

УДК 621.923

Андилахай А. А.¹, Новиков Ф. В.²

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований динамики процесса струйно-абразивной обработки, обоснованы благоприятные условия обработки с учетом угла воздействия единичного абразивного зерна на обрабатываемую поверхность по критерию времени их взаимодействия и массы съема металла.

Ключевые слова: абразивное зерно, сила резания, обрабатываемая поверхность, след, ширина срезаемого слоя, скорость, кинетическая энергия.

Андилахай О. О., Новиков Ф. В. Теоретичні і експериментальні дослідження динаміки струменево-абразивної обробки. Наведені результати теоретичних і експериментальних досліджень динаміки процесу струменево-абразивної обробки, обґрунтовані сприятливі умови обробки з урахуванням кута дії одиничного абразивного зерна на оброблювану поверхню по критерію часу їх взаємодії і маси знімання металу.

Ключові слова: абразивне зерно, сила різання, оброблювана поверхня, слід, ширина зрізаного шару, швидкість, кінетична енергія.

A.A. Andilayah, F.V. Novikov. Theoretical and experimental research of dynamics of jet-abrasive treatment. The results of theoretical and experimental research work of the dynamics of the process of jet-abrasive treatment were summarized in this article, favorable conditions of treatment were substantiated, with due regard to the angular action of a singular abrasive grain upon the surface under treatment along the criterion of the time of their interaction and the mass of removed metal.

Key words: abrasive grain, cutting force, treated surface, trace, width of the cut-off layer, velocity, kinetic energy.

Постановка проблемы. Струйно-абразивная отделочно-зачистная обработка деталей различной конфигурации, особенно сложной пространственной формы, находит все более широкое применение в машиностроении, прокатном и литейном производстве, приборостроении и электротехнической промышленности [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Использование абразивного порошка в качестве обрабатывающего инструмента обеспечивает экономичность процесса [1, 3, 4, 5], особенно в том случае, когда абразивные зерна присоединяются к струям сжатого воздуха за пределами каналов сопел не изнашивая их [1]. Вместе с тем, при такой схеме снижается запас кинетической энергии, сообщаемой абразивным зернам в процессе обработки [1, 4, 5], что приводит к снижению производительности и, как следствие, сдерживает применение метода в производстве. Этим обусловлена необходимость всестороннего исследования процесса воздействия единичного абразивного зерна на обрабатываемую поверхность.

Цель статьи – теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение наиболее благоприятных условий обработки свободными абразивными зернами по критерию максимального времени их взаимодействия, а также определение доли столкновений, заканчивающихся отделением металла от обработанной поверхности.

Изложение основного материала. Установим характер движения абразивного зерна массой m под действием возникающей в процессе съема обрабатываемого материала силы резания P . Будем считать, что зерно движется с начальной скоростью v_0 в направлении оси oz , рис. 1. Тогда уравнения движения абразивного зерна во времени τ в направлениях осей oz и

¹ канд. техн. наук, доцент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

² д-р техн. наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет, г. Харьков

оу под действием тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания опишутся следующим образом:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{z}(\tau) = -P_z; \\ m \cdot \ddot{y}(\tau) = P_y, \end{cases} \quad (1)$$

где $\ddot{z}(\tau)$ и $\ddot{y}(\tau)$ – соответственно ускорения движения абразивного зерна в направлениях осей oz и oy , m/c^2 .

