

УДК621.923

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЮ СЕБЕСТОИМОСТИ ОБРАБОТКИ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Черненко А.В.

(г. Харьков, Украина)

В работе приведены результаты оптимизации параметров алмазного шлифования по критерию себестоимости обработки

Применение прогрессивных технологий и режущих инструментов является важным фактором развития машиностроения и создания конкурентоспособной продукции. В успешном решении этих задач большое значение имеет оптимизация условий обработки по критерию себестоимости, позволяющая научно обоснованно определить экономически выгодные варианты обработки. Вместе с тем, задачи оптимизации технологических процессов являются весьма сложными, требующими разработки глубоких математических моделей технологических процессов обработки [1]. Поэтому целью работы является определение оптимальных параметров механической обработки по критерию себестоимости на примере алмазного шлифования, являющегося одним из наиболее эффективных методов повышения качества и производительности обработки. В нашей работе [2] приведена аналитическая зависимость для определения себестоимости обработки C :

$$C = n_1 \cdot t_n \cdot S_1 \cdot k + n_2 \cdot Ц + S_2 \cdot N \cdot t_n, \quad (1)$$

где n_1 – количество обрабатываемых деталей, шт.; n_2 – количество потребляемых инструментов, шт.; t_n – норма времени на обработку одной детали, час; $t_n = Z \cdot t_o$; t_o – основное время на обработку одной детали, час; Z – коэффициент, учитывающий долю вспомогательного времени на обработку одной детали по отношению к основному времени; S_1 – тарифная ставка рабочего, грн/час; k – коэффициент, учитывающий всевозможные начисления (налоги) на заработную плату рабочего; $Ц$ – цена одного инструмента, грн; S_2 – стоимость единицы энергии грн; N – потребляемая мощность процесса, Вт.

В зависимости (1) учтены три основные составляющие затрат, связанные с заработной платой рабочего, стоимостью инструментов и потребляемой энергии при обработке на станке. Для выполнения оптимизационных расчетов на основе себестоимости обработки важно знать функциональные связи между первым и вторым слагаемыми зависимости (1), пренебрегая третьим слагаемым в силу его малости. Для более углубленного анализа необходимо использовать аналитические зависимости, полученные на основе математического моделирования процессов обработки. Преобразуем зависимость (1) с учетом следующих соотношений:

$$t_o = \frac{V_0}{Q}; \quad V = n_1 \cdot V_0; \quad T = \frac{h}{V_{изн}}; \quad V_{изн} = \frac{Q_{изн}}{\pi \cdot D_{кр} \cdot B}; \quad q = \frac{Q_{изн} \cdot \rho_a \cdot \alpha}{Q \cdot \rho_m},$$

где V_0 – объем материала, снимаемый при обработке с одной детали, м³; Q – производительность обработки, м³/с; V – суммарный объем материала, снимаемый при обработке с n_1 деталей, м³; h – толщина алмазносного слоя круга, м;

$B, D_{кр}$ – соответственно ширина рабочей части круга и диаметр круга, м; $Q_{изн}$ – объем алмазосносного слоя круга, который изнашивается в единицу времени, м³/с; q – удельный расход алмаза, кг/кг; ρ_a, ρ_m – соответственно плотности алмаза и обрабатываемого материала, кг/м³; α – коэффициент, учитывающий объем, занимаемый алмазным порошком в общем объеме алмазосносного слоя круга (для 100%-ной концентрации алмазного круга $\alpha = 0,25$; для 50% -ной концентрации – $\alpha = 0,125$ и т.д.).

После преобразований зависимости (1), получим

$$C = V \left(\frac{A_1}{Q} + \frac{Ц}{V_{алмаз}} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_a \cdot \alpha} \cdot q \right), \quad (2)$$

где $V_{алмаз} = B \cdot h \cdot \pi \cdot D_{кр}$ – объем алмазосносного слоя круга, м³; $A_1 = S_1 \cdot Z \cdot K$.

