

ОПТИМИЗАЦИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

Д. И. Волков¹, Б. В. Цветков^{2*}, А. М. Голованова³

*boris_tsvetkov@mail.ru

^{1,3} ФГБОУ ВО «РГАТУ имени П. А. Соловьева»

² ООО ПАЗ «Ильич»

Поступила в редакцию 11.06.2024

Аннотация. Представлены результаты исследования перемещения охлаждающей жидкости высокопористым абразивным кругом в зону обработки при высокоскоростном глубинном шлифовании. Приведена методика определения оптимального положения сопла по отношению к абразивному кругу и заготовке, обеспечивающая отсутствие прижогов на обработанной поверхности при шлифовании инструментом на основе кубического нитрида бора (КНБ).

Ключевые слова: высокоскоростное глубинное шлифование; высокопористый инструмент; кубический нитрид бора; оптимизация подачи охлаждающей жидкости.

ВВЕДЕНИЕ

При глубинном шлифовании определяющим фактором стабильности процесса является достаточное охлаждение зоны резания. Для обеспечения условий, позволяющих охлаждать большую, в сравнении с другими методами, площадь контакта абразивного инструмента и заготовки используются специальные насосы высокого давления, обеспечивающие подачу смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) с большим расходом (до 200 л/мин) и высоким давлением (до 19 бар). При таких показателях системы подачи СОТС скорость течения жидкости достигает высоких значений, а «факел» ее разброса становится минимальным. С учетом небольших площадей сечения сопла оптимальное направление потока СОТС становится непростой задачей, поскольку неточность в позиционировании сопла приводит к недостаточному охлаждению зоны обработки и возникновению термических дефектов.

Современное оборудование позволяет с высокой точностью позиционировать сопло относительно шлифовального круга и заготовки. На большинстве моделей станков реализована система привязки сопла к кругу по линейным координатам (SXS-512, SXS-735 ООО «Шлифовальные станки»). Существуют модели, имеющие привязку по угловой координате (Magerle MFP-50, MFP-51, MFP-100) [1]. Несмотря на возможности оборудования, исследования влияния позиционирования сопла на тепловые процессы в зоне обработки при глубинном шлифовании практически отсутствуют. Имеют место лишь обобщенные рекомендации производителей оборудования и инструмента [2–4].

Развитие технологии глубинного шлифования на данный момент связано с внедрением высокоскоростной обработки деталей газотурбинных двигателей высокопористым эльборовым инструментом [5, 6]. С внедрением эльборовых шлифовальных кругов появилась возможность изменения скорости резания в достаточно широком диапазоне от 35 до 100 м/с [7]. Данные изменения имеют значительное влияние на термомеханические

процессы, происходящие в зоне обработки, в том числе и на механизм доставки СОТС. Это связано с изменением центробежных сил, способствующих выбросу охлаждающей жидкости из рабочего слоя круга, а также с влиянием пористости современных эльборовых кругов на объем и глубину ее проникновения.

Исследования в данном направлении являются актуальной задачей, поскольку при высокоскоростном глубинном шлифовании в качестве основного ограничивающего фактора увеличения производительности выступает повышенная температура в зоне резания [8–10].

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ПОДАЧИ СОТС В ЗОНУ РЕЗАНИЯ

Условия охлаждения при высокоскоростном шлифовании отличаются от обычного тем, что периферическая скорость круга практически всегда выше скорости течения жидкости из системы подачи СОТС. В результате этого может возникнуть состояние, когда СОТС, поступающая на рабочую поверхность круга, быстро выбрасывается центробежными силами и не доходит до зоны контакта эльборового круга 1 и заготовки 3 (рис. 1). Это происходит по причине большого расстояния l_2 от точки касания до начала зоны контакта l_k .

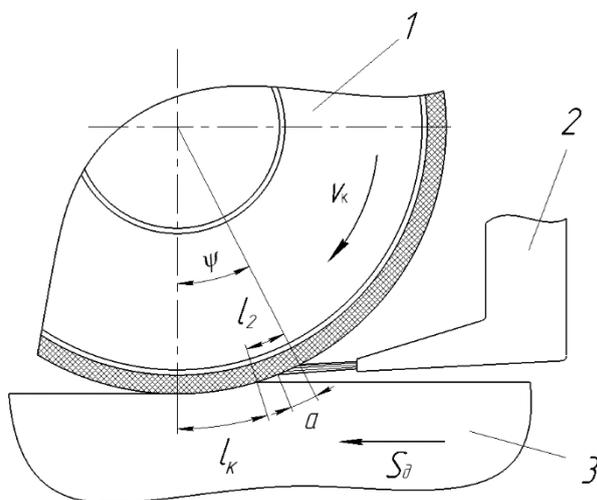


Рис. 1. Схема подачи СОТС в зону обработки:

1 – эльборовый шлифовальный круг; 2 – сопло подачи СОТС; 3 – заготовка

Наилучшие условия охлаждения при высокоскоростном глубинном шлифовании формируются тогда, когда подаваемая СОТС направлена таким образом, чтобы ее струя попадала в точку круга, расстояние от которой до начала зоны контакта круга с деталью определяется временем удержания СОТС в рельефе рабочего слоя круга. Время удержания охлаждающей жидкости в рабочей поверхности круга определяется двумя периодами: t_1 и t_2 . t_1 – время, в течение которого СОТС перемещается в рабочем слое к центру шлифовального круга, t_2 – время перемещения к периферии (за счет центробежных сил) до выброса СОТС в зону контакта круга с деталью. Расстояние, на которое перемещается СОТС от момента касания шлифовального круга до выброса в зону резания l_2 , определяет необходимое место расположения сопла (рис. 2).