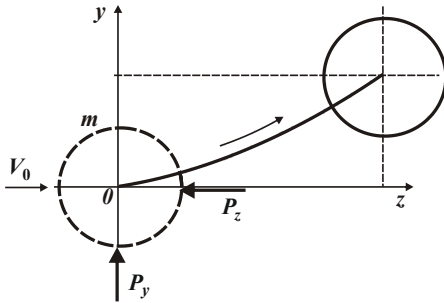


Рис. 1 - Расчетная схема траектории движения абразивного зерна в обрабатываемом материале

Решения дифференциальных уравнений (1) общеизвестны:

$$\begin{cases} z(\tau) = -\frac{P_z}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2} + C_1 \cdot \tau + C_2; \\ y(\tau) = \frac{P_y}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2} + C_3 \cdot \tau + C_4, \end{cases} \quad (2)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные интегрирования, определяются из следующих начальных условий:

$$\begin{cases} z(\tau = 0) = 0; \\ \dot{z}(\tau = 0) = V_0, \end{cases} \quad \begin{cases} y(\tau = 0) = 0; \\ \dot{y}(\tau = 0) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Подчиняя полученные решения (2) начальным условиям (3), имеем

$$\begin{cases} z(\tau) = -\frac{P_z}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2} + V_0 \cdot \tau; \\ y(\tau) = \frac{P_y}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2}. \end{cases} \quad (4)$$

Как видно, в направлении оси oy с течением времени τ абразивное зерно движется равноускоренно с ускорением P_y/m , а в направлении оси oz – равнозамедленно с ускорением $-P_z/m$. При выполнении условия $\dot{z}(\tau) = 0$ абразивное зерно остановится. Время τ и длина пути зерна в металле Z до момента его остановки равны

$$\tau = \frac{m \cdot V_0}{P_z}, \quad (5)$$

$$z = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot P_z}. \quad (6)$$

Время τ и длина пути зерна в металле Z тем больше, чем больше начальная скорость зерна V_0 и меньше ускорение его равнозамедленного движения P_z/m .

Длина пути зерна в металле y до момента его остановки (Рис. 2, а) определится подстановкой зависимости (5) во второе уравнение системы (4):

$$y = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot P_z} \cdot \frac{1}{K_{uz}} = \frac{z}{K_{uz}}, \quad (7)$$

где $K_{uz} = P_z/P_y$.

Очевидно, при $K_{uz} < 1$ координата y абразивного зерна будет больше координаты z , а при $K_{uz} > 1$, наоборот. Следовательно, увеличивая коэффициент K_{uz} , можно уменьшить

координату y и соответственно повысит эффективность процесса резания. Разрешая второе уравнение системы (4) относительно времени τ и подставляя полученное выражение в первое

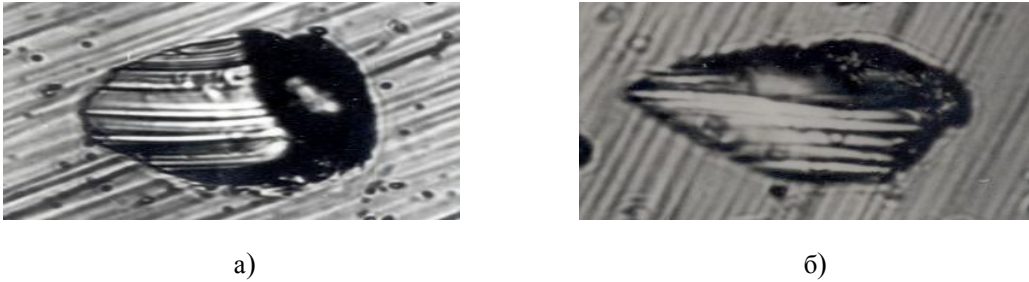


Рис. 2 – Единичный след абразивного зерна на полированных латунных образцах с корнем стружки (а) и с удаленным металлом из следа (б), $\times 200$, полученные при воздействии струи сжатого воздуха, затопленной в абразивной суспензии

уравнение, установим в общем виде связь между координатами z и y абразивного зерна в процессе резания:

$$z = -K_{\text{ш}} \cdot y + V_0 \cdot \sqrt{\frac{2m \cdot y}{P_y}} \quad (8)$$