Произведение параметров $V_{алмаз} \cdot \rho_a \cdot \alpha = m_a$ определяет массу алмазных зерен, содержащихся в алмазосносном слое круга. Отношение $Ц / m_a = Ц_1$ определяет цену единицы массы алмазного порошка. С учетом сказанного, зависимость (2) примет вид:

$$C = V \left(\frac{A_1}{Q} + Ц_1 \cdot \rho_m \cdot q \right). \quad (3)$$

В зависимость (3) входят две переменные величины Q и q . Экспериментально установлено, что с увеличением Q (например, за счет увеличения глубины шлифования) удельный расход алмаза q увеличивается, рис. 1. Не вникая в физическую суть причин, вызывающих рост q с увеличением Q , рассмотрим аппроксимирующую зависимость:

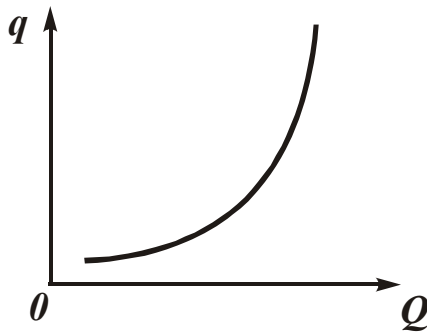


Рис. 1. Зависимость q от Q .

мость:

$$q = \beta \cdot Q^m, \quad (4)$$

где β, m – параметры, определяемые экспериментально.

Подставим (4) в зависимость (3):

$$C = V \cdot \left(\frac{A_1}{Q} + Ц_1 \cdot \rho_m \cdot \beta \cdot Q^m \right). \quad (5)$$

Как видно, себестоимость обработки C с изменением производительности обработки Q изменяется по экстремальной зависимости. Дифференцируя функцию C по Q и приравнявая первую производную нулю, определим экспериментальное значение $Q_{экстр}$:

$$Q_{экстр} = \left(\frac{A_1}{Ц_1 \cdot \rho_m \cdot \beta \cdot m} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (6)$$

Для $m \geq 2$ вторая производная функции C''_Q в точке экстремума – положительна, т.е. имеет место минимум себестоимости обработки C .

Исходя из зависимости (6), увеличить $Q_{экстр}$ можно увеличением $A_1 = S_1 \cdot Z \cdot K$ и уменьшением параметров $Ц_1, \rho_m, \beta, m$. В данном случае параметры

C_1, β, m определяются прочностью и износостойкостью алмазных зерен (маркой алмазного порошка). Например, с увеличением прочности алмазных зерен параметр C_1 увеличивается, а параметры β и m уменьшаются (в связи с уменьшением интенсивности износа зерен). Следовательно, характеристики алмазных зерен неоднозначно влияют на $Q_{экстр}$ и соответственно себестоимость обработки. Необходимо отметить, что возможности решения оптимизационных задач на основе экспериментально установленной зависимости $q=f(Q)$ весьма ограничены. Так, зависимость (6) не содержит параметров режима шлифования, характеристик круга и детали. В связи с этим, проведем анализ себестоимости обработки с использованием аналитической зависимости $q=f(Q)$, приведенной в работе [3] применительно к алмазному шлифованию по упругой схеме:

$$q = \frac{\rho_a \cdot \alpha \cdot HV}{\rho_m \cdot c \cdot P_y \cdot a \cdot \eta^3} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot \sigma_{сж} \cdot HV}{(1-\eta)}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{сж}, HV$ – соответственно предел прочности на сжатие и твердость (по Виккерсу)

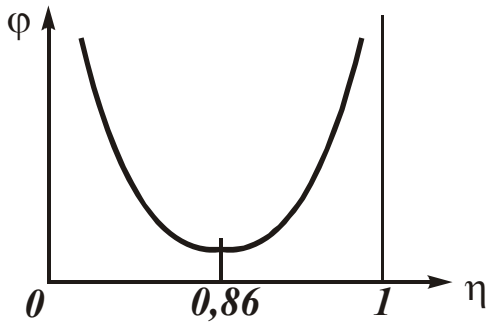


Рис. 2. Зависимость φ от η .