Для расчета данных показателей ключевым параметром будет являться угол ψ , характеризующий точку входа СОТС в рабочий слой круга, при различных геометрических параметрах круга и положении сопла 2 (рис. 1). В зависимости от направления подачи при шлифовании параметр ψ будет значительно отличаться, это связано с расположением припуска и сопла подачи СОТС (рис. 2).

$$|v| = \sqrt{v_k^2 + v_0^2 - 2v_k v_0 \cdot \cos(\psi - \alpha)}. \quad (1)$$

Движение частицы жидкости, попавшей в зону действия рабочей поверхности вращающегося абразивного круга, можно описать системой дифференциальных уравнений изменения скорости по координатам x и y :

$$\frac{dx}{dt} = v_0 \cos(\psi - \alpha) + a_x t; \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dt} = -v_0 \sin(\psi - \alpha) + a_y t, \quad (3)$$

где v_0 – скорость движения жидкости на входе в зону действия абразивного круга; ψ – угол точки входа жидкости в зону действия абразивного круга; α – угол наклона сопла подачи жидкости по отношению к горизонтальной плоскости; a_x – ускорение частицы жидкости в направлении оси x ; a_y – ускорение частицы жидкости в направлении оси y .

Компоненты ускорения a_x и a_y формируются под действием следующих сил: гравитационная сила с ускорением g ; центробежная сила с ускорением a_c ; сила вязкого сопротивления с ускорением a_f ; сила, характеризующая капиллярный эффект с ускорением a_k .

В принятой системе координат ускорения вдоль осей x и y определяются следующими уравнениями:

$$a_x = g \cdot \sin(\psi) + a_f \cdot \cos(\varphi); \quad (4)$$

$$a_y = g \cdot \cos(\psi) + a_c + a_f \cdot \sin(\varphi) - a_k, \quad (5)$$

где $a_f = \frac{\nu \cdot \nu}{2f}$ – среднее ускорение вязкого сопротивления; φ – угол между векторами \vec{v}_0 и \vec{v}_k ;

ν – кинематическая вязкость жидкости; f – средняя площадь пор на рабочей поверхности инструмента; $a_c = \frac{v_k^2}{2R_k}$ – среднее значение ускорения центробежной силы; v_k – скорость рабочей

поверхности абразивного круга; R_k – радиус круга; $a_k = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot r \cdot h}$ – среднее значение

ускорения жидкости при заполнении капилляров; σ – коэффициент поверхностного натяжения; θ – угол смачивания; ρ – плотность жидкости; r – средний радиус капилляра; h – длина капилляра.

Синус и косинус угла φ , под которым по отношению к оси x направлен вектор \vec{v} , определялись по формулам:

$$\sin(\varphi) = \frac{v_0 \cdot \sin(\psi - \alpha)}{\sqrt{v_k^2 + v_0^2 - 2v_k v_0 \cdot \cos(\psi - \alpha)}}; \quad (6)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{v_k - v_0 \cdot \cos(\psi - \alpha)}{\sqrt{v_k^2 + v_0^2 - 2v_k v_0 \cdot \cos(\psi - \alpha)}}. \quad (7)$$

Время, в течение которого движение жидкости происходит в отрицательном направлении оси y до начала движения в обратном направлении, определяется уравнением:

$$\frac{dy}{dt} = -v_0 \sin(\psi - \alpha) + a_y t_1 = 0; \quad (8)$$

$$\text{откуда } t_1 = \frac{v_0 \sin(\psi - \alpha)}{g \cdot \cos(\psi) + a_c + a_f \cdot \sin(\varphi) - a_k}. \quad (9)$$

В этом случае перемещение жидкости в рабочую поверхность круга определяется интегралом:

$$y_1 = \int_0^{t_1} (-v_0 \sin(\psi - \alpha) + a_y t) \cdot dt = -v_0 \sin(\psi - \alpha) \cdot t_1 + a_y \frac{t_1^2}{2}. \quad (10)$$

После подстановки времени t_1 получим:

$$y_1 = \frac{-(v_0 \sin(\psi - \alpha))^2}{2 \cdot a_y}. \quad (11)$$

Перемещение жидкости в направлении оси x в момент времени t_1 определяется зависимостью:

$$x_1 = \int_0^{t_1} (v_0 \cos(\psi - \alpha) + a_x t) \cdot dt = v_0 \cos(\psi - \alpha) \cdot t_1 + a_x \frac{t_1^2}{2}. \quad (12)$$

После подстановки времени t_1 получим:

$$x_1 = \frac{v_0^2 \sin(\psi - \alpha) \cos(\psi - \alpha)}{a_y} \cdot \left(1 + \frac{a_x}{2a_y} \cdot \text{tg}(\psi - \alpha) \right). \quad (13)$$

Вектор скорости жидкости в момент времени t_1 будет направлен только вдоль оси x , величина скорости определяется по формуле:

$$v_{x1} = v_0 \cos(\psi - \alpha) + \frac{a_x \cdot v_0 \sin(\psi - \alpha)}{a_y} = v_0 \cos(\psi - \alpha) \left(1 + \frac{a_x}{a_y} \cdot \text{tg}(\psi - \alpha) \right). \quad (14)$$

