

Ф.В. Новиков, докт. техн. наук, М.И. Гасанов, канд. техн. наук,
Харьков, Украина

УСЛОВИЯ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ И ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Conditions of capacity lowering and power productivity raising at diamond grinding of hard alloys are scientifically grounded. Practical recommendations are given.

При алмазном шлифовании твердых сплавов чрезвычайно актуальны вопросы определения условий снижения энергоемкости и повышения производительности обработки [1,2,3]. Эти вопросы чрезвычайно важны при шлифовании твердых сплавов алмазными кругами на металлических связках, которые в большинстве случаев используются лишь на операциях окончательного шлифования при съеме небольших припусков. Вместе с тем, как показывает практика, данные круги располагают большими технологическими возможностями в плане повышения их износостойкости и производительности обработки и, следовательно, могут эффективно использоваться на операциях предварительного шлифования при съеме больших припусков. Для этого необходимо обосновать оптимальные условия шлифования, в первую очередь теоретическим путем на основе разработанных математических моделей алмазного шлифования.

В связи с этим, целью настоящей работы является теоретическое определение условий снижения энергоемкости и повышения производительности обработки твердых сплавов алмазными кругами на металлических связках и проведение экспериментальной проверки полученных теоретических результатов.

В работе [4] приведены аналитические зависимости для определения условного напряжения резания σ (энергоемкость обработки) и радиальной составляющей силы резания, действующей на отдельное зерно, при микрорезании $P_{\text{пл}}$:

$$\sigma = 3 \cdot \sqrt[3]{\frac{HV \cdot \sin \gamma}{\cos \psi \cdot (1 - \sin \gamma)} \cdot \frac{\eta}{(1 - \eta)} \cdot \tau_{\text{сдв}}^2}, \quad (1)$$

$$P_{\text{пл}} = 3 \cdot x^2 \cdot \sqrt[3]{\left[\frac{HV \cdot \sin \gamma}{\cos \psi \cdot (1 - \sin \gamma)} \right]^2 \cdot \frac{(1 - \eta)}{\eta} \cdot \tau_{\text{сдв}}}, \quad (2)$$

где HV , $\tau_{\text{сдв}}$ - твердость по Виккерсу и предел прочности на сдвиг обраба-

тываемого материала, Н/м²; γ - половина угла при вершине исходного (неизношенного) режущего зерна, представленного в виде конуса ($\gamma = 45^\circ$); ψ - угол трения режущего зерна с обрабатываемым материалом ($tg\psi = f$ - коэффициент трения); η - безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления режущего зерна, 0...1 ($\eta = 0$ - для острого зерна, $\eta \rightarrow 1$ - для затупленного зерна); x - величина линейного износа зерна, представленного в расчетах в форме конуса, м.

Исходя из зависимости (1), энергоемкость обработки σ вполне однозначно определяется безразмерным коэффициентом η . С его увеличением ($\eta \rightarrow 1$) параметр σ неограниченно увеличивается. Коэффициент η является обобщенным и зависит от условий обработки. Для его определения воспользуемся зависимостью, приведенной в работе [5] для расчета максимальной толщины среза $H_{max} = a_z$

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho} \cdot (1 - \eta^2)}{m \cdot V_{кр}}}, \quad (3)$$

где \bar{X} - зернистость круга, м; m - объемная концентрация зерен круга; $V_{дет}$, $V_{кр}$ - скорости детали и круга, м/с; t - глубина шлифования, м;

$$\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}; \quad R_{кр}, R_{дет} - \text{радиусы круга и детали, м.}$$

В работе [4] приведена аналитическая зависимость, устанавливающая связь между параметрами a_z , x и η :

$$a_z = x \cdot \frac{(1 - \eta)}{\eta}. \quad (4)$$

Преобразуя зависимость (2) с учетом зависимостей (3) и (4), имеем

$$\frac{\eta^5}{(1 - \eta)} = \frac{P_{y1}^3}{27 \cdot \tau_{сов}} \cdot \left[\frac{\cos\psi \cdot (1 - \sin\gamma)}{HV \cdot \sin\gamma} \right]^2 \cdot \left(\frac{m \cdot V_{кр}}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}} \right)^2. \quad (5)$$