Приведенное выше решение дает общее представление о характере движения абразивного зерна массой m в процессе его взаимодействия с обрабатываемым материалом под действием неизменяющихся (постоянных) во времени составляющих силы резания P_z и P_y . В действительности, составляющие силы резания зависят от фактической глубины и ширины среза, которые в связи с перемещением абразивного зерна вдоль оси ou будут изменяться. Исходя из этого, составляющие силы резания P_z и P_y определяются:

$$\begin{cases} P_z = v \cdot (a - y) \cdot \sigma; \\ P_y = \frac{v \cdot (a - y) \cdot \sigma}{K_{\text{ш}}}, \end{cases} \quad (9)$$

где a , v – глубина и ширина среза, м, (см. рис. 3);
 σ – условное напряжение резания, Н/м².

В первом приближении будем считать, что σ – постоянная величина. Тогда уравнение движения абразивного зерна в направлении оси ou примет вид

$$m \cdot \ddot{y} = \frac{v \cdot (a - y) \cdot \sigma}{K_{\text{ш}}} \quad \text{или} \quad \ddot{y} + k^2 \cdot y = \frac{v \cdot a \cdot \sigma}{m \cdot K_{\text{ш}}}, \quad (10)$$

$$\text{где } k^2 = \frac{v \cdot \sigma}{m \cdot K_{\text{ш}}}.$$

Частное решение дифференциального уравнения (10):

$$y = A, \quad (11)$$

где $A = a$.

Общее решение дифференциального уравнения (10):

$$y = C_1 \cdot \sin k\tau + C_2 \cdot \cos k\tau + a, \quad (12)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий:

$$\begin{cases} y(\tau = 0) = 0; \\ \dot{y}(\tau = 0) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Подчиняя полученное решение (12) начальным условиям (13), имеем

$$y = a \cdot (1 - \cos k\tau). \quad (14)$$

Графічески зависимость (14) показана на рис. 4, а. Как видно, с течением времени τ координата y абразивного зерна изменяется по гармоническому закону, увеличиваясь в диапазоне $k\tau = 0 \dots \pi$ от 0 до $2a$. Очевидно, в реальных условиях координата y не может превышать толщину среза a . Поэтому решением дифференциального уравнения (10) является диапазон изменения величины $k\tau = 0 \dots \pi/2$. При условии $k\tau = \pi/2$ абразивное зерно выходит из контакта с обрабатываемым материалом. Тогда время τ зерна в обрабатываемом материале определится зависимостью:

$$\tau = \frac{\pi}{2k} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{m \cdot K_{uu}}{\epsilon \cdot \sigma}}. \quad (15)$$

Время τ тем больше, чем больше масса абразивного зерна m , коэффициент $K_{uu} = P_z / P_y$ и меньше ширина среза ϵ и условное напряжение резания σ .

Скорость перемещения абразивного зерна $\dot{y}(\tau)$ в обрабатываемом материале в направлении оси oy , исходя из зависимости (14), подчиняется синусоидальному закону:

$$\dot{y}(\tau) = a \cdot k \cdot \sin k\tau.$$

Графически характер изменения скорости $\dot{y}(\tau)$ во времени показан на рис. 4, б. При изменении угла $k\tau$ в пределах $0 \dots \pi/2$ скорость $\dot{y}(\tau)$ возрастает. Следовательно, при контакте абразивного зерна с обрабатываемым материалом скорость $\dot{y}(\tau)$ изменяется в пределах от 0 до максимального значения $a \cdot k$, что обусловлено действием «выталкивающей» силы P_y . Зная характер изменения координаты y во времени, можно по зависимости (9) определить составляющие силы резания P_z и P_y по формуле (16):

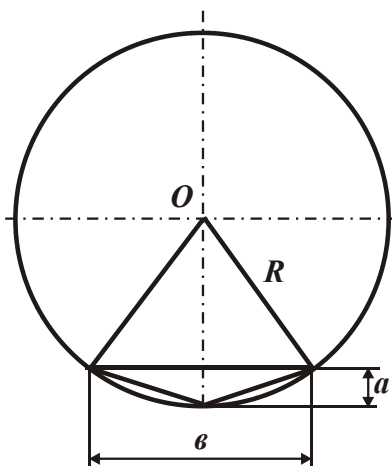


Рис. 3 – Расчетная схема параметров среза a и ϵ абразивным зерном условно сферической формы радиусом R