Абразивный инструмент за время t_1 повернется на некоторый угол, в результате этого новый угол рабочей поверхности, где находится частица жидкости, можно определить по формуле:

$$\psi_1 = \psi - \frac{v_k \cdot t_1}{R_k}. \quad (15)$$

В результате перемещения поверхности круга происходит изменение скорости и направления движения частицы жидкости, изменяются также компоненты ускорения по осям x и y :

$$a_{1x} = g \cdot \sin(\psi_1) + a_{1f} \cdot \cos(\varphi_1); \quad (16)$$

$$a_{1y} = g \cdot \cos(\psi_1) + a_c + a_{1f} \cdot \sin(\varphi_1) - a_k, \quad (17)$$

где $a_{1f} = \frac{v \cdot v_1}{2f}$;

$$\varphi_1 = \text{arctg} \left(\frac{v_{x1} \sin(\psi - \psi_1)}{v_k - v_{x1} \cos(\psi - \psi_1)} \right). \quad (18)$$

Модуль вектора разности скоростей круга и частицы жидкости принимает значение

$$|v_1| = \sqrt{v_k^2 + v_{x1}^2 - 2v_k v_{x1} \cdot \cos(\psi - \psi_1)}. \quad (19)$$

В следующие моменты времени будет происходить выброс охлаждающей жидкости из пор на рабочей поверхности круга (рис. 4).

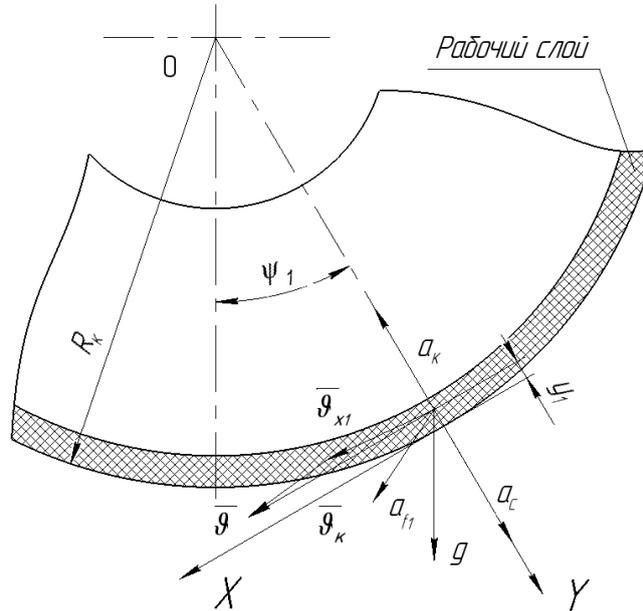


Рис. 4. Расчетная схема движения жидкости при выходе из рабочего слоя абразивного инструмента

Время, которое потребуется для выхода жидкости из зоны влияния абразивного круга, определяется уравнением:

$$y_2 = y_1 + \int_0^{t_2} (a_y t) \cdot dt = -v_0 \sin(\psi - \alpha) \cdot t_1 + a_y \frac{t_2^2}{2} = 0. \quad (20)$$

В результате получена следующая зависимость:

$$t_2 = \frac{v_0 \sin(\psi - \alpha)}{\sqrt{a_y \cdot a_{1y}}}. \quad (21)$$

Перемещение в направлении оси x определяется зависимостью:

$$x_2 = v_{x1} \cos(\psi - \psi_1) \cdot t_2 + a_{x1} \cdot \frac{t_2^2}{2} = \frac{v_{x1} \cdot v_0 \cdot \sin(\psi - \alpha) \cdot \cos(\psi - \psi_1)}{\sqrt{a_y \cdot a_{1y}}} \cdot \left(1 + \frac{a_{1x}}{2 \cdot \sqrt{a_y \cdot a_{1y}}} \cdot \frac{\sin(\psi - \alpha)}{\cos(\psi - \psi_1)} \right). \quad (22)$$

Составляющая скорости движения жидкости по оси x определялась следующей зависимостью:

$$v_{x2} = v_{x1} \cos(\psi - \psi_1) \cdot \left(1 + \frac{a_{1x}}{\sqrt{a_y \cdot a_{1y}}} \cdot \frac{v_0 \cdot \sin(\psi - \alpha)}{v_{x1} \cdot \cos(\psi - \psi_1)} \right). \quad (23)$$

Составляющая скорости движения жидкости по оси y определялась зависимостью:

$$v_{y2} = a_{y1} \cdot t_2 = v_0 \sin(\psi - \alpha) \cdot \sqrt{\frac{a_{y1}}{a_y}}. \quad (24)$$

Суммарная скорость отрыва жидкости от поверхности круга в момент времени t_2 определялась по формуле:

$$v_2 = \sqrt{v_{x2}^2 + v_{y2}^2}. \quad (25)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ СОТС

По разработанной модели были выполнены расчеты параметров движения СОТС в рабочем слое инструмента. Расчеты выполнялись в программной среде Mathcad 14 при следующих параметрах: угол наклона сопла $\alpha = 3^\circ$; угол точки попадания СОТС на рабочую поверхность круга $\psi = 10^\circ$; диаметр круга $D_k = 200$ мм; скорость круга v_k варьировалась в диапазоне от 30 до 100 м/с. В расчете принимались следующие расходы СОТС: $Q_1 = 20$ л/мин; $Q_2 = 30$ л/мин; $Q_3 = 45$ л/мин; $Q_4 = 60$ л/мин.

