

## ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ФАКТОР В ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**Кривошапка Ю.Н., канд. экон. наук, Новиков Ф.В., докт. техн. наук**  
(Государственное Предприятие Харьковский машиностроительный завод  
«ФЭД», Харьковский государственный экономический университет)

*В работе приведены результаты оптимизации параметров технологических процессов по критерию себестоимости обработки на примере алмазного шлифования.*

Известно, что оптимальные режимы резания, обеспечивающие выполнение технических требований на обработку, существенно отличаются от режимов резания, соответствующих минимуму себестоимости изготавливаемой продукции. Задача определения экономически выгодных режимов резания и других параметров технологического процесса чрезвычайно актуальна в настоящее время, когда постоянно изменяются цены на инструменты, заработная плата рабочих и т.д. Поэтому в работе предлагается подход с учетом экономического фактора на основе результатов исследований, приведенных в работе [1].

Для выполнения оптимизационных расчетов на основе себестоимости обработки важно знать функциональные связи между первым и вторым слагаемыми зависимости (1), приведенной в работе [1], пренебрегая третьим слагаемым в силу его малости

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

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 формуле (1) учтены три основные составляющие затрат, связанные с заработной платой рабочего, стоимостью инструментов и потребляемой энергии при обработке на станке.

Для углубленного анализа необходимо использовать аналитические зависимости, полученные на основе математического моделирования процессов обработки, в частности, алмазного шлифования.

Преобразуем зависимость (1) с учетом следующих соотношений:

$$t_0 = \frac{V_0}{Q}; \quad V = n_1 \cdot V_0; \quad T = \frac{h}{V_{изн}};$$

$$V_{изн} = \frac{Q_{изн}}{\pi \cdot D_{кр} \cdot B}; \quad q = \frac{Q_{изн} \cdot \rho_a \cdot \alpha}{Q \cdot \rho_m},$$

где  $V_0$  – объем материала, снимаемый при обработке с одной детали, м<sup>3</sup>;

$Q$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;

$V$  – суммарный объем материала, снимаемый при обработке с  $n_1$  деталей, м<sup>3</sup>;

$h$  – толщина алмазоносного слоя круга, м;

$B, D_{кр}$  – соответственно ширина рабочей части круга и диаметр круга, м;

$Q_{изн}$  – объем алмазоносного слоя круга, который изнашивается в единицу времени, м<sup>3</sup>/с;

$q$  – удельный расход алмаза, кг/кг;

$\rho_a, \rho_m$  – соответственно плотности алмаза и обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий объем, занимаемый алмазным порошком в общем объеме алмазоносного 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

$$C = V \left( \frac{A_1}{Q} + \frac{Ц}{V_{алмаз}} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_a \cdot \alpha} \cdot q \right)_1, \quad (2)$$

где  $V_{алмаз} = B \cdot h \cdot \pi \cdot D_{кр}$  – объем алмазоносного слоя круга, м<sup>3</sup>;

$$A_1 = S_1 \cdot Z \cdot K.$$

Произведение параметров  $V_{алмаз} \cdot \rho_a \cdot \alpha = m_a$  определяет массу алмазных зерен, содержащихся в алмазоносном слое круга.

Отношение  $\frac{Ц}{m_a} = Ц_1$  определяет цену единицы массы алмазного порошка. С учетом

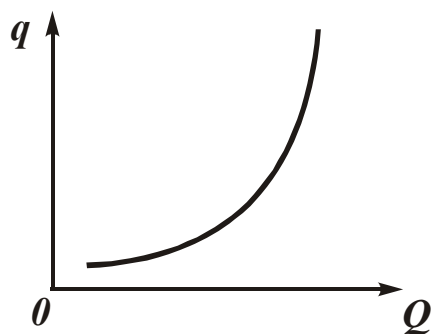


Рис.1. Зависимость  $q$  от  $Q$ .

сказанного, зависимость (2) примет вид

$$C = V \left( \frac{A_1}{Q} + C_1 \cdot \rho_m \cdot q \right). \quad (3)$$

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

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

где  $\beta$ ,  $m$  – параметры, определяемые экспериментально.

