

УДК 621.922.079.001.24

РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ ФЕРРОМАГНИТНОГО ПОКРЫТИЯ ОРИЕНТИРОВАННЫХ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН

Д. Ф. УСТИНОВИЧ^{1*}, В. Р. СОБОЛЬ²¹ ГНУ Физико-технический институт НАНБ, ул. Купревича 10, 220141 г. Минск, Беларусь.² ГНУ Институт физики твердого тела и полупроводников НАНБ, ул. П. Бровки 17, 220072 г. Минск, Беларусь.

Предложена методика расчета толщины ферромагнитного покрытия, обеспечивающего гарантированный разворот и ориентацию алмазного зерна в постоянном магнитном поле. Установлены зависимости между толщиной покрытия и параметрами постоянного магнитного поля.

Введение

Металлические покрытия порошков сверхтвердых материалов (СТМ) широко используются для повышения работоспособности инструмента на их основе, используемого для шлифования и доводки изделий из стекла, керамики и металлорежущего инструмента. Ориентирование и упорядочение расположения алмазных зерен является одним из путей повышения эффективности шлифования абразивным инструментом. Для формирования направленной ориентации зерен обычно применяют электростатический и магнитный способы. Под действием внешнего магнитного поля зерна сверхтвердого материала с ферромагнитным покрытием способны изменять свое хаотическое расположение на упорядоченное, определенным образом ориентируя режущие кромки в рабочем слое инструмента. Ориентация зерен позволяет обеспечить повышение стойкости и режущей способности инструмента, снижение температуры в зоне резания и расхода сверхтвердого материала. Эффективность ориентации определяется физико-механическими свойствами ферромагнитного материала покрытия и немагнитного связующего инструмента, формой зерен и толщиной покрытия [1–4].

Цель работы – разработка метода расчета толщины ферромагнитного покрытия алмазных зерен инструмента для шлифования, обеспечивающего их ориентацию в постоянном магнитном поле, и установление зависимости между толщиной покрытия и параметрами постоянного магнитного поля.

Результаты расчета и их обсуждение

Во внешнем однородном магнитном поле на ферромагнитную частицу действует момент сил,

который стремится развернуть ее в положение с минимальной энергией. Момент сил определяется масштабом искажения внешнего поля ферромагнитной частицей при двух предельных ориентациях. Степень искажения поля зависит от фактора размагничивания образца. Для удобства представим, что зерно сверхтвердого материала представляет собой сплошной цилиндр с ферромагнитным покрытием в форме полого цилиндра. В магнитном поле полый цилиндр, длина которого больше диаметра, стремится сорентироваться так, чтобы его ось наиболее легко намагничивания совпала с силовыми линиями [5–8]. Развороту цилиндра препятствует механический момент, вызываемый взаимодействием с окружающим цилиндр немагнитным порошкообразным связующим.

Магнитные проницаемости материала зерна и покрытия совпадают по величине лишь тогда, когда геометрия зерна и его положение относительно силовых линий магнитного поля наиболее оптимальны. Для разграничения этих понятий введем, так называемый, фактор размагничивания N , с учетом которого величина магнитной восприимчивости полого цилиндра χ_N имеет вид

$$\chi_N = \frac{\chi}{1 + \chi N}, \text{ где } \chi - \text{ магнитная восприимчивость}$$

вещества покрытия. Соответственно магнитная проницаемость полого цилиндра μ_N следует известному соотношению

$$\mu_N = 1 + \frac{\chi}{1 + \chi N} \quad (1)$$

Фактор размагничивания изменяется от 0 до 1. Нижний предел отвечает случаю, когда образец не искажает картину внешнего поля. Для бесконечно

* Автор, с которым следует вести переписку.

длинного цилиндра, вернее, эллипсоида вращения, длинная ось которого параллельна силовым линиям поля, фактор $N = 0$ и, следовательно, $\mu_N = \mu$, т. е. магнитные проницаемости полого цилиндра и материала покрытия равны. При параллельной ориентации конечного цилиндра, длина которого $L = 1,5D$, допустимо предположить, что $N_{\parallel}^0 = \frac{9}{32}$ [5, 6]. Для нахождения условий нормальной ориентации оценим значение фактора размагничивания, исходя из приближения, что длинный цилиндр, ориентированный поперек поля, имеет фактор $N \cong 1/2$. С учетом конечной длины цилиндра фактор N при нормальной ориентации можно представить как $N_{\perp}^0 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{D}{L}\right)^{-1}$, здесь D и L – диаметр и длина цилиндра.

