

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНОСА АЛМАЗНОГО КРУГА В ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ

При изучении процесса круглого наружного глубинного алмазного шлифования твердосплавных и быстрорежущих

119

многолезвийных инструментов с весьма малой скоростью изделия и долевой продольной подачей, близкой к единице [1, 2], установлены важные физические и технологические особенности, выгодно отличающие исследуемый процесс от применяемых методов обычного многопроходного и глубинного шлифования. Главной особенностью такого процесса является экстремальность зависимости «относительный расход алмаза — глубина шлифования».

По экспериментальным данным, с увеличением глубины шлифования относительный расход алмаза первоначально снижается, затем возрастает, проходя точку минимума. Такая закономерность прослеживается для различных характеристик алмазных кругов, обрабатываемых материалов и режимов шлифования. Причем для конкретной системы «круг — изделие», независимо от сочетания режимных параметров, во всех точках минимума относительного расхода алмаза достигается примерно одинаковая производительность шлифования, что позволяет значительно упростить решения оптимизационных задач шлифования. Например, располагая набором экспериментальных значений такой производительности для различных обрабатываемых материалов, по ним несложно пересчетом определить оптимальные сочетания режимных параметров, обеспечивающих выполнение требуемых технологических показателей шлифования.

В статье приведены результаты исследований механизма износа алмазного круга с позиций образования на его рабочей поверхности установившегося рельефа, который определяется режимом шлифования, характеристиками круга, обрабатываемым материалом и не зависит от времени обработки.

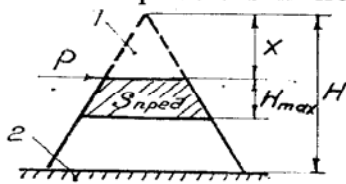


Рис. 1. Расчетная схема параметров шлифования: 1 — изношенная часть режущего зерна; 2 — связка круга

Согласно работе [3], стабилизация режущего рельефа круга наступает в тот момент, когда сила, действующая на максимально выступающее зерно, достигает предельного значения и зерно хрупко разрушается или выпадает без разрушения. В дальнейшем такой процесс периодически повторяется, подключая в работу новые нижерасположенные зерна. Предельная единичная сила резания P определяется произведением условного напряжения резания $[\sigma]$

и площади единичного среза $S_{пред}$ (рис. 1) и зависит от механизма износа круга. Установлено, что при небольшой глубине шлифования, когда высота выступания зерна над связкой незначительна и прочность его удержания достаточно высокая, ресурс работы зерна определяется числом касаний его с металлом до объемного разрушения. При повышенной глубине шли-

фования, в связи с увеличением межзеренного пространства, необходимого для размещения стружки, устойчивость зерен в связке уменьшается и они будут выпадать из связки без разрушения. Предельная нагрузка во втором случае меньше прочности зерна на раздавливание.

Для анализа процесса получим аналитические зависимости основных параметров шлифования — максимальной (вероятностной) толщины среза H_{\max} , максимальной глубины внедрения материала в рабочую поверхность круга (отсчитывая ее от вершины исходного неизношенного зерна) H , условного напряжения резания $[\sigma]$, принимая его в виде $[\sigma] = A/H_{\max}^n$, где A — размерный коэффициент, характеризующий прочностные свойства обрабатываемого материала, устанавливается расчетно-экспериментальным путем; n — показатель степени.

Используя соответствующие аналитические зависимости, приведенные в работе [3], с учетом $[\sigma] = A/H_{\max}^n$ и некоторых упрощений, параметры H_{\max} , H и $[\sigma]$ представим в виде

$$H_{\max} = \left(\frac{600\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot A^2 \cdot V_{\text{изд}} \cdot \sqrt{2Z\rho}}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot P^2} \right)^{\frac{1}{2n-1}}; \quad (1)$$

$$H = \frac{P}{A} \left(\frac{600\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot A^2 \cdot V_{\text{изд}} \cdot \sqrt{2Z\rho}}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot P^2} \right)^{\frac{n-1}{2n-1}}; \quad (2)$$

$$[\sigma] = A \left(\frac{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot P^2}{600\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot A^2 \cdot V_{\text{изд}} \cdot \sqrt{2Z\rho}} \right)^{\frac{n}{2n-1}}, \quad (3)$$

где \bar{X} — зернистость круга, мм; $V_{\text{изд}}$; $V_{\text{кр}}$ — скорости изделия и круга, мм/с; Z — глубина шлифования, мм; m — объемная концентрация круга, %; $\rho = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$; R_1 , R_2 — радиусы изделия и круга, мм.

