

МАШИНОСТРОЕНИЕ

С. А. БАБАЯН

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРОЦЕССА СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ
ОБРАБОТКИ

В последнее время процесс обработки свободным абразивом находит все более широкое применение в машиностроении. Одной из разновидностей этого процесса является способ струйно-абразивной обработки (САО), при котором частицы абразива в сопловых аппаратах (мониторах) разгоняются сжатым воздухом до сравнительно высоких скоростей и направляются на обрабатываемую поверхность. При ударе частицы абразива о поверхность образуется лунка, а в результате многократных повторений удара происходит съем металла, снижение шероховатости и упрочнение поверхностного слоя.

По сравнению с такими процессами, как полирование, дробеструйная и пескоструйная обработки, САО обладает рядом преимуществ, что и обусловило расширение области применения этого способа.

Исследованию процесса САО посвящен ряд работ, среди которых следует выделить [1].

Однако вопросы теории процесса и, в частности, механизм образования лунки при САО, изучены недостаточно. В трудах М. М. Сазерия, С. Г. Хейфеца, Н. В. Кудрявцева и М. С. Дрозда исследован процесс поверхностного упрочнения пластическим деформированием, в частности и дробеструйный способ, для которого определены диаметр отлетчатка и степень упрочнения в зависимости от режимов обработки. Эти исследования проведены на основе изучения процесса статического вдавливания индентора в упруго-пластическую среду.

Особенностью способа САО являются сравнительно высокие скорости удара частиц о поверхность, которые могут достигать значений 180...200 м/с. При этом следует учитывать инерционные нагрузки, обусловленные перемещением масс при деформациях [2].

В настоящей статье сделана попытка приближенно оценить глубину лунки при САО с позиций теории пластического деформирования металлов.

Задача решается при следующих допущениях:

а) рассматривается процесс внедрения абсолютно твердого гладкого шарового индентора в идеально-пластическое изотропное полупространство при прямом ударе;

б) обрабатываемая поверхность гладкая и сухая.

С учетом принятых допущений дифференциальное уравнение движения шара при внедрении в пластическую среду можно записать в виде:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = - \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (1)$$

где m — масса шара; h — глубина внедрения (рис.); Q_i — проекция действующих сил на направление перемещения:

$$\sum_{i=1}^4 Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (2)$$

где Q_1, Q_2 — силы сопротивления внедрению шара при пластическом деформировании и при наличии трения на поверхности контакта; Q_3 — составляющая, обусловленная инерционными нагрузками при перемещении масс деформируемой среды; Q_4 — нагрузка на поверхности контакта, возникающая при распространении упругих волн в полупространство.

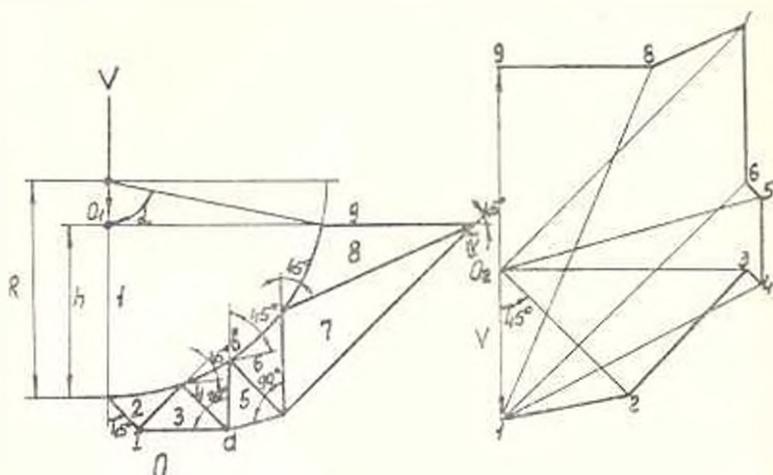


Рис. Поле линий скольжения и голограф скоростей при внедрении шарового индентора.

Для определения первых трех составляющих в уравнении (2) используем метод [3].

На рисунке в левой части показано кинематически возможное поле линий скольжения, где сплошная деформируемая среда разделена на отдельные блоки перемещающихся масс. В правой части рисунка представлен голограф скоростей перемещения этих блоков масс [3].