При повороте цилиндрического тела, покрытого слоем ферромагнетика, за счет действия магнитного момента изменение объемной плотности энергии в покрытии пропорционально $\frac{B^2 \Delta \mu_N}{\mu_0 \mu_{\perp} \mu_{\parallel}}$, здесь B – индукция внешнего магнитного поля, μ_0 – магнитная постоянная, $\Delta \mu_N$ – изменение магнитной проницаемости в процессе ориентации, μ_{\perp} и μ_{\parallel} – проницаемость покрытия при нормальной и коллинеарной ориентации зерна относительно вектора магнитного поля.

Учитывая, что ферромагнитное покрытие имеет вид полого цилиндра и, следуя принципу соответствия, представим фактор размагничивания в первом приближении как линейную функцию искомой толщины покрытия $N_{\parallel} = H_{\parallel}^0 \frac{\delta}{D}$; $N_{\perp} = N_{\perp}^0 \frac{\delta}{D}$, здесь δ – толщина ферромагнитного слоя покрытия. Указанный вид зависимости отвечает принципу предельного перехода, когда при $\delta \rightarrow D$ получаем установленные ранее соотношения для N_{\parallel}^0 и N_{\perp}^0 , а для $\delta \rightarrow 0$ влияние покрытия на конфигурацию магнитного поля в данной точке исчезает.

Для решения задачи о динамике цилиндрического зерна во внешнем однородном магнитном поле используем уравнение вращательного движения. Величина момента сил вращения пропорциональна выигрышу магнитной энергии системы при двух предельных ориентациях цилиндрического зерна

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + A \frac{d\varphi}{dt} - M = 0, \quad (2)$$

здесь I – момент инерции, A – коэффициент динамического трения, представляющий момент вязких сил, M – эффективный момент магнитных сил вращения, φ – угол поворота, t – время поворота.

Полагая, что во время поворота входящие в уравнение параметры не являются функциями угла, уравнение (2) можно рассмотреть как стандартное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. Для его решения найдем корни характеристического уравнения

$$\lambda^2 + C\lambda - K = 0, \quad (3)$$

здесь $C = A/I$, $K = M/I$. Общее решение уравнения (2) с учетом вида корней (3) можно представить как

$$\varphi = C_1 \exp(\lambda_1 t) + C_2 \exp(\lambda_2 t), \quad (4)$$

здесь

$$\lambda_1 = -\frac{A}{2I} + \sqrt{\frac{A^2}{4I^2} + \frac{M}{I}}; \lambda_2 = -\frac{A}{2I} - \sqrt{\frac{A^2}{4I^2} + \frac{M}{I}}.$$

Физическим условиям задачи соответствует только корень λ_1 и вследствие этого константа интегрирования C_2 равна нулю. Таким образом, возрастание угла поворота зерна с течением времени в условиях действия вязких сил трения имеет место тогда, когда подкоренное выражение в λ_1 превышает квадрат первого члена. Коэффициент λ_1 имеет размерность обратного времени. Физический смысл коэффициента λ_1 заключается в том, что он связывает инерционные, вязкие и силовые параметры с временем, необходимым для поворота. Для оценки параметров системы рассмотрим условия, при которых начальный произвольный угол ориентации оси зерна по отношению к магнитному полю изменится в e раз. Для этого используем соотношение

$$-\frac{A}{2I} + \sqrt{\frac{A^2}{4I^2} + \frac{M}{I}} = 1. \quad (5)$$

Уравнение (5) следует упростить, выразив эффективный магнитный момент как функцию вязких и инерционных сил.

$$M = I \text{сек}^{-2} + A \text{сек}^{-1}. \quad (6)$$

Здесь символы сек^{-2} и сек^{-1} оставлены для сохранения размерности. В выражении (6) момент инерции $I = m \left[\frac{D^2}{16} + \frac{L^2}{12} \right]$ (m – масса зерна без покрытия). Поскольку окружающая зерна СТМ среда образована дисперсной фазой, коэффициент вязких сил можно получить на основании соотношения Стокса $F_{\text{тр}} \approx 6\pi\eta Dv$. Для вращательного движения в реологической среде его следует трансформировать в коэффициент A , задающий момент вязких сил: $A \cong 6\pi\eta DL^2$, где η – динамическая вязкость среды, окружающей зерно. Эффективный момент магнитных сил можно определить, исходя из выражения для изменения объемной плотности магнитной энергии покрытия при