Учитывая определяющую роль числителя в соотношении $\eta^5 / (1 - \eta)$, уменьшить коэффициент η (с целью снижения σ) можно уменьшением m , $V_{кр}$, P_{y1} и увеличением \bar{X} , $V_{дет}$, t . Принимая параметр P_{y1} равным прочности зерна на раздавливание, с учетом известной зависимости $P_{y1} = \alpha \cdot \bar{X}$ (где α - безразмерный коэффициент, характеризующий прочность зерна), зависимость (5) выразится

$$\frac{\eta^5}{(1-\eta)} = \frac{\alpha^3}{27 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot \bar{X}^3} \cdot \left[\frac{\cos\psi \cdot (1-\sin\gamma)}{HV \cdot \sin\gamma} \right]^2 \cdot \left(\frac{m \cdot V_{\text{кр}}}{630 \cdot \pi \cdot V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}} \right)^2. \quad (6)$$

Коэффициент η тем меньше, чем меньше параметры α , m , $V_{\text{кр}}$ и больше \bar{X} , $V_{\text{дет}}$, t . При заданной производительности обработки $Q = B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t$ зависимость (6) примет вид:

$$\frac{\eta^5}{(1-\eta)} = \frac{\alpha^3}{27 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot \bar{X}^3} \cdot \left[\frac{\cos\psi \cdot (1-\sin\gamma)}{HV \cdot \sin\gamma} \right]^2 \cdot \left(\frac{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot \sqrt{B}}{630 \cdot \pi \cdot \sqrt{V_{\text{дет}} \cdot Q \cdot \rho}} \right)^2. \quad (7)$$

Уменьшить η при $Q = \text{const}$ можно уменьшением параметров α , m , $V_{\text{кр}}$ и увеличением \bar{X} , $V_{\text{дет}}$ при изменении t по зависимости $t = Q / B \cdot V_{\text{дет}}$.

Наибольшее влияние на коэффициент η оказывает коэффициент α . Это предопределяет необходимость правильного выбора связки и прочности зерна.

При глубинном шлифовании (при небольших значениях $V_{\text{дет}}$) коэффициент α необходимо уменьшить, применяя круги с менее прочными алмазами и связками, или увеличить зернистость \bar{X} и уменьшить концентрацию круга m . Этим объясняется широкое применение при глубинном шлифовании крупнозернистых высокопористых абразивных кругов. При многопроходном шлифовании (при относительно высоких значениях $V_{\text{дет}}$), наоборот, коэффициент α необходимо увеличить, применяя более прочные связки и алмазные зерна, или уменьшить зернистость \bar{X} и увеличить концентрацию m .

Для обеспечения одинаковой энергоемкости многопроходного и глубинного шлифования ($\eta = \text{const}$) необходимо выполнить условие $V_{\text{дет}} \cdot Q = \text{const}$. При уменьшении $V_{\text{дет}}$ от 10 м/мин (при многопроходном шлифовании) до 0,1 м/мин (при глубинном шлифовании) производительность Q увеличивается в 100 раз.

Следовательно, глубинное шлифование при заданном значении η допускает существенное увеличение производительности обработки Q .

Исходя из преобразований зависимости (3)

$$H_{\text{max}} = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{V_{\text{дет}} \cdot Q \cdot \rho}}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot \sqrt{B}}} \quad (8)$$



Рис. 1. Структурная схема условий повышения производительности шлифования.

(при долеговой продольной подаче $S_d = 1$), условие $V_{дет} \cdot Q = const$ выполняется для $H_{max} = const$.