Скорость истечения жидкости из сопла определялась по формуле

$$v_{ж} = \frac{Q \cdot 10^4}{60 \cdot S}, \quad (26)$$

где S – площадь проходного сечения сопла охлаждения, равная $S = h \cdot b$; h – высота сечения сопла, мм; b – ширина сечения сопла, мм; Q – расход СОТС через сопло охлаждения, л/мин.

Для принятой в расчетах площади сечения сопла, равной $38,25$ мм², варьируемые скорости истечения жидкости были равны 8,7; 13,1; 19,6; 26,1 м/с.

Результаты расчетов глубины проникновения охлаждающей жидкости в поры абразивного круга при разных скоростях выхода СОТС из сопла представлены на рис. 5.

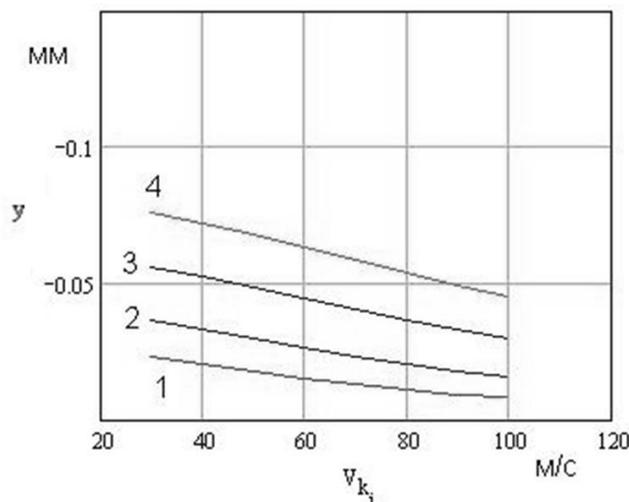


Рис. 5. Результаты расчетов глубины проникновения охлаждающей жидкости y в поры абразивного круга при различных скоростях СОТС:
 1 – $v_{ж1} = 8,7$ м/с; 2 – $v_{ж2} = 13,1$ м/с; 3 – $v_{ж3} = 19,6$ м/с; $v_{ж4} = 26,1$ м/с

Результаты расчетов скорости охлаждающей жидкости в момент отрыва от рабочей поверхности круга в зависимости от скорости круга при различных скоростях подачи жидкости представлены на рис. 6.

Одной из важных характеристик для процесса высокоскоростного глубинного шлифования является расстояние, на которое абразивный инструмент способен транспортировать охлаждающую жидкость, чтобы основная часть жидкости была подана в зону резания. Время, в течение которого жидкость находится в пределах (порах) рабочей поверхности круга, складывается из времени заполнения пор t_1 и времени выхода из рабочего слоя инструмента t_2 , а расстояние транспортирования охлаждающей жидкости определялось на основе зависимости:

$$l_2 = v_k \cdot (t_1 + t_2). \quad (27)$$

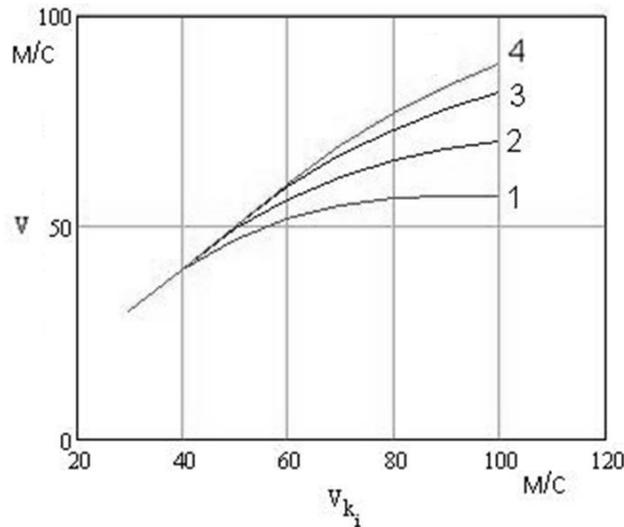


Рис. 6. Результаты расчетов скорости охлаждающей жидкости при выходе из рабочей поверхности абразивного круга в зависимости от его периферийной скорости v_k :

$1 - v_{жк1} = 8,7 \text{ м/с}; 2 - v_{жк2} = 13,1 \text{ м/с}; 3 - v_{жк3} = 19,6 \text{ м/с}; v_{жк4} = 26,1 \text{ м/с}$

Результаты расчетов расстояния транспортировки охлаждающей жидкости в порах абразивного круга от его периферийной скорости v_k представлены на рис. 7.