При этом вместо действительных величин деформаций и скоростей перемещения рассматриваются кинематически возможные значения этих параметров, отвечающие граничным условиям и несжимаемости. Приближенное решение по сравнению с точным дает завышенное значение усилий, поэтому его называют верхней оценкой в отличие от нижней, получаемой из точного решения [3].

В нашем случае будем искать среднее значение этих двух величин по формуле

$$Q_1 = \frac{q_1 + q_2}{2} \pi R^2 \sin^2 \alpha, \quad (3)$$

где q_1 и q_2 — соответственно точное и приближенное значения величины удельного усилия при пластическом деформировании, отнесенного к площади сечения шара в плоскости, проходящей через начало координат (точка O , рис.).

Точное решение дает [3]:

$$q_1 = 2k \left(1 + \frac{\pi}{2} - \alpha + \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{4\sin^2 \alpha} \right), \quad (4)$$

где k — пластическая постоянная, а $\alpha = \arccos \left(1 - \frac{h}{R} \right)$ (рис.).

Для приближенного решения [3]:

$$q_2 = \frac{k \sum_{j=1}^n l_j V_j}{RV \sin \alpha}, \quad (5)$$

где l_j — длина отдельных границ блоков; V_j — разрывы скоростей течения вдоль границ блоков; $V = \frac{dh}{dt}$ — скорость шара.

В формуле (5) индексу j последовательно придаются значения 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08.

Так, например, произведение $l_{02} \cdot V_{02}$ относится к блокам 4 и 5 (рис.), граница которых имеет длину l_{02} (отрезок ab), а величина разрыва скоростей V_{02} в масштабе равна длине отрезка 4—5 на годографе скоростей. Индексом 0 обозначена область пластической среды.

Удельную силу сопротивления внедрению шара, обусловленную наличием трения на поверхности контакта, находим по формуле [3]:

$$q_3 = \frac{2k\mu \sum_{r=1}^n l_r V_r}{RV \sin \alpha}, \quad (6)$$

где μ — коэффициент пластического трения; l_r — длина участков контура пуансона; V_r — скорость скольжения вдоль участков контура пуансона, определяемая из годографа скоростей.

Индексу r в формуле (6) последовательно придаются значения 12, 14, 16, 18.

Динамические напряжения на линиях разрыва скоростей, возникающие вследствие перемещения масс, определим из формулы [3]:

$$q_i = e V_i (V_{pi})_i, \quad (7)$$

где e — плотность деформируемого материала; V_{i1} , $(V_{a1})_i$ — скорость частицы на линии разрыва при переходе из одной области в другую и нормальная составляющая этой скорости.

Преобразовав формулу (7) для шарового индентера, получим:

$$q_1 = \frac{e}{2R} \frac{\sum_{i=1}^n V_{i1}^2 (V_{a1})_i l_i}{V \sin \alpha}. \quad (8)$$

В этой формуле индексу i придаются значения 23, 34, 45, 56, 67, 78.

Используя данные [4], величину удельной нагрузки, возникающей при распространении упругих волн, можно найти из выражения:

$$q_3 = \psi e c V, \quad (9)$$

где ψ — коэффициент, зависящий от форм индентера и недеформированной поверхности; c — скорость распространения звука в данной среде.

С учетом зависимостей (2) ... (9), дифференциальное уравнение (1) движения шара при внедрении в пластическую среду запишем в развернутом виде:

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = -\frac{\pi R^2}{m} \left[k \left(1 + \frac{\pi}{2} - \alpha + \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{4 \sin^2 \alpha} \right) + \frac{k}{2R} \frac{\sum_{i=1}^n l_i V_i}{\sin \alpha} + \right. \\ \left. + \frac{2k\mu}{R} \frac{\sum_{i=1}^n l_i V_i}{\sin \alpha} + \frac{e}{2R} \frac{\sum_{i=1}^n l_i V_i^2 (V_{a1})_i}{\sin \alpha} \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 + \psi e c \frac{dh}{dt} \right] \sin^2 \alpha. \quad (10)$$

Для решения уравнения (10) все входящие в него переменные величины представляли в виде функций одной переменной — глубины луки.

