

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

**Новиков Ф.В., Андилахай А.А.**  
(ХНЭУ, г. Харьков, Украина)

### Введение

Струйно-абразивная обработка получила применение при очистке заготовок от окалины, чистовой доводке деталей, в том числе и сложной формы [1]. Она обеспечивает уменьшение шероховатости поверхности, получение поверхности без направленных следов механической обработки, создание наклепа для повышения усталостной прочности, получение поверхностей с высокой капиллярностью, повышение износостойкости и сцепления с покрытиями и красками, увеличение стойкости инструмента, устранение следов механической обработки, удаление ржавчины и очистку поверхностей от загрязнения и т.д. [2].

Струйно-абразивная обработка основана на реализации эффекта ударно-импульсного действия на поверхность заготовки потока свободного абразива, в результате чего происходит образование тончайших микросрезов и съем обрабатываемого материала. Чтобы определить оптимальные условия обработки, важно знать закономерности процесса взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым материалом и в первую очередь закономерности формирования энергетических показателей обработки. Поэтому целью настоящей работы является теоретический анализ условий стружкообразования при резании отдельным абразивным зерном и определение параметров силовой напряженности процесса обработки.

### Основное содержание работы

Для решения поставленной задачи воспользуемся теоретическим подходом, предложенным в работе [3] применительно к процессу резания с переменной толщиной среза, рис. 1. Предположим, что со стороны движущегося со скоростью  $V_0$  абразивного зерна на обрабатываемый материал действуют тангенциальная  $P_z$  и радиальная  $P_y$  составляющие силы резания, которые вызывают периодическое разрушение (сдвиг) материала вдоль условной плоскости сдвига, расположенной под углом  $\beta$  к направлению движения зерна. Для определения положения условной плоскости сдвига обрабатываемого материала установим касательное напряжение  $\tau$ , возникающее в данной плоскости:

$$\tau = \frac{P_z \cdot \cos \beta - P_y \cdot \sin \beta}{\nu \cdot L}, \quad (1)$$

где  $\nu$  – ширина среза, м;  $L = OA$  – длина условной плоскости сдвига материала, м.

Длину  $L$  найдем на основе решения двух тригонометрических уравнений, вытекающих из рис. 1:

$$\begin{cases} y = a + \operatorname{tg} \alpha \cdot x, \\ y = \operatorname{tg} \beta \cdot x, \end{cases} \quad (2)$$

где  $x$  и  $y$  – координаты точки пересечения условной плоскости сдвига  $OA$  с обрабатываемой поверхностью  $BA$ ;  $a$  – толщина среза, м;  $\alpha$  – угол входа абразивного зерна в обрабатываемый материал.

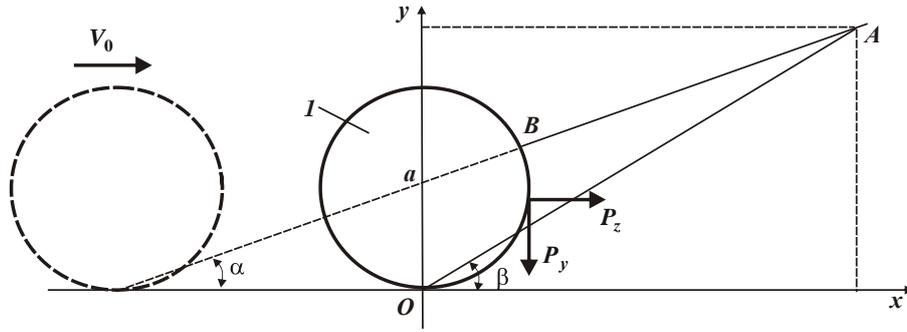


Рис. 1. Расчетная схема процесса стружкообразования при резании единичным абразивным зерном 1.

Решая систему уравнений (2), имеем

$$x = \frac{a}{(\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha)}, \quad (3)$$

$$L = \frac{x}{\cos \beta} = \frac{a}{\cos \beta \cdot (\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha)}. \quad (4)$$

Преобразуя зависимость (1), с учетом зависимости (4), получим

$$\tau = \frac{P_y \cdot \cos \beta \cdot (\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha)}{v \cdot a} \cdot (K_{us} \cdot \cos \beta - \sin \beta), \quad (5)$$

где  $K_{us} = P_z / P_y$  – коэффициент шлифования, определяемый по зависимости [4]:  $K_{us} = \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)$ ;  $\psi$  – условный угол трения абразивного зерна с обрабатываемым материалом;  $\gamma$  – отрицательный передний угол режущего абразивного зерна.

