

## ТЕХНІЧНІ НАУКИ

УДК 621.921

Андилахай А. А.

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ  
АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ЗАТОПЛЕННЫМИ СТРУЯМИ**

Перспективным направлением развития струйно-абразивной поверхностной обработки мелкогабаритных деталей малой жесткости и сложной пространственной формы стало создание метода абразивной обработки деталей затопленными струями. Данный метод исключает основной недостаток струйно-абразивных установок – абразивный износ каналов сопел или эжекционных насадок, т. к. абразивные зерна присоединяются к струям сжатого воздуха за их пределами. Необходимость создания данного метода продиктована тем, что отделочная обработка (зачистка) деталей малой жесткости массой до 3 г в настоящее время осталась немеханизированной и часто осуществляется вручную, что приводит к чрезвычайно высокой трудоемкости изготовления этих деталей. Поэтому определение технологических возможностей и областей эффективного применения предложенного метода абразивной обработки деталей затопленными струями является актуальной задачей.

Вопросам струйно-абразивной обработки в научно-технической литературе уделено достаточно большое внимание [1–4]. Это относится к вопросам как технологического, так и конструкторского обеспечения обработки. Вместе с тем, вопросы динамики взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым материалом при струйно-абразивной обработке в полной мере не изучены: отсутствуют теоретические решения о траектории движения абразивного зерна в обрабатываемом материале, закономерностях формирования микросреза и силовой напряженности процесса микрорезания. Не приведены практические рекомендации по управлению динамикой струйно-абразивной обработки и в частности предложенного метода абразивной обработки деталей затопленными струями. Это ограничивает возможности научно обоснованного выбора оптимальных условий обработки.

Цель работы – определение условий повышения эффективности применения метода абразивной обработки деталей затопленными струями на основе исследований динамики взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым материалом.

В отличие от обработки связанным абразивом (шлифовании, хонинговании и т. д.), при струйно-абразивной обработке режущее зерно в момент соударения с обрабатываемым материалом теряет скорость вплоть до нуля. Поэтому длина среза зависит от кинетической энергии движущегося зерна: чем она больше, тем больше длина среза. Сравнивая кинетическую энергию:

$$W = \frac{m \times V_0^2}{2}$$

с работой резания:

$$A = P_z \times l,$$

определим длину среза отдельным зерном:

$$l = \frac{m \times V_0^2}{2 \times P_z}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса зерна, кг;

$V_0$  – скорость зерна в начале его соударения с материалом, м/с;

$P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н.

Из зависимости (1) вытекает, что увеличить длину среза  $l$  и, соответственно, производительность струйно-абразивной обработки можно увеличением параметров  $m$ ,  $V$  и уменьшением  $P_z$ . Рассматривая тангенциальную составляющую силы резания в виде:

$$P_z = \sigma \times S [5],$$

из зависимости (1) можно определить условное напряжение резания:

$$\sigma = \frac{m \times V_0^2}{2 \times \mathcal{G}_{\text{срез}}}, \quad (2)$$

где  $\mathcal{G}_{\text{срез}} = l \times S$  – объем материала, снимаемого одним зерном, м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь поперечного сечения среза, м<sup>2</sup>.

Используя экспериментальные значения параметров  $m$ ,  $V$  и  $\mathcal{G}_{\text{срез}}$ , из зависимости (2) можно установить количественные значения параметра  $\sigma$ . Для этого массу зерна представим в виде  $m = \rho \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 / 6$ , где  $\rho$  – плотность материала абразивного зерна ( $\rho = 3,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>);  $\bar{X}$  – размер абразивного зерна ( $\bar{X} = 630$  мкм). Тогда  $m = 0,459 \cdot 10^{-6}$  кг.

Как установлено экспериментально, при струйно-абразивной обработке латуни геометрические параметры единичного среза для  $V = 20$  м/с принимают значения: длина среза –  $l = 10$  мкм, ширина среза –  $b = 6$  мкм; глубина внедрения зерна –  $t = 6$  мкм, тогда  $\mathcal{G}_{\text{срез}} = l \times b \times t / 6 = 10 \cdot 6 \cdot 6 / 6 = 60$  мкм<sup>3</sup> =  $60 \cdot 10^{-18}$  м<sup>3</sup> и  $\sigma = 15 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup> [1]. Предел прочности на растяжение латуни равен  $\sigma_g = 360$  Н/мм<sup>2</sup>.

Как видно, расхождение значений  $\sigma$  и  $\sigma_g$  существенно и обусловлено особенностями процесса резания в связи с высокой пластичностью латуни и неблагоприятными условиями стружкообразования, а также интенсивным трением режущего зерна с обрабатываемым материалом (латунью). Это согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе [6], согласно которым параметр  $\sigma$  при микрорезании латуни по жесткой схеме (с постоянной скоростью резания  $V_0 = 1$  м/с и толщиной среза 30 мкм) специально изготовленным индентором (алмазным конусом с углом при вершине  $2\alpha = 120^\circ$ ) на маятниковом приборе принимает значение  $\sigma = 12 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup>.

