

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ

**КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ РЕЖУЩЕГО РЕЛЬЕФА
АЛМАЗНОГО КРУГА В ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ**

Процесс алмазного шлифования характеризуется большими пластическими деформациями металла в момент отделения тончайших по размерам стружек, что требует его изучения с учетом всего многообразия контактных явлений, связанных с износом алмазного круга. Многочисленными исследованиями [1, 2, 3] износа круга, работающего в режиме самозатачивания,

установлено, что в процессе шлифования после определенного времени приработки на его поверхности образуется устойчивый режущий рельеф, который в дальнейшем независимо от линейного износа круга остается практически неизменным и определяет интенсивность съема металла. Значительное влияние на формирование рельефа оказывают режим шлифования, характеристики круга и обрабатываемый металл, которые обуславливают различное соотношение между силовой нагруженностью зерен и их прочностными свойствами, степенью износа зерен и их выступанием над связкой.

Как показала практика применения алмазного шлифования, для каждой трущейся пары «круг — изделие» всегда имеется оптимальный режущий рельеф круга, шлифование которым обеспечивает наилучшее сочетание технологических показателей обработки. Однако задача его определения решена далеко не полностью, что связано в основном с отсутствием аналитического решения, позволяющего установить общую закономерность износа круга в режиме самозатачивания и на ее базе целенаправленно программировать эксперимент. Обычно для обоснования механизма износа круга и образования устойчивого рельефа рассматривают износ единичного зерна без учета совместной (вероятностной) работы остальных зерен и распределения действующих на них сил резания. Кроме того, не учитывается износ зерна до его объемного разрушения или выпадания из связки, хотя в действительности ресурс зерна определяется именно периодом истирания и поверхностного микроскалывания. Изучить эти вопросы с помощью методов теории упругости, теории пластичности, теории разрушения и других не представляется возможным в силу сложности аналитического описания контактных процессов шлифования. Гораздо проще получить принципиальные кинетические решения, задавая в расчетах определенным образом зависимость «объем разрушенной части зерна — сила резания».

В настоящей статье предложена математическая модель образования установившегося режущего рельефа круга с учетом вероятности работы и износа всех зерен круга, что позволило вскрыть ряд физических особенностей в механизме износа круга и правильно подойти к оценке его износостойкости.

Предположим, перед шлифованием рабочая поверхность заправленного круга характеризуется равномерным законом распределения вершин над связкой $f(y_i) = \frac{1}{b}$ (рис. 1), имеющих форму конуса с углом при вершине 2γ , и поверхностной концентрацией зерен k . В процессе шлифования режущие зерна изнашиваются, выступание их над связкой уменьшается и закон разновысотности вершин зерен превращается в нормальный. Форма изношенных зерен может быть представлена усеченным конусом, площадь верхнего основания которого за-

висит от величины нагрузки, действующей на зерно. По мере износа зерен в результате образования более сглаженного рельефа толщина среза во времени уменьшается, а площадь среза и нагрузка на зерно увеличиваются. При достижении предельной нагрузки на максимально выступающем зерне произойдет его объемное разрушение или выпадение из связки, что приведет к подключению в резание нового нижерасполо-

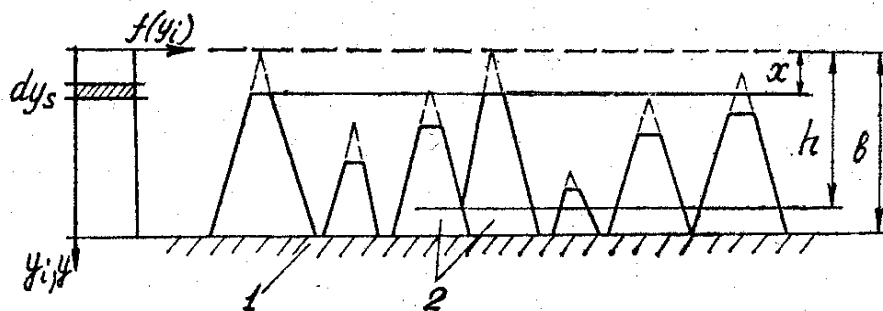


Рис. 1. Расчетная схема относительной полноты профиля: 1 — связка круга; 2 — алмазные зерна

женного зерна. Через определенное число касаний круга с изделием произойдет разрушение другого наиболее выступающего зерна и подключения в резание нового зерна, т. е. количество разрушенных или выпавших зерен будет постоянно компенсироваться новыми зернами, а износ круга подчиняться равномерному закону.