обрабатываемого материала, Н/м^2 ; $P_y = F_y / a \cdot B$ – нормальное давление, н/м^2 ; $(a \cdot B)$ – площадь контакта круга с материалом, м^2 ; B – ширина рабочей части круга, м; a – толщина поперечного сечения обрабатываемого образца, прижимаемого к кругу с фиксированным усилием F_y ; γ – половина угла при вершине конусообразного зерна; η – безразмерный коэффициент изменяющийся в пределах $0 \dots 1$ и определяющий степень затупления зерна (для “острого” зерна $\eta \rightarrow 0$, для затупленного зерна $\eta \rightarrow 1$); c – коэффициент, характеризующий износостойкость алмазного зерна, н/м^3 .

Согласно приведенной зависимости, с изменением коэффициента η в пределах $0 \dots 1$ удельный расход алмаза q подчиняется экстремальной зависимости (рис. 2), где $\varphi = \eta^{-3} \cdot (1-\eta)^{-0,5}$.

При $\eta=0$ и $\eta=1$ удельный расход алмаза стремится к бесконечности. Минимум функции φ достигается при $\eta=0,86$. В работе [3] приведена аналитическая зависимость для определения производительности обработки:

$$Q = \frac{2 \cdot V_{кр} \cdot F_y \cdot (1-\eta)}{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV}. \quad (8)$$

Производительность обработки Q тем больше, чем больше скорость круга $V_{кр}$, сила прижима образца к кругу F_y и меньше безразмерный коэффициент $\eta \rightarrow 0$. При $\eta \rightarrow 1$ (т.е. при шлифовании затупленными зернами) $Q \rightarrow 0$. Подставим зависимости (7) и (8) в (3):

$$C = V \left[\frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV \cdot A_1}{2 \cdot V_{кр} \cdot F_y \cdot (1-\eta)} + \frac{C_1 \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot HV}{c \cdot P_y \cdot a \cdot \eta^3} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot \sigma_{сж} \cdot HV}{(1-\eta)}} \right]. \quad (9)$$

С увеличением коэффициента η первое слагаемое увеличивается, а второе уменьшается (рассматривая на рис. 2 лишь левую ветвь зависимости $\varphi - \eta$).

При $\eta=0$ второе слагаемое стремится к бесконечности. Следовательно, с увеличением η себестоимость обработки C первоначально будет уменьшаться от бесконечности до определенного значения (минимума C), затем увеличиваться. Минимум функций C будет достигаться при $\eta < 0,86$. Для определения экстремального значения η возьмем первую производную от C по η и полученное выражение приравняем нулю. После преобразований, имеем

$$\frac{(3 - 3.5 \cdot \eta) \cdot (1 - \eta)^{0.5}}{\eta^4} = \frac{A_1 \cdot c}{2 \cdot V_{кр} \cdot C_1 \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma}{\sigma_{сж} \cdot HV}} \quad (10)$$

Для определения экстремального значения η необходимо знать численное значение правой части уравнения (10).

Проведем анализ минимального значения себестоимости обработки C , рассматривая экстремальное значение η , которое может быть установлено на основе решения уравнения (10). Зависимость (9) представим в виде:

$$C_{min} = \frac{V \cdot HV \cdot \sqrt{\pi \cdot \text{tg} \gamma}}{F_y} \cdot \left[\frac{A_1 \sqrt{\pi \cdot \text{tg} \gamma}}{2 \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta)} + \frac{C_1 \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot B}{c \cdot \eta^3} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{сж} \cdot HV}{1 - \eta}} \right] \quad (11)$$

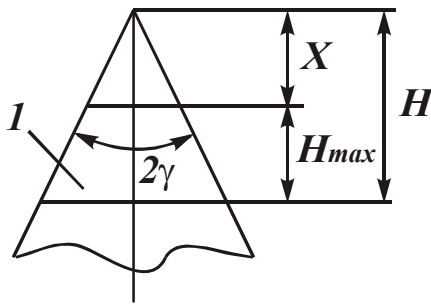


Рис. 3. Расчетная схема шлифования: 1 – зерно.

