

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВЯЗИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ И ВЕЛИЧИНЫ УПРУГОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Фадеев В.А., канд. техн. наук, Новиков Ф.В., докт. техн. наук
(Государственное Предприятие Харьковский машиностроительный завод
«ФЭД», г. Харьков,
Харьковский государственный экономический университет)

Приведены аналитические упрощенные зависимости для расчета производительности обработки и величины упругого перемещения при шлифовании. Определены пути интенсификации процесса шлифования.

При шлифовании под действием возникающей силы резания происходит упругое перемещение круга и обрабатываемой детали, что ведет к снижению производительности, точности и качества обработки. В наших работах получена аналитическая упрощенная зависимость для определения производительности обработки Q с учетом упругого перемещения в технологической системе

$$Q = \frac{Q_0}{\left[1 + \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV}{c \cdot v_{кр} \cdot \tau} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \sqrt[3]{1 + \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{x}^3 \cdot v_{дет} \cdot \sqrt{t\rho}}{m \cdot v_{кр} \cdot x^3}} \right) \right]}, \quad (1)$$

где Q_0 – номинальная производительность обработки, м³/с; $v_{кр}$, $v_{дет}$ – соответственно скорости круга и детали, м/с; $D_{дет}$, $l_{дет}$ – соответственно диаметр и длина обрабатываемой детали, м; c – приведенная жесткость системы в радиальном направлении, н/м; t – глубина шлифования, м; τ – время обработки, с; $\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}$; $R_{кр}$, $R_{дет}$ – соответственно радиусы круга и детали, м; HV – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), н/м²; m – объемная концентрация круга; \bar{x} – зернистость круга, м; x – величина линейного износа максимально выступающего над уровнем связки зерна, м; γ – половина угла при вершине зерна.

Полученная зависимость (1) имеет сложную структуру. Переменными в процессе шлифования являются два(входящие в (1)) параметра: τ и x .

С течением времени обработки оба параметра увеличиваются. Однако, рост τ ведет к увеличению производительности Q , а увеличение величины линейного износа зерна x – к уменьшению Q . Если преобладает рост параметра τ , то производительность обработки Q с течением времени будет увеличиваться, асимптотически приближаясь к определенному значению $Q \leq Q_0$. Если преобладает рост величины x , то производительность обработки Q будет уменьшаться во времени. При одинаковом влиянии двух параметров τ и x на Q , произойдет стабилизация во времени производительности обработки. Для этого необходимо, чтобы произведение:

$$\tau \cdot \left(1 - \sqrt[3]{\frac{1}{1 + \frac{630 \cdot \pi \cdot x^{-3} \cdot v_{dem} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot v_{кр} \cdot x^3}}} \right) \text{ или } \tau \cdot (1 - \eta)$$

с течением времени обработки оставалось постоянным. Чем больше данное произведение (чем меньше начальные значения параметров x и η), тем меньше знаменатель зависимости (1) и больше производительность обработки Q , т.е. $Q \rightarrow Q_0$.

При анализе влияния параметров режима шлифования, характеристик круга и обрабатываемой детали (при фиксированном значении τ) на производительность обработки Q необходимо рассматривать изменение величины x , которая переменна в процессе шлифования и зависит от условий обработки. При шлифовании с долевой продольной подачей, близкой или равной единице, номинальная производительность обработки Q_0 равна $Q_0 = l_{dem} \cdot v_{dem} \cdot t$, где параметр l_{dem} равен ширине круга. С увеличением скорости детали v_{dem} и глубины шлифования t , очевидно, увеличивается толщина единичного среза и нагрузка на зерно, что приведет к увеличению величины линейного износа зерна x . Следовательно, с одной стороны, фактическая производительность обработки Q будет увеличиваться по закону изменения номинальной производительности Q_0 , с другой стороны, будет зависеть от соотношений v_{dem} / x^3 и \sqrt{t} / x^3 , входящих в подкоренное выражение зависимости (1).

