

УДК 621.923

ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВРЕЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

д-р техн. наук, доц. Н.Н. ПОПОК
(Полоцкий государственный университет),
канд. техн. наук, доц. Е.И. МАХАРИНСКИЙ, Ю.Е. МАХАРИНСКИЙ
(Витебский государственный технологический университет)

Разработана математическая модель, отражающая характер изменения состояния рабочей поверхности шлифовального круга в процессе резания, проведены исследования изменения коэффициента режущей способности инструмента и даны рекомендации по управлению рабочим циклом при круглом врезном шлифовании.

Известно [1 – 3], что режущая способность шлифовального круга с течением времени после правки существенно изменяется. И это обстоятельство необходимо учитывать при разработке оптимального алгоритма управления рабочим циклом шлифования.

Анализ результатов опубликованных [1, 2] экспериментов позволяет высказать следующие гипотезы о характере изменения коэффициента режущей способности K_p шлифовального круга при круглом врезном шлифовании с постоянной радиальной силой за время его эксплуатации между правками.

1. После определенного периода шлифования наступает стабилизация коэффициента режущей способности (режим полного самозатачивания).

2. Стабильное значение коэффициента режущей способности K_{pc} увеличивается при увеличении радиальной силы.

3. Коэффициент режущей способности сразу после правки не зависит от радиальной силы.

4. Коэффициент режущей способности сразу после правки увеличивается при увеличении продольной подачи правящего инструмента.

5. При увеличении радиальной силы шлифовальный круг переходит из режима затупления в режим самозатачивания и даже в режим восстановления.

Согласно [4, 5] возможен следующий подход к синтезу математической модели, которая будет отражать характер изменения состояния рабочей поверхности шлифовального круга. Рассматривая накопленные «повреждений» на рабочей поверхности шлифовального круга как процесс Пуассона, можно записать

$$\frac{K_{pn} - K_p}{K_{pn} - K_{pc}} = 1 - \exp(-Mt^c), \quad (1)$$

где выражение слева представляет собой вероятность того, что коэффициент режущей способности K_p примет значение K_{pc} ; M – параметр, который отражает темп изменения коэффициента режущей способности; параметр c – характеризует степень нестационарности (т.е. зависимости вероятности изменения K_p не только от рассматриваемого интервала, но и от времени t , прошедшего от начала процесса шлифования). Процесс считается стационарным, если $c = 1$.

Из модели (1) получаем

$$K_p = (K_{pn} - K_{pc}) \cdot \exp(-Mt^c) + K_{pc}. \quad (2)$$

При $c = 1$ эта модель полностью совпадает с моделью, полученной на основании основного принципа надежности [5]. Аппроксимация результатов экспериментов [1] моделью (2) показала, что параметр c может принимать значения от 0,6 до 1. Физической причиной нестационарности процесса изменения коэффициента режущей способности является недостаточное качество шлифовального круга (неравномерность твердости на его рабочей поверхности) и низкая жесткость технологической системы. Как известно, при этом изнашивание круга приводит к довольно быстрому развитию волнистости на его рабочей поверхности. Когда амплитуда волнистости достигает некоторого предела, происходит разрыв контакта заготовки и круга и их соударения. При этом полученная ранее волнистость

сглаживается. Этот процесс повторяется периодически в течение периода стойкости шлифовального круга, замедляя процесс его затупления.

При достаточной жесткости технологической системы круглошлифовального станка и хорошем качестве шлифовального круга можно с высокой степенью достоверности считать процесс изменения состояния его рабочей поверхности стационарным и пользоваться для его отражения моделью (3) при $c = 1$.

$$K_p = (K_{pn} - K_{pc}) \cdot \exp(-Mt) + K_{pc}, \quad (3)$$

где

$$M = (\ln 2) / t_{0,5} = 0,6931 / t_{0,5}; \quad (4)$$

$t_{0,5}$ – время работы шлифовального круга, в течение которого текущее значение коэффициента режущей способности станет равным $K_p = (K_{pn} + K_{pc}) / 2$.