Линейный износ зерна до его объемного разрушения или выпадания из связки определится разностью $X = H - H_{\max}$. По методике, приведенной в работе [4], несложно показать, что параметр шероховатости обработанной поверхности R_{\max} , примет вид

$$R_{\max} = \sqrt[5]{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} \frac{18 \cdot 10^4 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{\text{изд}} \cdot \rho}{m^2 \cdot V_{\text{кр}}^2}}, \quad (4)$$

где

$$\eta = \frac{X}{H} = 1 - \frac{A}{P} \left(\frac{600\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot A^2 \cdot V_{\text{изд}} \cdot \sqrt{2Z\rho}}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot P^2} \right)^{\frac{2-n}{2n-1}}.$$

Как следует из рис. 2, характер изменения полученных зависимостей определяется величиной показателя n . Сравнивая расчетные зависимости с экспериментальными (рис. 2), видим, что наиболее правильно процесс шлифования описывается зави-

симостями с $n=1\div 2$. В этом случае величина износа зерна X с увеличением глубины шлифования Z уменьшается и на круге образуется более развитый рельеф. При других n закономерности изменения R_{\max} и $[\sigma]$ не соответствуют экспериментальным данным, и, следовательно, такие варианты шлифования не реализуются на практике.

В теории шлифования износ круга рассматривается как функция от нагрузки, действующей на отдельное зерно, или от

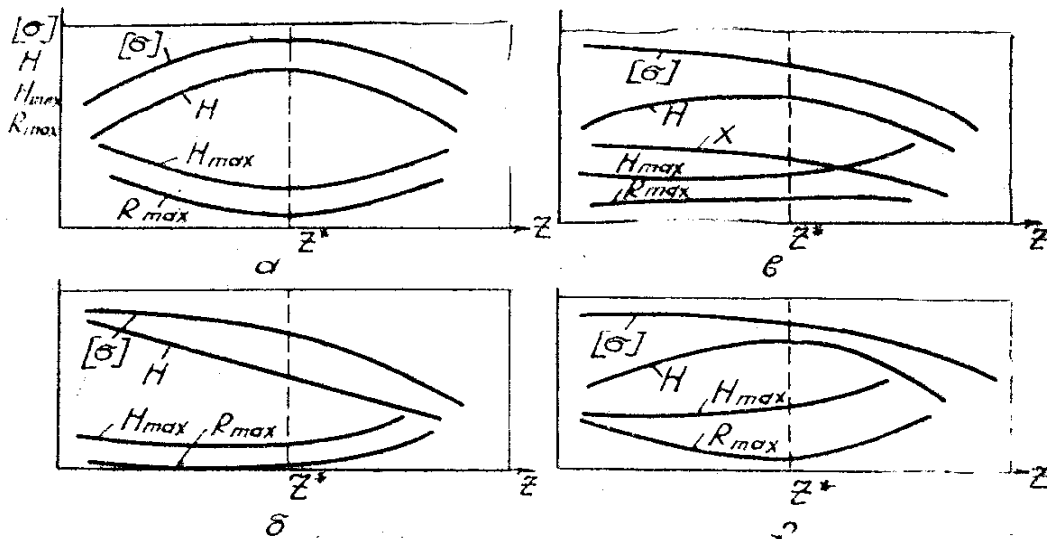


Рис. 2. Примерные зависимости параметров шлифования от глубины шлифования для различных значений n : а — $n=0-0,5$; б — $n=0,5-1$; в — $n=1-2$; г — $n=2$

толщины среза. В данном случае с увеличением Z при постоянной P максимальная толщина среза H_{\max} возрастает, а условное напряжение резания $[\sigma]$ снижается. Нагрузка, приходящаяся на единицу поверхности режущей части зерна, падает. В соответствии с существующими теориями следует ожидать уменьшения линейного износа зерен от их истирания за один контакт с металлом. В действительности этого не происходит. Экспериментально установлено, что линейный износ круга с ростом Z непрерывно увеличивается (рис. 3). Таким образом, ни предельная единичная сила резания P , ни максимальная толщина среза H_{\max} не определяют интенсивности линейного износа круга. Обоснование подобной закономерности следует искать в характере изменения установившейся формы зерна, ее прочности и износостойкости. Согласно приведенным графикам (см. рис. 2), с увеличением Z параметр X уменьшается и на круге образуется более развитый рельеф с менее прочными режущими микроромками. В результате ослабления прочности износостойкость таких зерен снижается, а линейный износ от их истирания возрастает, что соответствует экспериментальным результатам. Для других n такая закономерность не прослеживается, так как с увеличением Z параметр X возрастает и на круге об-

разуется более сглаженный рельеф, характеризующийся повышенной износостойкостью круга.

Таким образом, форма установившегося рельефа круга является основным фактором, определяющим его износ. При $n = 1,5 \div 1,7$ форма рельефа круга хорошо коррелируется с основными технологическими показателями шлифования.

