

Ф. В. НОВИКОВ

РЕЖУЩИЙ РЕЛЬЕФ АЛМАЗНОГО КРУГА И ЕГО РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ШЛИФОВАНИЯ

Эффективность алмазного шлифования зависит от состояния рабочей поверхности круга. Развитый рельеф позволяет продолжительное время поддерживать высокую режущую способность круга без его частых правок, уменьшает склонность круга к засаливанию и появлению тепловых дефектов на обработанной поверхности. Однако добиться на практике высокой работоспособности алмазного круга в течение длительного времени удается не всегда, особенно при шлифовании кругами из СТМ на высокопрочных металлических связках, которые быстро теряют режущую способность и нуждаются в правке. Существенным резервом повышения работоспособности таких кругов является шлифование с одновременным непрерывным электроэрозионным или электрохимическим воздействием на рабочую поверхность круга. При правильном выборе режима работы источника тока алмазный круг может осуществлять высокопроизводительный съем металла до полного износа. Такой эффект достигается главным образом за счет своевременного удаления с рабочей поверхности круга продуктов диспергирования и поддержания в процессе шлифования примерного равенства скоростей линейного износа зерен и связки, которые обеспечивают стабильное выступание зерен над связкой на необходимую высоту. Способы задания оптимальной высоты выступания зерен при заточке инструмента по упругой схеме подробно изложены в работах [1, 2]. Применительно к круглому наружному шлифованию по жесткой схеме рекомендации по оптимизации и стабилизации режущего рельефа в достаточной степени не разработаны. Отсутствует четкая взаимосвязь основных технологических показателей шлифования с параметрами рельефа круга, которыми необходимо управлять в процессе шлифования. Оптимизация, как правило, выполняется методами многофакторного планирования эксперимента с одновременным учетом механических и электрических параметров. Установить оптимальный механический режим работы круга в широком диапазоне изменяемых параметров шлифования и затем для него подобрать электрический режим правки, обеспечивающий стабилизацию режущего рельефа круга, сложно.

Нами предложен метод аналитической оптимизации параметров рельефа круга, основанный на раздельном учете механического и электрического режимов шлифования.

При выполнении расчетов условно принимается равенство скоростей износа зерен и связки, что позволяет определить оптимальную скорость износа зерен и по ней электрический режим правки, обеспечивающий удаление связки со скоростью, равной расчетной скорости износа зерен.

Для решения задачи оптимизации воспользуемся результатами исследований [3]: для любого режима шлифования, характеристики круга и обрабатываемого материала существует свой установившийся (прочностной) режущий рельеф круга, соответствующий энергетическому равновесию системы круг–изделие. Образование устойчивого (равновесного) рельефа происходит после определенного времени приработки круга. В момент стабилизации рельефа сила резания, действующая на максимально выступающее зерно, в зависимости от вида износа круга принимает значение, равное силе, разрушающей зерно, или вываливающей его из связки. В случае равенства этих трех сил относительный расход алмазов q становится минимальным и задача оптимизации сводится к выбору параметров шлифования, обеспечивающих наилучшее сочетание технологических показателей в точках q_{min} .

Рассмотрим подробнее равновесное состояние системы “зерно–связка”. Для удобства анализ представим максимально выступающее зерно в виде закрепленного стержня, на который действует постоянная сила резания P , равная предельной (разрушающей) силе (рисунок). Условием равновесия такого стержня будет равенство моментов от силы P и реакции заделки $\bar{m} = f(y)$. Поскольку моменты $M = P \cdot l$ и \bar{m} являются переменными величинами, зависящими от l и y , может показаться, что существует бесконечное множество сочетаний l и y , при которых стержень сохраняет устойчивое равновесие. На самом деле, как показано в работе [3], параметры H и l для данного режима шлифования вполне однозначны и поэтому стержень имеет единственное устойчивое равновесное состояние. Для оценки влияния режима шлифования и других параметров на H , l и технологические показатели шлифования воспользуемся зависимостью для максимальной толщины среза H_{max} , приведенные в работе [3]. В этой зависимости неизвестно условное напряжение резания $[\sigma]$, которое предлагалось устанавливать из экспериментального графика $[\sigma] - z$, где z – глубина шлифования. Однако такое $[\sigma]$ характеризует больше суммарное резание всеми зернами и не отражает особенностей работы максимально выступающего зерна, по которому ведутся все расчеты. Поэтому представим в первом приближении $[\sigma]$ в виде $[\sigma] = A / H_{max}$, где A – параметр, учитывающий прочностные свойства обрабатываемого материала. Влияние на $[\sigma]$ радиуса округления режущего зерна не рассматривается.