Анализ результатов экспериментов [1, 2] позволяет утверждать, что $t_{0,5}$ практически не зависит от значения радиальной силы P_y . А зависимость K_{pc} от P_y можно отразить следующей моделью:

$$K_{pc} = K_{pcm} \cdot [1 - \exp(-0,6391 P_y^2 / P_{y1}^2)], \quad (5)$$

где K_{pcm} – максимальное для данных характеристик шлифовального круга и шлифуемого материала значения K_{pc} ; P_{y1} – значение радиальной силы, при котором $K_{pc} = K_{pcm} / 2$.

Модель (3) с учётом моделей (4) и (5) удобнее для использования и анализа представлять в безразмерной форме:

$$\kappa_p = \exp(G \cdot \tau) + \kappa_{pcm} \cdot [1 - \exp(G \cdot \tau)] \cdot [1 - \exp(G \cdot p^2)], \quad (6)$$

где $\kappa_p = K_p / K_{pn}$; $\kappa_{pcm} = K_{pcm} / K_{pn}$; $\tau = t / t_{0,5}$; $p = P_y / P_{y1}$; $G = -\ln 2$.

При круглом шлифовании с постоянной радиальной силой изменение режущей способности ведёт к изменению производительности. Согласно определению

$$\pi d B V_r = K_p P_y, \quad (7)$$

где d и B – диаметр и ширина шлифуемой поверхности соответственно; V_r – скорость уменьшения радиуса заготовки (линейная производительность).

Записав модель (7) для начала процесса (сразу после правки) и для произвольного момента времени и поделив эти модели друг на друга, получим:

$$V_r = V_{rn} \kappa_p, \quad (8)$$

где V_{rn} – начальная линейная производительность сразу после правки.

При шлифовании с постоянной радиальной подачей S изменение коэффициента режущей способности (затупление или восстановление) ведёт к соответствующему изменению радиальной силы P_y .

При таком стабильном шлифовании $V_r = S$. Аналогично, записав модель (7) для двух моментов времени, получим:

$$p = P_n / \kappa_p, \quad (9)$$

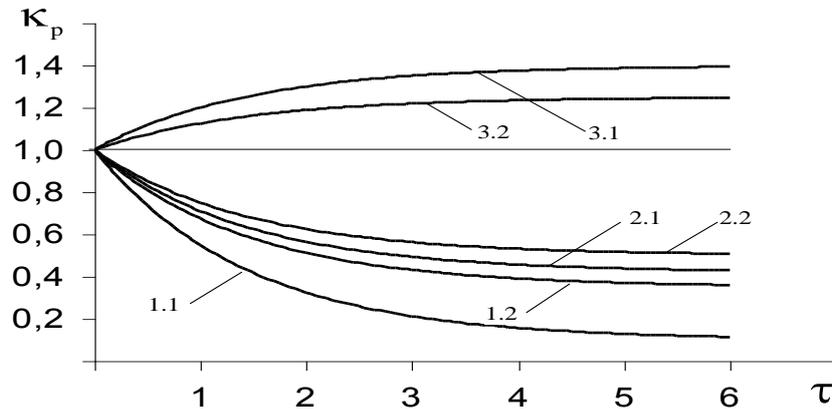
где P_n – начальное значение (сразу после правки) относительной радиальной силы.

Подставив модель (9) в (6), получим для случая шлифовании с постоянной производительностью ($S = const$):

$$\kappa_p = \exp(G \cdot \tau) + \kappa_{рсм} \cdot [1 - \exp(G \cdot \tau)] \cdot [1 - \exp(G \cdot p_n^2 / \kappa_p^2)]. \quad (10)$$

Так как κ_p входит в правую и левую части модели (10), его значение можно определить только численно, например, методом итераций или методом прямого поиска с переменным шагом.

На рисунке показан характер изменения κ_p от относительного времени шлифования с постоянной радиальной силой и с постоянной радиальной подачей (модели (6) и (10)).



Изменение относительного коэффициента режущей способности при шлифовании с постоянной радиальной силой (1.1; 2.1; 3.1) и с постоянной подачей (1.2; 2.2; 3.2)

Анализ графиков на этом рисунке ясно показывает, что изменение κ_p при шлифовании с постоянной подачей происходит в меньшей степени, чем при шлифовании с постоянной радиальной силой.