Обозначая  $\psi + \gamma = \psi_1$  и рассматривая  $K_{us} = \operatorname{ctg} \psi_1$ , зависимость (5) выразится:

$$\tau = \frac{P_y}{2 \cdot v \cdot a \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha} \cdot [\sin(2\beta - \alpha + \psi_1) - \sin(\alpha + \psi_1)]. \quad (6)$$

Максимальное касательное напряжение  $\tau_{max}$ , определяющее положение условной плоскости сдвига обрабатываемого материала, будет достигаться при условии  $\sin(2\beta - \alpha + \psi_1) = 1$ . Откуда

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha - \psi_1}{2}. \quad (7)$$

Как видно, условный угол сдвига обрабатываемого материала  $\beta$  тем больше, чем больше угол входа абразивного зерна в обрабатываемый материал  $\alpha$  и меньше угол  $\psi_1 = \psi + \gamma$ , т.е. чем меньше условный угол трения обрабатываемого материала с абразивным зерном  $\psi$  (или коэффициент трения  $f$ ) и отрицательный передний угол режущего абразивного зерна  $\gamma$ . Подставляя зависимость (7) в (6), определим  $\tau_{max}$ :

$$\tau_{max} = \frac{P_y}{v \cdot a \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha} \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} - \frac{\psi_1}{2} \right). \quad (8)$$

Сдвиг обрабатываемого материала в условной плоскости  $OA$  произойдет при условии достижения максимальным касательным напряжением  $\tau_{max}$  предела прочности на сдвиг обрабатываемого материала  $\tau_{сдв}$ . Тогда, принимая  $\tau_{max} = \tau_{сдв}$ , из зависимости (8) можно определить радиальную составляющую силы резания  $P_y$ :

$$P_y = 2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв} \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}. \quad (9)$$

Соответственно, тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  равна

$$P_z = P_y \cdot K_{us} = P_y \cdot \operatorname{ctg} \psi_1 = 2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв} \cdot \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}. \quad (10)$$

Если представить тангенциальную составляющую силы резания в виде  $P_z = a \cdot v \cdot \sigma$ , то условное напряжение резания  $\sigma$  равно

$$\sigma = \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{2}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}.$$

Из зависимости (10) вытекает неоднозначный характер изменения тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  с увеличением углов  $\psi_1$  и  $\alpha$ . С одной стороны, за счет числителя происходит уменьшение  $P_z$  с увеличением углов  $\psi_1$  и  $\alpha$ , а с другой стороны, за счет знаменателя – увеличение  $P_z$ . Следовательно, существуют экстремальные зависимости тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  от углов  $\psi_1$  и  $\alpha$ . Для определения экстремума функции  $P_z$  подчиним зависимость (10) необходимому условию экстремума:  $(P_z)'_{\alpha} = 0$ . После преобразований получим

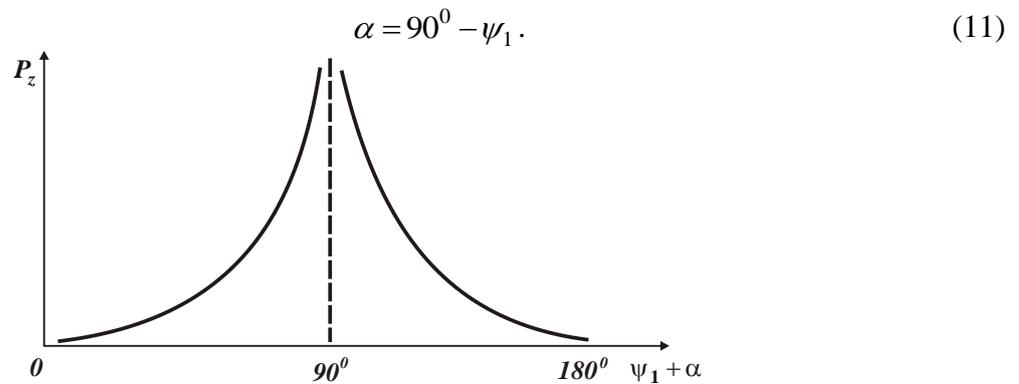


Рис. 2. Общий вид зависимости  $P_z$  от угла  $\psi_1 + \alpha$ .

Подставляя зависимость (11) в (10), видно, что в точке экстремума функция  $P_z$  обращается в бесконечность, рис. 2. Это связано с тем, что угол сдвига  $\beta$ , определяемый зависимостью (7), становится равным углу  $\alpha$ . В результате, исходя из рис. 1, условная плоскость сдвига  $OA$  не пересекается с обрабатываемой поверхностью  $BA$  и процесс стружкообразования отсутствует, имеет место лишь упруго-пластическое деформирование обрабатываемого материала. Из этого вытекает, что существенно уменьшить тангенциальную составляющую силы резания  $P_z$  можно при выполнении двух условий:

$$\psi_1 + \alpha < 90^{\circ}; \quad 90^{\circ} < \psi_1 + \alpha < 180^{\circ}. \quad (12)$$

