

максимума производительности обработки плотность тока фактически одинакова и равна $1,3 \cdot 1,5 \text{ A/mm}^2$.

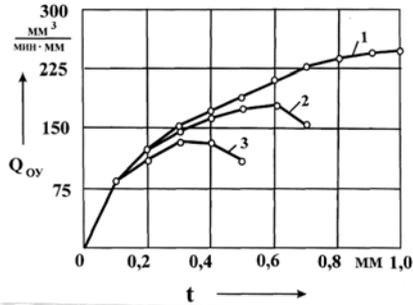


Рис. 1. Зависимость производительности обработки от глубины шлифования: 1 – $I_{cp} = 75 \text{ A}$; 2 – $I_{cp} = 48 \text{ A}$; 3 – $I_{cp} = 34 \text{ A}$; обрабатываемый материал – покрытие ПГ-10Н-01; алмазный круг – АС6 250/200 М2-01 4; максимальная толщина среза отдельным зерном $a_{z, \text{max}} = 15 \text{ мкм}$; $V_{кр} = 28 \text{ м/с}$.

Список литературы: 1. Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. – К.: Наук. думка, 1994. – 180 с. 2. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями: Дис...канд. техн. наук: 05.02.08. – Харьков, 1989. – 210 с. 3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 4. Машко А.А. Определение условий повышения точности механической обработки // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – "Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні". – 2008. – Вип. 68. – С. 106-111.

Поступила в редколлегию 11.12.08

УДК 621.923

А.Н. КОВАЛЬЧУК, Р.А. БЕРЕЖНОЙ, В.В. НЕЖЕБОВСКИЙ

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

В работе приведен расчет и анализ шероховатости поверхности при алмазном шлифовании.

Алмазное шлифование является важным фактором повышения качества обработки деталей [1, 2]. Вместе с тем, технологические возможности алмазного шлифования в плане улучшения шероховатости поверхности полностью не изучены. Поэтому целью работы является теоретический анализ условий улучшения шероховатости поверхности при алмазном шлифовании. Для ре-

шения поставленной задачи рассмотрим закономерности разрушения алмазных зерен круга от действия механических нагрузок, возникающих в процессе шлифования твердосплавной пластинки, которая прижимается к рабочей поверхности алмазного круга с радиальным усилием P_y . В первом приближении примем равномерный закон выступания вершин неизношенных зерен над уровнем связки алмазного круга. Предположим, что под действием радиальной силы P_{y_i} , действующей на отдельное зерно в процессе шлифования, оно “утопает” в связку круга на величину y , т.е. между силой P_{y_i} и радиальным перемещением (“утопанием”) зерна в связку y существует связь: $P_{y_i} = c \cdot y$, где c – жесткость связки, Н·м. Учитывая то, что вследствие “утопания” зерен в связку, в контакте с обрабатываемой алмазной пластинкой будет находиться n зерен из всего числа N зерен, расположенных на рабочей поверхности круга площадью S , справедливо равенство:

$$P_y = \sum_{i=1}^n P_{y_i} = c \cdot y + c \cdot (y - \Delta) + \dots + c \cdot (y - n \cdot \Delta) = c \cdot \left(n \cdot y - \Delta \cdot \sum_{i=1}^n i \right). \quad (1)$$

Здесь $\Delta = b / N$ – среднее расстояние (по высоте) между вершинами зерен, расположенных в пределах контакта круга с обрабатываемой пластинкой, м; b – максимальная высота выступания вершин зерен над уровнем связки круга, м; $N = k \cdot S$; k – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности круга, шт/м². Тогда $\Delta = b / k \cdot S$. Количество контактирующих с обрабатываемой пластинкой зерен n можно определить:

$$n = N \cdot \frac{y}{b} = k \cdot S \cdot \frac{y}{b}, \quad \text{откуда} \quad y = \frac{n \cdot b}{k \cdot S}. \quad (2)$$

В зависимости (1) сумма $\sum_{i=1}^n i$ равна сумме n членов арифметической прогрессии: $\sum_{i=1}^n i = \frac{(1+n) \cdot n}{2}$. Тогда

$$P_y = n \cdot (n-1) \cdot \frac{c \cdot b}{2 \cdot k \cdot S}. \quad (3)$$

Данная зависимость содержит неизвестную величину n . Для ее определения разрешим зависимость (3) относительно n . В результате приходим к квадратному уравнению:

$$n^2 - n - \frac{2 \cdot k \cdot S \cdot P_y}{c \cdot b} = 0. \quad (4)$$

Его решение:

$$n = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot k \cdot S \cdot P_y}{c \cdot b}} \right). \quad (5)$$

Если жесткость связки $c \rightarrow \infty$, то $n=1$, т.е. в контакте с обрабатываемой пластинкой находится лишь одно наиболее выступающее из связки круга алмазное зерно. Этот случай возможен при шлифовании алмазными кругами на прочных металлических связках, практически исключаящих “утопание” зерен в связку ($y \rightarrow 0$).