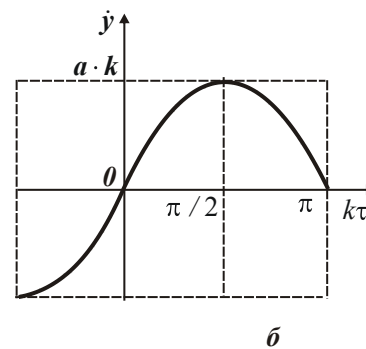
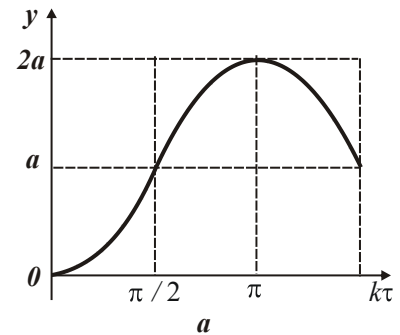


Рис. 4 – Характер изменения координаты y (а) и скорости \dot{y} (б) абразивного зерна с течением времени обработки τ .

$$\begin{cases} P_z = \epsilon \cdot a \cdot \sigma \cdot \cos k\tau; \\ P_y = \frac{\epsilon \cdot a \cdot \sigma \cdot \cos k\tau}{K_{uu}}. \end{cases} \quad (16)$$

Как видно, составляющие силы резания P_z и P_y изменяются по закону косинуса, т. е. в начальный момент времени они принимают максимальные значения, а затем уменьшаются вплоть до нуля (при $k\tau = \pi/2$) в момент выхода абразивного зерна из контакта с обрабатываемым материалом.

Учитывая переменный характер составляющих силы резания во времени, уточним полученное выше решение (2) для условия $P_z = const$.

Дифференциальное уравнение движения абразивного зерна в направлении оси oz с учетом зависимости (16) примет вид

$$m \cdot \ddot{z} = -a \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot \cos k\tau. \quad (17)$$

Частное решение дифференциального уравнения (17) будем искать в виде

$$z = A_1 \cdot \cos k\tau, \quad (18)$$

где A_1 – неопределенная величина.

Подставляя зависимость (18) в уравнение (17), имеем

$$A_1 = a \cdot K_u. \quad (19)$$

Общее решение дифференциального уравнения (17):

$$z = C_1 \cdot \tau + C_2 + A_1 \cdot \cos k\tau, \quad (20)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий:

$$\begin{cases} z(\tau=0) = 0; \\ \dot{z}(\tau=0) = V_0. \end{cases} \quad (21)$$

Подчиняя полученное решение (20) начальным условиям (21), получим:

$C_1 = V_0; C_2 = -a \cdot K_u$. Тогда

$$z = V_0 \cdot \tau - a \cdot K_u \cdot (1 - \cos k\tau), \quad (22)$$

$$\dot{z} = V_0 - a \cdot K_u \cdot k \cdot \sin k\tau. \quad (23)$$

Как видно, с течением времени τ скорость движения абразивного зерна $\dot{z}(\tau)$ в направлении оси oz уменьшается. Таким образом, показано, что с течением времени τ скорость движения абразивного зерна $\dot{y}(\tau)$ растет, а скорость $\dot{z}(\tau)$, наоборот, уменьшается вплоть до нуля. В итоге зерно под действием “выталкивающей” силы P_y стремится выйти из контакта с обрабатываемым материалом.

