

УДК 621.921

Ф.В. НОВИКОВ (д-р техн. наук, проф.)
А.А. АНДИЛАХАЙ (канд. техн. наук, доц.)
ХНЭУ, г. Харьков, Украина

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

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 ($0 \dots 90^\circ$).

струйно-абразивная обработка, микросрез, зерно, плоскость сдвига

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 β к направлению движения зерна. Для определения положения условной плоскости сдвига обрабатываемого материала установим касательное напряжение τ , возникающее в данной плоскости:

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

где v – 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; α – угол входа абразивного зерна в обрабатываемый материал.

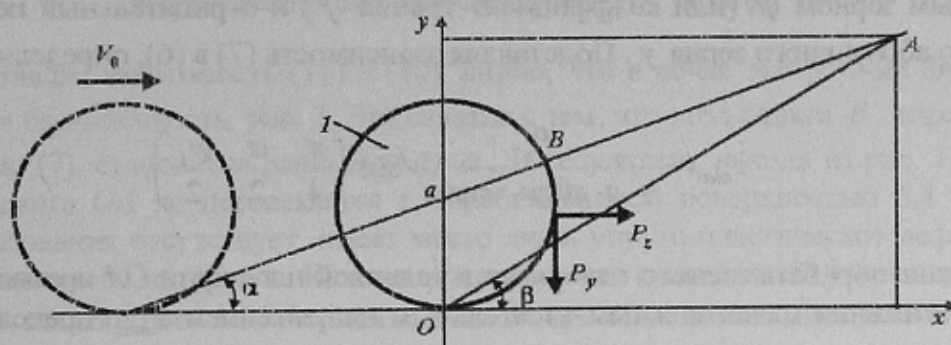


Рис. 1. Расчетная схема процесса стружкообразования при резании единичным абразивным зерном 1.

Решая систему уравнений (2), имеем

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

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

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

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

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

Обозначая $\psi + \gamma = \psi_1$ и рассматривая $K_{ш} = \operatorname{ctg}\psi_1$, 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 τ_{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 β тем больше, чем больше угол входа абразивного зерна в обрабатываемый материал α и меньше угол $\psi_1 = \psi + \gamma$, т.е. чем меньше условный угол трения обрабатываемого материала с абразивным зерном ψ (или коэффициент трения f) и отрицательный передний угол режущего абразивного зерна γ . Подставляя зависимость (7) в (6), определим τ_{max} :

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

Сдвиг обрабатываемого материала в условной плоскости OA произойдет при условии достижения максимальным касательным напряжением τ_{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 :

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

Соответственно, тангенциальная составляющая силы резания P_z равна

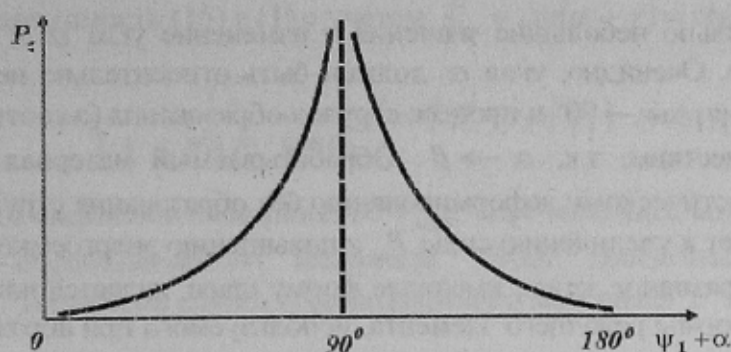
$$P_z = P_y \cdot K_{ин} = P_y \cdot \operatorname{ctg}\psi_1 = 2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{сдв} \cdot \cos\psi_1 \cdot \cos\alpha \cdot \frac{1}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}. \quad (10)$$

Если представить тангенциальную составляющую силы резания в виде $P_z = a \cdot b \cdot \sigma$, то условное напряжение резания σ 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 ψ_1 и α . С одной стороны, за счет числителя происходит уменьшение P_z с увеличением углов ψ_1 и α , а с другой стороны, за счет знаменателя – увеличение P_z . Следовательно, существуют экстремальные зависимости тангенциальной составляющей силы резания P_z от углов ψ_1 и α . Для определения экстремума функции P_z подчиним зависимость (10) необходимому условию экстремума: $(P_z)'_{\alpha} = 0$. После преобразований получим

$$\alpha = 90^\circ - \psi_1. \quad (11)$$

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 β , определяемый зависимостью (7), становится равным углу α . 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 ψ_1 , так и угол α . Во втором случае (при относительно большом значении угла $\psi_1 \rightarrow 90^\circ$) угол α 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° . 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 α .