Значения скоростей V_i , V_{a1} , V_{a2} определены аналитически из годографа скоростей и отнесены к скорости шара $V = \frac{dh}{dt}$.

Уравнение (10) подстановкой $\frac{dh}{dt} = z$ приведено к системе:

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = z; \\ \frac{dz}{dt} = -\frac{\pi R^2}{m} f \left(\frac{dh}{dt}, h \right), \end{cases} \quad (11)$$

которая решена методом Рунге-Кутты на ЭВМ «Минск-32» при следующих начальных условиях:

$$t = 0, \quad h = 0, \quad z_0 = V_0, \quad (12)$$

где V_0 — начальное значение скорости абразивной частицы в момент начала удара, метод определения которого приведен в [5].

Результаты расчетов по (11) при начальных условиях (12) в случае внедрения этой частицы в стальную поверхность ($\Psi = 1$) с пластической постоянной $20,8 \cdot 10^7$ Па при коэффициенте пластического трения 0,3 [3] дают глубину лунки порядка $2 \cdot 10^{-4}$ м.

В последующем проводили экспериментальную проверку полученных расчетным путем величин глубины лунок.

Несмотря на сравнительную большую ошибку измерений, полученные результаты расчета и эксперимента по определению глубины лунки позволяют рассматривать уравнение (11) как математическую модель процесса САО и применять его для изучения основных параметров резания и характеристик качества поверхностного слоя обработанной детали.

Действительно, при известной глубине лунки без особых затруднений можно определить форму и размеры стружки, степень упрочнения (рис.), а также рассчитать контактную нагрузку на поверхности зерна, вызывающую его износ и разрушение.

При заданном законе распределения размеров абразивных зерен можно на основе методов математической статистики и геометрической вероятности определить параметры, характеризующие шероховатость обработанной поверхности.

Выводы

1. На основе методов теории пластического деформирования материалов построена математическая модель процесса струйно-абразивной обработки. Процесс описывается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка, учитывающим инерционные нагрузки вследствие перемещения деформируемого материала при сравнительно высоких начальных скоростях удара абразивного зерна о поверхность.

2. При заданных режимах обработки и физико-механических свойствах обрабатываемой поверхности из уравнения процесса можно рассчитать глубину отпечатка абразивного зерна, а также параметры, характеризующие шероховатость поверхности и степень упрочнения.

ИПО «Армтаиок»

18 VII 1981

Հ. Ս. ԲԱՐՍԱՆ

ՇԻՔԱՀԿԱՆՅՈՒԹԱՅԻՆ ՄՇԱԿՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՀԻՄՈՒՄՆԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ո մ

Պլաստիկ դեֆորմացման տեսության մեթոդների հիման վրա դուրս է բերված զնդածև ինդինսորի՝ հղկանյութային մասնիկի, ներխուժման պրոցեսը նկարագրող դիֆերենցիալ հավասարումը:

Ստացված հավասարումը դիտարկվում է որպես շիթահղկանյութային մշակման պրոցեսի մաթեմատիկական մոդել, որը հնարավորություն է տալիս ստիված ռեժիմային դործունեների միջոցով հաշվարկել պրոցեսի հիմնական կիրի պարամետրերը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Билик Ш. М. Абразивно-жидкостная обработка металлов.— М.: Машгиз, 1960. — 199 с.
2. Витман Ф. Ф., Степанов В. А. Влияние скорости деформирования на сопротивление деформированию металлов при скоростях удара 10^2 — 10^3 м/с.— В сб.: Некоторые проблемы прочности твердого тела, М.—Л., АН СССР, 1959, с. 207—221.
3. Томленов А. Д. Теория пластического деформирования металлов.— М.: Металлургия, 1972.— 408 с.
4. Гольдсмит В. Удар и контактные явления при средних скоростях.— В сб.: Физика быстротекающих процессов, М., Мир, 1971, т. 2, с. 153—203.
5. Бабаян С. А., Аракелян А. А., Дохилян Р. Т. Оценка энергии обрабатывающих частиц и потока абразивно-жидкостной суспензии.— Вестник машиностроения, 1981, № 5, с. 57—59.