При условии $\dot{z}(\tau) = 0$ абразивное зерно остановится. Исходя из данного условия с учетом зависимости (23), определим время контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом:

$$\sin k\tau = \frac{V_0}{a} \cdot \sqrt{\frac{m}{\epsilon \cdot \sigma \cdot K_u}} \quad (24)$$

или

$$k\tau = \arcsin \frac{V_0}{a} \cdot \sqrt{\frac{m}{\epsilon \cdot \sigma \cdot K_u}}. \quad (25)$$

Из зависимости (25) следует, что чем больше V_0 , m и меньше a , ϵ , K_u , σ , тем больше $k\tau$, т. е. время контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом и, соответственно, выше эффективность процесса обработки. При $k\tau < \pi/2$, исходя из рис. 4, абразивное зерно остановится в обрабатываемом материале. При $k\tau > \pi/2$, наоборот, кинетической энергии абразивного зерна будет достаточно, чтобы выйти из контакта с обрабатываемым материалом без остановки и осуществить полный срез обрабатываемого материала (Рис. 2, б).

Произведем расчет величины $k\tau$ для следующих исходных данных: $V = 30$ м/с; $a = 3$ мкм; $\sigma = 1000$ МПа; $K_u = 0,5$. Массу абразивного зерна m определим по зависимости $m = \rho \cdot v$, где ρ – плотность абразивного материала (для карбида кремния $\rho = 3,5$ г/см³); $v = \pi \cdot D^3 / 6$ –

объем абразивного зерна (в форме сферы диаметром $2R=D$). Примем $D=50$ мкм. Ширину среза v , образованного абразивным зерном в форме сферы радиусом R (рис. 3), определим по зависимости:

$$v = 2 \cdot \sqrt{R^2 - (R - a)^2} \approx 2 \cdot \sqrt{D \cdot a} \quad (26)$$

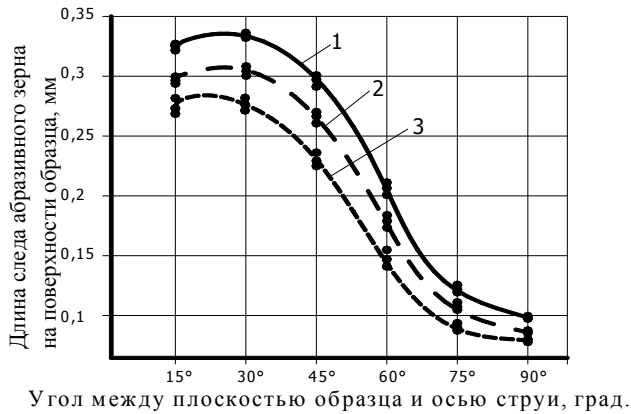


Рис. 5 – Экспериментальная зависимость длины следа абразивного зерна на поверхности полированного латунного образца от угла между его поверхностью и осью струи сжатого воздуха: 1 – зернистость абразива 630 мкм; 2 – 400 мкм; 3 – 200 мкм.

Подставляя исходные данные в зависимость (24), получим $\sin k\tau = 0,432$, соответственно $k\tau \approx 26^\circ$. Следовательно, справедливо условие $k\tau < \pi/2$ и абразивное зерно остановится в обрабатываемом материале, образуя неполный срез.

Полученные данные хорошо согласуются с экспериментальными. Из графика на рис. 5 видно, что максимальная длина следа, а следовательно, и максимальное время контакта соответствует углу $\approx 26^\circ$.

Процент столкновений, при которых кинетической энергии абразивного зерна оказалось достаточно, чтобы выйти из контакта с обрабатываемым материалом без остановки и осуществить полный срез обрабатываемого материала определялся двумя способами.

Первый из которых заключается в подсчете количества следов абразивных зерен на контрольных образцах, из которых удален металл в пределах видимости объектива микроскопа. Полированные образцы предварительно свободно помещали в рабочую камеру и обрабатывали в течение 1 мин. Подсчет общего количества следов и - следов с удаленным корнем стружки позволил определить, что последние составляют $\approx 5\%$ от общего числа. Поскольку у остальных следов корни стружки сохранились, что свидетельствует о целостности металла, предполагалось, что сьем металла осуществляется лишь в этих $\approx 5\%$ столкновений абразивных зерен и деталей.