В первом случае необходимо уменьшать как угол  $\psi_1$ , так и угол  $\alpha$ . Во втором случае (при относительно большом значении угла  $\psi_1 \rightarrow 90^{\circ}$ ) угол  $\alpha$  необходимо, наоборот, увеличивать вплоть до значения  $\alpha \rightarrow 90^{\circ}$ . Очевидно, угол  $\psi_1 = \psi + \gamma$  за счет относительно большого отрицательного переднего угла режущего абразивного зерна  $\gamma = 45-60^{\circ}$  может принимать значения, близкие к  $90^{\circ}$ . Поэтому реализовать первый случай возможно лишь при весьма малых значениях угла  $\alpha \rightarrow 0$ . Более реальным следует рассматривать второй случай, реализуемый при относительно больших значениях угла  $\alpha$ .

Таким образом показано, что в общем случае угол  $\alpha$  может изменяться в широких пределах, принимая значения  $0 < \alpha < 90^{\circ}$ . Это указывает на возможность эффективного применения прогрессивного способа струйно-абразивной гидроротационной обработки (зачистки) мелких деталей массой до 3 г и имеющих сложную пространственную форму [5]. В этом случае реализуется схема абразивной обработки деталей затопленными струями [6], согласно которой возможны различные случаи столкновения движущихся обрабатываемых

деталей и абразивных зерен, определяемые углом  $0 < \alpha < 90^\circ$ . Поскольку режущее зерно по форме приближается к форме шара, то, как отмечалось выше, угол  $\psi_1 + \alpha > 90^\circ$  и фактически всегда будет осуществляться процесс стружкообразования при взаимодействии абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Это обеспечивает меньшие энергетические затраты на обработку, чем при пластическом деформировании металлов без отделения стружки. Таким образом установлено, что струйно-абразивную обработку эффективно выполнять как с фиксированным углом входа абразивного зерна в обрабатываемый материал  $\alpha$ , так и не с фиксированным углом  $\alpha$ , реализуемым, например, в схеме абразивной обработки деталей затопленными струями [6].

Необходимо отметить, что данное условие справедливо при использовании режущего элемента в форме шара, имеющего значительный отрицательный передний угол резания. При положительном переднем угле резания условный угол  $\psi_1$  будет принимать относительно небольшие значения и изменение угла  $\alpha$  в этом случае должно быть ограничено. Очевидно, угол  $\alpha$  должен быть относительно небольшим. В противном случае угол  $\psi_1 + \alpha \rightarrow 90^\circ$  и процесс стружкообразования (а соответственно и процесс резания) неосуществим, т.к.  $\alpha \rightarrow \beta$ . Обрабатываемый материал будет подвергаться лишь упруго-пластическому деформированию без образования стружки, что, как показано выше, приведет к увеличению силы  $P_z$  и повышению энергоемкости обработки. Этим показано, что абразивное зерно, имеющее форму шара, является наиболее оптимальным с точки зрения формы режущего элемента, используемого при абразивной обработке деталей затопленными струями, когда угол  $\alpha$  может изменяться в широких пределах  $0 < \alpha < 90^\circ$ .

Представляет интерес определение параметров силовой напряженности процесса резания абразивным зерном при его выходе из контакта с обрабатываемым материалом, т.е. при резании с уменьшающейся толщиной среза. Предположим, что в начальный момент времени толщина среза равна  $a$  (рис. 3) и по мере перемещения зерна вдоль оси  $ox$  уменьшается по закону  $a - tg \alpha_1 \cdot x$ , где  $\alpha_1$  – угол выхода абразивного зерна из контакта с обрабатываемым материалом.

Очевидно, под действием системы сил  $P_z$  и  $P_y$  произойдет сдвиг обрабатываемого материала вдоль условной плоскости сдвига  $OA=L$ , расположенной под углом сдвига  $\beta$  к направлению движения зерна. Касательное напряжение  $\tau$ , возникающее в данной плоскости, определяется по зависимости (1), а длина плоскости сдвига  $OA=L$  – на основе решения системы тригонометрических уравнений, вытекающих из рис. 3:

$$\begin{cases} y = a - tg \alpha_1 \cdot x, \\ y = tg \beta \cdot x, \end{cases} \quad (13)$$

где  $x$  и  $y$  – координаты точки пересечения условной плоскости сдвига  $OA$  с обрабатываемой поверхностью  $BA$ .

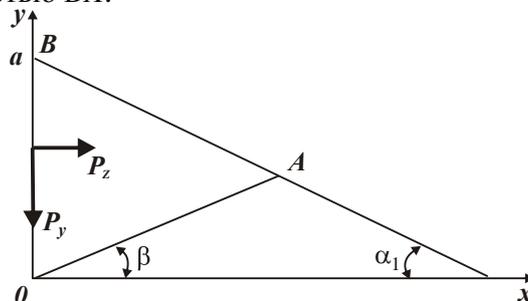


Рис. 3. Расчетная схема процесса стружкообразования при резании зерном с уменьшающейся толщиной среза.

