

РАСЧЕТ РАЦИОНАЛЬНЫХ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ ОГРАНОЧНЫХ ДИСКОВ ПРИ ИХ УКАТКЕ С УЛЬТРАЗВУКОМ

Докт. техн. наук, проф. КИСЕЛЕВ М. Г., асп. СТЕПАНЕНКО Д. А.

Белорусский национальный технический университет

В данной статье рассматривается технологический процесс формирования алмазонасного слоя на рабочих поверхностях ограночных дисков, применяемых при шлифовании и полировании монокристаллов алмаза, путем их шаржирования (укатки). Укатка традиционно производится с помощью деформирующего инструмента с конической рабочей частью из поликристаллического алмаза (балласа). По данным [1, 2], эксплуатационные показатели ограночных дисков могут быть существенно повышены за счет сообщения деформирующему инструменту ультразвуковых колебаний (УЗК). Так как при ультразвуковом воздействии контакт деформирующего инструмента с обрабатываемой поверхностью имеет дискретный характер, для равномерности шаржирования поверхности необходимо, чтобы происходило частичное перекрытие смежных областей контакта. Для обеспечения перекрытия контактных областей линейная скорость точек контактной области должна быть связана определенным образом с частотой ультразвукового воздействия. В [2] установлены ограничения на технологические параметры процесса ультразвуковой укатки, связанные с необходимостью обеспечения перекрытия пятен контакта. Однако численные значения параметров процесса не рассчитаны, что связано со сложностью определения геометрических параметров пятна контакта. В данной работе определены предельные размеры контактной области с учетом наличия слоя алмазных частиц между поверхностью ограночного диска и деформирующим инструментом. Это позволило определить связь коэффициента перекрытия контактных областей с частотой вращения ограночного диска для различных значений частоты УЗК.

При расчете размеров контактной области считаем, что между инструментом и диском находится слой алмазных частиц сферической формы радиусом r . Предельное значение ши-

рины контактной области определяется координатами центров частиц, которые могут касаться поверхности инструмента и максимально удалены от его вертикальной плоскости симметрии. Касание этих частиц с поверхностью инструмента будет иметь место в случае нулевого зазора между нижней образующей инструмента и поверхностью диска. Для определения координат центров частиц сделаем допущение, что точка контакта алмазной частицы с поверхностью инструмента лежит в плоскости, проходящей через центр частицы и перпендикулярной нижней образующей поверхности инструмента. В этом случае определение координаты центра частицы сводится к решению плоской задачи о касании сечения инструмента, перпендикулярного его нижней образующей, и меридионального сечения частицы. Из аналитической геометрии известно, что сечение конической поверхности плоскостью, пересекающей обе ее полости, представляет собой гиперболу. Если обозначить через z расстояние от вершины инструмента до произвольно взятой точки его нижней образующей, то параметры сечения, проведенного через эту точку перпендикулярно образующей, будут определяться выражениями:

$$a = \frac{z \operatorname{ctg} \theta}{1 - \operatorname{ctg}^2 \theta}; \quad b = \frac{z}{\sqrt{1 - \operatorname{ctg}^2 \theta}}.$$

Здесь θ – половина угла при вершине осевого сечения инструмента. Параметр a имеет смысл расстояния от центра гиперболы до ее вершины. Уравнение гиперболы в каноническом расположении (начало координат совмещено с центром гиперболы, ось x совмещена с осью симметрии ветви) имеет вид

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (1)$$

При решении рассматриваемой задачи удобно совместить начало координат с вершиной гиперболы. Тогда уравнение (1) примет вид

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{2x}{a} - \frac{y^2}{b^2} = 0. \quad (2)$$

Центры окружностей радиуса r , касающихся гиперболы, лежат на кривой, представляющей собой геометрическое место концов нормалей к гиперболе, имеющих длину r . Точка этой кривой, соответствующая центру частицы, касающейся поверхностей инструмента и диска, должна иметь абсциссу x_1 , равную r . Для отыскания ординаты y_1 этой точки запишем уравнение нормали к гиперболе в точке $(x_0; y_0)$. Угловой коэффициент касательной к гиперболе, проходящей через эту точку, определяется выражением

$$k(x_0; y_0) = -\frac{F'_x(x_0; y_0)}{F'_y(x_0; y_0)} = \frac{(x_0 + a)b^2}{y_0 a^2}.$$

Здесь $F(x; y)$ – неявно заданная функция, стоящая в левой части уравнения (2).

Учитывая, что величины x_0 и y_0 связаны уравнением (2), можно считать, что угловой коэффициент является функцией только x_0 , т. е. $k = k(x_0)$.