Рассмотрим условия повышения производительности обработки с учетом ограничения по энергоемкости шлифования. Для этого разрешим зависимость (7) относительно производительности обработки Q :

$$Q = \left[\frac{m \cdot V_{кр} \cdot \cos \psi \cdot (1 - \sin \gamma)}{630 \cdot \pi \cdot HV \cdot \sin \gamma} \right]^2 \cdot \left[\frac{\alpha^3}{27 \cdot \tau_{сдв} \cdot \bar{X}^3} \cdot \frac{(1 - \eta)}{\eta^5} \cdot \frac{B}{V_{дет} \cdot \rho} \right]. \quad (9)$$

Увеличить Q можно увеличением параметров α , m , $V_{кр}$, B и уменьшением \bar{X} , $V_{дет}$, η , ψ . Чем прочнее и тверже обрабатываемый материал,

тем больше Q . Наибольшее влияние на Q оказывает коэффициент η . Регулировать коэффициентом η можно, изменяя глубину шлифования $t = Q / B \cdot V_{дет}$ с учетом зависимости (9). При работе круга в режиме самозатачивания коэффициент η стабилизируется во времени. При работе круга в режиме затупления коэффициент η возрастает во времени $\eta \rightarrow 1$ и уменьшает Q . Это требует применения непрерывной правки круга, реализуемой, например, в процессе алмазного электроэрозионного шлифования. Условия повышения производительности обработки в обобщенном виде представлены на рис. 1.

С целью проверки теоретических решений проводились экспериментальные исследования на плоскошлифовальном станке мод. 3Е711В, модернизированном под алмазное электроэрозионное шлифование. Обработывались твердосплавные пластинки из ВК8 и Т15К10 по схеме плоского врезного

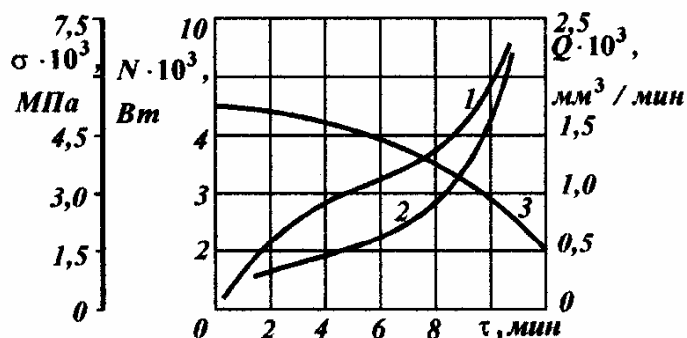


Рис. 2. Зависимости мощности N (1), энергоемкости σ (2) и производительности Q (3) обработки от времени шлифования τ : обрабатываемый материал – твердый сплав ВК8; $t = 0,03$ мм.

шлифования всей шириной алмазного круга на металлической связке 1А1 200x20x5 АС6 160/125 М2-01 4 с относительно небольшой скоростью детали $V_{дет} = 3,3$ м/мин, скоростью круга $V_{кр} = 15,7$ м/с и глубиной шлифования, изменяющейся в пределах 0...0,1 мм. Это позволило в определенной степени реализовать условия однопроходного (глубинного) шлифования, обеспечивающие, согласно структурной схеме (рис. 1), повышение производи-

тельности обработки с учетом ограничения по энергоемкости шлифования.

Экспериментально установлено, что с течением времени обработки τ эффективная мощность N и энергоемкость σ при обычном шлифовании (без подвода электрического тока в зону резания) непрерывно увеличиваются, а производительность обработки – уменьшается, рис. 2.

Исходя из зависимости (1), увеличение энергоемкости шлифования σ обусловлено увеличением коэффициента η вследствие затупления зерен круга и увеличения величины x . Увеличение коэффициента η , согласно зависимости (9), ведет к уменьшению производительности обработки Q . Мощ-

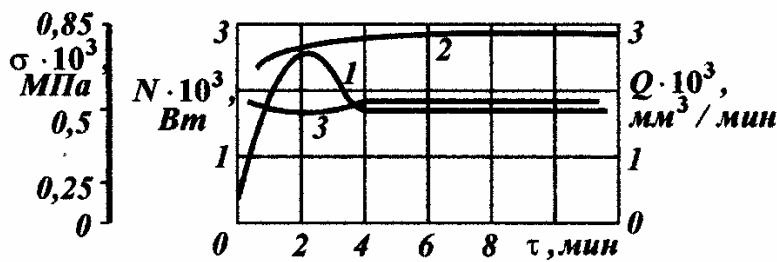


Рис. 3. Зависимости мощности N (1), энергоемкости σ (2) и производительности Q (3) обработки от времени шлифования τ при алмазном электроэрозионном шлифовании: обрабатываемый материал – твердый сплав ВК8; $t = 0,03$ мм.