Зависимость (11) содержит две переменные величины F_y и $V_{кр}$. С их увеличением C_{min} однозначно уменьшается (при условии $\eta = \text{const}$), а производительность обработки Q увеличивается. Следовательно, уменьшение себестоимости обработки C_{min} обусловлено увеличением производительности Q . Однако пределы уменьшения C_{min} и увеличения Q ограничены. В работах [3, 4] показано, что с увеличением F_y увеличивается максимальная глубина внедрения зерна в обрабатываемый материал H (рис. 3):

$$H = \bar{X} \cdot 3 \sqrt{\frac{900 \cdot F_y}{\text{tg}^2 \gamma \cdot m \cdot HV \cdot B \cdot \alpha}} \quad (12)$$

где \bar{X} – зернистость алмазного круга, м; m – объемная концентрация круга.

Параметр H связан с величиной линейного износа зерна x зависимостью: $\eta = x / H$. При $\eta = \text{const}$ с увеличением H увеличивается величина x , т.е. по сути, увеличивается радиус округления вершины режущего зерна.

Очевидно, параметр H в пределе равен максимальной высоте выступания зерен над уровнем связки круга b . Поэтому, исходя из зависимости (12), сила прижатия круга к обрабатываемому материалу F_y может изменяться в ограниченных пределах. Увеличить F_y можно увеличением объемной концентрации круга m (при заданных значениях HV , $B \cdot \alpha$), но главным образом – увеличением максимальной высоты выступания зерен над уровнем связки круга $b = H_1$. Таким образом, теоретически обосновано основное направление увеличения F_y и соответственно увеличения Q и уменьшения C_{min} .

Увеличить b (для $\bar{X} = const$) можно повышением прочности удержания алмазных зерен на рабочей поверхности круга, применяя более прочные металлические связки. Однако, как известно, алмазные круги на металлических связках в процессе шлифования быстро изнашиваются и затупляются. Выступление зерен над уровнем связки уменьшается. Поэтому для обеспечения увеличенного выступления зерен эффективно использовать электрофизикохимические методы правки круга.

В отличие от силы F_y , скорость круга $V_{кр}$ в зависимость (12) не входит. Следовательно, скорость круга не ограничена высотой выступления зерен над уровнем связки круга. На первый взгляд, это открывает широкие возможности увеличения Q и уменьшения C_{min} . Однако, скорость круга $V_{кр}$ входит в уравнение (10). С ее увеличением правая часть уравнения уменьшается, что однозначно ведет к увеличению экстремального значения $\eta \rightarrow 1$ и соответственно C_{min} , исходя из зависимости (11). Таким образом, скорость круга эффективно увеличивать лишь до определенного значения. Тогда C_{min} будет уменьшаться. При дальнейшем увеличении $V_{кр}$ себестоимость обработки будет возрастать.

Для реализации установленных оптимальных условий обработки необходимо в первую очередь поддерживать в процессе шлифования на заданном уровне безразмерный коэффициент η , который в общем случае определяется зависимостью (13). Параметр H , входящий в (13), в процесс шлифования остается постоянным. Изменяется параметр x . Для того чтобы ограничить рост x и не допустить увеличение коэффициента η выше предельного значения, необходимо управлять процессом удаления затупившихся зерен из связки круга. При работе алмазного круга в режиме самозатачивания процесс управления осуществляется автоматически без дополнительного воздействия (извне) на рабочую поверхность круга. Регулируемым параметром служит предельная нагрузка, действующая на зерно, достижение которой происходит при вполне конкретном значении x .

При работе круга в режиме затупления (шлифование алмазными кругами на металлических связках) прочность удержания зерна в связке может быть больше собственно прочности зерна и для его удаления из связки необходимо дополнительное воздействие (извне). Например, за счет электроэрозионного или электрохимического разрушения металлической связки, что позволяет уменьшить глубину залегания зерна в связке и прочность его удержания.

Литература: 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 2. Новіков Ф.В., Дитиненко С.О., Черненко А.В. Економічна оцінка умов підвищення технологічної підготовки виробництва // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – “Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні”. – 2008. – Вип. 68. – С. 239-242. 3. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. Алмазная обработка: Учеб. пособие. – К.: ІЗМН, 1996. – 168 с. 4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Серов Б.С., Якимов А.А. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.