Из зависимости (5) следует, что с уменьшением жесткости связки c количество зерен n , находящихся в контакте с пластинкой, увеличится, $n > 1$. Поэтому зависимость (5) можно упростить:

$$n = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot S \cdot P_y}{c \cdot b}}. \quad (6)$$

Уменьшение жесткости c предполагает применение более мягких связок алмазного круга – органических и керамических. При определенном значении c количество зерен n увеличится до максимального значения N . В этом случае обрабатываемая пластинка будет контактировать со связкой круга, вызывая ее разрушение и выпадение зерен из связки, обеспечивая таким образом режим самозатачивающегося алмазного круга. Исходя из зависимости (6), выполнить условие $n \rightarrow N$ можно также за счет увеличения усилия P_y .

Оценим радиальную нагрузку, действующую на максимально выступающее из связки зерно, $P_{y1} = c \cdot y$ с учетом (2) и (5):

$$P_{y1} = \frac{c \cdot b}{2 \cdot k \cdot S} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot k \cdot S \cdot P_y}{c \cdot b}} \right) \approx \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot b \cdot P_n}{k}}, \quad (7)$$

где $P_n = P_y / S$ – нормальное давление в зоне обработки, Н/м².

Как видно, с увеличением параметров c , b , P_n и уменьшением k нагрузка P_{y1} увеличивается. Это означает, что наибольшая нагрузка P_{y1} достигается при шлифовании алмазным кругом на металлической связке (вследствие увеличения жесткости c). Следовательно, в этом случае произойдет наибольшее разрушение зерна с образованием наибольшей площадки на его вершине.

При шлифовании алмазными кругами на менее прочных и твердых органических и керамических связках нагрузки P_{y1} будут меньше, что приведет к образованию меньших площадок на вершинах зерен. Поэтому для увеличения нагрузки P_{y1} , согласно зависимости (7), необходимо увеличивать нормальное давление в зоне обработки P_n .

Оценим, как это повлияет на интенсивность съема материала. Нагрузку P_{y_1} , действующую на максимально выступающее из связки зерно круга, можно выразить зависимостью: $P_{y_1} = HV \cdot \pi \cdot tg^2 \gamma \cdot H^2$, где HV – твердость (по Виккерсу) обрабатываемого материала, Н/м²; 2γ – условный угол при вершине конусообразного зерна; H – глубина внедрения режущего зерна в обрабатываемый материал, м. Откуда

$$H = \sqrt{\frac{P_{y_1}}{\pi \cdot tg^2 \gamma \cdot HV}} \quad (9)$$

Параметр H тем больше, чем больше нагрузка P_{y_1} и меньше HV . Для заданного значения HV увеличить параметр H и соответственно производительность обработки можно увеличением нагрузки P_{y_1} . А это достигается, согласно зависимости (7), увеличением жесткости связки (т.е. применением алмазных кругов на металлических связках) и нормального давления P_n . Чем меньше c , тем больше должно быть нормальное давление P_n . Поэтому при шлифовании пластинки алмазным кругом на металлической связке нормальное давление P_n должно быть меньше, чем при шлифовании алмазным кругом на менее прочной органической или керамической связках. Это хорошо согласуется с практическими данными. Так, в работе [3] показано, что для нормального протекания процесса шлифования синтетического сверхтвердого материала алмазным кругом на органической связке P_n должно быть приблизительно в 10 раз больше, чем при шлифовании алмазным кругом на металлической связке. В противном случае съем обрабатываемого материала (алмаза) не произойдет.

Исходя из зависимости (7), важным условием увеличения нагрузки P_{y_1} и соответственно производительности обработки является увеличение b и уменьшение k . Выразим параметры b и k через стандартные параметры – объемную концентрацию зерен круга m и зернистость круга \bar{X} , используя известные зависимости [4]:

$$k = \frac{3m \cdot (1 - \varepsilon)}{200\pi \cdot \bar{X}^2}, \quad b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X} \quad (10)$$

где $(1 - \varepsilon)$ – безразмерный коэффициент, учитывающий степень выступления режущего зерна над уровнем связки круга.

Тогда соотношение b/k выразится:

$$\frac{b}{k} = \frac{200\pi \cdot \bar{X}^3}{3m} \quad (11)$$

Как видно, увеличение соотношения b/k предполагает увеличение зернистости круга \bar{X} и уменьшение объемной концентрации зерен круга m . Причем, зернистость круга \bar{X} оказывает на соотношение b/k более существенное влияние.