При алмазном электроэрозионном шлифовании с увеличением τ эффективная мощность N первоначально увеличивается, затем, несколько уменьшается и в дальнейшем остается постоянной (кривая 1, рис. 3). Производительность обработки Q в начальный момент времени уменьшается, затем, несколько увеличивается и стабилизируется (кривая 3, рис. 3). Энергоемкость шлифования σ первоначально увеличивается, затем, остается постоянной (кривая 2, рис. 3).

В отличие от обычного алмазного шлифования, при алмазном электроэрозионном шлифовании через определенное время рассмотренные параметры стабилизируются. Согласно зависимости (1), это обусловлено стабилизацией во времени безразмерного коэффициента η и соответственно величины x . С физической точки зрения это означает стабилизацию параметров режущего рельефа алмазного круга в результате выполнения условия равенства скоростей износа зерен и связки. Скорость износа связки определяется интенсивностью электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность круга, которая эквивалентна количеству дополнительной электрической энергии, подводимой в зону резания от источника технологического тока. Очевидно, чем больше количество подводимой электрической энергии, тем больше скорость термического разрушения металлической связки от действия электрических разрядов в межэлектродном зазоре (между кругом и обрабатываемым материалом) и меньше величина линейного износа зерен x и соответственно безразмерный коэффициент η , т.е. острее круг. Поэтому, увеличивая интенсивность электроэрозионного воздействия на круг, можно существенно уменьшить коэффициент η и, согласно зависимостям (1) и (9), увеличить производительность Q и уменьшить энергоемкость обработки σ . Некоторое уменьшение мощности шлифования N , а также увеличение производительности Q в период времени, предшествующий стабилизации указанных пара-

ность шлифования $N = \sigma \cdot Q$ увеличивается в связи с тем, что интенсивность увеличения энергоемкости σ выше интенсивности уменьшения энергоемкости обработки Q . Таким образом, теоретические зависимости согласуются с экспериментальными данными.

метров (рис. 3), обусловлен особенностями процесса электроэрозии, который начинает интенсивно протекать в момент достижения максимальной мощности шлифования. Использовался специальный генератор импульсного тока (частота 22 кГц, скважность – 9/10).

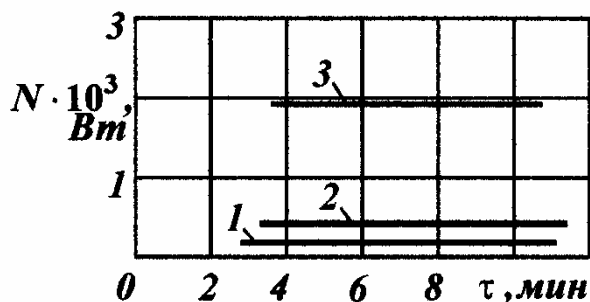


Рис. 4. Зависимости мощности шлифования N от времени обработки τ при алмазном электроэрозионном шлифовании: обрабатываемый материал – твердый сплав ВК8; 1 - $t = 0,03$ мм; 2 - $t = 0,05$ мм; 3 - $t = 0,08$ мм.

Таким образом, экспериментально установлено, что введение в зону резания дополнительной энергии в виде электрических разрядов позволяет за счет термического разрушения металлической связки алмазного круга (а также продуктов обработки) стабилизировать во времени показатели шлифования.

Данная закономерность установлена для различных значений глубины шлифования, рис. 4. Например, при глубине шлифования $t = 0,03$ мм мощность стабилизируется на уровне 180 Вт, при $t = 0,05$

мм – на уровне 400 Вт, при $t = 0,08$ мм – на уровне 1,9 кВт.

