

Ф. В. НОВИКОВ, канд. техн. наук

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗНОСА И СТАБИЛИЗАЦИИ РЕЛЬЕФА
АЛМАЗНОГО КРУГА

Проблема повышения режущей способности алмазного круга неразрывно связана с разработкой эффективных методов стабилизации и поддержания в процессе шлифования оптимального режущего рельефа. Решением такой задачи может быть правильный выбор режимов шлифования, характеристик круга, СОТС и других условий обработки, позволяющих продолжительное время сохранять примерное равенство скоростей износа зерен и связки, осуществлять высокопроизводительный съем металла в режиме самозатачивания. При определенных сочетаниях прочностных характеристик обрабатываемого металла, зерен и связки работа круга в режиме самозатачивания может оказаться малоэффективной — в широком диапазоне изменения режимов шлифования скорость износа зерен будет постоянно опережать скорость износа связки, и круг необходимо периодически править. Для эффективного ведения процесса шлифования в таких условиях важно знать модель оптимального режущего рельефа, механизмы его износа и стабилизации, что позволит для любой пары круг — заготовка подобрать условия обработки, включая электрический режим комбинированного шлифования, при которых связка и зерна будут изнашиваться с оптимальной скоростью.

В настоящей статье предложено аналитическое решение задачи об износе и стабилизации рельефа круга, показана взаимосвязь параметров процесса шлифования с параметрами установившегося рельефа. Дана структура оптимизации режимов шлифования и характеристик алмазного круга.

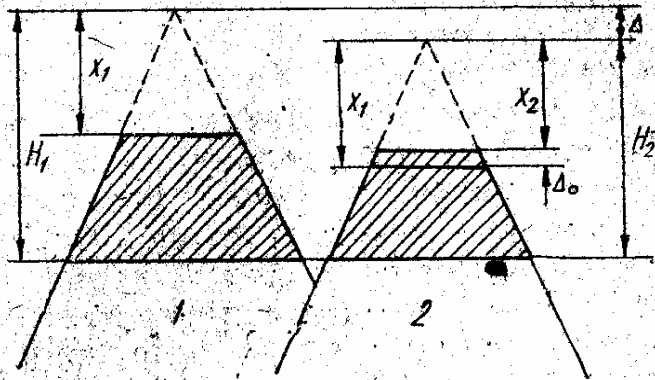
Для анализа закономерностей шлифования износ круга во времени рассмотрим как процесс периодического объемного разрушения зерен и их последующего выпадания из связки от действия предельной нагрузки. Как показано в работах [1—3], моменту достижения такой нагрузки на максимально выступающем зерне и стабилизации рельефа круга предшествует определенный линейный износ зерна, величина которого зависит от режимов шлифования и других условий обработки. По многочисленным экспериментальным данным, эта величина незначи-

гельна (не более 10 % размера зерна) и при анализе обычно не учитывается. В то же время, как будет показано ниже, эта величина весьма чувствительна к изменению условий обработки и играет важную роль в формировании технологических показателей шлифования. Например, изменение поперечной подачи в несколько раз приводит к изменению износа круга в десятки и сотни раз, тогда как величина линейного износа до его объемного разрушения остается практически постоянной. Обычно такое изменение износа круга связывают с величиной нагрузки, действующей на отдельное зерно. Чем больше нагрузка, тем интенсивнее износ, и наоборот.

Вместе с тем в установившемся процессе шлифования, характеризующемся равномерным во времени объемным разрушением и выпадением из связки зерен, нагрузка, действующая на максимально выступающее (в данный момент времени) зерно, периодически, через определенное число контактов зерна с металлом, принимает предельное значение, обусловленное прочностными свойствами зерен и связки. Это свидетельствует о том, что в широком диапазоне изменения режимов шлифования нагрузка приблизительно постоянна, не превышает предельного значения и, следовательно, не является причиной изменения износа круга.