Таким образом показано, что в общем случае угол α 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 α , так и не с фиксированным углом α , 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 ψ_1 будет при-

нимать относительно небольшие значения и изменение угла α в этом случае должно быть ограничено. Очевидно, угол α 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 α 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 α_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 β к направлению движения зерна. Касательное напряжение τ , 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 .

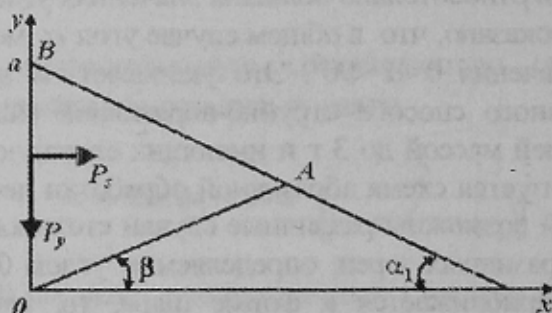


Рис. 3. Расчетная схема процесса стружкообразования при резании зерном с уменьшающейся толщиной среза.

Откуда

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

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

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

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

Максимальное касательное напряжение τ_{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 β 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 β меньше. Подставляя зависимость (17) в (16), определим максимальное касательное напряжение τ_{max} :

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

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

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

Соответственно, тангенциальная составляющая силы резания P_z и условное напряжение резания σ равны

$$P_z = P_y \cdot K_{\text{ш}} = P_y \cdot \text{ctg}\psi_1 = 2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \frac{1}{[1 + \sin(\alpha_1 + \psi_1)]}, \quad (20)$$

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

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 процессе 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, що в момент входу зерна в оброблюваний матеріал силова напруженість процесу вище, ніж в момент його виходу з контакту з оброблюваним матеріалом. Отримані результати використані при створенні декоративних поверхонь на деталях складної просторової форми з різних металів і сплавів з одночасним скругленням гострих кромки, видаленні окисної плівки під гальванічні покриття, видаленні окалини і ґрата за допомогою обробки абразивним порошком, приводимим в рух струями стиснутого повітря, затопленими абразивної суспензією. Завдяки прийнятій схемі обробки виключається знос сопел, т.к. абразивні зерна приєднуються до струї стиснутого повітря за їх межами.

Список літератури

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: в 10 т. / под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – Т. 4: Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения: в 10 т. / под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – Т. 3: Резание материалов лезвийными инструментами. – Одесса: ОНПУ, 2003. – 546 с.
4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения: в 10 т. / под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – Т. 1: Механика резания материалов. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
5. Андिलाхай А.А. Струйно-абразивная гидроротационная обработка мелких деталей: автореф. дис... канд. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процессы и машины обработки материалов резанием; автоматические линии» / А.А. Андिलाхай. – Тула, 1983. – 22 с.
6. Андिलाхай А.А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А.А. Андिलाхай. – Мариуполь: ПТУ, 2006. – 190 с.

Ф.В. НОВИКОВ, О.О. АНДИЛАХАЙ

ХНЕУ, м. Харків, Україна

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ СИЛОВОЇ НАПРУЖЕНОСТІ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ

Проведено теоретичний аналіз умов стружкоутворення при різанні окремим абразивним зерном і визначені параметри силової напруженості процесу струйно-абразивної обробки. Установлено вплив кута входу зерна на сили різання. Доведено, що процес знімання матеріалу може бути здійснений при зміні даного кута в широких межах (0...90°).

струминно-абразивна обробка, мікроріз, зерно, плоскість зрушення

F.V. NOVIKOV, A.A. ANDILAHAY

THEORETICAL ANALYSIS OF PARAMETERS OF POWER TENSION ABRASIVE BLASTING

The theoretical analysis of conditions in cutting chip recommended to individual abrasive grains and the parameters of the power intensity processes abrasive blasting. The influence of entry angle of grain on the force of cutting. Proved that the recording material can be carried out when changing this angle in a wide range (0 ... 90°).

abrasive blasting, micro cut, grain, shear plane

Рецензент: Єронько С.П.

Надійшла до редколегії 18.03.10