

А. Ф. РАБ, канд. техн. наук, *Ф. В. НОВИКОВ*

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМА ИЗНОСА АЛМАЗНОГО КРУГА

Современная теория шлифования относит износостойкость алмазного круга к числу наиболее сложных и наименее изученных вопросов, что объясняется, главным образом, многообразием возникающих в процессе шлифования различных по природе явлений (механического происхождения, теплового, химического, адгезионного, диффузионного и др.), которые, воздействуя на рабочую поверхность круга, в зависимости от условий обработки вызывают тот или иной вид его износа. Еще более сложным является аналитическое описание механизма износа круга, позволяющего установить пути снижения расхода дорогостоящего алмазного инструмента при шлифовании труднообрабатываемого твердого сплава и создать инженерно-приемлемые методики расчета износа круга.

Многочисленными исследованиями ИСМ АН УССР и ВНИИАлмаза показано, что износ алмазного круга при шлифовании твердого сплава в основном зависит от прочностных свойств режущих зерен и их удержания в связке. Интенсивность износа при этом определяется максимальной толщиной среза и суммарной длиной пути зерна в металле. Причем, последний фактор играет исключительно важную роль в износе алмазных зерен круга. Если предположить, что перед началом эксперимента вновь заправленный алмазный круг на металлической связке характеризуется определенной максимальной высотой и вероятностным законом выступания вершин зерен над связкой, то в процессе шлифования интенсивность его износа во времени будет изменяться неравномерно. В начальный момент скорость линейного износа максимальна, по мере приработки круга она уменьшается и наступит такой момент, когда становится практически постоянной.

С физической точки зрения такой характер износа является результатом специфики разрушения режущих кромок алмазного круга, имеющих форму клина (или приближающихся к ней). Под действием нагрузки, возникающей при резании, происходит скалывание некоторого участка режущего клина, прилегающего к вершине. Перемещение той же нагрузки к вершине вновь образованного режущего клина вызовет скалывание второго его участка, по объему меньше первого, что обусловлено большей прочностью овальной формы клина по сравнению с остроугольной. Все последующие микроразрушения по объему будут уступать предыдущим, и скорость линейного износа круга со временем уменьшится. Падение скорости линейного износа будет наблюдаться до тех пор, пока нагрузка, действующая на зерно, не превысит прочность удержания зерна в связке или его собственно прочность и не приведет к его разрушению.

Проведенный анализ изменения во времени скорости линейного износа

круга подтвержден экспериментально. С увеличением времени шлифования скорость линейного износа непрерывно снижается. После 40 мин шлифования она практически стабилизируется, хотя в дальнейшем и наблюдается тенденция к ее снижению.

Таким образом, при изучении закономерностей износа алмазного круга следует стремиться к сохранению постоянной суммарной длины пути зерна в металле l независимо от условий изменения параметров режима шлифования, что дает возможность получить сопоставимые результаты и правильно подойти к оценке износостойкости круга.

Рассмотренный механизм износа алмазного круга – разрушение и истирание алмазных зерен в основном от действия механического фактора – позволяет аналитически описать удельный расход алмаза эквивалентной функцией и выявить с механической точки зрения его зависимость от основных параметров процесса шлифования.

