

УДК 621.923

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

канд. техн. наук, доц. В.Я. ЛЕБЕДЕВ, канд. техн. наук Э.Н. ФЕДОРОВИЧ, В.Е. БАБИЧ
(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск)

Рассмотрены факторы и явления, влияющие на производительность процесса магнитно-абразивной обработки. Определена удельная производительность магнитно-абразивной обработки путем суммирования съема зернами, контактирующими с обрабатываемой поверхностью. Небольшое отклонение результатов, полученных экспериментально (3...17 %), от расчетных величин доказывает достаточную точность предложенной методики расчета величины съема металла. Имея числовые значения параметров, можно прогнозировать величину съема металла в зависимости от условий обработки, величины исходной шероховатости, а также от свойств ферроабразивных порошков и обрабатываемого материала, что позволяет задавать необходимую величину припуска на механическую обработку.

Введение. При исследовании обработки деталей в магнитном поле ферроабразивным порошком (ФАП) важным является изучение комплекса явлений, происходящих в зоне контакта зерен с обрабатываемой поверхностью детали. Раскрытие физической природы этого процесса позволяет решать важные задачи повышения производительности и качества обработки.

Производительность МАО можно оценивать по массе или величине толщины снятого в единицу времени с обрабатываемой поверхности материала. Измерение съема материала может сопровождаться большими погрешностями из-за малой толщины удаляемого слоя ($10^{-3} \dots 10^{-2}$ мм) и температурных деформаций заготовки. Поэтому в практике исследований оценку производительности МАО производят измеряя массу образца до и после обработки [1].

При обработке в съеме металла принимает участие многочисленная совокупность вершин абразивных зерен. При этом одновременно участвует в обработке значительное количество зерен, часть из которых, проходя зону контакта, снимает единичную стружку. В связи с этим оценку производительности МАО проводят по совокупному съему металла, или по характеристикам микрорезания единичным зерном, моделируя для него условия обработки, близкие к реальным.

Основная часть. При оценке производительности обработки количество режущих кромок считают равным числу вершин абразивных зерен, принимающих участие при микрорезании в зоне контакта.

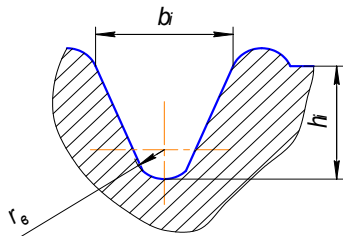


Рис. 1. Сечение чарапины от единичного выступа абразивного зерна

При этом полагают, что каждое абразивное зерно взаимодействует с обрабатываемой поверхностью только одной вершиной и, контактируя с поверхностным слоем детали, образует чарапину треугольной формы (рис. 1).

Каждое зерно ФАП на поверхности контакта с обрабатываемой деталью участвует в микрорезании и снимает единичным микровыступом стружку объемом $V_c = K_c \cdot V_{\text{ч}}$.

С учетом пластического течения материала в процессе резания действительный объем снятой стружки отличается от реального объема чарапины. Это учитывается в расчетах коэффициентом стружкообразования (K_c).

Исходя из этого весовой съем металла можно определить как

$$Q = \rho V_{\text{ч}} K_c K_{\text{ф}}$$

Здесь ρ – плотность обрабатываемого материала; $V_{\text{ч}}$ – суммарный объем чарапин; K_c – коэффициент стружкообразования; $K_{\text{ф}}$ – коэффициент учитывающий влияние других факторов.

Коэффициент стружкообразования определяется как

$$K_c = 1 - \varepsilon_n,$$

где ε_n – коэффициент навалов, определенный согласно [2].

Суммарный объем чарапин на пути резания будет определяться по формуле:

$$V_{\text{чс}} = L_{\text{рез}} \sum_{i=1}^n S_i.$$

Здесь $L_{\text{рез}}$ – путь резания; S_i – площадь i -й чарапины; n – количество чарапин.

Таким образом, для расчета теоретической величины съема металла вершиной зерна ФАП необходимо определить суммарную площадь сечения царапин и путь резания.