Если с увеличением параметров v_{dem} и t соответствующие им соотношения $\frac{v_{dem}}{x^3}$ и $\frac{\sqrt{t}}{x^3}$ увеличиваются, то, согласно зависимости (1), будет уменьшаться знаменатель, а фактическая производительность обработки Q увеличиваться, приближаясь к значению Q_0 . В противном случае, знаменатель зависимости (1) будет возрастать и изменение производительности Q будет зависеть от интенсивностей роста числителя и знаменателя. Если преобладает рост числителя, т.е. параметра Q_0 , то фактическая про-

изводительность обработки будет увеличиваться с интенсивностью, ниже линейной. Если преобладает рост знаменателя, то производительность обработки Q будет уменьшаться. При одинаковой интенсивности изменения числителя и знаменателя производительность обработки Q будет оставаться постоянной. На практике, как правило, реализуется первый и третий случаи, когда производительность обработки Q с увеличением скорости детали $v_{\text{дет}}$ и глубины шлифования t или увеличивается или остается постоянной. Например, при круглом наружном глубинном алмазном шлифовании твердосплавных изделий с долевой продольной подачей, близкой к единице, фактическая производительность обработки Q с ростом $v_{\text{дет}}$ и t увеличивалась, незначительно отличаясь от номинальной производительности обработки Q_0 . При обычном многопроходном алмазном шлифовании с увеличением поперечной подачи $S_{\text{ном}}$ (глубины шлифования t) наблюдались случаи как роста, так и снижения фактической производительности обработки.

При шлифовании с долевой продольной подачей, меньше единицы, номинальная производительность обработки Q_0 равна $Q_0 = \pi D_{\text{дет}} \cdot t \cdot S_{\text{прод}}$, где $D_{\text{дет}}$ – диаметр детали, м; $S_{\text{прод}}$ – скорость продольной подачи, м/с. В этом случае на круге образуется заборный конус (его размеры определяются глубиной шлифования и шириной круга).

Тогда зависимость (1) после соответствующих преобразований примет вид

$$Q = \frac{Q_0}{1 + \frac{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}} \cdot \pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV}{c \cdot v_{\text{кр}} \cdot \tau} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \sqrt[3]{1 + \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{x}^3}{m \cdot v_{\text{кр}} \cdot x^3} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot t \cdot v_{\text{дет}}}{B} \cdot S_{\text{прод}}}}\right)}}} \quad (2)$$

Здесь с изменением $v_{\text{дет}}$, t , $S_{\text{прод}}$ будет изменяться x , поэтому производительность обработки Q зависит от соотношений $\frac{\sqrt{v_{\text{дет}}}}{x^3}$, $\frac{\sqrt{t}}{x^3}$, $\frac{\sqrt{S_{\text{прод}}}}{x^3}$. В данном случае параметры $v_{\text{дет}}$, t , $S_{\text{прод}}$ в одинаковой степени влияют на величину x и соответственно на производительность обработки Q .

Если с увеличением t и $S_{\text{прод}}$ соотношения $\frac{\sqrt{t}}{x^3}$ и $\frac{\sqrt{S_{\text{прод}}}}{x^3}$ уменьшаются, то, согласно (2), знаменатель увеличивается. Производительность обработки Q зависит от интенсивностей роста числителя и знаменателя зависимости (2). Если преобладает рост числителя, т.е. параметра Q_0 , то производительность Q будет увеличиваться с интенсивностью, ниже линейной. Судя по результатам экспериментальных исследований, приведенных в большом количестве научных трудов, в основном на практике реализу-

ется именно эта зависимость. Скорость детали $v_{дет}$ в данном случае не определяет номинальную производительность обработки Q_0 . Она влияет на фактическую производительность Q посредством отношения $\sqrt{v_{дет}} / x^3$. При росте $\sqrt{v_{дет}} / x^3$ с увеличением $v_{дет}$ знаменатель зависимости (2) уменьшается и Q увеличивается. При уменьшении $\sqrt{v_{дет}} / x^3$ с увеличением $v_{дет}$, наоборот, фактическая производительность обработки Q уменьшается. На практике, как правило, наблюдаются случаи незначительного увеличения Q с ростом скорости детали $v_{дет}$. Имеет место также экстремальная зависимость производительности обработки Q от $v_{дет}$, т.е. первоначально Q растет, затем уменьшается.