Наблюдаемое изменение износа круга обусловлено различным числом контактов зерна с металлом до момента его объемного разрушения. Правомочность такого положения следует из расчетной схемы, приведенной на рисунке. Пусть величина линейного износа наиболее выступающего зерна в момент его объемного разрушения равна X_1 , а второго, расположенного ниже, в тот же момент — X_2 , $X_2 < X_1$. Для того чтобы произошло объемное разрушение второго зерна, оно должно претерпеть дополнительный линейный износ на $\Delta_0 = X_1 - X_2$ (1).

Очевидно, чем больше Δ_0 , тем выше ресурс работы зерна и меньше износ круга. Параметры X_1 , X_2 определяются по методике, описанной в работе [1]: $X_1 = \eta H_1$; $X_2 = \eta H_2$, где η — коэффициент, учитывающий степень износа зерна до его объемного разрушения, $\eta = 0-1$; H — максимальная глубина внедрения металла в рабочую поверхность круга, отсчитывается от вершины исходного (неизношенного) максимально выступающего зерна, мм.



Расчетная схема образования стабилизированного рельефа алмазного круга

Принимая $H_2 = H_1 - \Delta$, где Δ — расстояние между вершинами двух зерен, в соответствии с работой [4] имеем $\Delta_0 = \eta \cdot \Delta$ (2), где

$$\eta = 1 - \frac{A}{P} \left(\frac{600\pi \bar{X}^3 A^2 V_{\text{заг}} \sqrt{2t\rho_{\text{пр}}}}{mV_{\text{кр}} P^2} \right)^{\frac{2-n}{2n-1}},$$

A — параметр, характеризующий прочностные свойства обрабатываемого металла; \bar{X} — зернистость круга, мм; m — объемная концентрация алмазов, %; $V_{\text{заг}}$, $V_{\text{кр}}$ — скорости заготовки и круга, мм/с; t — глубина шлифования, мм; $\rho_{\text{пр}} = 1/R_1 + 1/R_2$ — приведенный радиус, 1/мм; R_1 , R_2 — радиусы заготовки и круга, мм.

Значение n изменяется в пределах $n=0-1$ и с достаточной степенью точности может быть принято $n=1,5$.

Из (2) следует значительное влияние коэффициента η на параметр Δ_0 , определяющий период времени между объемным разрушением двух наиболее выступающих зерен. Полученная зависимость хорошо согласуется с практикой шлифования. Так, известно, что шлифование кругом с развитым режущим рельефом сопровождается повышенным его износом. Аналогичная зависимость вытекает из (2), так как с уменьшением коэффициента η , соответствующего образованию более развитого рельефа на круге, параметр Δ_0 снижается и повышает износ круга. При $\eta=0$ линейный износ зерна до его объемного разрушения практически отсутствует и круг будет работать в режиме катастрофического износа.

Полученная зависимость (2) показывает, что повышенному износу круга, определяемому коэффициентом η , всегда соответствует меньшее значение нагрузки P , действующей на максимально выступающее зерно. Следовательно, не величина единичной нагрузки, а форма зерна, обусловленная его линейным износом в процессе шлифования, определяет износостойкость круга в целом. Чем более развит рельеф, тем выше его износ, несмотря на то, что нагрузка, действующая на максимально выступающее зерно, меньше.

Полученная зависимость позволяет провести анализ износостойкости круга при шлифовании в стабилизированном режиме, т. е. когда нагрузка P периодически достигает предельного значения $P_{\text{пр}}$. Для этого параметр Δ выразим следующим образом: $\Delta = b/n_0$ (3), где $b = (1-\varepsilon) \bar{X}$ — максимальная высота выпячивания зерен над связкой, мм; $(1-\varepsilon)$ — коэффициент, учитывающий прочность удержания зерна в связке; $n_0 = 2\pi R_2 B k$ — общее число зерен, расположенных на рабочей поверхности круга; B — ширина круга, мм; $k = \frac{3m(1-\varepsilon)}{200 \cdot \bar{X}^2}$ — поверхностная концентрация зерен, шт/мм².