Подтверждением правильности сделанного вывода может быть также следующее: шлифование алмазным кругом после правки характеризуется повышенным его износом вплоть до момента стабилизации рельефа, после чего скорость линейного износа остается практически неизменной. Общеизвестно, что режущий рельеф при этом притупляется и повышается его износостойкость. Толщины срезов в зависимости от времени шлифования уменьшаются, а единичные силы резания — возрастают, что обусловлено более интенсивным ростом $[\sigma]$. Следовательно, не единичные силы резания, а именно форма зерен определяет интенсивность износа круга в целом.

Из проведенного анализа может показаться, что толщина среза все же оказывает определенное влияние на скорость

износа круга, так как чем выше H_{\max} , тем больше износ и наоборот. В действительности прямой физической связи между этими параметрами нет. Рост H_{\max} вызывает снижение параметра X , который в свою очередь повышает линейный износ круга, т. е. H_{\max} не непосредственно, а через X и форму зерен влияет на износ круга. Одинаковый характер изменения H_{\max} и линейного износа позволяет последний представить функцией от H_{\max} , хотя максимальная толщина среза с физической точки зрения не определяет скорость линейного износа круга. Более точное

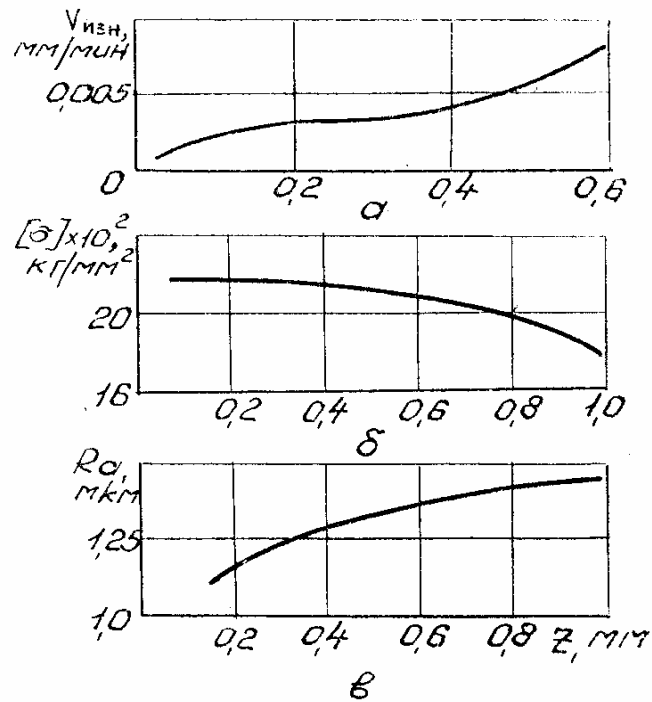


Рис. 3. Зависимости скорости линейного износа круга $V_{\text{изн}}$, условного напряжения резания $[\sigma]$, параметра шероховатости R_a от глубины шлифования Z :

а) круг IAI 300×25 AC6 250/200 — MB1 — 100 %; обрабатываемый материал — BK8 + сталь; $V_{\text{кр}} = 35$ м/с; $B_1 = 22,5$ мм/об; $V_{\text{изд}} = 1$ м/мин; б) круг IAI 200×25 AC6 200/160 — MO4 — 100 %; обрабатываемый материал — Т5К10; $V_{\text{кр}} = 35$ м/с; $B_1 = 22,5$ мм/об; $V_{\text{изд}} = 2,5$ м/мин; в) круг IAI 300×25 AC6 200/160 — MB1 — 100 %; обрабатываемый материал — Т5К10; $V_{\text{кр}} = 35$ м/с; $B_1 = 22,5$ мм/об; $V_{\text{изд}} = 1$ м/мин

решение должно основываться на изучении механики разрушения вполне определенной формы зерна под действием заданной нагрузки, что вызывает значительные затруднения.

Для аппроксимации скорости линейного износа круга $V_{\text{изн}}$ воспользуемся ее экспериментальной зависимостью (рис. 3), из которой следует, что $V_{\text{изн}}$ может быть описана функцией

$$V_{\text{изн}} = \frac{V_{\text{кр}}}{2\pi R_2} \cdot c \cdot H_{\text{мах}}^3, \quad (5)$$

где c — коэффициент, учитывающий линейный износ зерна за одно касание с металлом, $1/\text{мм}^2$.

Относительный расход алмаза аналитически представим в виде

$$q = \frac{V_{\text{изн}}}{Q} \cdot \frac{m}{m_6}, \quad (6)$$

где $Q = B_1 \cdot V_{\text{изд}} Z$ — производительность шлифования, $\text{мм}^3/\text{с}$; B_1 — продольная подача, $\text{мм}/\text{об}$; m_6 — базовое значение объемной концентрации круга, %, принимается 100 %.