Для плоского шлифования t можно определить по следующей формуле:

$$t = i \cdot L / V, \quad (11)$$

где i – порядковый номер прохода; L – длина прохода; V – скорость продольной подачи.

Подставив это уравнение в модель (6), с учетом того, что i_1 соответствует t_1 , получим

$$\kappa_p = \exp(G \cdot \tau) + \kappa_{рсм} \cdot [1 - \exp(G \cdot I)] \cdot [1 - \exp(G \cdot p^2)], \quad (12)$$

где $I = i / i_1$.

Тогда для случая плоского врезного шлифования постоянной вертикальной подачей S на каждый проход и без учета переходного процесса в соответствии с моделью (10) можно записать

$$\kappa_p = \exp(G \cdot \tau) + \kappa_{рсм} \cdot [1 - \exp(G \cdot I)] \cdot [1 - \exp(G \cdot p_n^2 / \kappa_p^2)]. \quad (13)$$

Шлифование обычно осуществляется с изменяющейся в рабочем цикле подачей. При ступенчатом алгоритме управления подача на этапе врезания $S_B = 4S_1$, где S_1 – подача при предварительном этапе; S_2 – на чистовом этапе и S_3 – на отделочном этапе шлифования. Если времена элементов рабочего цикла t_1 , t_2 и t_3 , то можно определить [6]:

- время врезания:

$$t_B = 0,2877 / \kappa,$$

где k – постоянная времени переходного процесса; $\kappa = K_p j / \pi d B$; K_p – коэффициент режущей способности; j – жёсткость технологической системы; d – диаметр; B – ширина шлифования;

- зависимость линейной производительности V_{ri} от времени на каждом элементе рабочего цикла:

$$\begin{aligned}
 V_{r6} &= 4S_1 \cdot [1 + \exp(-kt)], \quad 0 \leq t \leq t_e, \quad V_{r1} = S_1, \\
 V_{r2} &= V_{r1} \cdot \exp(-k \cdot t) + S_2 \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)], \quad 0 \leq t \leq t_2, \\
 V_{r3} &= V_{r2\kappa} \cdot \exp(-k \cdot t) + S_3 \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)], \quad 0 \leq t \leq t_3, \\
 V_{r2\kappa} &= V_{r1} \cdot \exp(-k \cdot t_2) + S_2 \cdot [1 - \exp(-k \cdot t_2)].
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Будем считать, что в течение достаточно малого времени Δt_i на этапах врезания, чистового и отделочного шлифования линейная производительность V_{ri} является постоянной. Тогда за это время согласно модели (3) коэффициент режущей способности изменится на ΔK_{pi} :

$$\Delta K_{pi} = \frac{\Delta t}{t_{0,5}} \cdot G \cdot (K_{p(i-1)} - K_{pc(i-1)}).
 \tag{15}$$

Поделив обе части этого выражения на K_{pn} и умножив на S_1 , с учётом того, что $\pi dBV_r = K_p P_y$, получим

$$\Delta \kappa_{pi} = G \Delta \tau_i \cdot \{ \kappa_{p(i-1)} - \kappa_{pcm} \cdot [1 - \exp(G \cdot f_m^2 \cdot \omega_i^2 / \kappa_{p(i-1)}^2)] \},
 \tag{16}$$

$$f_m = \pi dB S_1 / (K_{pn} P_{y1}), \quad \omega_i = V_{ri} / S_1,$$

где значение V_{ri} вычисляется для моментов времени $(t_{i-1} + 0,5 \Delta t_i)$.

Текущее значение κ_{pi} можно определить из выражения:

$$\kappa_{pi} = \kappa_{p(i-1)} + \Delta \kappa_{pi}.
 \tag{17}$$

Аналогично для плоского врезного шлифования с подачей на каждый рабочий ход:

$$\Delta k_{pi} = \frac{G}{i_1} \left\{ k_{p(i-1)} - k_{pcm} \cdot \left[1 - \exp \left(G \cdot \frac{p_n^2 \cdot \alpha_i^2}{k_{p(i-1)}^2} \right) \right] \right\},
 \tag{18}$$

где i_1 – число проходов, после которых $K_p = (K_{pn} + K_{pc})/2$; $\alpha_i = a_i/a_n$; a_i – глубина шлифования на i -м проходе; a_n – начальная глубина шлифования сразу после правки шлифовального круга; $p_n = BV a_n / K_{pn} P_{y1}$.