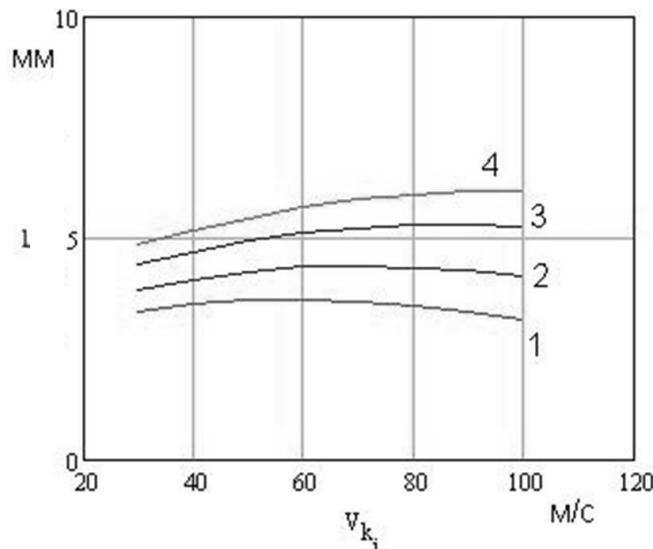


Рис. 7. Результаты расчетов расстояния транспортировки охлаждающей жидкости l в порах абразивного круга от его периферийной скорости v_k :

$1 - v_{жк1} = 8,7 \text{ м/с}; 2 - v_{жк2} = 13,1 \text{ м/с}; 3 - v_{жк3} = 19,6 \text{ м/с}; v_{жк4} = 26,1 \text{ м/с}$

Еще одним важным параметром процесса является количество СОТС, переносимой рельефом рабочей поверхности круга в зону обработки. Для определения количества прокачиваемой жидкости необходимо установить, какое соотношение имеет пространство, заполненное абразивными зернами, наполнителем и связкой, по сравнению с объемом рабочего слоя круга на глубине проникновения СОТС в поры круга h_p .

Объем, занимаемый абразивным зерном, связкой и наполнителем, определялся по формуле [28]:

$$V_{Zcn} = K \cdot Z_k^{-3} \cdot \frac{C_k \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{3 \cdot h_p \cdot 10^5}{Z_k} \right) \right) \cdot V_Z (1 + k_c + k_{n1})}{100}, \quad (28)$$

где K – коэффициент, определяемый для градиента плотности абразивных зерен; Z_k – зернистость алмазного или эльборового круга, мкм (табличное значение); C_k – концентрация алма-

за или кубического нитрида бора в круге; h_p – глубина проникновения СОТС в поры круга; V_Z – средний объем абразивного зерна, определяемый по формуле:

$$V_Z = \frac{\pi \cdot d_z^3}{6}, \quad (29)$$

где d_z – эквивалентный диаметр абразивного зерна, $d_z = 1,26 \cdot 10^{-3} \cdot Z_k$, мм³.

Структура круга формируется за счет добавления наполнителя, связки, выгорающего порообразователя и его распределения в рабочем слое, условий прессования и обжига. Непосредственно в рабочем слое круга дополнительно на нее влияют условия правки и износа. В данной работе коэффициент, определяющий структуру эльборового круга, принимался в следующем виде:

$$k_{n1} = k_n - 0,25 \cdot \frac{C_k}{100}, \quad (30)$$

где $k_n = \frac{62 - 2 \cdot S_c}{100}$ – коэффициент структуры; S_c – номер структуры.

Объем пор в рабочем слое круга на глубине h_p определялся по формуле [31]

$$V_{por} = \pi \cdot D_k \cdot b_k \cdot 10^6 \cdot h_p \cdot \left[1 - K \cdot Z_k^{-3} \cdot \frac{C_k \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{3 \cdot h_p \cdot 10^5}{Z_k} \right) \right) \cdot V_Z (1 + k_c + k_{n1})}{100} \right], \quad (31)$$

где D_k – диаметр круга; b_k – высота круга; k_c – коэффициент, характеризующий количество связки.

Общее количество СОТС, которое может транспортировать рабочая поверхность круга в зону обработки в минуту, можно рассчитать на основе зависимости:

$$Q_{cox} = V_{por} \cdot n_k \cdot 10^{-6}, \quad (32)$$

где n_k – частота вращения круга, мин⁻¹, определяемая по формуле:

$$n_k = \frac{v_k \cdot 60}{\pi \cdot D_k}. \quad (33)$$

Расход СОТС, прокачиваемой рабочей поверхностью абразивного круга через зону контакта, рассчитанный по приведенной выше методике, представлен на рис. 8.

Экспериментальные исследования, проведенные на станке 3E711 CNC при шлифовании никелевого жаропрочного сплава ЖС26, позволили установить, что при ширине шлифования $b = 10$ мм, скорости круга $v_k = 60$ м/с, скорости подачи СОТС $v_{ж} = 26$ м/с предельная мощность шлифования, при которой не наблюдались прижоги на обработанной поверхности, составляла $N_p = 6700$ Вт.

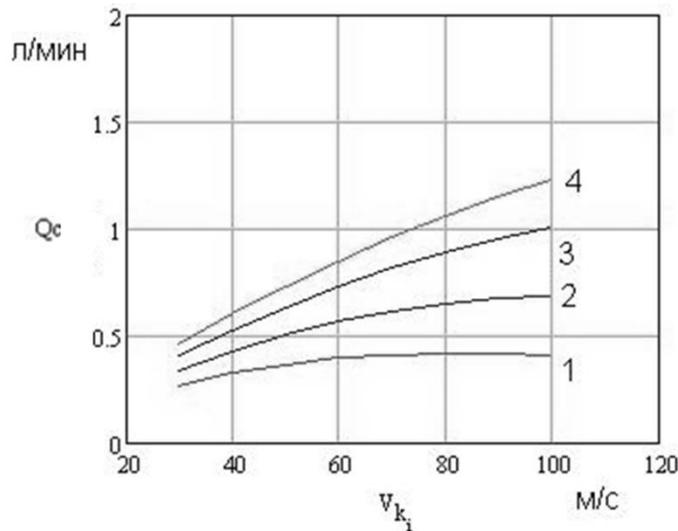


Рис. 8. Результаты расчетов количества охлаждающей жидкости Q_c , транспортируемой в порах абразивного круга, в зависимости от его периферийной скорости v_k :
 $1 - v_{ж1} = 8,7 \text{ м/с}$; $2 - v_{ж2} = 13,1 \text{ м/с}$; $3 - v_{ж3} = 19,6 \text{ м/с}$; $4 - v_{ж4} = 26,1 \text{ м/с}$