повороте, которое пропорционально $\frac{\Delta\mu_N}{\mu_{\perp}\mu_{\parallel}}$:

$$\frac{\Delta\mu_N}{\mu_{\perp}\mu_{\parallel}} \cong \frac{\chi(\chi+1)\left(\frac{\delta}{D}\right)^2(N_{\perp}^0 - N_{\parallel}^0)}{\left(\chi+1 + \frac{\chi N_{\perp} \delta^2}{D^2}\right)\left(\chi+1 + \frac{\chi N_{\parallel} \delta^2}{D^2}\right)} \quad (7)$$

Сам выигрыш энергии и средний момент магнитных сил определим как произведение изменения плотности энергии на объем ферромагнитного покрытия зерна

$$M = \frac{\pi\delta DLB^2 \Delta\mu_n}{16\mu_0 \mu_{\perp}\mu_{\parallel}} \quad (8)$$

Используя уравнения (7), (8) и подставив их в уравнение (6), толщину покрытия можно представить как

$$\delta \cong \left\{ \frac{16\mu_0 D \chi}{\pi B^2 L (\chi+1)(N_{\perp}^0 - N_{\parallel}^0)} \times \left[\frac{3\pi\rho D^5}{32} + 27\pi\eta D^3 \right] \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

здесь ρ – плотность материала зерна СТМ. С учетом приведенных ранее значений $N_{\parallel}^0 = \frac{9}{32}$ и

$$N_{\perp}^0 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{D}{L} \right)^{-1},$$

а также полагая, что плотность алмаза $\rho = 3,5 \cdot 10^3$ кг/м³, $\eta = 10^{-3}$ н·сек/м², $D = 10^{-3}$ м, $L = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, получаем, что для случая внешнего магнитного поля величины $B \cong 1,0$ Т толщина слоя $\delta \cong 10 \cdot 10^{-5}$ м. Таким образом, для алмазных зерен зернистостью 125/100 мкм толщина покрытия из кобальта, обеспечивающего гарантированный разворот во внешнем магнитном поле, составляет приблизительно 10 мкм.

Выводы

Используемые в расчете протабулированные значения для фактора размагничивания N относятся к образцам в форме эллипсоида вращения. Применение полученных соотношений к образцам в форме полого цилиндра допустимо лишь с ого-

воркой, что оцененные значения дают представления о нижнем пределе искомой величины. Уточнение предлагаемой методики будет осуществляться с учетом изменений магнитной энергии, как в самом покрытии, так и в области пространства, окружающей зерно.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании оборудования, предназначенного для изготовления шлифовального инструмента на основе сверхтвердых материалов с металлическим ферромагнитным покрытием.

Обозначения

χ – магнитная восприимчивость вещества покрытия; μ_N – магнитная проницаемость полого цилиндра; N – фактор размагничивания; D и L – диаметр и длина цилиндра; B – индукция внешнего магнитного поля; μ_0 – магнитная постоянная; μ_{\perp} и μ_{\parallel} – проницаемость покрытия при нормальной и коллинеарной ориентации; δ – толщина ферромагнитного слоя покрытия; I – момент инерции; A – коэффициент динамического трения; M – эффективный момент магнитных сил вращения; φ – угол поворота; t – время поворота; m – масса зерна; η – динамическая вязкость среды; ρ – плотность материала зерна.

Литература

1. Аканович В. А. Исследование процесса обработки инструментов с ориентированными зернами алмаза (на примере хонингования). Автореф. дисс. канд. техн. наук. Мн.: БПИ (1969)
2. Зайцев А. Г. Влияние расположения алмазных зерен на процесс шлифования твердого сплава // Вестник машиностроения (1977), № 8, 71–72
3. Ящерицын П. И., Зябавский М. Т., Кожуро Л. М., Акулович Л. М. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле. Мн.: Наука и техника (1988)
4. Зайцев А. Г. Расчет числа зерен, ориентированно расположенных на рабочей поверхности шлифовального круга // Сверхтвердые материалы (1982), № 6, 41–44
5. Никольский В. В. Теория электромагнитного поля. М.: Высшая школа. (1961)
6. Чечерников В. И. Магнитные измерения. М.: Изд. МГУ (1963)
7. Вонсовский С. В. Магнетизм. М.: Наука (1971)
8. Афанасьев Ю. В., Студенцов Н. В., Хорев В. М. и др. Средства измерения параметров магнитного поля. Л.: Энергия (1979)

Ustinovich D.F., Sobol V.R.

Calculation of a ferromagnetic coating thickness with oriented diamond grains.

A design procedure is proposed for calculation of a ferromagnetic coating thickness that ensures a turn and orientation of diamond grains in a permanent magnetic field. The relationships have been established between the coating thickness and parameters of the permanent magnetic field.

Поступила в редакцию 05.07.2002.

© Д. Ф. Устинович, В. Р. Соболев, 2003.