Длина пути резания зависит от частоты вращения обрабатываемого изделия n , определяющей скорость резания $V_{рез}$ и продолжительность обработки t и может быть рассчитана по формуле:

$$L_{рез} = \frac{V_{рез}}{\pi d} \cdot \tau.$$

Контактируя с обрабатываемой поверхностью, ферроабразивное зерно оставляет на ней микроцарапину, параметры которой определяются величиной давления зерна на эту поверхность. Площадь царапины треугольной формы от резания микровыступом единичного зерна с радиусом округления r_g (см. рис. 1) будет равной:

$$S_y \approx 0,5(b_i + 2r_g)(h_i - r_g) + 0,5\pi r_g^2, \quad (1)$$

где b_i и h_i – соответственно ширина и глубина царапины.

В связи с тем, что глубина и ширина царапин ферроабразивными зернами на поверхности контакта ферроабразивной «щетки» с деталью будут различными, производительность съема металла следует оценивать по значению площади сечения царапин в середине абразивного слоя с учетом количества зерен по всей площади контактирования при непрерывной циркуляции абразивной среды.

Таким образом, суммарная площадь сечения царапин составит:

$$\sum S_y = 0,5 \left[b_0 + 2r_g \quad h_0 - r_g + \pi r_g^2 \right] \sum N_k. \quad (2)$$

Здесь b_0 и h_0 – соответственно ширина и глубина царапины, оставляемой вершиной ферроабразивного зерна с исходным микрорельефом на исследуемом материале в средней части царапины; $\sum N_k$ – суммарное число зерен, контактирующих с поверхностью обрабатываемой детали определяемое из условия, что при MAO зерна находятся только в зонах действия магнитного поля.

Исследованиями [3] установлено, что форма полюсного наконечника и, следовательно, рабочих зазоров определяет суммарное количество участвующих в процессе резания зерен ФАП и условия их удержания внутри зазоров. Рабочая зона при MAO характеризуется шириной зазора δ , углом охвата изделия 2α , радиусом профилирования рабочей поверхности полюсного наконечника R и его длиной L (рис. 2).

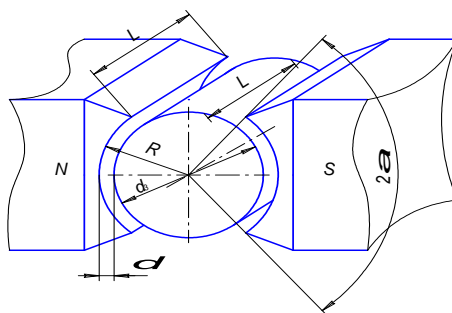


Рис. 2. Форма рабочего зазора при MAO цилиндрических поверхностей

Этими же исследованиями установлено, что наиболее эффективно процесс MAO протекает при $\delta = 0,3 \dots 0,5$ мм. Угол охвата 2α обрабатываемой поверхности полюсными наконечниками определяет количество режущих вершин порошка, находящихся в рабочих зазорах и одновременно участвующих в резании. Трудоемкость операции не изменяется, если сохранять при MAO различных диаметров изделий постоянный угол охвата $2\alpha = 90^\circ$. Увеличение угла α повышает производительность процесса, интенсифицируя съем металла, но одновременно увеличивается расход порошка и мощность резания.

Дуга контакта ФАП с обрабатываемой поверхностью составляет $\frac{360^\circ}{2\alpha}$. Учитывая, что оптимальный угол охвата обрабатываемой поверхности равен 90° [4, 6], зоной контакта в процессе обработки является $\frac{1}{4}$ поверхности детали.

Учитывая площадь контакта единичного зерна с обрабатываемой поверхностью S_k определим максимально возможное число непосредственно контактирующих зерен с деталью цилиндрической формы:

$$\sum N_k = \left(\frac{\pi \cdot d^2 \cdot l}{4} \cdot \frac{1}{4} \right) / S_k. \quad (3)$$

Произведем расчет количества зерен контактирующих с поверхностью цилиндрической детали с размерами $d = 30$ мм; $l = 30$ мм. Для ФАП зернистостью 400/315 ...200/160 значение $S_k = 3 \dots 20$ мкм [1, 5]. Принимаем в расчетах значение $S_k = 5$ мкм.

$$\sum N_k = \left(\frac{3,14 \cdot 0,03^2 \cdot 0,03 \cdot 1}{4} \right) / (5 \cdot 10^{-6}) \approx 1060.$$

Так как процесс МАО проходит на участках 3...6 и 2...7 (рис. 3), то суммарное количество участвующих в процессе резания зерен ФАП будет равно $2\sum N_k$.