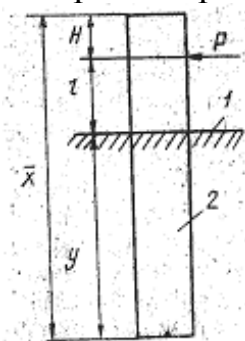


Рисунок. Расчетная схема устойчивости системы зерно–связка: 1 – уровень связки; 2 – зерно.

После подстановки $[\sigma]$ и $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$; $k = \frac{3m \cdot (1 - \varepsilon)}{200\pi \cdot \bar{X}^2}$ [4] в выражение

для H_{max} имеем

$$H_{max} = \left(1 + \sqrt{1 - \frac{m^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot P^3 \cdot H_{max}^3}{72 \cdot 10^4 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{изд}^2 \cdot z \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}} \right)^{-1} \times$$

$$\times \frac{600\pi \cdot A^2 \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{изд} \sqrt{2 \cdot z \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}}{m \cdot V_{кр} \cdot P^2}, \quad (1)$$

где m – объемная концентрация зерен, %; $V_{кр}$, $V_{изд}$ – скорости круга и изделия, м/мин; \bar{X} – зернистость круга, мм; R_1 , R_2 – радиусы изделия и круга, мм; $(1 - \varepsilon)$ – коэффициент, учитывающий прочность удержания зерна в связке; b – максимальная высота выступания зерна над связкой, мм; k – поверхностная концентрация зерен, шт/мм².

Слагаемое в скобках изменяется в пределах 1 – 2 и поэтому не оказывает существенного влияния на H_{max} . Следовательно, его в принципиальных решениях можно не рассматривать. Тогда условное напряжение резания $[\sigma]$ примет вид

$$[\sigma] = \frac{m \cdot V_{кр} \cdot P^2}{600\pi \cdot A \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{изд} \cdot \sqrt{2 \cdot z \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}}. \quad (2)$$

Параметр H , характеризующий максимальную глубину внедрения металла вглубь рабочей поверхности круга по отношению к неизношенному максимально выступающему зерну, исходя из [3], выразится так:

$$H = \frac{600\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{изд} \cdot \sqrt{2 \cdot z \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}}{m \cdot V_{кр} \cdot P} \cdot [\sigma] = \frac{P}{A}. \quad (3)$$

Как следует из (3), параметр H зависит только от прочности зерна и обрабатываемого материала. Режим шлифования, геометрические размеры круга и изделия, концентрация зерен в круге, марка связки на параметр H не оказывают влияния. Зернистость круга влияет на H , однако не через форму и геометрические размеры зерен, а через изменение собственно их прочности P .