Согласно (6), с увеличением глубины шлифования Z относительный расход алмаза q снижается, что связано с более интенсивным ростом Q по сравнению с $V_{\text{изн}}$.

Анализ экспериментальной зависимости (рис. 3) показывает, что с увеличением Z скорость линейного износа растет первоначально незначительно, затем более интенсивно. Такой характер изменения $V_{\text{изн}}$ и шероховатости обработанной поверхности R_a в диапазоне $Z < Z^*$ свидетельствует о незначительном изменении X , т. е. на круге для разных Z образуется рельеф с примерно одинаковыми площадками износа на зернах. В диапазоне $Z > Z^*$ закономерности шлифования изменятся. Износ круга будет определяться преобладающим выпаданием зерен из связки без их объемного разрушения, что приведет к интенсификации изменения $V_{\text{изн}}$ [σ]. Такой результат следует из решения уравнения (4) с учетом экспериментальной кривой R_a (рис. 3). Сила P при этом незначительно уменьшается, что хорошо согласуется с результатами Л. Л. Мишнаевского [5], а параметр H остается практически постоянным. Выполненные численные расчеты для $n = 1,7$ показали, что P в зависимости от Z изменяется приблизительно по закону $P \sim 1/Z^{0,25}$. Тогда максимальная толщина среза $H_{\text{мах}}$, согласно (1), будет изменяться по закону $H_{\text{мах}} \sim Z^{0,416}$, условное напряжение резания [σ] — по закону [σ] $\sim 1/Z^{0,7}$, скорость линейного износа круга $V_{\text{изн}}$ — по закону $V_{\text{изн}} \sim Z^{1,25}$, относительный расход алмаза q — по закону $q \sim Z^{0,25}$. Если аналитически выразить тангенциальную составляющую силы резания F зависимостью

$$F = [\sigma] \cdot \frac{Q}{V_{\text{кр}}} = B_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{m^2 \cdot V_{\text{изд}} \cdot Z^2 \cdot P^4}{600^2 \cdot \pi^2 \cdot X^6 \cdot A \cdot V_{\text{кр}} \cdot \rho}}, \quad (7)$$

то F с увеличением Z будет изменяться по закону $F \sim Z^{0,3}$. Соответствующие экспериментальные зависимости указанных параметров шлифования изменяются приблизительно по тем же законам [6].

Уменьшение P при $Z > Z^*$ зависит от условий размещения стружки в межзеренном пространстве круга. После достижения предельного объема стружки, соответствующей $Z = Z^*$, зерно теряет устойчивость и выпадает из связки без объемного разрушения, так как сила P не успевает достичь предела прочности зерна на раздавливание. Относительный расход алмаза в точке $Z = Z^*$ принимает минимальное значение.

Влияние процесса трения металла со связкой круга на основные параметры шлифования незначительно. Об этом свидетельствуют полученные решения, имеющие хорошую сходимость с экспериментом. Несомненно, процесс шлифования по физической сущности значительно сложнее приведенной модели. Из полученных теоретических и экспериментальных результатов следует, что с увеличением Z сила резания изменяется по закону $F \sim Z^{0,3}$, а относительный расход алмаза — по закону $q \sim Z^{0,25}$. Имеются работы [7], в которых закон изменения $F \sim Z^{0,6}$, а $q \sim Z^{1,0}$, т. е. параметры шлифования могут быть более чувствительны к изменению Z . Такие результаты могут быть получены из приведенных решений согласно закону изменения $P \sim 1/Z^{0,1}$. Условное напряжение резания $[\sigma]$ следует рассматривать как результат работы не только максимально выступающего зерна, а всех зерен, участвующих одновременно в съеме металла. Указанные решения могут быть более точными, но требуют численного счета на ЭВМ, что снижает эффективность инженерного анализа.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что все технологические и физические параметры шлифования связаны между собой и определяются силой P . Для построения математической модели шлифования в первом приближении можно ограничиться одной экспериментальной зависимостью любого параметра шлифования и установить параметр A , по которому расчетом определяются остальные параметры шлифования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Раб А. Ф., Новиков Ф. В., Сошников С. А. Аналитическая оценка износостойкости алмазных кругов при круглом продольном шлифовании изделий с прерывистыми поверхностями. — Резание и инструмент. Харьков, 1982, вып. 28, с. 15—18.
2. Оптимизация алмазного круглого шлифования твердосплавных многолезвийных инструментов на основе приведенной толщины среза/Ф. В. Новиков, А. Ф. Раб, С. А. Сошников, Б. С. Сербóв.—В кн.: Материалы V Междунар. конф. по режущим инструментам, ВНР, Мишкольц, 1982, 24—27 августа.