Значения глубин шлифования на любом этапе рабочего цикла можно определить из следующей системы уравнений [6]:

$$\begin{aligned}
 a_{1i} &= S_1; \quad a_{2i} = S_2(1 - \delta^i) + S_1 \delta^i; \quad a_{2\kappa} = S_2 + (S_1 - S_2) \delta^{i_2}; \\
 a_{3i} &= S_3(1 - \delta^i) + a_{2\kappa} \delta^i; \quad \delta = 1/(1 + k_{nl}); \quad k_{nl} = K_{pn} j / BV,
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

где k_{nl} – постоянная времени переходного процесса при плоском шлифовании.

С помощью разработанной нами программы проводилось моделирование процесса круглого и плоского шлифования с переменной подачей в рабочем цикле и с постоянной производительностью, которая соответствовала средневзвешенной подаче соответственно при круглом и плоском шлифовании.

$$S = \frac{S_1 t_1 + S_2 t_2 + S_3 t_3}{t_1 + t_2 + t_3} \quad \text{и} \quad S = \frac{S_1 i_1 + S_2 i_2 + S_3 i_3}{i_1 + i_2 + i_3}.$$

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

1) все переменные параметры ($K_{рн}$, j и $k_{рсм}$) оказывают существенное влияние на среднюю относительную скорость изменения режущей способности;

2) при увеличении $K_{рн}$ и $k_{рсм}$ средняя относительная скорость затупления уменьшается и в некоторых случаях (когда $K_{рн}$ меньше 11) шлифовальный круг переходит из режима затупления в режим восстановления;

3) при шлифовании с постоянной производительностью средняя относительная скорость изменения коэффициента режущей способности не зависит от жесткости технологической системы, а при шлифовании с переменной подачей в рабочем цикле существенно зависит;

4) при шлифовании в рабочем цикле с увеличением жесткости технологическая средняя относительная скорость изменения коэффициента режущей способности увеличивается;

5) степень этого увеличения тем больше, чем больше $k_{рсм}$ и меньше $K_{рн}$;

6) максимальное отклонение средней относительной скорости изменения коэффициента режущей способности при шлифовании в рабочем цикле от последней при шлифовании с постоянной производительностью увеличивается при увеличении $k_{рсм}$ и уменьшается при увеличении $K_{рн}$;

7) при наименьшем значении $K_{рн}$ увеличение $k_{рсм}$ в 3 раза ведет к увеличению относительной скорости изменения коэффициента режущей способности почти в 40 раз, а при максимальном значении $K_{рн}$ – всего на 38 %;

8) в каждой ситуации существует такое значение жесткости технологической системы, при которой относительные скорости изменения режущей способности при шлифовании с постоянной подачей и в рабочем цикле одинаковы;

9) эта жесткость увеличивается при увеличении $k_{рсм}$ и $K_{рн}$;

10) при увеличении $k_{рсм}$ увеличивается амплитуда колебаний относительного коэффициента режущей способности внутри рабочего цикла;

Таким образом, разработанные модели и программное обеспечение позволило получить новую важную для управления рабочим циклом информацию, которую можно будет использовать при проектировании алгоритмов для систем автоматического управления шлифовальными станками с ЧПУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кенджаев Х.Х. Исследование затупления шлифовального круга // Передовой научно-технический и производственный опыт: Сб. – М.: Изд-во Всесоюз. ин-та науч. и техн. информ., 1957. – С. 12 – 23.
2. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 200 с.
3. Лурье Г.Б. Рациональное использование шлифовальных станков: Обзор. информ. – М.: НИИМАШ, 1974. – 79 с.
4. Богданов Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений. – М.: Мир, 1989. – 364 с.
5. Седакин Н.М. Об одном физическом принципе теории надежности // Известия Акад. наук СССР. Техническая кибернетика. – 1966. – № 3. – С. 80.
6. Махаринский Е.И. Технологические основы управления процессом шлифования. – М.: СНИО СССР, 1990. – 52 с.