Полученный результат проверен вторым способом. Контрольные образцы взвешивали до и после 30-ти минутной обработки. Далее определяли массу металла, удаленного в результате обработки, приходящуюся на единицу поверхности образца, а также массу металла, удаленного с единичного следа.

$$M_1 = \frac{M}{S} = \frac{0,02}{3500} = 5,7 \times 10^{-6} \text{ г/мм}^2 \quad (27)$$

где M - сьем металла с 10 латунных образцов размером $10 \times 15 \times 1$, г;
 S - полная боковая поверхность 10 образцов, мм^2 .

Масса металла, удаленного с единичного следа, определялась посредством замера геометрических параметров среднего следа, через его объем и плотность материала:

$$M_0 = 0,5a \times b \times l \times \rho = 0,5 \times 0,03 \times 0,025 \times 0,003 \times 0,0083 = 1,8 \times 10^{-8} \text{ г} \quad (28)$$

где a, b, l , - глубина, ширина и длина, царапины;
 ρ – плотность материала.

Основываясь на предположении о принадлежности удаленного в результате обработки металла только к одной разновидности следов, можно определить их число, разделив металлосъем, отнесенный к единице поверхности на массу металла, удаленного с единичного следа.

$$N_0 = \frac{M_1}{M_0} = \frac{5,7 \times 10^{-6}}{1,8 \times 10^{-8}} = 316 \text{ шт} \quad (29)$$

Полученные расчетное число следов с удаленным металлом и общее число следов, находящихся в поле зрения объектива микроскопа, позволяют вычислить процент следов, а, следовательно, и столкновений абразивного зерна и детали, при которых снимается металл.

$$N_1 = \frac{n \times T}{S_{\text{микро}}} = \frac{18 \times 30}{0,08} = 6750 \text{ шт}, \quad (30)$$

где n – общее число следов, находящихся в поле зрения объектива микроскопа, полученных за 1 мин обработки;

T – время обработки образца;

$S_{\text{микро}}$ – площадь поля зрения объектива микроскопа.

$$\frac{N_0 \times 100 \cdot \%}{N_1} = \frac{316 \times 100}{6750} = 4,69 \text{ \%} \quad (31)$$

Таким образом, число столкновений абразивных зерен и обрабатываемых деталей, в результате которых срезаются частицы металла, не превышает 5 % от числа всех столкновений.

С целью подтверждения правомерности полученных зависимостей и практических результатов следует продолжить эксперименты на деталях различной конфигурации.

Выводы

1. Эффективность процесса обработки тем выше, чем больше начальная скорость, масса абразивного зерна и чем меньше глубина и ширина срезаемого слоя, а также условное напряжение резания. Оптимальный угол воздействия абразивного зерна на деталь 25 – 30.⁰

2. Доля столкновений абразивных зерен с обрабатываемыми деталями, в результате которых осуществляется сьем металла, не превышает 5 %.

Список использованных источников:

1. Андилахай А. А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А. А. Андилахай. – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с.
2. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.
3. Проволоцкий А. Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. / А. Е. Проволоцкий // К.: Техника, 1989. - 177с.
4. Андилахай А. А. Теоретические и экспериментальные исследования формообразования поверхностей деталей в процессе обработки свободными абразивными зёрнами. / А. А. Андилахай // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту.: Зб. наук. пр. - Маріуполь, 2000. Вип. 10. - С. 164-172.
5. Андилахай А. А. Исследование струй сжатого воздуха, подаваемых в рабочую камеру, заполненную абразивной суспензией. /А. А. Андилахай // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту.: Зб. наук. пр. - Маріуполь, 2003. Вип. 13. - С. 159-162.

Рецензент: М. В. Маргулис
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 26.11.2009