После преобразований параметры Δ , Δ_0 определяются так:

$$\Delta = \frac{100\bar{X}^3}{3mBR_2}, \quad (4)$$

$$\Delta_0 = \frac{100\bar{X}^3}{3mBR_2} \left[1 - \frac{A}{P_{\text{пр}}} \left(\frac{600\pi\bar{X}^3 A^2 V_{\text{заг}} \sqrt{2t\rho_{\text{пр}}}}{mV_{\text{кр}} P^2} \right)^{0,25} \right]. \quad (5)$$

Из полученной зависимости (5) следует важный практический вывод. Если принять $V_{\text{кр}} = 2\pi R_2 \omega_{\text{кр}}$, где $\omega_{\text{кр}} = \text{const}$ — частота вращения круга, то с увеличением R_2 параметр Δ_0 первоначально возрастает, что связано с повышением η , затем — в результате снижения расстояния между вершинами зерен Δ — уменьшается. Такая же закономерность существует для объемной концентрации алмазов m и ширины круга B при рассмотрении шлифования с долевой продольной подачей $S_d < 0,5$ ($V_{\text{заг}} = \frac{2\mu R_1}{S_d \cdot B} S_{\text{пр}}$, где $S_{\text{пр}}$ — продольная подача, мм/с). Следовательно, добиться преимуществ в шлифовании только путем пропорционального увеличения параметров R_2 , m , B нельзя. Увеличение радиуса и ширины круга, объемной концентрации алмазов должно быть связано с соответствующим изменением параметров режима шлифования, определяемых из условия максимума Δ_0 по зависимости (5).

В отличие от объемной концентрации алмазов m , зернистость круга \bar{X} оказывает на параметр Δ_0 вполне однозначное влияние. С ее увеличением Δ_0 непрерывно возрастает и ресурс работы зерна повышается. Это происходит вследствие того, что одновременно с увеличением \bar{X} в зависимости (5) приблизительно по линейному закону возрастает предел прочности зерна $P_{\text{пр}}$.

Увеличение $V_{\text{кр}}$ приводит к повышению Δ_0 , а $V_{\text{заг}}$, t — к его уменьшению. Механизм влияния режимных параметров шлифования на Δ_0 заключается в следующем. С увеличением $V_{\text{кр}}$ снижаются параметры H , H_{max} , где H_{max} — максимальная толщина среза [4]:

$$H_{\text{max}} = \left(\frac{600\pi\bar{X}^3 A^2 V_{\text{заг}} \sqrt{2t\rho_{\text{пр}}}}{mV_{\text{кр}} P_{\text{пр}}^2} \right)^{0,5}, \quad (6)$$

$$H = \frac{P_{\text{пр}}}{A} \left(\frac{600\pi\bar{X}^3 A^2 V_{\text{заг}} \sqrt{2t\rho_{\text{пр}}}}{mV_{\text{кр}} P_{\text{пр}}^2} \right)^{0,25}. \quad (7)$$

Однако интенсивность уменьшения H по сравнению с H_{max} ниже, в результате чего коэффициент $\eta = 1 - \frac{H_{\text{max}}}{H}$ и величина линейного износа зерна до его объемного разрушения

возрастают. Такая закономерность обусловлена повышением условного напряжения резания при шлифовании

$$\sigma = \frac{A}{H_{\max}^{1.5}} = A \left(\frac{m V_{\text{кр}} P_{\text{пр}}^2}{600 \pi X^3 A^2 V_{\text{заг}} \sqrt{2 t_{\text{пр}}}} \right)^{0.75} \quad (8)$$

и уменьшением площади поперечного сечения единичного среза, необходимой для достижения на максимально выступающем зерне предельной нагрузки $P_{\text{пр}}$.