С изменением скорости круга $v_{кр}$ также изменяется величина x , т.е. на Q будут влиять входящие в (1) и (2) параметр $v_{кр}$ и произведение $v_{кр} \cdot x^3$, которые оказывают на Q противоположное влияние. С ростом $v_{кр}$ производительность Q увеличивается, а с увеличением произведения $v_{кр} \cdot x^3$ — уменьшается. При шлифовании по жесткой схеме, как правило, производительность Q несущественно увеличивается. Следовательно, можно принять, что с увеличением $v_{кр}$ произведение $v_{кр} \cdot x^3$ уменьшается.

С ужесточением режима шлифования (с увеличением параметров t , $S_{прод}$) происходит уменьшение соотношений $\frac{\sqrt{t}}{x^3}$ и $\frac{\sqrt{S_{прод}}}{x^3}$, что ведет к расхождению фактической и номинальной производительности обработки, т.е. интенсивность роста x^3 превышает рост \sqrt{t} и $\sqrt{S_{прод}}$. Для уменьшения расхождения между фактической и номинальной производительностью обработки необходимо управлять величиной x , стабилизируя ее на заданном (оптимальном) уровне. Это возможно путем выбора характеристик круга или дополнительным электроэрозионным или электрохимическим воздействием на рабочую поверхность алмазного круга на металлической связке. Например, используя высокопрочные алмазные зерна, можно существенно снизить интенсивность их износа во времени, а используя высокопрочные металлические связки, можно увеличить предельные нагрузки на зерна и соответственно ужесточить режимы шлифования и увеличить производительность обработки.

Проведенный анализ справедлив при фиксированном времени обработки τ , например, при проведении исследовательских работ. При обработке конкретной детали на станке необходимо фиксировать не время, а величину снимаемого припуска на сторону Π , рассматривая $\tau = v/Q_0$, где $v = \pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \Pi$ — объем снимаемого материала. С учетом этой зависимости (2) опишется:

$$Q = \frac{Q_0}{\left[1 + \frac{Q_0}{c \cdot v_{кр}} \cdot \frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV}{2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \sqrt[3]{1 + \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{x}^3}{m \cdot v_{кр} \cdot x^3} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot t \cdot v_{дет} \cdot S_{прод}}{B}}}\right)}\right]}. \quad (3)$$

С увеличением параметров t и $S_{прод}$ в связи с уменьшением соотношений $\frac{\sqrt{t}}{x^3}$ и $\frac{\sqrt{S_{прод}}}{x^3}$ знаменатель зависимости (3) увеличивается. Этому способствует также рост знаменателя за счет увеличения параметра Q_0 . Поэтому интенсивность роста знаменателя при $\Pi = const$ выше, чем при $\tau = const$. Соответственно интенсивность роста Q меньше, чем при $\tau = const$.

Следовательно, в условиях обработки конкретной детали добиться увеличения производительности Q сложнее, чем при проведении исследовательских работ, фиксируя время обработки τ . Основной путь увеличения Q – это уменьшение $x \rightarrow 0$ и увеличение жесткости $c \rightarrow \infty$.

Произведем расчет и анализ упругого перемещения в технологической системе y . Величина y определяется из расчетной зависимости:

$$y = \frac{Q_0}{\left(\frac{c \cdot k_{ш}}{\sigma} \cdot v_{кр} + \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет}}{\tau}\right)}, \quad (4)$$

где σ – условное напряжение резания, н/м²; $k_{ш}$ – коэффициент шлифования. Величина y тем меньше, чем меньше Q_0 и больше c , $v_{кр}$, $k_{ш}/\sigma$. Соотношение $k_{ш}/\sigma$ зависит от времени обработки, поэтому влияние τ на y следует рассматривать с учетом $k_{ш}/\sigma$. После соответствующих преобразований, имеем

$$y = \frac{Q_0}{\left[\frac{2 \cdot c \cdot v_{кр}}{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV} \cdot \left(1 - \sqrt[3]{1 + \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{x}^3 \cdot v_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot v_{кр} \cdot x^3}}\right) + \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет}}{\tau}\right]}. \quad (5)$$

Влияние времени обработки на величину y проявляется через изменение двух параметров: τ и x . С их ростом величина y увеличивается неограниченно. Очевидно, уменьшить y можно за счет первого слагаемого (входящего в знаменатель зависимости), фиксируя параметр x при шлифовании. Уменьшить y за счет второго слагаемого труднее, т.к. время τ зависит от продолжительности обработки конкретной детали на станке. Например, увеличивая номинальную производительность обработки Q_0 ,