Откуда

$$x = \frac{a}{(tg \beta + tg \alpha_1)}, \quad (14)$$

$$L = \frac{x}{\cos \beta} = \frac{a}{\cos \beta \cdot (\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \alpha_1)}. \quad (15)$$

Подставляя зависимость (15) в (1) с учетом  $K_{uu} = \operatorname{ctg}(\psi + \gamma) = \operatorname{ctg} \psi_1$ , получим

$$\tau = \frac{P_y}{2 \cdot \nu \cdot a \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha_1} \cdot [\sin(2\beta - \alpha_1 + \psi_1) - \sin(\alpha_1 - \psi_1)]. \quad (16)$$

Максимальное касательное напряжение  $\tau_{max}$ , определяющее положение условной плоскости сдвига обрабатываемого материала, будет достигаться при условии  $\sin(2\beta + \alpha_1 + \psi_1) = 1$ . Тогда угол сдвига обрабатываемого материала  $\beta$  определится

$$\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{(\alpha_1 + \psi_1)}{2}. \quad (17)$$

Сравнивая зависимость (17) с аналогичной зависимостью (7), видно, что в первом случае условный угол сдвига обрабатываемого материала  $\beta$  меньше. Подставляя зависимость (17) в (16), определим максимальное касательное напряжение  $\tau_{max}$ :

$$\tau_{max} = \frac{P_y}{2 \cdot \nu \cdot a \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha_1} \cdot [1 + \sin(\alpha_1 + \psi_1)]. \quad (18)$$

Принимая  $\tau_{max} = \tau_{cдв}$ , из зависимости (18) вытекает расчетная зависимость для определения радиальной составляющей силы резания  $P_y$ :

$$P_y = 2 \cdot a \cdot \nu \cdot \tau_{cдв} \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \frac{1}{[1 + \sin(\alpha_1 + \psi_1)]}. \quad (19)$$

Соответственно, тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  и условное напряжение резания  $\sigma$  равны

$$P_z = P_y \cdot K_{uu} = P_y \cdot \operatorname{ctg} \psi_1 = 2 \cdot a \cdot \nu \cdot \tau_{cдв} \cdot \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \frac{1}{[1 + \sin(\alpha_1 + \psi_1)]}, \quad (20)$$

$$\sigma = \frac{P_z}{a \cdot \nu} = \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \frac{2}{[1 + \sin(\alpha_1 + \psi_1)]}. \quad (21)$$

В отличие от аналогичных зависимостей (9) и (10), зависимости (19) и (20) при условии  $\sin(\alpha_1 + \psi_1) = 1$  принимают конечные значения. Это свидетельствует о более низкой силовой напряженности процесса резания в момент выхода абразивного зерна из контакта с обрабатываемым материалом по сравнению с моментом входа абразивного зерна в обрабатываемый материал.

### Выводы

В работе проведен теоретический анализ условий стружкообразования при резании отдельным абразивным зерном и определены параметры силовой напряженности процесса струйно-абразивной обработки. Установлено влияние угла входа зерна на силы резания. Доказано, что процесс съема материала может быть осуществлен при изменении данного угла в широких пределах ( $0 \dots 90^\circ$ ). Это указывает на возможность эффективного применения прогрессивного способа струйно-абразивной гидроротационной обработки (зачистки) мелких деталей массой до 3 г и имеющих сложную пространственную форму. Теоретически доказано, что в момент входа зерна в обрабатываемый материал силовая напряженность процесса выше, чем в момент его выхода из контакта с обрабатываемым материалом. Полученные результаты использованы при создании декоративных поверхностей на деталях сложной пространственной формы из различных металлов и сплавов с одновременным скруглением острых кромок, удалении окисной пленки под гальванические покрытия, удалении окалины и грата посредством обработки абразивным порошком, приводимым в движение струями сжатого воздуха, затопленными абразивной суспензией. Благодаря принятой схеме обработки

исключается износ сопел, т.к. абразивные зерна присоединяются к струям сжатого воздуха за их пределами.

**Список литературы:** 1. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин / А.Е. Проволоцкий. – К.: Техника, 1989. – 277 с. 2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. ”Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов ” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 3. ”Резание материалов лезвийными инструментами ” – Одесса: ОНПУ, 2003. – 546 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. ”Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 5. Андилахай А.А. Струйно-абразивная гидроротационная обработка мелких деталей: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы и машины обработки материалов резанием; автоматические линии” / А.А. Андилахай. – Тула, 1983. – 22 с. 6. Андилахай А.А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А.А. Андилахай. – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с.