Эквивалентную функцию удельного расхода алмаза выразим зависимостью

$$\lambda = H_{max} \cdot l^{1/p} / V_{объем}, \quad (1)$$

в которой линейный износ круга представлен произведением максимальной толщины единичного среза, характеризующей силовую нагруженность зерна при шлифовании, и степенной зависимости от суммарной длины пути зерна в металле $l^{1/p}$ (p – целое число), определяющей изменение скорости линейного износа круга во времени; объем снятого металла $V_{объем}$ равен $V_{объем} = 2\pi \cdot R_1 \cdot S_{np} \cdot Z \cdot t$, где R_1 – радиус изделия, мм; S_{np} – продольная подача, м/мин; Z – поперечная подача, мм/ход; t – время шлифования. Показатель $1/p$ в зависимости (1) характеризует степень неравномерности износа круга во времени. Так, для обычных абразивных, алмазных и эльборовых кругов на органической и керамической связках, которые работают в основном в условиях самозатачивания с постоянной во времени скоростью линейного износа, параметр p стремится к 1. Для алмазных кругов на металлической связке без применения непрерывной электроэрозионной или электрохимической правки параметр p будет значительно больше 1: самозатачивание практически не происходит, износу подвергаются главным образом зерна, вскрытые предварительной механической правкой, и скорость линейного износа круга в соответствии с механизмом микроразрушений режущего клина будет со временем обработки уменьшаться вплоть до полной потери кругом режущей способности. При электрических способах правки алмазного круга, когда наряду с износом зерен происходит удаление связки и в резание подключаются расположенные ниже зерна, скорость линейного износа стабилизируется, и параметр p принимает значение, близкое к 1.

Для анализа зависимости (1) рассмотрим общую расчетную схему круглого продольного шлифования (рис. 1), согласно которой за один оборот изделия аналогично точению снимается слой металла площадью поперечного сечения $B \cdot \Delta Z$, где

$$\Delta Z = B_1 \cdot \sin \alpha = B_1 \cdot \frac{Z}{B} = 2\pi \cdot R_1 \cdot \frac{S_{np}}{V_{изд}} \cdot \frac{Z}{B}, \quad (2)$$

B - ширина круга, мм; B_1 – продольная подача на оборот изделия, мм/об; $V_{изд}$ – окружная скорость изделия, м/мин.

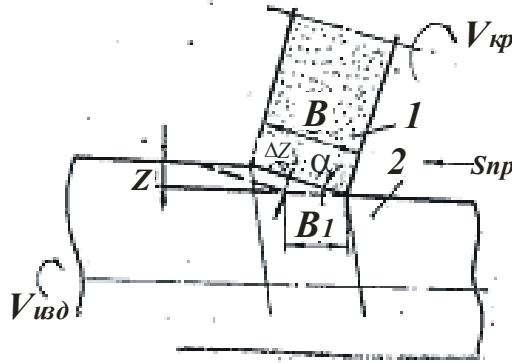


Рис. 1. Расчетная схема круглого продольного шлифования: 1 – круг; 2 – изделие

Для определения H_{max} воспользуемся полученной в работе [1] зависимостью, предварительно заменив в ней Z на ΔZ и b^2 на $\frac{H_{max}^3}{b}$:

$$H_{max} = \sqrt{\frac{9 \cdot \sqrt{2} \cdot b \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}} \cdot \sqrt[6]{V_{изд} \cdot S_{np} \cdot Z \cdot \frac{2\pi \cdot R_1}{B}}, \quad (3)$$

где b – максимальная высота выступания зерен над связкой, мкм; 2γ – угол заострения вершины зерна; k – поверхностная концентрация зерна, шт/мм²; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; R_2 – радиус круга, мм.

Время шлифования t после соответствующих кинематических преобразований с учетом постоянства суммарной длины пути зерна в металле:

$$t = \frac{2\pi \cdot R_2 \cdot l}{V_{изд}} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}{2 \cdot Z}}. \quad (4)$$

Как следует из (4), для того чтобы суммарная длина пути зерна в металле l с увеличением $V_{изд}$ и Z оставалась постоянной, необходимо уменьшать время шлифования t .

Эквивалентная функция удельного расхода алмаза λ с учетом (4) выразится

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot \sqrt{2} \cdot b \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}} \cdot \frac{\sqrt[6]{V_{изд} \cdot S_{np} \cdot Z \cdot \frac{2\pi \cdot R_1}{B}}}{4\pi^2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot S_{np} \cdot l^{1-\frac{1}{p}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot Z \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}}. \quad (5)$$