можно существенно уменьшить τ , однако при этом пропорционально растёт числитель зависимости (4), что нивелирует уменьшение величины y за счет снижения τ . Рассмотрим влияние на y параметров режима шлифования, характеристик круга и обрабатываемой детали. С увеличением $v_{дет}$ и t , как показано выше, имеет место тенденция уменьшения соотношений $\frac{v_{дет}}{x^3}$ и $\frac{\sqrt{t}}{x^3}$ и уменьшения знаменателя. С учетом пропорционального роста номинальной производительности обработки $Q_0 = l_{дет} \cdot v_{кр} \cdot t$ с увеличением $v_{дет}$ и t при шлифовании с долевой продольной подачей, близкой к единице, это ведет к увеличению величины y более чем по линейной зависимости. С увеличением $v_{кр}$ произведение $v_{кр} \cdot x^3$ уменьшается, что ведет к уменьшению величины y . Этому также способствует снижение y за счет увеличения входящего в знаменатель параметра $v_{кр}$.

С увеличением концентрации круга m уменьшается нагрузка, действующая на отдельное зерно круга, и соответственно величина линейного износа зерна x . Это ведет к уменьшению произведения $m \cdot x^3$ (можно предположить, что интенсивность уменьшения x^3 выше интенсивности роста m), увеличению знаменателя зависимости (5) и снижению величины y . Соотношение $\frac{\bar{x}^3}{x^3}$ с ростом зернистости \bar{x} должно возрасти или оставаться постоянным, т.к. параметры \bar{x} и x входят с одной степенью. Следовательно, знаменатель с ростом \bar{x} увеличивается, а величина y уменьшается. С увеличением твердости обрабатываемого материала HV , очевидно, величина x увеличивается, что в совокупности с ростом входящего в знаменатель параметра HV ведет к увеличению y . При шлифовании с долевой продольной подачей меньше единицы, зависимость (4) с учетом (2) опишется

$$y = \frac{Q_0}{\left[\frac{2 \cdot c \cdot v_{кр}}{\pi \cdot tg \gamma \cdot HV} \cdot \left(1 - \sqrt[3]{1 + \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{x}^3}{m \cdot v_{кр} \cdot x^3} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot t \cdot S_{прод} \cdot v_{дет}}{B}}} \right) + \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет}}{\tau} \right]}. \quad (6)$$

Здесь $Q_0 = \pi \cdot D_{дет} \cdot t \cdot S_{прод}$. С увеличением t , $S_{прод}$, $v_{дет}$ соотношения $\frac{\sqrt{t}}{x^3}$, $\frac{\sqrt{S_{прод}}}{x^3}$, $\frac{\sqrt{v_{дет}}}{x^3}$, как показано выше, уменьшаются. Следовательно, уменьшается знаменатель зависимости (6) и увеличивается величина y . При обработке конкретной детали производится съём припуска на сторону, равный Π . С учетом $\tau = v/Q_0$, где $U = \pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \Pi$, зависимость (6) опишется

$$y = \frac{Q_0}{\left[\frac{2 \cdot c \cdot v_{кр}}{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV} \cdot \left(1 - \sqrt[3]{1 + \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{x}^3}{m \cdot v_{кр} \cdot x^3} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot t \cdot S_{прод} \cdot v_{дет}}{B}}} \right) + \frac{Q_0}{\Pi} \right]}. \quad (7)$$

С увеличением t , $S_{прод}$ соотношения $\frac{\sqrt{t}}{x^3}$ и $\frac{\sqrt{S_{прод}}}{x^3}$ уменьшаются, что ведет к уменьшению первого слагаемого знаменателя. При этом второе слагаемое знаменателя и числитель за счет роста Q_0 увеличиваются. Следовательно, по сравнению со случаем $\tau = const$ при $\Pi = const$ интенсивность уменьшения знаменателя будет ниже и величина y уменьшится.

Проведенный теоретический анализ определяет пути повышения производительности обработки при шлифовании с учетом упругих перемещений в технологической системе.

Список литературы

1. Фадеев В.А., Новиков Ф.В. Повышение эффективности алмазного внутреннего шлифования твердых сплавов. – Авиационно-космическая техника и технология. Труды ХАИ, вып.14, 2000. – С. 312-316.
2. Теоретические основы резания и шлифования материалов / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.