На основании этих данных были проведены расчеты температуры, до которой нагреется охлаждающая жидкость, проходящая через зону обработки. Определение температуры нагрева осуществлялось на основании следующей зависимости [34]:

$$\Theta = \Theta_0 + N_p \cdot k_{bal} \cdot \frac{60 \cdot 1000}{Q_{cox} \cdot c\rho_{50}}, \quad (34)$$

где Θ_0 – начальная температура, равная $25 \text{ }^\circ\text{C}$; k_{bal} – коэффициент баланса отвода тепла в СОТС, равный $0,55$; $c\rho_{50}$ – объемная теплоемкость СОТС, принимаемая $4,126 \cdot 10^6 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Результаты расчета температуры нагрева СОТС, прошедшей через зону обработки, представлены на рис. 9.

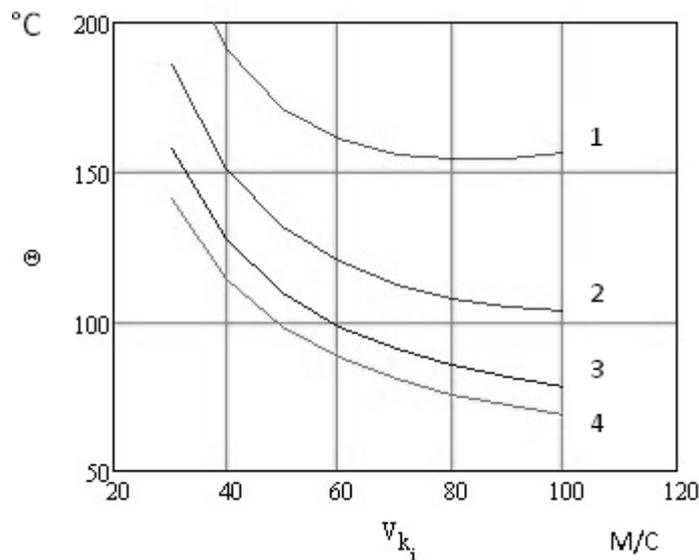


Рис. 9. Результаты расчетов температуры охлаждающей жидкости, транспортируемой через зону обработки, в зависимости от скорости круга v_k :
 $1 - v_{ж1} = 8,7 \text{ м/с}$; $2 - v_{ж2} = 13,1 \text{ м/с}$; $3 - v_{ж3} = 19,6 \text{ м/с}$; $4 - v_{ж4} = 26,1 \text{ м/с}$

Результаты расчетов показали, что при скорости охлаждающей жидкости $v_{ж} = 26 \text{ м/с}$, действительно, закипание СОТС еще не наступает. При всех других скоростях подачи СОТС температура может достигать температуры кипения. Если происходит увеличение мощности

шлифования на 10 %, то температура жидкости приближается к 100 °С. В этом случае прижог наступает и при скорости $v_{ж} = 26$ м/с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ СОПЛА

Схема определения оптимального положения сопла подачи СОТС представлена на рис. 10. За «нулевую» координату положения сопла по вертикальной оси принимается нижняя точка шлифовального круга, определяющая окончательную поверхность обработки. Параметрами, от которых зависит позиционирование сопла по данной оси, являются расстояние до верхней точки выхода жидкости из сопла h_3 и угол наклона потока СОТС α_c . Оба этих параметра зависят от конструктивных и геометрических особенностей сопла.

Величина ψ зависит от позиционирования сопла подачи СОТС при шлифовании. Начальным параметром, определяющим расстояние сопла по горизонтальной оси l_c , является радиус круга R_k . Подавляющее большинство станков для глубинного шлифования не имеет механизмов позиционирования сопла в данном направлении, и размер l_c остается постоянным.