Угловой коэффициент нормали

$$k_1(x_0) = -1/k(x_0).$$

Уравнение нормали

$$y - y_0 = k_1(x_0)(x - x_0). \quad (3)$$

Условие нормировки длины нормали

$$(y_1 - y_0)^2 + (x_1 - x_0)^2 = r^2.$$

С учетом уравнения (3) условие нормировки длины примет вид

$$(k_1^2(x_0) + 1)(x_1 - x_0)^2 = r^2. \quad (4)$$

Из уравнения (4) находим координаты центров двух окружностей, касающихся гиперболы в точке $(x_0; y_0)$:

$$x_1 = x_0 \pm \frac{r}{\sqrt{k_1^2(x_0) + 1}}. \quad (5)$$

Внешней нормали, которую необходимо рассматривать в исследуемой задаче, соответствует знак «+».

С учетом уравнения (5) условие касания частицы с поверхностью диска принимает вид

$$x_0 - \frac{r}{\sqrt{k_1^2(x_0) + 1}} = r. \quad (6)$$

Решив нелинейное уравнение (6) относительно неизвестной x_0 , можно найти ординату y_0 точки гиперболы, а затем, положив в уравнении (3) $x = r$, определить ординату центра частицы.

Помимо описанного способа рассматриваемая задача о касании сечения инструмента с меридиональным сечением частицы может быть решена приближенным способом. Аппроксимируем форму сечения инструмента в окрестности вершины дугой окружности радиусом R , равным радиусу кривизны сечения в вершине. Величина R определяется по выражению

$$R = b^2/a = z \operatorname{tg} \theta.$$

С учетом принятого допущения значение y_1 может быть найдено из элементарных геометрических соображений

$$y_1 = 2\sqrt{Rr}.$$

Результаты приближенного и аналитического расчетов формы границы области контакта приведены на рис. 1. Расчет выполнен для инструмента с радиусом основания 2 мм и углом при вершине $\theta = 75^\circ$. Радиус алмазных частиц принят равным $r = 10$ мкм.

Кривая, изображенная сплошной линией, соответствует аналитическому расчету формы границы, а кривая, изображенная штриховой линией, – приближенному расчету. Следует отметить два существенных различия кривых, полученных путем расчета разными способами. Во-первых, при $z \rightarrow 0$ точное значение ширины области контакта стремится к ненулевому значению, в то время как приближенный расчет дает нулевое значение. При этом погрешность вычислений сильно возрастает. Это объясняется тем, что при $z = 0$ сечение инструмента имеет треугольную форму, что соответствует нену-

левому значению ширины контактной области. Для того чтобы приближенный расчет давал приемлемые по точности результаты, необходимо, чтобы ширина области, в которой форма сечения инструмента может быть аппроксимирована дугой окружности, превышала значение ширины контактной области. Это значит, что для обеспечения точности расчета в вершине необходимо, чтобы ширина области аппроксимированности принимала в вершине ненулевое значение. Однако по мере приближения к вершине ширина указанной области стремится к нулю. Во-вторых, при значениях z , близких к длине образующей на аналитически рассчитанной кривой, наблюдается резкое уменьшение ширины контактной области. Это объясняется тем, что инструмент начинает касаться частиц своей цилиндрической поверхностью, сечение которой имеет форму эллипса. Методика расчета ширины зоны контакта для данного случая не описывается, так как она полностью аналогична приведенной выше, за исключением того, что рассматриваются нормали к эллипсу.

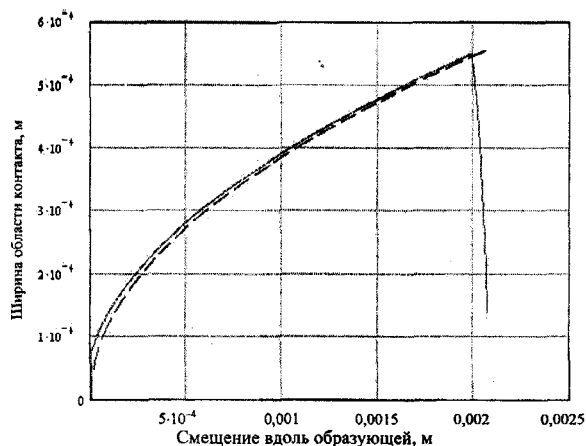


Рис. 1

Под коэффициентом перекрытия K контактных областей будем понимать отношение предельной ширины области перекрытия к предельной ширине контактной области, т. е.

$$K = \frac{2y_{\max} - \Delta s}{2y_{\max}},$$

где $\Delta s = \frac{\pi n R_d}{30f}$ — величина окружного смещения за период ультразвукового воздействия; n —

частота вращения диска, об/мин; f — частота УЗК; R_d — радиус диска, $R_d = 150$ мм.

