УДК 621.793.7 А.И. Долматов - доктор техн.наук
А.Ф. Горбачев -канд.техн.наук

Моделирование и метод решения процесса пластического деформирования при магнитно-абразивной обработке газодетонационных покрытий

Финишная обработка, в том числе и магнитно-абразивная, сопровождаются двумя основными процессами - механическим съемом металла и его окислов с поверхности обрабатываемых деталей, а также сглаживание микронеровностей путем их пластического деформирования абразивными зернами. Причем пластическое деформирование поверхности занимает приблизительно 70-80% объема МАО. Вследствие этого задача исследования процесса пластического деформирования поверхностного слоя деталей при МАО является весьма актуальной.

В качестве модели, поясняющей процессы, происходящие при МАО, предлагается рассмотреть вдавливание твердого шарика в пластически деформируемую среду.

На основе анализа картины деформирования получено поле скоростей течения частиц материала в предположении линейного закона затухания деформацией по глубине внедрения шарика:

$$V_x=\frac{V_0}{h}\left(x-\frac{x^3}{3a^2}-\frac{xy^2}{a^2}\right)\left(1+\frac{z}{h}\right); \qquad (1)$$

$$V_y=\frac{V_0}{h}\left(y-\frac{y^3}{3a^2}-\frac{x^2y}{a^2}\right)\left(1+\frac{z}{h}\right); \qquad (2)$$

$$V_z=-2V_0\left(1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{a^2}\right)\left(\frac{1}{2}+\frac{z}{h}+\frac{z^2}{2h^2}\right), \qquad (3)$$

где: x, y, z - координаты точки приложения шарика к пластически деформируемой среде;
a - радиус отпечатка;
h - глубина внедрения шарика в пластически деформируемую среду.

В уравнении (3) скорость распространения деформации по оси z задана выражением $1-x^2/a^2-y^2/a^2$, а закон затухания представлен выражением $1/2+z/h+z^2/2h^2$, т.е. линейным. Аналогично заданы V_x и V_y.

Зная поле скоростей частиц деформируемого материала определяем поле скоростей деформаций:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial V_x}{\partial x} = \frac{V_0}{h}\left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}\right)\left(1 + \frac{z}{h}\right); \tag{4}$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial V_y}{\partial y} = \frac{V_0}{h}\left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}\right)\left(1 + \frac{z}{h}\right); \tag{5}$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{2V_0}{h}\left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}\right)\left(1 + \frac{z}{h}\right); \tag{6}$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} = -\frac{V_0}{h}\left(1 + \frac{z}{h}\right)\frac{2xy}{a^2} - \frac{V_0}{h}\left(1 + \frac{z}{h}\right)\frac{2xy}{a^2}; \tag{7}$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} = \frac{V_0}{h^2}\left(y - \frac{x^2 y}{a^2} - \frac{y^3}{3a^2}\right) - 2V_0\left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} + \frac{z^2}{2h^2}\right)\frac{2y}{a^2}; \tag{8}$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} = -\frac{V_0}{h^2}\left(x - \frac{x^3}{3a^2} - \frac{xy^2}{a^2}\right) + 2V_0\left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} + \frac{z^2}{2h^2}\right)\frac{2x}{a^2}. \tag{9}$$

Далее находим интенсивность скоростей деформации по формуле:

$$\varepsilon_i = \sqrt{2}/3\sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + 3/2\,(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{xz}^2)}. \tag{10}$$

В нашем случае $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$; $\varepsilon_{zz} = -2\varepsilon_{xx}$, поэтому

$$\varepsilon_i = 2\varepsilon_{xx}\sqrt{1 + 1/12\left[(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{xz}^2)/\varepsilon_{xx}^2\right]} \tag{11}$$

Обозначим в уравнении (II):

$$B = \sqrt{1 + 1/12\left[(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{xz}^2)/\varepsilon_{xx}^2\right]}, \tag{12}$$

где B – учитывает влияние касательных напряжений на процесс обработки.

Учитывая выражение (12), интенсивность скоростей деформации (10) примет вид:

$$\varepsilon_i = 2\varepsilon_{xx} B = \frac{2V_0}{h}\left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}\right)\left(1 + \frac{z}{h}\right) B. \qquad (13)$$

Теперь легко определить работу деформирования:

$$A = \sqrt{1 + 1/12\left\{\left[(16V_0^2 + x^2y^2)/a^4h^2\right](1 + z/h)^2 + \left[(V_0^2/h^4 \times (y - x^2y/a^2 - y^3/3a^2) + 4V_0(1/2 + z/h + z^2/2h^2)2y^2/a^4\right]^2 + \left[V_0^2/h^2(x - x^3/3a^2 - xy/a^2) + 2V_0(1/2 + z/h + z^2/2h^2)2x/a^3\right]\right\}/ V_0h^2(1 - x^2/a^2 - y^2/a^2)(1 - z/h)}. \qquad (14)$$

Далее определяем параметры процесса пластического деформирования материала:

$$\mu_i = \frac{\sigma_s}{3\varepsilon_i} = \frac{\sigma_s h}{6V_0}\left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}\right)\left(1 + \frac{z}{h}\right) B, \qquad (15)$$

где: μ_i – коэффициент Пуассона;

σ_s – предел текучести материала.

Зная μ_i, находим значение касательных напряжений:

$$\tau_{xy} = \mu_i \varepsilon_{xy} = -\frac{2}{3}\sigma_s \frac{xy}{a^2} B\left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}\right). \qquad (16)$$

Применив функцию диссипации энергии:

$$E = \sigma_s \varepsilon_i = \frac{2V_0}{h}\sigma_s\left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}\right)\left(1 + \frac{z}{h}\right), \qquad (17)$$

определяем энергию деформирования

$$Э = \iiiint E\,dV\,dt = \kappa\frac{2\sigma_s}{h}\iiint\left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}\right)\left(1 + \frac{z}{h}\right) B\,dx\,dy\,dz. \qquad (18)$$

Расчет остальных параметров деформирования материала зернами магнитно-абразивного порошка при МАО выполнен на основе теории малых упруго-пластических деформаций со следующими допущениями: рабочие зерна имеют одинаковые размеры и сферическую форму ; абразивная фракция в зернах размещена изотропно, зерна несжимаемые, жесткие, соотношения размеров реальных зерен и обрабатываемых деталей позволяют считать рабочий зазор плоским.

Задача заключалась в определении величины деформируемого слоя (отпечатка) и закона распределения нагрузки под зерном.

В результате предложенной методики получены следующие расчетные зависимости:

$$a=\sqrt[3]{\frac{3\pi K_1 P}{8\beta_1}}; \qquad (19)$$

$$q_0=\sqrt{\frac{24}{\pi^5}\left[\beta_1/K_1\right]^{2}P}; \qquad (20)$$

$$\omega_0=\sqrt{\frac{9\pi^2}{8}\beta_1 K_1^2 P^2}, \qquad (21)$$

где: a, ω - размеры отпечатка (диаметр и глубина) ;

q_0 - интенсивность нагрузки ;

K_1 - коэффициент, учитывающий свойство обрабатываемых материалов ;

P - нагрузка на зерно ;

R - радиус зерна ;

$\beta_1 = 1/2R$ - коэффициент, учитывающий влияние размера зерна.

На основании предложенной методики расчета параметров процесса деформирования материала зернами магнитно-абразивного порошка при МАО.можно определять энерго-силовые параметры процесса, прогнозировать величину упрочненного слоя материала и варьировать технологические параметры (размеры зерен, магнитную индукцию).