С возрастанием $V_{\text{заг}}$, t , как следует из (6) — (8), наблюдается противоположная картина, что приводит к уменьшению Δ_0 .

Прочность зерна $P_{\text{пр}}$ и обрабатываемого металла A оказывают на Δ_0 различное влияние. С ростом $P_{\text{пр}}$ уменьшается H_{\max} , повышаются H и η . Это позволяет увеличить линейный износ зерна до его объемного разрушения X и параметр Δ_0 . Увеличение A , наоборот, приводит к повышению H_{\max} и снижению H и η , т. е. объемному разрушению зерна предшествует незначительный его износ. Предельное значение нагрузки $P_{\text{пр}}$ достигается практически на неизношенном зерне. Снижение H с ростом A свидетельствует об уменьшении уровня максимально возможной производительности шлифования.

Для более глубокого изучения процесса шлифования проведем анализ изменения относительного расхода алмаза, для чего установим его аналитическое выражение. Пусть за время τ в стабилизированном режиме шлифования произошло объемное разрушение двух наиболее выступающих зерен, что соответствует линейному износу круга на Δ . Потеря алмаза по весу составит $P_a = \rho_a B 2\pi R_2 \Delta \alpha$, где ρ_a — плотность алмаза, н/мм³; α — коэффициент, учитывающий плотность связки в зависимости от концентрации алмазов в круге. [5].

За это же время сошлифован металл массой $P_m = \rho_m V_{\text{заг}} t \tau B$ где ρ_m — плотность обрабатываемого металла, н/мм³; $\tau = \tau_0 i$

$\tau_0 = \frac{2\pi R_2}{v_{\text{кр}}}$ — время одного оборота круга, с; $i = \frac{\Delta_0}{\Delta_i}$ — число оборотов круга за время между объемным разрушением двух наиболее выступающих зерен, соответствующего линейному износу зерна на Δ_0 ; Δ_i — линейный износ зерна за одно касание с металлом; первоначально в расчетах принимается постоянным. Относительный расход алмаза получим отношением P_a к P_m :

$$q = \frac{10^3 \rho_a \alpha \cdot \Delta_i V_{\text{кр}}}{\rho_m V_{\text{заг}} t \eta}, \text{ мг/г.} \quad (9)$$

Аналогично (5), характер изменения зависимости (9) определяется коэффициентом η , что подтверждает необходимость анализа износа круга с позиций износа отдельных зерен до мо-

мента их разрушения. Из приведенной зависимости следует принципиальное для работы алмазно-абразивного инструмента решение: при $\eta \rightarrow 0$ относительный расход алмаза стремится к бесконечности и условия съема металла нарушаются. Катастрофический износ круга имеет место для различных сочетаний параметров процесса шлифования, определяемых коэффициентом $\eta \rightarrow 0$.

Второй важной особенностью зависимости (9) является ее экстремальность. Нетрудно видеть, что при однофакторном изменении $V_{\text{заг}}, V_{\text{кр}}, t, m = f(\alpha), R_2 = \frac{V_{\text{кр}}}{2\pi\omega_{\text{кр}}}$ функция относительного расхода алмаза проходит точку минимума, т. е. всегда существует оптимальное значение η .

Преобразуя (9), можно показать экстремальность относительного расхода алмаза от продольной подачи $S_{\text{пр}}$ и ширины круга B . Приведенные теоретические решения подтверждаются экспериментальными исследованиями, приведенными в работе [6]. Таким образом, появляется возможность расчетного определения относительного расхода алмаза q и условий шлифования, соответствующих минимуму q .

Установим оптимальное значение глубины шлифования t , для чего продифференцируем (9) по t и производную приравняем к нулю:

$$t = 0,16 \left(\frac{mV_{\text{кр}}}{600\pi X^3 V_{\text{заг}} \sqrt{2\rho_{\text{пр}}}} \right)^2 \left(\frac{P_{\text{пр}}}{A} \right)^{12} \quad (10)$$

Из (10) видно, что наибольшее влияние на t и, следовательно, производительность шлифования оказывают параметры $P_{\text{пр}}, A$, т. е. наибольшего эффекта в интенсификации шлифования можно добиться применением новых инструментов на основе высокопрочных алмазов и других СТМ в сочетании с высокопрочными связками, обеспечивающими устойчивость зерен до момента их объемного разрушения.