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что в точках q_{min} параметр $l = \xi \cdot \Delta = \xi \cdot \frac{V_{изд} \cdot z}{V_{кр}} = \xi \cdot \frac{Q}{B_1 \cdot V_{кр}}$, а, следовательно, и производитель-

ность шлифования $Q = B_1 \cdot V_{изд} \cdot z$ остаются постоянными величинами независимо от сочетания режимных параметров (ξ - коэффициент, учитывающий степень заполнения межзеренного пространства стружкой, $\xi = const$; Δ - толщина слоя стружки, равномерно расположенной на рабочей поверхности круга, мм; B_1 - продольная подача, мм/об). Такой результат хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе [3]. Не оказывает влияния на Q в экстремальных точках q_{min} изменение концентрации зерен, т.к. H и l в этих точках остаются постоянными. Несмотря на неизменность Q , относительный расход алмазов в точках q_{min} неодинаков для различных режимов шлифования и концентрации круга

$$q = \frac{600 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot B \cdot \bar{X}^3 \cdot A^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} \cdot \eta}{B_1 \cdot \sqrt{z} \cdot P^2}, \quad (4)$$

где B - ширина круга, мм; η - коренное выражение в формуле (1).

Так, с увеличением z при $Q = const$ относительный расход алмазов уменьшается и наиболее предпочтительным вариантом шлифования является глубинное шлифования с небольшой скоростью изделия. С увеличением концентрации круга относительный расход алмазов q сохраняет приблизительно постоянное значение, хотя максимальная толщина среза H_{max} при этом и уменьшается. Постоянство q в зависимости от обусловлено тем, что наряду с уменьшением H_{max} пропорционально увеличивается количество алмазов в единице объема алмазоносного слоя круга. Таким образом, увеличение концентрации зерен не позволяет повысить работоспособность алмазного круга, как в кинематических моделях [5] и др.

Скорость круга $V_{кр}$ оказывает на показатели шлифования более сложное влияние, чем $V_{изд}$, z или m . При условии, что $H = const$ и $l = const$, увеличение $V_{кр}$ уменьшает толщину слоя стружки Δ и появляется возможность повышения Q за счет увеличения $V_{изд}$ или z . Более эффективным путем является увеличение z , так как при этом q уменьшается более интенсивно.

С повышением прочности связки увеличивается высота межзеренного пространства l и производительность Q . Рост производительности позволяет уменьшить H_{max} и, следовательно, q .

Механизм влияния прочности зерен P на технологические показатели шлифования в точках q_{min} заключается в том, что с увеличением P возрастает H и зерно до объемного разрушения претерпевает больший линейный износ. Высота межзеренного пространства l уменьшается и вызывает снижение Q по линейному закону. Максимальная толщина среза H_{max} также уменьшается интенсивнее, чем Q , и относительный расход алмазов снижается. Такая закономерность изменения q и Q в точках q_{min} наблюдается до определенного зна-

чения P , после которого глубина критической заделки зерна в связке станет недостаточной для его удержания и зерна начнут выпадать из связки без объемного разрушения. Таким образом, при увеличении P необходимо подбирать более прочную связку, только в этом случае потенциальные возможности алмазных зерен могут быть использованы в максимальной степени. Например, трудно добиться минимума q для алмазных кругов на органической и керамической связках, где глубина критической заделки зерна в связке значительна и условие энергетического равновесия зерно–связка может быть невыполнимо. Аналогичное влияние на q_{min} оказывает обработка пластичных материалов (сталей, титановых сплавов и др.), когда образуется длинная сливная стружка, требующая для размещения большого объема межзеренного пространства.

Оценивая устойчивость зерна в связке с учетом полученных решений для H_{max} и H , можно определить оптимальные соотношения прочности зерен и связки, обеспечивающие наилучшие сочетания технологических показателей шлифования.

С увеличением зернистости круга критическая глубина заделки зерна в связке изменяется незначительно, а прочность зерен и высота межзеренного пространства l и производительность возрастают.

Максимальная толщина среза H_{max} с учетом всех изменений P , z , \bar{X} остается практически постоянной, а относительный расход алмазов уменьшается.

С увеличением прочности обрабатываемого материала A уменьшается H и возрастает l , а следовательно, и Q . Максимальная толщина среза H_{max} повышается более, чем по закону квадратной параболы, и вызывает рост q .