Для аналитического описания стабилизации рельефа круга установим степень износа максимально выступающего зерна от истирания и поверхностного микроскалывания до момента достижения на нем предельной нагрузки и его объемного разрушения. Износ круга изучим на примере врезного шлифования прямоугольного образца, движущегося с постоянной скоростью в радиальном направлении к рабочей поверхности круга. Выделим слой зерен dn , имеющих высоту выступления над связкой $(y - y_s)$ (рис. 1), и рассмотрим образование профиля от их наложения на плоскость образца, совпадающую с диаметральной плоскостью круга. При взаимном горизонтальном движении dn зерен и радиальном движении образца на его поверхности будут образовываться срезы различной толщины, подчиняющиеся равномерному закону распределения. Относительная полнота профиля элементарного среза по аналогии с [4] опишется:

$$\epsilon_i(y) = \frac{dn[a_s + 2tg \gamma \cdot (y - y_i)]}{B}, \quad (1)$$

где a_s — длина верхнего основания трапеции; B — ширина круга; $dn = n \cdot \frac{1}{b} \cdot dy_i$.

Суммарный профиль от таких срезов получим вероятностным суммированием, для чего перейдем от $\varepsilon_i(y)$ противоположной функции $\Phi_i(y) = 1 - \varepsilon_i(y)$ и воспользуемся теоремой умножения независимых случайных величин:

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^n \Phi_i(y) = e^{-\frac{dn}{b} [(a_s(y-y_a) + \operatorname{tg} \gamma (y-y_a)^2)]}$$

Относительную полноту профиля от всех зерен, участвующих в резании, получим умножением $\Phi(y)$ от всех элементарных слоев зерен. Величину a_s представим выражением $a_s = 2 \operatorname{tg} \gamma \times (y_a - y_s)$, в котором $(y_a - y_s)$ заменим $\eta (y - y_s)$, $\eta = 0 \div 1$ — коэффициент износа зерна до его объемного разрушения. В модели принимается, что линейный износ зерна пропорционален толщине среза.

$$\Phi_{\text{общ}} = e^{-\frac{n \cdot \operatorname{tg} \gamma (1 - \eta^2)}{b \cdot b} \cdot \frac{y^2}{3}}$$

Общее число зерен n , участвующих в резании при движении образца в слое зерен высотой b , равно

$$n = k \cdot B \cdot V_{\text{кр}} \cdot \frac{b}{V_{\text{изд}}}$$

где $V_{\text{кр}}$; $V_{\text{изд}}$ — соответственно скорости круга и изделия м/мин.

Максимальную глубину внедрения образца в рабочую поверхность круга, при которой на его плоскости образуется пенистый профиль, т. е. происходит полный сьем металла, получим из условия $\varepsilon(H) = 0,95$:

$$H = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V_{\text{изд}}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{кр}} (1 - \eta^2)}}$$

Для определения коэффициента износа зерна η предположим, что линейный износ круга в основном происходит от объемного разрушения зерен при действии на них предельной (разрушающей) нагрузки. Выпадение зерен из связки, в связи с высокой прочностью их удержания, первоначально в расчет исключается. Предельную нагрузку примем пропорциональной площади среза $S_{\text{пред}}$, которая в зависимости от $H_{\text{max}} = (1 - \eta) \times H$ и степени износа зерна η может располагаться на разном удалении от вершины исходного конусообразного зерна (см. рис. 1):

$$S_{\text{пред}} = \operatorname{tg} \gamma \cdot H^2 \cdot (1 - \eta^2)$$

Решая совместно (5) и (6), имеем:

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot S_{\text{пред}}^3}{81 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot b^2 \cdot V_{\text{изд}}^2}}$$