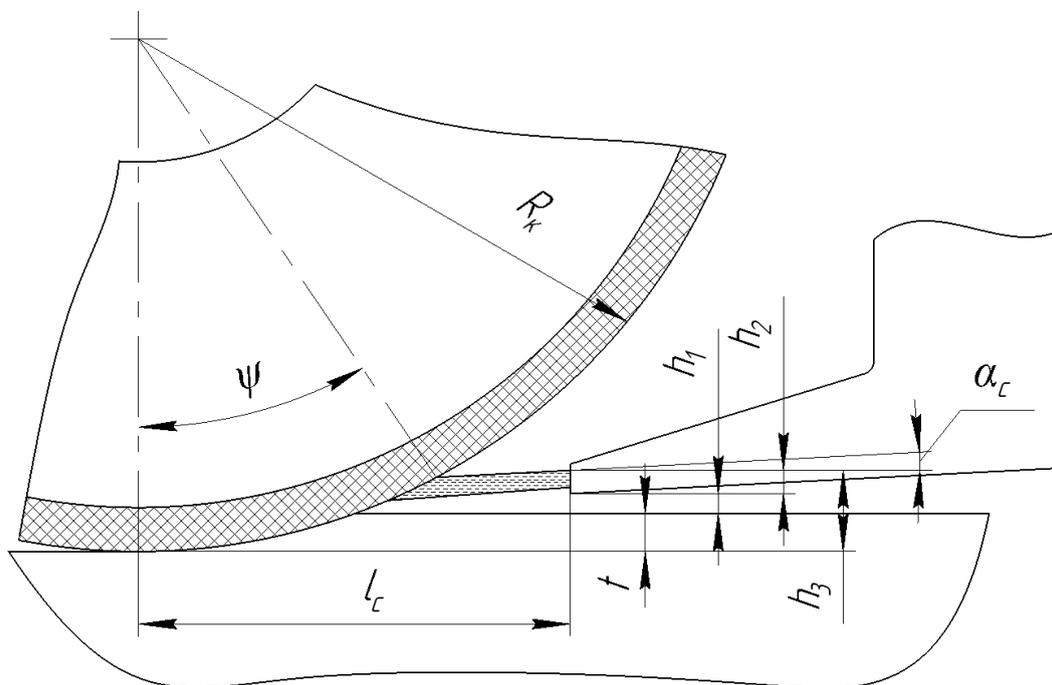


Рис. 10. Схема позиционирования сопла подачи СОТС для попутного шлифования

Поскольку при попутном шлифовании сопло располагается над обрабатываемой поверхностью, его положение должно учитывать величину припуска на обработку t . Большое давление в системе подачи СОТС при ее работе формирует реактивную силу, которая способствует возникновению упругих деформаций в подвижных соединениях системы позиционирования сопла, поэтому необходимо введение параметра h_1 , характеризующего безопасное расстояние от нижнего элемента сопла до поверхности заготовки. Величину параметра h_3 можно определить следующим образом:

$$h_3 = t + h_1 + h_2, \quad (35)$$

где t – припуск при обработке, мм; h_1 – величина безопасного расстояния до сопла, мм; h_2 – расстояние от нижней точки сопла до верхней границы его отверстия, мм.

Таким образом, при условии, что ψ находится в диапазоне от 0 до 90°, его величина в зависимости от параметров шлифовального круга и сопла системы подачи СОТС будет являться действительным неотрицательным корнем уравнения:

$$R_k(1 - \cos \psi) + \tan \alpha_c (l_c - R_k \cdot \sin \psi) = h_3. \quad (36)$$

Полученное значение угла ψ будет определять точку, которая должна отстоять от начала зоны контакта на определенное расстояние, равное $\psi \cdot r_k$. Для обеспечения оптимальной подачи струи СОТС на поверхность абразивного круга необходимо выполнение следующих условий: при попутном шлифовании

$$l_2 \geq \psi \cdot r_k - \sqrt{D_k \cdot t}. \quad (37)$$

При встречном шлифовании

$$l_2 \geq \psi \cdot r_k. \quad (38)$$

Реализация приведенных условий непосредственно на станке при высокоскоростном шлифовании жаропрочных сплавов с попутной подачей инструментом из КНБ при следующих условиях установки сопла: $l_c = 50$ мм; $h_1 = 1$ мм; $h_2 = 1,5$ мм; $\alpha_c = 3^\circ$; глубина шлифования $t = 0,5$ мм; диаметр круга $D_k = 200$ мм; скорость круга $v_k = 60$ м/с; скорость СОТС $v_{ж} = 26$ м/с ($l_2 = 6$ мм) позволила получить наилучшие результаты по производительности шлифования при отсутствии дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представленная математическая модель позволяет определить оптимальные условия положения сопла для подачи СОТС при высокоскоростном глубинном шлифовании инструментом из КНБ.