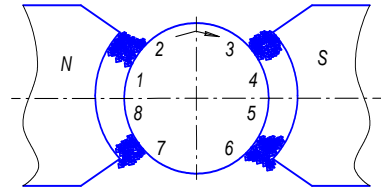


Рис. 3. Зоны концентрации порошка в рабочих зазорах

Аналитическое выражение для определения весового съема металла за время цикла обработки t_u получим в виде:

$$\sum Q = \rho(1 - \varepsilon_n) \cdot [(h_0 + 2r_e) \cdot (h_0 - r_e) + \pi r_e^2] \cdot \sum N_k \cdot \left(\frac{V_{рез} \cdot t}{\pi d} \right). \quad (4)$$

Анализ имеющейся информации по исследованиям процесса МАО показывает [1, 3, 4, 6], что наибольшие магнитодвижущие силы будут в зонах концентрации магнитной индукции на концентраторах в зонах 1 – 2, 3 – 4, 5 – 6, 7 – 8 (см. рис. 3).

В указанных зонах концентрируется наибольшее количество элементов порошка и осуществляется интенсивный съем материала, причем, как показала скоростная киносъемка [3], наиболее производительными зонами являются участки 1 – 2, 5 – 6. При скоплении большого количества порошка на участках 1 – 2 и 5 – 6 происходит его уплотнение и заклинивание в рабочем зазоре, что вызывает интенсивный съем материала с поверхности заготовки. На основании вышеприведенных данных значение коэффициента K_z , учитывающего фактор концентрации ФАП на поверхности детали в зависимости от участка обработки, составит 0,8...0,9.

При внедрении ферроабразивных зерен в обрабатываемую поверхность и их относительном движении возникают силы, определяющие относительное положение абразивных зерен. Если они превысят силу нормального давления ферроабразивного зерна на обрабатываемую поверхность, то зерно повернется к этой поверхности другой гранью или вершиной. При этом изменение положения одного зерна в ферроабразивной щетке может привести к относительному смещению граничащих с ним зерен.

При повороте абразивных частиц имеет место частичное скалывание и выкрашивание отдельных вершин. При этом микропрофиль зерен обновляется и его режущие свойства поддерживаются на постоянном уровне. Поворот частиц способствует повышению величины съема металла при обработке, который учитывается коэффициентом K_n , равным 1,1...1,3 [7].

Кроме того, на съем металла влияют следующие факторы:

- K_y – коэффициент, учитывающий то, что при поворотах абразивных частиц часть металла выпадает из впадин субмикронеровностей, увеличивая режущую способность ФАП, $K_y = 1,2 \dots 1,4$ [2];

- $K_{ш}$ – коэффициент, учитывающий влияние исходной шероховатости обрабатываемой поверхности. Значения $K_{ш} = 1,0 \dots 1,46$ для $R_a 0,16 \dots 6,3$ мкм.

- $K_{жс}$ – коэффициент, учитывающий влияние жидкой фазы абразивной суспензии (в зависимости от вида смазочно-охлаждающей жидкости значение $K_{жс}$ находится в диапазоне 1,2...1,5 [1]).

Для упрощения последующих расчетов введем общий коэффициент K_{ϕ} , учитывающий совокупное влияние вышеперечисленных факторов.

Существенное влияние на производительность процесса оказывает длительность обработки. В процессе обработки зерна ФАП постепенно теряют свои режущие свойства, и удельный съем постепенно снижается. Данное явление учитывается коэффициентом K_{δ} , который выбирается в зависимости от времени обработки и всегда меньше 1.

По результатам проведенных исследований при разном времени обработки стали с $\sigma_b = 500 \dots 1000$ МПа порошком Ж15КТ фракцией 400/315 коэффициентом K_e составил: 0,65 при $t = 90$ с; 0,8 при $t = 60$ с; 0,1 при $t = 300$ с.