Как следует из (7), с увеличением $V_{\text{изд}}$ (что соответствует повышению производительности шлифования) коэффициент η растет и стабилизация режущего рельефа круга происходит на большем удалении от вершины исходного максимально выступающего зерна, т. е. прежде, чем зерно объемно разрушится, оно претерпевает значительный износ от истирания и микро-скалывания кромок. Выступление таких зерен над связкой уменьшится, радиусы округления при вершинах возрастут и режущий рельеф примет более сглаженный характер. Полученный результат обусловлен тем, что с ростом $V_{\text{изд}}$ предельная площадь среза, соответствующая разрушающей нагрузке, расположена на большем удалении от вершины исходного зерна:

$$H = \frac{9 \cdot b \cdot V_{\text{изд}}}{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot S_{\text{пред}}} \quad (8)$$

Увеличение $S_{\text{пред}}$, т. е. собственно прочности зерна, при одном режиме шлифования, как следует из (8), уменьшает линейный износ зерна до момента его объемного разрушения. На рабочей поверхности круга образуется более развитый рельеф. Линейный износ зерна до разрушения X и максимальная толщина среза H_{max} определяются зависимостями:

$$X = \eta \cdot H = \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot S_{\text{пред}}^3}{81 \cdot \text{tg} \gamma \cdot b^2 \cdot V_{\text{изд}}^2}} \cdot \frac{9 \cdot b \cdot V_{\text{изд}}}{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot S_{\text{пред}}} ; \quad (9)$$

$$H_{\text{max}} = (1 - \eta) \cdot H = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot S_{\text{пред}}^3}{81 \cdot \text{tg} \gamma \cdot b^2 \cdot V_{\text{изд}}^2}}\right) \cdot \frac{9 \cdot b \cdot V_{\text{изд}}}{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot S_{\text{пред}}} \quad (10)$$

Анализируя (7), (9), (10), нетрудно заметить, что стабилизация рельефа круга произойдет при $V_{\text{изд}} > \frac{k^2 \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot S_{\text{пред}}^3}{81 \cdot \text{tg} \gamma \cdot b^2}$. В противном случае нагрузка, действующая на зерно, не достигнет предельного значения и разрушения зерен не произойдет. Зерна будут подвергаться в основном истиранию и микро-скалыванию с образованием площадок износа, что вызовет повышенную теплонпряженность процесса и затупление круга. Такая закономерность износа будет наблюдаться при неправильном выборе характеристики круга, особенно на отделочных операциях, когда прочность зерен и связки может превышать силы резания. Полученное решение полностью подтверждается практическими рекомендациями по шлифованию, согласно которым на «мягких» режимах резания эффективно применять круги с пониженной прочностью зерен и связкой, легко самозатачиваемые, без образования значительных площадок износа на зернах.

Дальнейший анализ зависимости (7) показывает, что при превышении скоростью изделия определенной величины режущий рельеф не будет обеспечивать полного съема металла, под-

водимого в зону резания $\varepsilon(y) = 0,95$. Неснятый металл в виде гребешков микронеровностей начнет интенсивно контактировать со связкой, разрушая ее, оголяя зерна и уменьшая таким образом прочность удержания их в связке. Объемного разрушения зерна в этих условиях не произойдет, так как нагрузка, действующая на зерно, всегда меньше предельной вследствие снижения алмазоудержания. Основной вид износа — выпадание зерен из связки, которому обязательно предшествует истирание и поверхностное микроскалывание кромок.

Применим полученные аналитические решения для оптимизации шлифования по относительному расходу алмаза. При установившемся процессе шлифования за каждое касание зерна с металлом происходит его линейный износ на величину $\eta \cdot H_{\max}$. Линейный съем металла за один оборот круга равен $h = V_{\text{изд}} \cdot t$, где t — время одного оборота круга. Функцию относительного расхода алмаза q получим из соотношения $\eta \cdot H_{\max}$ к h :

$$q = \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot S_{\text{пред}}^3}{81 \cdot \text{tg} \gamma \cdot b^3 \cdot V_{\text{изд}}^2}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot S_{\text{пред}}^3}{81 \cdot \text{tg} \gamma \cdot b^3 \cdot V_{\text{изд}}^2}} \right) \times \frac{9 \cdot b}{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot S_{\text{пред}} \cdot t} \quad (11)$$