При изменении t в пределах 0,03...0,05 мм энергоемкость шлифования σ остается почти постоянной, а с увеличением t до 0,08 мм – увеличивается, рис. 5. Это связано с тем, что с увеличением t увеличиваются нагрузки, действующие на алмазные зерна, и интенсивность их линейного износа. Поэтому, при заданном значении скорости износа связки, определяемом интенсивностью электроэрозионного воздействия

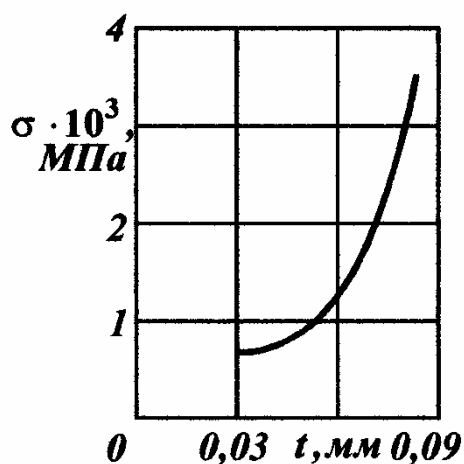


Рис. 5. Зависимости условного напряжения резания σ от глубины шлифования t : обрабатываемый материал – твердый сплав ВК8.

на круг, условия равенства скоростей износа связки и зерен с увеличением t достигаются при больших значениях x и η , т.к. с увеличением x и η скорость износа зерен уменьшается.

Аналогичные закономерности экспериментально получены при алмазном электроэрозионном шлифовании твердосплавных пластин Т5К10, рис. 6. При $t = 0,03$ мм “всплеск” мощности шлифования отсутствует, тогда как при $t = 0,05$ мм он имеет место. В диапазоне изменения $t = 0,03...0,05$ мм энергоемкость шлифования σ остается почти постоянной.

Энергоемкость шлифования твердого сплава Т5К10 выше энергоемкости шлифования твердого сплава ВК8. Это связано с более высокими значениями механических характеристик твердого сплава Т5К10. Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретической зависимостью (1), откуда следует, что с увеличением твердости HV и прочности $\tau_{сдв}$ обрабатываемого материала энергоемкость шлифования σ увеличивается.

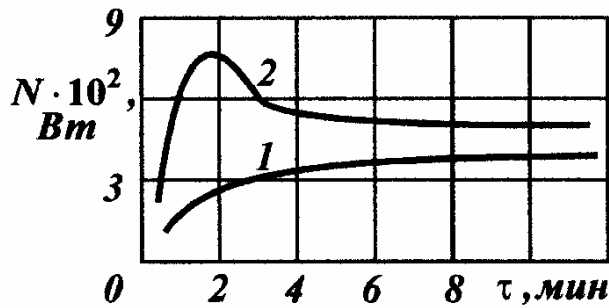


Рис. 6. Зависимости мощности шлифования N от времени обработки τ : обрабатываемый материал – твердый сплав Т5К10; 1 - $t = 0,03$ мм; 2 - $t = 0,05$ мм.

Таким образом, показано, что за счет применения алмазного электроэрозионного шлифования можно управлять параметрами χ и η , стабилизируя во времени мощность (энергоемкость) шлифования для различных условий обработки, включая режимы обработки с увеличенными глубинами шлифования t . Это обеспечивает увеличение производительности обработки.

Из полученных результатов следует важный вывод, состоящий в том, что алмазное электроэрозионное шлифование твердых сплавов позволяет эффективно использовать алмазные круги на прочной металлической связке М2-01, которые обычно при шлифовании твердых сплавов и других металлических материалов быстро затупляются, засаливаются и теряют режущую способность. Причем, появилась возможность их эффективного применения в условиях увеличенных глубин шлифования (в условиях, близких к глубинному шлифованию), что открывает широкие перспективы в интенсификации процессов обработки.

Список литературы: 1. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Раб А.Ф. и др. Основы алмазного шлифования. – К.: Техника, 1978. – 192 с. 2. Захаренко И.П. Алмазные инструменты и процессы обработки. – К.: Техника, 1980. – 212 с. 3. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 4. Новиков Ф.В., Гасанов М.И. Физические закономерности процесса резания при алмазном шлифовании. - Вісник Харківського держ. техн. ун-ту сільск. господ., 2004, вип. 26. – С. 31-40. 5. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования. – Автореф. дис. ...докт. техн. наук. – Одесса: ОГПУ, 1995. – 36 с. 6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.4. “Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.