Предельное значение t , при котором $\eta = 0$ и относительный расход алмаза стремится к бесконечности, определится из зависимости (2)

$$t = \left(\frac{mV_{\text{кр}}}{600\pi X^3 V_{\text{заг}} \sqrt{2\rho_{\text{пр}}}} \right)^2 \left(\frac{P_{\text{пр}}}{A} \right)^{12} \quad (11)$$

Сравнение (10) и (11) показывает, что значения t отмечаются в 6,2 раза, т. е. предельное значение t больше от оптимального в 6,2 раза. При таком же увеличении t относительный расход алмаза возрастает в бесконечное число раз.

Подставляя (10) в выражение для η из зависимости (2), установим оптимальное значение $\eta_{\text{опт}}$, которое равно $\eta_{\text{опт}} = 0,2$. Следовательно, оптимальным с точки зрения износостойкости

следует считать такой режущий рельеф круга, который обеспечивает линейный износ зерна до его объемного разрушения на $\eta=0,2$. Минимум q определится подстановкой (10) в (9):

$$q_{\min} = \frac{3 \cdot 10^8 P_a \alpha \Delta_l \bar{X}^3 \sqrt{2\rho_{\text{пр}}}}{\rho_m m \sqrt{t}} \left(\frac{A}{P_{\text{пр}}} \right)^6 \quad (12)$$

Зависимость (12) вскрывает потенциальные возможности шлифования. Из режимных параметров в (12) входит только глубина шлифования t , увеличение которой при соответствующем уменьшении $V_{\text{заг}}$ или других параметров приводит к снижению q_{\min} . Более осязаемое влияние на q_{\min} оказывает прочность алмаза $P_{\text{пр}}$. Объемная концентрация алмаза m и зернистость круга \bar{X} изменяют q_{\min} в меньшей степени, так как с увеличением m и \bar{X} возрастают параметры α и $P_{\text{пр}}$.

В случае, если прочность удержания зерен в связке ниже их собственно прочности, превалирующим в износе круга будет выпадание зерен из связки без объемного разрушения и предельная нагрузка будет определяться прочностными свойствами связки.

Таким образом, теоретически показано, что основным фактором, определяющим износ алмазного круга, является линейный износ зерна до его объемного разрушения. Аналитически описан оптимальный рельеф круга и соответствующий ему износ, что может быть использовано при разработке новых технологических процессов шлифования и алмазных инструментов.

Список литературы: 1. Новиков Ф. В. Кинетика образования режущего рельефа алмазного круга в процессе шлифования. — В кн.: Контактные процессы при больших пластических деформациях. Х., 1982, с. 33—37. 2. Новиков Ф. В., Раб А. Ф., Сошников С. А. Некоторые предпосылки к разработке физической модели алмазного шлифования. — Резание и инструмент, 1984, вып. 31, с. 31—36. 3. Новиков Ф. В. Закономерности износа алмазного круга в процессе шлифования. — Прогрессивные технологические процессы, оборудование и инструмент, 1985, вып. 36, с. 31—35. 4. Новиков Ф. В. Расчет шероховатости шлифованной поверхности с учетом стабилизации режущего рельефа алмазного круга. — Резание и инструмент, 1986, вып. 35, с. 33—36. 5. Кащук В. А., Мелехин Д. А., Бармин Б. П. Справочник заточника. — М.: Машиностроение, 1982. — 232 с. 6. Захаренко И. П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента. — К.: Наук. думка, 1981. — 300 с.

Поступила в редколлегию 15.06.85.