Таким образом, определено условное напряжение резания (энергоемкость) процесса струйно-абразивной обработки и показано, что оно примерно такое же, как и при микрорезании единичным зерном с неизменной во времени скоростью резания [6]. Следовательно, в первом приближении для анализа силовой напряженности (энергоемкости обработки) процесса струйно-абразивной обработки может быть использована зависимость (2).

Установим характер движения абразивного зерна массой  $m$  под действием возникающей в процессе съема обрабатываемого материала силы резания  $P$ , которую можно разложить на две составляющие: тангенциальную  $P_z$  и радиальную  $P_y$ . Предположим, абразивное зерно движется с начальной скоростью  $V_0$  в направлении оси  $oz$ , рис. 1. Тогда уравнения его движения во времени  $\tau$  в направлениях осей  $oz$  и  $oy$  под действием возникающих составляющих силы резания опишутся:

$$\begin{cases} m \times \ddot{z}(\tau) = -P_z; \\ T \times \ddot{y}(\tau) = P_y, \end{cases} \quad (3)$$

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

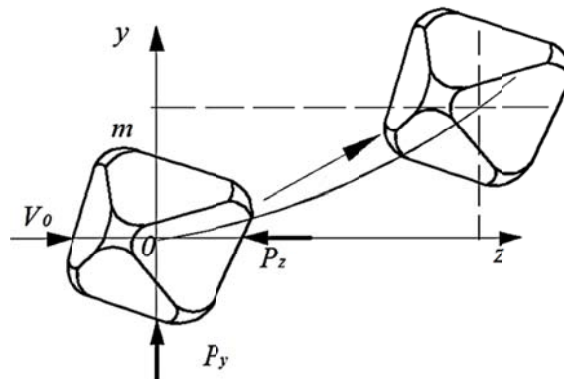


Рис. 1. Расчетная схема траектории движения абразивного зерна в обрабатываемом материале

Решения дифференциальных уравнений (3) общеизвестны и с учетом начальных условий:

$$\begin{cases} z(\tau=0)=0; & y(\tau=0)=0; \\ \dot{z}(\tau=0)=V_0; & \dot{y}(\tau=0)=0 \end{cases} \quad (4)$$

принимают вид:

$$\begin{cases} z(\tau) = -\frac{P_z}{m} \times \frac{\tau^2}{2} + V_0 \times \tau; \\ y(\tau) = \frac{P_y}{m} \times \frac{\tau^2}{2}, \end{cases} \quad (5)$$

откуда:

$$y = \frac{z}{K_{uz}},$$

где  $K_{uz} = P_z / P_y$ .

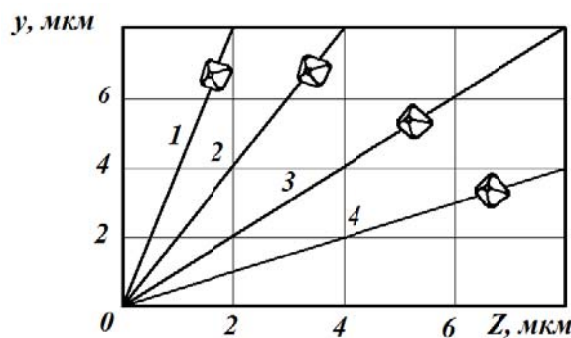


Рис. 2. Функциональная связь между координатами  $y$  и  $z$  движущегося абразивного зерна:

1 –  $K_{uz} = 0,25$ ; 2 –  $K_{uz} = 0,5$ ; 3 –  $K_{uz} = 1,0$ ; 4 –  $K_{uz} = 2,0$

На рис. 2 графічно показана функціональна зв'язь між координатами  $y$  і  $z$  рухомого абразивного зерна. По суті, приведені графіки відповідають траєкторіям руху абразивного зерна. При умові  $K_{uu} < 1$  координата  $y$  абразивного зерна буде більшою за координату  $z$ , а при  $K_{uu} > 1$ , навпаки. Отже, збільшуючи коефіцієнт  $K_{uu}$ , можна збільшити координату  $z$ , т. є. збільшити довжину різання окремих зерном і відповідно підвищити ефективність процесу різання.

В реальних умовах обробки складові сили різання залежать від фактичної товщини різання, яка в зв'язі з переміщенням абразивного зерна вздовж осі  $oy$  буде змінюватися. Тоді диференціальне рівняння руху абразивного зерна в напрямку осі  $oy$  опишеться:

$$m \times \ddot{y} = \frac{v \times (a - y) \times \sigma}{K_{uu}}, \quad (6)$$

де  $a, v$  – товщина і ширина різання, м.