Выполненные на ЭВМ расчеты показали, что q с увеличением $V_{\text{изд}}$ непрерывно уменьшается или в зависимости от сочетания остальных параметров может оставаться практически постоянной, т. е. более сглаженный рельеф круга характеризует-

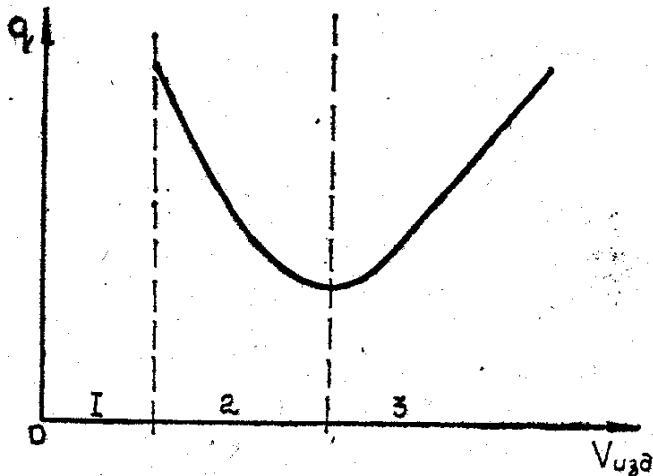


Рис. 2. Зависимость q от $V_{\text{изд}}$: 1—истирание и поверхностное разрушение зерен (затупление круга); 2 — объемное разрушение зерен (самозатачивание круга); 3 — выпадание зерен из связки круга

ся повышенной износостойкостью. Однако такая закономерность будет справедлива до предельного значения $V_{\text{изд}}$, превышение которого приведет к выпаданию зерен из связки без их объемного разрушения и повышению q . Следовательно, для любой трущейся пары «круг—изделие» всегда существует оптимальный рельеф круга, обеспечивающий минимум относительного расхода алмаза. На рис. 2 графически показан характер изменения механизма износа

круга и соответствующие ему значения q в зависимости от $V_{\text{изд}}$. Рассмотрим влияние прочности алмазного зерна, связки и

обрабатываемого материала на минимум q . Для этого воспользуемся зависимостью (8), из которой видно, что с увеличением $S_{\text{пред}}$ износ зерна h останется постоянным при пропорциональном увеличении $V_{\text{изд}}$ и соответственно производительности шлифования. Следовательно, одинаковый линейный износ зерна h для более прочной марки достигается при большей производительности шлифования. Аналогичным образом влияет на h и повышение прочности связки, так как более прочная связка позволяет увеличить степень износа зерна до объемного разрушения и, следовательно, интенсифицировать режим шлифования. Как следует из (8), с увеличением прочности обрабатываемого металла $S_{\text{пред}}$ уменьшается и минимум q смещается в область меньших значений $V_{\text{изд}}$.

Полученные аналитические решения износа круга и образования устойчивого рельефа на его рабочей поверхности достаточно полно подтверждаются результатами экспериментальных исследований [2, 3].

Таким образом, благодаря вероятностному подходу к изучению процесса шлифования появилась возможность разработать методику расчета износа круга и параметров его рельефа во времени, где исходными данными является прочность зерна, связки, обрабатываемого металла и режим шлифования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сагарда А. А., Чеповецкий И. Х., Мишнаевский Л. Л. Алмазно-абразивная обработка деталей машин. — Киев: Техніка, 1974.—179 с.
2. Мишнаевский Л. Л. Износ шлифовальных кругов. — Киев: Наук. думка, 1982. — 192 с.
3. Попов С. А., Малевский Н. П., Терещенко Л. М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. — М.: Машиностроение, 1977. — 263 с.
4. Раб А. Ф., Новиков Ф. В. Относительная полнота профиля рабочей поверхности круга из СТМ. — Резание и инструмент, 1980, вып. 24, с. 41—47.