Окончательно получим зависимость для определения величины съема металла при обработке деталей, которая будет иметь следующий вид:

$$\sum Q = \rho(1 - \varepsilon_n) \left[b_0 + 2r_g \cdot h_0 - r_g + \pi r_g^2 \right] \cdot 2 \sum N_k K_\phi K_e \left(\frac{V_{pez} t}{\pi d} \right). \quad (5)$$

Для примера проведем расчет производительности MAO наружной цилиндрической поверхности детали из стали 45 с размерами $d = 30$ мм; $l = 30$ мм. Ферроабразивный материал Ж15КТ, $K_c = 1 - \varepsilon_n = 0,95$; $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³; $V_{pez} = 1,2$ м/с; $t = 90$ с; $r_g = 0,2 \cdot 10^{-6}$ м; $K_\phi = 2,41$; $K_e = 0,65$; $b_0 = 10 \cdot 10^{-6}$ м; $h_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ м [6]. Подставив данные значения в формулу (5), получим $Q = 3,7 \cdot 10^{-3}$ кг.

Экспериментальная проверка проводилась при следующих условиях: исходная шероховатость поверхности образцов составляет $R_a = 2,5$ мкм. ФАП Ж15КТ, размерность частиц $\Delta = 400/315$ мкм, смазочно-охлаждающие жидкости – СинМА-1, 2 %-ный водный раствор, капельная подача принудительным способом, удельный расход 200 – 250 мл/мин. Параметры обработки: магнитная индукция, $B = 0,9 \dots 1,1$ Тл; сила тока, подаваемого на катушки соленоидов ЭМС $I = 4 \dots 6$ А; скорость вращения детали $V_{вр} = 2$ м/с; скорость осцилляции $V_0 = 0,1 \dots 0,25$ м/с; амплитуда осцилляции $A = 1 \dots 4$ мм; величина рабочего зазора $\delta = 1 \dots 1,4$ мм.

Экспериментальный съем металла Q для стали 45 составил $3,14 \cdot 10^{-3} \dots 3,22 \cdot 10^{-3}$ кг при $t = 90$ с. Взвешивание образцов до и после обработки производилось с помощью электронных весов OHAUS AR5120.

Небольшое отклонение результатов, полученных экспериментально (3...17 %), от расчетных величин доказывает достаточную точность предложенной методики расчета величины съема металла.

Следует отметить, что вышеприведенные формулы применимы для других способов обработки незакрепленным абразивом магнитно-абразивной обработки и могут быть применены не только для расчета съема при обработке цилиндрических деталей, но и для других сложнопрофильных тел вращения с учетом специфики их обработки. Данную методику расчета производительности магнитно-абразивного полирования корректно использовать при режимах, рекомендованных для MAO [1, 3, 4, 6]: $V_{pez} = 0,5 \dots 3,0$ м/с; $t = 30 \dots 300$ с; $B = 0,3 \dots 1,2$ Тл.

Заключение. Имея числовые значения параметров, входящих в формулы (1)...(5), можно прогнозировать величину съема металла в зависимости от условий обработки, величины исходной шероховатости, а также от свойств ФАП и обрабатываемого материала, что позволяет задавать необходимую величину припуска на механическую обработку.

Работа выполняется в рамках проекта 1.30 ГППИ «Материалы в технике».

ЛИТЕРАТУРА

1. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущего инструмента / Ю.М. Барон. – Л., 1986. – 176 с.
2. Богомолов, Н.И. Основные процессы при взаимодействии абразива и металла: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Н.И. Богомолов. – Киев, 1977. – 46 с.
3. Коновалов, Е.Г. Основы электроферромагнитной обработки / Е.Г. Коновалов, Ф.Ю. Сакулевич. – Минск: Наука и техника, 1974. – 272 с.
4. Коновалов, Е.Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е.Г. Коновалов, Г.С. Шулев. – Минск: Наука и техника, 1967. – 125 с.
5. Хомич, Н.С. Исследование влияния свойств ферромагнитных абразивных материалов на эффективность абразивной обработки в магнитном поле / Н.С. Хомич // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев: ИПМ АН УССР, 1982. – С. 105 – 112.
6. Сакулевич, Ф. Магнитно-абразивная обработка точных деталей / Ф. Сакулевич, Л. Минин, Л. Олендер. – Минск: Выш. шк., 1977. – 287 с.
7. Скрябин, В.А. Основы процесса субмикрорезания при обработке деталей незакрепленным абразивом / В.А. Скрябин. – Пенза: Изд-во ПВАИУ, 1992. – 120 с.

Поступила 28.11.2008