Його рішення з урахуванням початкових умов:

$$\begin{cases} y(\tau = 0) = 0; \\ \dot{y}(\tau = 0) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

приймає вигляд:

$$y = a \times (1 - \cos kt), \quad (8)$$

де  $k = \frac{v \times \sigma}{m \times K_{uu}}$ .

Диференціальне рівняння руху абразивного зерна в напрямку осі  $oz$  з урахуванням залежності (8) опишеться:

$$m \times \ddot{z} = -a \times v \cdot \sigma \cdot \cos k\tau. \quad (9)$$

Його рішення з урахуванням початкових умов:

$$\begin{cases} z(\tau = 0) = 0; \\ \dot{z}(\tau = 0) = V_0 \end{cases} \quad (10)$$

приймає вигляд:

$$z = V_0 \times \tau - a \times K_{uu} \times (1 - \cos k\tau), \quad (11)$$

$$\dot{z} = V_0 - a \times K_{uu} \times k \times \sin k\tau. \quad (12)$$

При умові  $\dot{z}(\tau) = 0$  абразивне зерно зупиниться. Виходячи з цього умови з урахуванням залежності (12), визначимо час контакту абразивного зерна з оброблюваним матеріалом:

$$kt = \arcsin \frac{V_0}{a} \times \sqrt{\frac{m}{v \sigma K_{uu}}}. \quad (13)$$

З залежності (13) випливає, що чим більше  $V_0$ ,  $m$  і менше  $a$ ,  $v$ ,  $K_{uu}$ ,  $\sigma$ , тим більше час контакту абразивного зерна з оброблюваним матеріалом і вище ефективність процесу обробки.

Произведем численные расчеты величины  $z$  (длины среза) в соответствии с зависимостью (11) для случая, когда кинетической энергии абразивного зерна достаточно, чтобы выйти из контакта с обрабатываемым материалом без остановки и осуществить полный срез обрабатываемого материала. Для условия  $y = a$  справедливо  $\cos k\tau = 0$  и зависимость (11) принимает упрощенный вид:

$$z = V_0 \times \tau - a \times K_{uu}. \quad (14)$$

Рассмотрим следующие исходные данные:  $V = 30$  м/с;  $a = 3$  мкм;  $\sigma = 10000$  Н/мм<sup>2</sup>;  $K_{uu} = 0,5$ . Масса абразивного зерна  $m = \rho \cdot v$ , где  $\rho$  – плотность абразивного материала (для алмаза  $\rho = 3,5$  г/см<sup>3</sup>);  $v = \pi \cdot D^3 / 6$  – объем абразивного зерна (в форме шара диаметром  $D$ ). Примем  $D = 50$  мкм. Ширину среза  $\vartheta$ , образованного абразивным зерном в форме шара радиусом  $R$ , определим по зависимости:  $\vartheta = 2 \cdot \sqrt{D \cdot a}$ .

В результате расчетов установлено:  $\vartheta = 24,5$  мкм;  $v = 65,4 \cdot 10^3$  мкм<sup>3</sup>;  $m = 229 \cdot 10^{-9}$  г;  $\tau = 3,41 \cdot 10^{-8}$  с. Подставляя эти значения в зависимость (14), получено отрицательное значение  $z$ . Это свидетельствует о том, что кинетической энергии движущегося абразивного зерна недостаточно для его внедрения в обрабатываемый материал и образования среза, т. е. процесс микрорезания в данном случае будет отсутствовать.

Чтобы увеличить кинетическую энергию движущегося абразивного зерна, примем  $D = 100$  мкм. В этом случае время  $\tau$  увеличивается до значения  $3,41 \cdot 10^{-8}$  с, а величина  $z$ , рассчитанная по зависимости (14), принимает положительное значение, равное 0,94 мкм, т. е. имеет место процесс микрорезания.

Расчетами установлено (рис. 3), что с увеличением диаметра абразивного зерна  $D$  величина  $z$  непрерывно увеличивается, а это ведет к увеличению длины среза и интенсификации процесса обработки.

Необходимо отметить, что траектории движения абразивного зерна, графически показанные на рис. 4, существенно отличаются от траекторий движения абразивного зерна, графически показанных на рис. 2. Следовательно, учет изменения толщины среза и силы резания при обработке приводят к изменению траектории движения абразивного зерна – она становится криволинейной (вместо прямолинейной). Поэтому для более полного анализа динамики взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом при струйно-абразивной обработке необходимо учитывать изменение толщины среза и силы резания во времени.