Из анализа зависимости (5) вытекает, что однофакторное увеличение $V_{изд}$ вызывает непрерывный рост λ . Такая закономерность изменения λ обусловлена, с одной стороны, возрастанием H_{max} , а, следовательно, и линейного износа круга с увеличением $V_{изд}$, с другой – уменьшением объема сошлифованного металла, что связано со снижением времени шлифования t , необходимого для поддержания постоянной суммарной длины пути зерна в металле. Таким образом, установлено, что эффективность обработки с увеличением $V_{изд}$ снижается и при выборе оптимальной схемы шлифования следует стремиться к уменьшению $V_{изд}$ до технологически возможного значения. Экспериментально полученная зависимость $q-V_{изд}$ (рис. 2, а, кривая 1) при шлифовании твердосплавной развертки подтверждает достоверность зависимости (5).

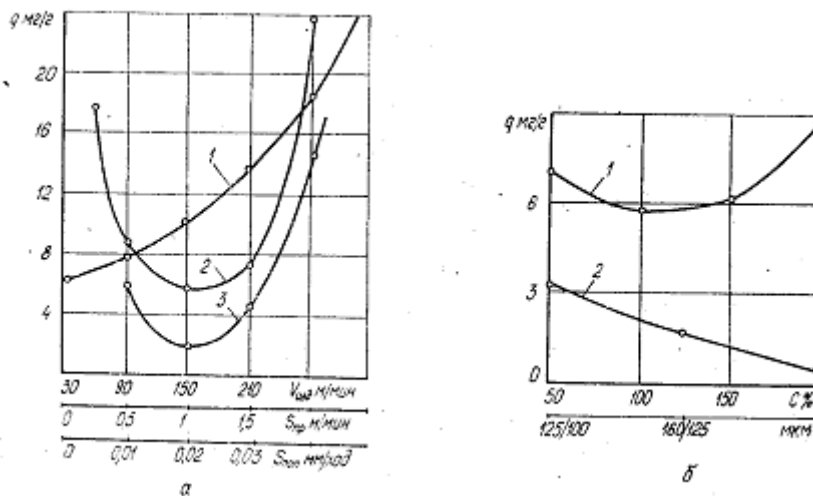


Рис. 2. Зависимости удельного расхода алмаза от параметров режима шлифования $V_{изд}$, $S_{нр}$, $S_{нон}$ (а) и характеристик круга m , \bar{X} (б)

Условия проведения эксперимента: а – круг ПП250x16x75 АСВ 160/125 МВ1 – 100%; обрабатываемый материал – твердый сплав ВК8; $V_{кр} = 30$ м/с; 1 – $S_{нр} = 0,5$ м/мин; $S_{нон} = 0,02$ мм/ход; 2 – $V_{изд} = 30$ м/мин; $S_{нр} = 0,5$ м/мин; 3 – $V_{изд} = 30$ м/мин; $S_{нон} = 0,02$ мм/ход; б - $V_{кр} = 30$ м/с; $S_{нр} = 1$ м/мин; $S_{нон} = 0,02$ мм/ход; $V_{изд} = 30$ м/мин.

Наибольший интерес представляет анализ зависимости λ от продольной и поперечной подач, которые, согласно (5), в одинаковой степени влияют на λ . Выражение (5) показывает уменьшение λ с увеличением $S_{нр}$, что объясняется менее интенсивным ростом максимальной толщины среза H_{max} с увеличением по сравнению с ростом объема снятого металла, который изменяется пропорционально $S_{нр}$. Однако, беспредельный рост H_{max} с увеличением $S_{нр}$ невозможен вследствие ограниченной прочности зерна и его удержания в связке. Обязательно наступит такой момент, когда увеличение $S_{нр}$ вызовет превышение критического значения H_{max} – допустимой (прочностной) толщины среза – и в результате раскалывания зерна на более крупные части или выпадения зерен из связки произойдет катастрофический износ шлифовального круга. Следовательно, падающая зависимость λ от $S_{нр}$ будет иметь место при изменении H_{max}

пределах $0 - H_{max}$, в дальнейшем интенсивность роста износа круга превысит скорость съема металла и удельный расход алмаза начнет возрастать, т.е. зависимость λ от S_{np} носит экстремальный характер с явно выраженным минимумом.