Параметр H , определяемый зависимостью (9), приблизительно равен максимальной высоте микронеровностей обработанной поверхности. Поэтому, чем больше нагрузка P_{y_1} , тем больше шероховатость обработки. Как показано выше, при шлифовании алмазным кругом на металлической связке нагрузка P_{y_1} больше, чем при шлифовании алмазным кругом на органической связке. Следовательно, будет больше и шероховатость обработки, что также хорошо согласуется с практическими данными. Эффект уменьшения шероховатости обработки обусловлен возможностью “утопания” режущих зерен в органическую связку круга и увеличением количества одновременно работающих зерен.

Рассмотрим условия контакта неподвижного алмазного круга с пластинкой из синтетического сверхтвёрдого материала (СТМ). Предположим, что выступание вершин зерен над условным уровнем связки алмазного круга подчиняется равномерному закону распределения с плотностью $f(y_i) = 1/b$, где b – максимальная высота выступания зерен над условным уровнем связки, рис. 1. Физически это означает, что в каждом интервале длиной Δy_i по координате y_i находится одинаковое число зерен. Зная количество зерен n_0 , расположенных на рабочей поверхности круга площадью, равной площади рассматриваемой пластинки, и их максимальную высоту выступания b , можно определить среднее расстояние между вершинами зерен по координате y_i (разновысотность) как отношение b/n_0 .

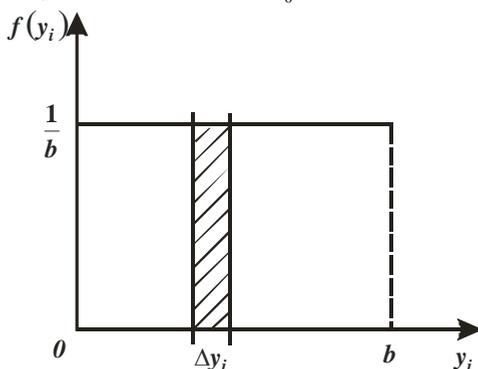


Рис. 1. График функции $f(y_i)$.

Предположим, что алмазная пластинка прижимается к неподвижному алмазному кругу радиальным усилием P_y . Учитывая то, что внедрение зерен

круга в алмазную пластинку практически невозможно, то данную силу (в связи с разновысотным выступанием вершин зерен над связкой) будет воспринимать лишь одно максимально выступающее зерно. Очевидно, под действием силы, превышающей предельное значение, это зерно поверхностно разрушится. Длина разрушенной части зерна может быть или меньше, или равной, или больше величины разновысотности b/n_0 . Рассмотрим третий случай, как наиболее вероятный. Тогда в контакт с алмазной пластинкой вступит новое нижерасположенное зерно, которое также поверхностно разрушится и приведет к нагружению и последующему поверхностному разрушению определенного количества зерен n_1 из всех рассматриваемых n_0 зерен, ограниченных площадью пластинки. В итоге сила P_y будет уравниваться системой сил, действующих на пластинку со стороны поверхностно разрушенных зерен. Необходимо отметить, что величина разрушенной части зерна определяется пределом прочности его на сжатие $\sigma_{сж}$. Разрушение зерна происходит не мгновенно, а в течении непродолжительного, но физически ощутимого промежутка времени.

Произведем расчет длины разрушенной части H наиболее выступающего из связки круга алмазного зерна при условии прижатия алмазной пластинки к неподвижному алмазному кругу с силой P_y . Будем считать, что зерна имеют форму конуса с углом при вершине 2γ , а высоты их выступания над уровнем связки круга подчинены равномерному закону, как это показано на рис. 1.

Предположим, что поверхностное разрушение зерна в сечении, удаленном на расстояние H от его вершины, происходит от предельных напряжений сжатия, вызванных действием радиальной силы P_{y1} , приложенной к вершине зерна. Тогда силу P_y , действующую на алмазную пластинку, можно представить в виде

$$P_y = \sigma_{сж} \cdot F_{факт} , \quad (12)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие алмаза (алмазного зерна), Н/м²; $F_{факт}$ – фактическая площадь контакта поверхностно разрушенных зерен с алмазной пластинкой, м²;

$$F_{факт} = \sum_{i=1}^{n_1} F_i = \sum_{i=1}^{n_1} \pi \cdot r_i^2 = \sum_{i=1}^{n_1} \pi \cdot tg^2 \gamma \cdot H_i^2 = \int_0^H \pi \cdot tg^2 \gamma \cdot H_i^2 \cdot dn_1 , \quad (13)$$

F_i , r_i – соответственно площадь и радиус контакта алмазной пластинки с поверхностно разрушенным зерном; H_i – длина разрушенной части отдельного зерна, м.