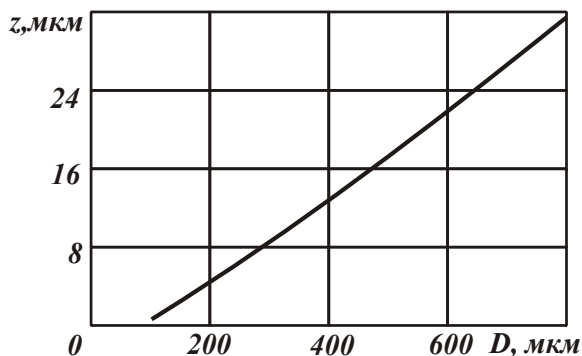


Рис. 3. Зависимость величины  $z$  от диаметра абразивного зерна  $D$

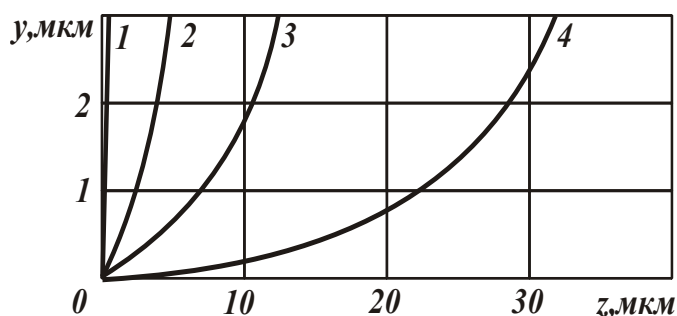


Рис. 4. Траектории движения абразивного зерна:

- 1 –  $D = 100$  мкм; 2 –  $D = 200$  мкм;  
3 –  $D = 400$  мкм; 4 –  $D = 800$  мкм

На рис. 4 графически показаны траектории движения абразивного зерна для различных значений его диаметра  $D$ . Как видно, при  $D = 100$  мкм абразивное зерно фактически не производит среза материала. Интенсивный срез материала начинается при  $D > 400$  мкм. Следовательно, для эффективного осуществления процесса струйно-абразивной обработки и в частности предлагаемого метода абразивной обработки затопленными струями необходимо использовать крупнозернистый абразив, обеспечивающий достаточную для съема материала кинетическую энергию движущегося абразивного зерна.

## ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель динамики абразивной обработки деталей затопленными струями, позволяющая рассчитать траекторию движения абразивного зерна, длину и толщину отдельного среза, законы изменения скорости резания и силы резания во времени, условное напряжение резания (энергоёмкость обработки). Это открывает новые возможности научно обоснованного выбора оптимальных условий струйно-абразивной обработки.

Расчетно-экспериментальным путем установлено, что в процессе взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом (латунью) при струйно-абразивной обработке условное напряжение резания принимает значение, почти в 50 раз превышающее предел прочности обрабатываемого материала на растяжение. Это согласуется с известными экспериментальными данными, полученными при микрорезании латуни единичным зерном, и указывает на неблагоприятные условия стружкообразования и интенсивное трение режущего зерна с обрабатываемым материалом (латунью). Установленное значение условного напряжения резания приводит в соответствие теорию и практику струйно-абразивной обработки и позволяет расчетным путем определить силу резания, производительность и другие параметры обработки.

Получено теоретическое решение движения абразивного зерна в обрабатываемом материале при струйно-абразивной обработке. Установлено, что в этом случае скорость движения зерна во времени переменна и подчиняется косинусоидальному закону, т. е. уменьшается с течением времени обработки. Показано, что увеличить длину среза отдельным зерном и соответственно производительность обработки можно за счет увеличения начальной скорости движения зерна и его массы (размера).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андилахай А. А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А. А. Андилахай. – Мариуполь : ПГТУ, 2006. – 190 с.
2. Цыгановский А. Б. Экспериментальное определение скорости абразивных частиц в затопленной гидроабразивной струе / А. Б. Цыгановский // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ : вид-во СНУ ім В. Даля, 2008. – С. 92–97.
3. Цыгановский А. Б. О влиянии геометрических характеристик струйных аппаратов на производительность гидроабразивной обработки затопленными струями / А. Б. Цыгановский // Вопросы вибрационной технологии. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2003. – С. 109–112.
4. Сирота А. А. Эффективность отделочно-зачисной обработки ударным гидроабразивным воздействием свободной рабочей среды / А. А. Сирота, В. Я. Мицык // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ : вид-во СНУ ім В. Даля, 2011. – Вип. 45. – С. 353–358.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. В 10 т. Т. 1. Механика резания материалов / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 580 с.
6. Синтетические алмазы в машиностроении / под ред. В. Н. Бакуля. – К. : Наукова думка, 1976. – 351 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Суглобов В. В.

Статья поступила в редакцию 05.09.2012 г.