Подставим (4) в зависимость (3)

$$C = V \cdot \left( \frac{A_1}{Q} + C_1 \cdot \rho_m \cdot \beta \cdot Q^m \right). \quad (5)$$

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

$$Q_{экстр} = \left( \frac{A_1}{C_1 \cdot \rho_m \cdot \beta \cdot m} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (6)$$

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  $C_1$ ,  $\rho_m$ ,  $\beta$ ,  $m$ . В данном случае параметры  $C_1$ ,  $\beta$ ,  $m$  определяются прочностью и износостойкостью алмазных зерен (маркой алмазного порошка). Например, с увеличением прочности алмазных зерен параметр  $C_1$  увеличивается, а параметры  $\beta$  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 [2] 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) обрабатываемого материала, н/м<sup>2</sup>;

$$P_y = \frac{F_y}{a \cdot B} \text{ - нормальное давление, н/м}^2;$$

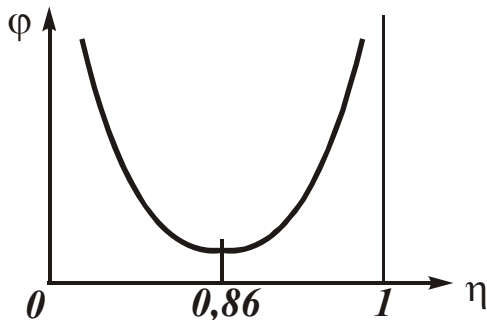
$(a \cdot B)$  – площадь контакта круга с материалом, м<sup>2</sup>;

$B$  – ширина рабочей части круга, м;

$a$  – толщина поперечного сечения обрабатываемого образца, прижимаемого к кругу с фиксированным усилием  $F_y$ ;

$\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного зерна;

$\eta$  – безразмерный коэффициент изменяющийся в пределах 0...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<sup>3</sup>.

Согласно приведенной зависимости, с изменением коэффициента  $\eta$  в пределах 0...1 удельный расход алмаза  $q$  подчиняется экстремальной зависимости (рис.2. где

Рис.2. Зависимость  $\varphi$  от  $\eta$ .

$$\varphi = \frac{1}{\eta^3 \cdot (1-\eta)^{0.5}}).$$

При  $\eta=0$  и  $\eta=1$  удельный расход алмаза стремится к бесконечности. Минимум функции  $\varphi$  достигается при  $\eta = 0,86$ . В работе [2] 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):

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

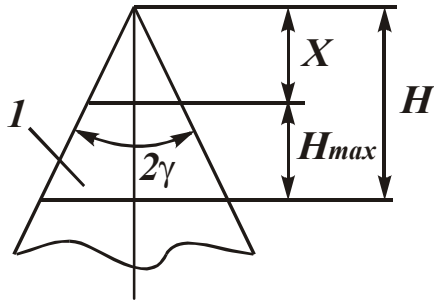


Рис.3. Расчетная схема шлифования: 1 – зерно.

будет достигаться при  $\eta < 0,86$ . Для определения экстремального значения  $\eta$  возьмем первую производную от  $C$  по  $\eta$  и полученное выражение приравняем нулю. После преобразований, имеем

$$\frac{(3 - 3.5 \cdot \eta) \cdot (1 - \eta)^{0.5}}{\eta^4} = \frac{A_1 \cdot c}{2 \cdot V_{кр} \cdot \zeta_1 \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\sigma_{сж} \cdot HV}} \quad (10)$$

Для определения экстремального значения  $\eta$  необходимо знать численное значение правой части уравнения (10).

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

$$C_{min} = \frac{V \cdot HV \cdot \sqrt{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma}}{F_y} \times \left[ \frac{A_1 \sqrt{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma}}{2 \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta)} + \frac{\zeta_1 \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot B}{c \cdot \eta^3} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{сж} \cdot HV}{1 - \eta}} \right] \quad (11)$$

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  $Q$ , исходя из зависимости (8), увеличивается. Следовательно, уменьшение себестоимости обработки  $C_{min}$  обусловлено увеличением производительности  $Q$ .

Однако, пределы уменьшения  $C_{min}$  и увеличения  $Q$  ограничены. В работе [2] показано, что с увеличением  $F_y$  увеличивается максимальная глубина внедрения зерна в обрабатываемый материал  $H$  (рис.3)

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

где  $\bar{x}$  - зернистость алмазного круга, м;

$m$  - объемная концентрация круга.

С увеличением коэффициента  $\eta$  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  $\eta$  себестоимость обработки  $C$  первоначально будет уменьшаться от бесконечности до определенного значения (минимума  $C$ ), затем увеличиваться. Минимум функций  $C$

Параметр  $H$  связан с величиной линейного износа зерна  $x$  зависимостью

$$\eta = \frac{x}{H}. \quad (13)$$

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  $HV$ ,  $B \cdot a$ ), 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  $\bar{x} = \text{const}$ ) 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. Выступание зерен над уровнем связки уменьшается. Поэтому для обеспечения увеличенного выступания 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 выступания 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 увеличивается 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  $\eta$ , 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  $\eta$  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.

Таким образом, определены оптимальные условия алмазного шлифования по критерию себестоимости обработки.

### **Список литературы**

1. Кривошапка Ю.Н. Экономический анализ уровня технологической подготовки производства. – Труды Одесского политехнического университета. – Одесса, 2001. – Вып.5. – С.265-267.
2. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. Алмазная обработка. Учеб. пособие. – К.: ИЗМН, 1996. – 168с.