences № 3*, pp. 31-34.

Статья поступила в редакцию 28. 03. 2016 г.