2. Модель хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований и позволяет учитывать условия подачи СОТС и структуру абразивного инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Д. И., Цветков Б. В. Перспективы развития глубинного шлифования деталей газотурбинных двигателей с использованием высокопористых эльборовых кругов // Вестник машиностроения. 2022. № 7. С. 45–48. [D.I. Volkov, B.V. Tsvetkov, Prospects for the development of deep-feed grinding of gas turbine engine parts using highly porous cubic boron nitride wheels // Vestnik Mashinostroeniya. 2022. No. 7. P. 45–48 (in Russian).]
2. Ефимов В. В. О проникновении (пропитке) технологической жидкости в абразивный шлифовальный круг с периферийной поверхности // Изв. вузов. Машиностроение. 1984. № 8. С.148–152. [V.V. Efimov, On the penetration of the process fluid into the abrasive grinding wheel from the peripheral surface // Izvestiya VUZov. Mashinostroenie. 1984. No. 8. P. 148–152 (in Russian).]
3. Ефимов В. В., Буранов Н. С., Демидов В. В. Течение СОЖ в зоне контакта шлифовальный круг – деталь // Вестник машиностроения. 1980. №11. С. 51–53. [V.V. Efimov, N.S. Buranov, V.V. Demidov, Flow of a cooling and lubrication fluid in the contact zone between a grinding wheel and a part // Vestnik Mashinostroeniya. 1980. No. 11. P. 51–53 (in Russian).]
4. Худобин Л. В., Бабичев А. П., Булыжев Е. М. Смазочно-охлаждающие технические средства и их применение при обработке резанием: справочник под ред. Л. В. Худобина. М.: Машиностроение, 2007. 544 с. [L.V. Khudobin, A.P. Babichev, E.M. Bulyzhev, Cooling and Lubrication Fluids and Their Application during Cutting Treatment. – Moscow: Mashinostroenie, 2007. – 544 p. (in Russian).]
5. Волков Д. И., Цветков Б. В., Голованова А. М. Повышение эффективности глубинного шлифования замкового элемента лопатки турбины высокопористым эльборовым шлифовальным кругом Аэробор II // Вестник машиностроения. 2021. № 7. С. 68–71. [D.I. Volkov, B.V. Tsvetkov, A.M. Golovanova, Increasing the effectiveness of deep grinding of the locking element of a turbine blade with an "Aerobor® II" highly porous cubic boron nitride grinding wheel. // Vestnik Mashinostroeniya. 2021. No. 7. P. 68–71 (in Russian).]
6. Aspinwall D. K., Soo S. L., Curtis D. T., Mantle A. L. Profiled Superabrasive Grinding Wheels for the Machining of a Nickel Based Superalloy / CIRP Annals. 2007. №1 (56). P.335.
7. Гюринг К. Технология высокоскоростного шлифования // Современная металлообработка: Матер. симпозиума. Ярославль, 1987 / ГЮРИНГ Аутоматизон ГмбХ и Ко. 1987. С.2.1–2.17. [K. Gühring, Technology of high-speed grinding. In: Proceedings of the Symposium "Modern Metal Working" (Yaroslavl, March 1987). Gühring Automation GmbH, Stetten, 1987. P. 2.1–2.17 (in Russian).]
8. Хрульков В. А., Лобанов А. В., Полетаев В. А., Волков Д. И. Оптимальные условия подачи СОЖ при шлифовании высокопористыми кругами // Станки и инструменты. 1985. №9. С.28–29. [V.A. Khrulkov, A.V. Lobanov, V.A. Poletaev, D.I. Volkov, Optimum conditions for the supply of a cooling and lubrication fluid during grinding with high-porosity wheels // Stanki i Instrumenty. 1985. No. 9. P. 28–29 (in Russian).]

9. Hood R., Aguirre F. M., Gonzalez L. S., Novovic D., Soo S. L. Evaluation of superabrasive grinding points for the machining of hardened steel / CIRP Annals. 2019. No. 1 (68). P. 329–333.
10. Кремень З. И., Юрьев В. Г., Бабошкин А. Ф. Технология шлифования в машиностроении. СПб.: Политехника, 2007. 424 с. [Z.I. Kremen, V.G. Yur'ev, A.F. Baboshkin, Grinding Technology in Mechanical Engineering. – Saint Petersburg, Politekhnik, 2007. – 424 p. (in Russian).]
11. Полетаев В. А., Цветков Е. В., Волков Д. И. Автоматизированное производство лопаток ГТД. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 261 с. [V.A. Poletaev, E.V. Tsvetkov, D.I. Volkov, Automated Production of GTE Blades. – Moscow: Innovatsionnoe Mahinostroenie, 2016. – 261 p. (in Russian).]
12. Saito Y., Nishiwaki N., Ito Y. An investigation of local heat transfer during grinding process – effects of porosity of grinding wheel // Trans. ASME. 1979. Vol.101. № 2. P.97–103.
13. Kopalinsky E. M. A new approach to calculating the workpiece temperature distributing in grinding // Wear. 1984. Vol. 94. №3. P. 295–322.

ОБ АВТОРАХ

ВОЛКОВ Дмитрий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мехатронные системы и процессы формообразования им. С. С. Силина», ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева». +79109791789, d_i_volkov@rsatu.ru.

ЦВЕТКОВ Борис Викторович, кандидат технических наук, начальник отдела исследований и новых разработок ООО «ПАЗИ». +78611551787, boris_tsvetkov@mail.ru.

ГОЛОВАНОВА Анна Михайловна, аспирант кафедры «Мехатронные системы и процессы формообразования им. С. С. Силина», ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева». +79159945857, uryadyshvaa@mail.ru.

METADATA

Title: Optimization of cooling during high-speed deep grinding with tools made of cubic boron nitride.

Authors: D. I. Volkov¹, B. V. Tsvetkov², A. M. Golovanova³

Affiliation: ^{1,3} Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Solovyov

² Head of the Research and Innovation Department at “Ilyich Abrasive Company”

Email: ¹ d_i_volkov@rsatu.ru, ² boris_tsvetkov@mail.ru, ³ uryadyshvaa@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 28, no. 2 (104), pp. 14-26, 2024. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The results of a study of the supply of a coolant by a porous abrasive wheel to the processing zone during high-speed creep feed grinding are presented. A method is presented for determining the optimal position of the nozzle in relation to the abrasive wheel and the workpiece, ensuring the absence of burns on the machined surface when grinding with a tool based on cubic boron nitride (CBN).

Keywords: high-speed creep feed grinding; highly porous tools; cubic boron nitride; optimization of coolant supply.

About authors:

VOLKOV, Dmitri Ivanovich, Doctor of Technical sciences, Professor, Head of the Department “Mechatronic Systems and Shaping Processes” named after S. S. Silin, Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Solovyov.

TSVETKOV, Boris Victorovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Research and Innovation Department at “Ilyich Abrasive Company”.

GOLOVANOVA, Anna Mikhailovna, postgraduate student of the Department “Mechatronic Systems and Shaping Processes” named after S. S. Silin, Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Solovyov.