Для численных расчетов производительности, максимальной толщины среза, относительного расхода алмазов в зависимости от параметров шлифования получим выражение для l с учетом прочности удержания зерна в связке. Предположим, что момент \bar{m} изменяется по закону $\bar{m} = a \cdot y$, где a – постоянная, зависящая от прочности связки. Тогда, из условия равновесия моментов $M = P \cdot l$ и \bar{m} имеем

$$P \cdot l = a \cdot y. \quad (5)$$

Текущую координату y выразим следующим образом:

$$y = \bar{X} - H - l. \quad (6)$$

После подстановки (6) в (5) получим зависимость для

$$l = a \cdot \frac{(\bar{X} - H)}{(P + a)}. \quad (7)$$

С учетом (3) параметр l примет окончательный вид

$$l = a \cdot \frac{\left(\bar{X} - \frac{P}{A}\right)}{(P + a)}. \quad (8)$$

Воспользуемся выражением $z = \frac{l \cdot V_{кр}}{\xi \cdot V_{изд}}$ и подставим его в (1):

$$H_{max} = \frac{600 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot A^2 \cdot \sqrt{V_{изд} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}}{m \cdot \sqrt{V_{кр}} \cdot P^2} \cdot \sqrt{\frac{a}{\xi} \cdot \left(\frac{\bar{X} - \frac{P}{A}}{P + a} \right)}. \quad (9)$$

Зависимость (9) содержит 3 неизвестных параметра A , a и ξ (считаем, что P – известная величина, равная прочности зерна на раздавливание). Параметр a может быть определен экспериментально на основе исследований прочности удержания в связке единичного зерна. Для оценки A и ξ необходи-

мо в зависимость (4) и $z = \frac{l \cdot V_{кр}}{\xi \cdot V_{изд}}$ подставить экспериментальные значения q и z , соответствующие точке q_{min} .

Таким образом, определяются базовые значения A , a и ξ . Если возникает задача рассчитать Q , q , R_{max} , оптимальный режим шлифования для других значений A и a , то необходимо базовые значения A и a увеличить или уменьшить в соответствующее число раз. Следует отметить, что предложенный метод оптимизации процесса шлифования является приближенным, так как \bar{m} аппроксимируется линейной функцией, не зависящей от размера зерен. Кроме того, трудно прогнозировать ξ для различных обрабатываемых материалов.

Зная A , a и ξ , можно определить все параметры установившегося рельефа круга и другие физические параметры шлифования, например, линейный износ зерна до разрушения, число касаний зерна с металлом до его разрушения, закон разновысотности вершин зерен, распределение площадок износа, число работающих зерен, скорость износа зерен и ряд других. Используя такую методику расчета, можно решать и обратные задачи по определению силы P , разрушающей зерно непосредственно в процессе шлифования, прочности связки a , обрабатываемого материала A , характер стружкообразования ξ , которые обычно на практике устанавливаются в статических условиях для единичных зерен.

Список литературы: 1. Грабченко А.И., Русанов В.В., Федорович В.А., Наконечный Н.Ф. Особенности износа и формирования режущего рельефа кругов при шлифовании сверхтвердых поликристаллов совместно со сталью. – Резание и инструмент, 1980, вып. 23, с. 100-104. 2. Грабченко А.И., Федорович В.А., Наконечный Н.Ф. Алмазное шлифование с непрерывным управлением режущим рельефом круга. – Алмазы и сверхтвердые материалы, 1981, вып. 5, с. 20-25. 3. Новиков Ф.В., Раб А.Ф., Сошников С.А. Некоторые предпосылки разработки физической модели алмазного шлифования. – Резание и инструмент, 1984, вып. 31, с. 31-36. 4. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справ. / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с. 5. Раб А.Ф., Новиков Ф.В. Аналитическое описание механизма износа алмазного круга. – Резание и инструмент, 1983, вып. 29, с. 15-23.