Параметр H_i подчиняется равномерному закону распределения с плот-

ностью $f(H_i) = \frac{1}{H}$, рис. 2. С учетом $dn_1 = n_1 \cdot f(H_i) \cdot dH_i = n_1 \cdot \frac{1}{H} \cdot dH_i$, имеем

$$F_{\text{факт}} = \frac{\pi \cdot tg^2 \gamma \cdot n_1 \cdot H^2}{3}. \quad (14)$$

Представим $n_1 = \alpha \cdot n_0$; $n_0 = k \cdot F_{nl} \cdot \frac{H}{b}$, где $\alpha < 1$; k – поверхностная концентрация зерен круга, шт/м²; F_{nl} – площадь алмазной пластинки, м². Выразим параметры k и b известными соотношениями (10). Тогда

$$n_1 = \frac{3m \cdot \alpha \cdot F_{nl} \cdot H}{200\pi \cdot \bar{X}^3}, \quad (15)$$

$$F_{\text{факт}} = \frac{tg^2 \gamma \cdot m \cdot \alpha \cdot F_{nl} \cdot H^3}{200 \cdot \bar{X}^3}. \quad (16)$$

Подставляя зависимость (16) в (12), имеем

$$H = \bar{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{200 \cdot P_n}{tg^2 \gamma \cdot m \cdot \alpha \cdot \sigma_{сж}}}, \quad (17)$$

где $P_n = P_y / F_{nl}$ – нормальное давление, Н/м².

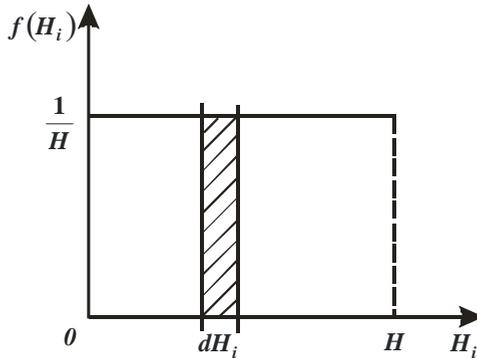


Рис. 2. График функции $f(H_i)$.

Параметр H тем больше, чем больше зернистость круга \bar{X} , нормальное давление P_n и меньше величины γ , m , α , $\sigma_{сж}$. Если рассматривать зависимость (17) применительно к процессу шлифования по упругой схеме ($P_n = const$) алмазной пластинки, то увеличить параметр H , а следовательно повысить ресурс работы зерна при резании можно прежде всего уменьшением объемной концентрации зерен m , т.к. увеличение нормального давления P_n ограничено собственно прочностью алмазной пластинки.

Произведем расчет параметра H для исходных данных шлифования: $P_n=3$ МПа=0,3 кГс/мм²; $m=100$; $\bar{X}=0,1$ мм; $\gamma=45^\circ$; $P_p=0,4$ кГс (алмазное зерно АС6 100/80). Тогда, согласно аналитической зависимости $\sigma_{сж} = \frac{4 \cdot P_p}{\pi \cdot \bar{X}^2}$, определяющей условие разрушения (раскалывания) зерна на две одинаковые части, имеем $\sigma_{сж}=50$ кГс/мм². Для приведенных исходных данных зависимость (17) принимает вид: $H = 23 \cdot \sqrt[3]{1/\alpha}$, мкм.

Таблица 1 – Расчетные значения параметра H

α	1,0	0,5	0,3	0,1
H , мкм	23	29	34	50

Как видно из табл. 1, при $\alpha=0,3$ параметр H принимает значение 34 мкм, что приблизительно равно величине изношенной части наиболее выступающего над уровнем связки круга алмазного зерна при шлифовании пластинки из поликристаллического синтетического сверхтвёрдого материала. Этим количественно подтверждена возможность поверхностного разрушения алмазных зерен от действия предельных напряжений сжатия, вызванных радиально приложенной к зернам силой P_y . При взаимодействии зерен круга с пластинкой из мягкого материала (с той же силой P_y), в связи с их возможностью внедряться в материал пластинки, в контакте будет находиться большее количество зерен. Это приведет к снижению нагрузок, действующих на отдельные зерна, и замедлению их поверхностного разрушения во времени.

Список литературы: 1. Новиков Ф.В., Дитиненко С.А., Ковальчук А.Н. Финишная обработка твердосплавных изделий алмазными кругами на металлических связках // Труды 11-й Межд. науч.-техн. конф. “Физические и компьютерные технологии”, 2-3 июня 2005 г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2005. – С. 8-10. 2. Новиков Г.В., Ковальчук А.Н., Яценко С.М. Исследование структуры параметров рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005, №12. – С. 110-118. 3. Грабченко А.И., Пыжов И.Н. Особенности контактного взаимодействия алмазных кругов с СТМ при шлифовании // Контактные процессы при больших пластических деформациях. – Темат. сборник науч. трудов. – Харьков, 1982. – С. 33-37. 4. Абразивно-алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.4. “Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.

Поступила в редколлегию 11.12.08