Аналогичен характер изменения λ в зависимости от Z . Приведенные на рис. 2,а экспериментальные зависимости для S_{non} (кривая 2) и S_{np} (кривая 3) полностью соответствуют теоретическим результатам.

При установлении экспериментальной схемы шлифования важно знать оптимальную долевую продольную подачу $S_{\delta} = B_1 / B$ обеспечивающую минимум удельного расхода алмаза. Для этого преобразуем несколько выражение (5), заменив в нем S_{np} зависимостью $S_{np} = B_1 / 2\pi \cdot R_1 \cdot V_{изд}$:

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot \sqrt{2} \cdot b \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}} \cdot \frac{\sqrt[6]{V_{изд}^2 \cdot Z \cdot \frac{B_1}{B}}}{2\pi^2 \cdot R_2 \cdot B_1 \cdot l^{1-\frac{1}{p}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot Z \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}} \quad (6)$$

Как следует из (6), удельный расход алмаза можно уменьшить, применяя шлифование с продольной подачей B_1 , равной ширине круга, т. е. $S_{\delta}=1$. Наряду с уменьшением q такая схема позволяет добиться наибольшей производительности.

Минимальное значение λ_{min} получим, выражая $V_{изд}$ через Z по формуле, приведенной в работе [1]:

$$\lambda_{min} = \frac{9 \cdot b \cdot V_{изд}}{\pi \cdot R_2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{B \cdot B_1} \cdot H_{max}^2 \cdot l^{\left(1-\frac{1}{p}\right)}} \quad (7)$$

Анализ зависимости (7) показывает, что наиболее эффективной схемой шлифования является глубинное шлифование с продольной подачей, равной ширине круга, минимально технологически возможной скоростью изделия $V_{изд}=1 \dots 10$ м/мин. Поперечная подача может быть принята равной снимаемому припуску. Предлагаемая схема шлифования существенно отличается от применяемых схем многопроходного и глубинного шлифования, в частности многолезвийных инструментов [2], где S_{δ} не превышает 0,1 ширины круга, а скорость изделий находится в пределах 20–30 м/мин.

Экспериментальные исследования показали, что применение такой схемы шлифования позволяет снизить удельный расход алмаза до экономически приемлемого уровня $q \cong 1$ мг/г и, следовательно, осуществить замену абразивного шлифования алмазным на операциях круглого наружного шлифования многолезвийным инструментом.

Аналитическое описание зависимости удельного расхода алмазов от параметров режима шлифования приемлемо для кругов одной характеристики.

Чтобы выяснить влияние зернистости и объемной концентрации круга на удельный расход алмаза, эквивалентную функцию (1) необходимо представить

в виде, содержащем кроме H_{max} , t и $V_{объем}$ число работающих зерен на единице площади круга k_l и время шлифования t :

$$\lambda = \frac{H_{max} \cdot l^{1/p} \cdot k_l \cdot t_1}{V_{объем}}. \quad (8)$$

При построении зависимости (8), как и зависимости (1), исходим из предположения, что объемный износ круга пропорционален нагрузке, действующей на максимально выступающее из связки зерно $F \sim H_{max}$, числу работающих зерен k_l и времени шлифования t .

Число работающих зерен k_l с учетом зависимости для поверхностной концентрации зерен [3]: $k = \frac{3m \cdot (1 - \varepsilon)}{200\pi \cdot \bar{X}^2}$, где \bar{X} – зернистость; m – объемная концентрация круга; $(1 - \varepsilon)$ – коэффициент, определяющий прочность удержания зерна в связке. Равномерный закон распределения вершин зерен над уровнем связки выражается уравнением

$$k_l = k \cdot \frac{H_{max}}{b} = \frac{3m \cdot (1 - \varepsilon) \cdot H_{max}}{200\pi \cdot \bar{X}^2 \cdot b}, \quad (9)$$

где $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$ – максимальная высота выступания зерен над связкой