При этом считаем, что величина окружного смещения примерно постоянна для различных точек контактной области. Такое допущение вполне приемлемо, так как длина образующей инструмента значительно меньше радиуса диска. Поскольку для оценки равномерности шаржирования важным является минимальное значение коэффициента перекрытия, ограничимся рассмотрением случая, когда инструмент расположен на дорожке с внешним радиусом R_d . На рис. 2 приведены графики, из которых можно по заданному коэффициенту перекрытия определить частоту вращения диска при различных значениях угла при вершине инструмента. Расчет графиков выполнен для частоты УЗК, равной 22 кГц.

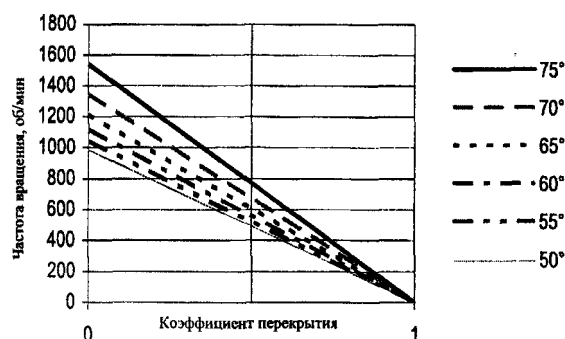


Рис. 2

Из анализа приведенных графиков следует, что при ультразвуковой укатке для обеспечения равномерности шаржирования следует снизить частоту вращения ограниченного диска, которая традиционно составляет 4000 об/мин. Подобное снижение частоты вполне оправдано, так как при традиционной механической укатке высокая частота вращения необходима, по-видимому, преимущественно для обеспечения интенсивного тепловыделения в результате износа балласа. Тепловыделение, в свою очередь, инициирует процесс поликонденсации фенолоформальдегидной резольной смолы (клеи БФ-2), используемой для предварительного закрепления алмазных частиц. В результате поликонденсации образуется резит — высокомолекулярный полимер, который отличается от резола нерастворимостью и неплавкостью и имеет высокую твердость и прочность [3]. Резит в соче-

тании с алмазными частицами, частично внедренными в материал ограничного диска, образует на его поверхности композиционное покрытие. При ультразвуковой укатке образование подобного композиционного покрытия будет происходить в результате дополнительного термического воздействия УЗК, обусловленного диссипацией акустической энергии и увеличением работы сил трения, что позволяет снизить частоту вращения ограничного диска.

Рациональным является обеспечение коэффициента перекрытия не менее 0,5, так как в этом случае наиболее удаленные от оси симметрии точки контактной области, в которых частицы либо не внедряются вообще, либо внедряются на глубину, не обеспечивающую их надежного закрепления, оказываются при последующем акте воздействия на более близком расстоянии к оси, что обеспечивает их более глубокое внедрение. На рис. 3 приведен график зависимости частоты вращения диска от угла при вершине инструмента для коэффициента перекрытия 0,5 и частоты УЗК 22 кГц.

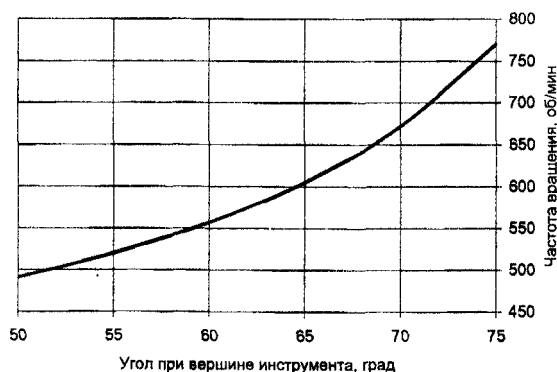


Рис. 3

Из анализа графика следует, что при традиционно используемом угле при вершине инструмента в 75° частота вращения ограничного диска, необходимая для обеспечения коэффициента перекрытия не менее 0,5, должна составлять порядка 750 об/мин.

ВЫВОД

На основании выполненных расчетов коэффициента перекрытия контактных областей при ультразвуковой укатке можно сделать вывод о необходимости снижения частоты вращения ограничного диска примерно до 750 об/мин при частоте УЗК 22 кГц, что обеспечит равномерность шаржирования его рабочей поверхности. При этом требуемые температурные режимы процесса укатки будут обеспечиваться за счет термического воздействия УЗК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эффективность применения ультразвука для шаржирования ограничных дисков методом укатки / М. Г. Киселев, В. Т. Минченя, Е. В. Зыль, О. М. Шуляковский // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. / Под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя. — Мн., 2001. — С. 626–629.
2. Исследование возможности применения ультразвуковых колебаний при укатке ограничных дисков: Отчет о НИР (заключит.). Науч. рук. В. А. Цымбалист. № ГР 81078073. — Барнаул, 1983.
3. Смолы фенолоформальдегидные // Краткая химическая энциклопедия: В 5 т. — М., 1965. — Т. 4. — 1182 стб.