Между максимальной глубиной внедрения металла в рабочую поверхность круга H_{max} и параметрами k и b существует кинематическая связь. Для удобства анализа она может быть выражена через безразмерный параметр μ ($H_{max} = \mu \cdot b$), характеризующий степень использования в процессе шлифования высоты рельефа круга и изменяющийся в пределах 0–1:

$$\mu = \sqrt[3]{\frac{600 \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}{tg\gamma \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)^3 \cdot V_{кр}}} \cdot \sqrt[6]{V_{изд} \cdot S_{np} \cdot Z \cdot \frac{2\pi \cdot R_1}{B}}. \quad (10)$$

Преобразуем (8) с учетом (4), (9) и (10):

$$\lambda = \frac{9 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \cdot \sqrt{V_{изд}}}{tg\gamma \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{2\pi \cdot R_1 \cdot S_{np} \cdot Z \cdot B \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}}}. \quad (11)$$

Как следует из (10) и (11), с уменьшением m и, соответственно, увеличением μ происходит падение функции удельного расхода алмаза λ , что обусловлено затухающим характером скорости изменения μ в зависимости от концентрации m . Однако такая закономерность справедлива при увеличении μ до значения $\mu^{дон}$, определяющего допустимую (прочностную) толщину среза. Дальнейшее увеличение μ приведет к интенсивному разрушению, вырыванию зерен из связки и значительному росту линейного износа круга. Таким образом, как и для режимных параметров S_{np} и Z , зависимость λ от m носит экстремальный характер, связанный с существованием допустимой (прочностной) толщины среза, при достижении которой λ принимает минимальное значение.

Экспериментальные исследования показали экстремальность зависимости $q-m$ (рис. 2,б), что соответствует теоретические результатам.

Из анализа выражения (11) следует, что λ_{min} , соответствующее $\mu = \mu^{don}$, не зависит от m , хотя предельная кинематическая производительность шлифования с учетом $k = \frac{3m \cdot (1 - \varepsilon)}{200\pi \cdot \bar{X}^2}$ прямо пропорционально связана с m :

$$Q = \frac{tg\gamma \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)^3 \cdot V_{кр} \cdot B_1 \cdot \mu^3}{600 \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}} \cdot \sqrt{Z}. \quad (12)$$

С кинематической точки зрения, целесообразно увеличить концентрацию круга, что позволяет без снижения износостойкости повысить производительность шлифования. Однако при чрезмерном увеличении m уменьшатся прочность удержания зерна в связке и допустимая (прочностная) толщина среза, определяемая μ^{don} , что вызовет повышенный износ круга и, в соответствии с формулой (12), – снижение предельной кинематической производительности Q .

По мере увеличения зернистости круга по формуле (11) уменьшается λ_{min} , в то время как предельная кинематическая производительность не зависит от \bar{X} . Такая закономерность обусловлена тем, что увеличение \bar{X} по квадратичной зависимости вызывает уменьшение k_1 и по линейной – увеличение толщины единичного среза $H_{max} = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$. Их произведение в выражении (8) дает падающую зависимость от X . Следовательно, повышение зернистости кругов позволяет снизить удельный расход алмаза без уменьшения производительности.

Рассмотренный механизм износа алмазного круга находит удобное аналитическое описание, приемлемое для решения ряда инженерных задач прикладного и методологического характера, в частности целенаправленного экспериментального поиска оптимальных условий шлифования.

Список литературы: 1. **Раб А. Ф., Новиков Ф. В.** Кинематические соотношения параметров процесса шлифования изделий с прерывистыми поверхностями. – Резание и инструмент, 1980, вып. 24, с. 99–105. 2. **Захаренко И. П.** Алмазные инструменты и процессы обработки. – К.: Техніка, 1980. – 212 с. 3. **Абразивная** и алмазная обработка материалов. Справ. / Под ред. А. Н. Резникова. – Машиностроение, 1977. – 390 с.

Поступила в редколлегию 18.08.81.