

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**Проволоцкий А.Е., Мохеб Мохаммад**  
(НМетАУ, г. Днепрпетровск, Украина, Иран)

### Введение

Изнашивание рабочей поверхности круга при шлифовании - сложный физико-химический и механический процесс, зависящий от правильного выбора характеристики шлифовального круга, свойства обрабатываемого материала, режима шлифования и других факторов.

При шлифовании с повышением производительности обработки существенно уменьшается стойкость кругов между правками  $T$  и возрастает расход абразивов. Особенно это заметно при обработке труднообрабатываемых материалов, когда период стойкости круга уменьшается в 15-20 раз, а затраты времени и расход абразива, связанные с правкой круга, доходят до 60-70% всех затрат на операцию обработки [1].

Процесс «самозатачивания» шлифовального круга состоит в том, что по мере износа наиболее выступающих зерен шлифовального круга из связки возрастает сопротивление резанию, в результате чего происходит вырывание (полностью или частично) зерна из связки. В работу вступают новые зерна, поэтому рабочая поверхность шлифовального круга непрерывно обновляется. Однако в большинстве случаев самозатачивание круга является недостаточным, так как не сохраняется геометрическая форма его рабочей поверхности или не обеспечивается размерная стойкость абразивного круга. Иногда металл налипает на поверхность зерна, поры круга забиваются металлической пылью, и зерна круга теряют способность к шлифованию [2]. При этом уменьшается производительность обработки.

В связи с вышесказанным, очевидно, что необходимая постоянная правка шлифовального круга приводит к увеличению трудоёмкости обработки, связанной с потерей трудового времени на правку. Правка - процесс восстановления режущей способности шлифовального круга и его геометрической формы (размерная стойкость).

Целью работы является применение комбинированного метода шлифования с введением в зону обработки гидроабразивной струи и исследование возможности за счет этого повышения производительности шлифования.

### Основное содержание работы

При внедрении комбинированного метода шлифования с применением гидроабразивной струйной суспензии значительно уменьшается время на дополнительную правку шлифовального круга, так как гидроабразивные частицы, проникая в поры круга, очищают его от накопившейся стружки и металлической пыли с перспективой повышения производительности обработки. Проведем анализ возможности повышения производительности комбинированной технологии обработки шлифованием с введением в зону обработки гидроабразивной струйной суспензии.

Производительность при шлифовании  $Q_{шл}$  (м<sup>3</sup>/с) можно представить в виде [3]:

$$Q_{шл} = \frac{2 \cdot P_y \cdot V_{кр}}{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV} \cdot (1 - \eta), \quad (1)$$

где  $P_y$  - радиальное усилие, кН;  $V_{кр}$  - скорость круга, м/с;  $HV$  - твердость обрабатываемого материала.

мого материала, Па;  $\gamma$  – половина угла при вершине зерна (примем  $\text{tg } \gamma = 1$ );  $\eta$  – безразмерный коэффициент изменяющийся в пределах  $0 \dots 1$  и определяющий степень затупления зерна (для «острого» зерна  $\eta \rightarrow 0$ , затупленного зерна  $\eta \rightarrow 1$ ).

Наибольшее влияние на  $Q_{\text{шл}}$  оказывает коэффициент  $\eta$ . С его увеличением от 0 до 1 производительность обработки (рис.1) уменьшается от своего максимального значения практически до нуля, то есть во много раз [3]:

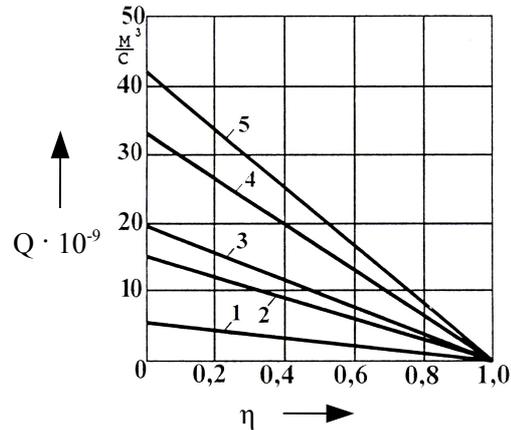


Рис. 1. Зависимость производительности обработки  $Q_{\text{шл}}$  от параметра  $\eta$  для обрабатываемых материалов: 1 - алмаз, 2 - карбид бора, 3 - Т15К6, 4 - ВК8, 5 - керамика ЦМ-322 [3]

Это свидетельствует о том, что основным резервом повышения производительности обработки необходимо рассматривать уменьшение коэффициента  $\eta$  до минимального значения (близкого к нулю). Реализовать это можно в соответствии с зависимостью [3]:

$$Q_{\text{шл}} = \frac{2 \cdot P_y \cdot V_{\text{эп}}}{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV} \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{0,5 \cdot \pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot HV \cdot x^2}{P_{y1}}} \right), \quad (2)$$

где  $x$  - величина линейного износа зерна, мм;  $P_{y1}$  - радиальная составляющая силы резания, действующая на отдельное зерно круга, кН.

Во-первых, за счет уменьшения величины  $x$ , что достигается принудительным удалением с рабочей поверхности круга затупившихся зерен путем применения: механической или электро-физико-химической правки круга; прерывистого шлифования, обеспечивающего за счет ударного характера контакта рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом режим самозатачивания круга с регулированием интенсивности его износа в широких пределах; самозатачивающихся связок и повышением стойкости круга в результате металлизации зерен, импрегнации круга и т. д.

Во-вторых, за счет увеличения нагрузки  $P_{y1}$ , действующей на отдельное зерно, до значения, близкого к предельному (соответствующему прочности зерна), что достигается применением оптимальных режимов шлифования, в данном случае определяемых параметрам  $P_y$  и  $V_{\text{кр}}$ .

Этим показано, что добиться повышенной производительности обработки можно на основе управления и оптимизации процесса шлифования. Управлять необходимо

величиной  $x$ , а оптимизировать режимы шлифования с учетом ограничений по величине  $P_{y1}$ .

Нормальная составляющая силы резания, действующая на единичное зерно при шлифовании, равна [4]:

$$P_{y1} = HV \cdot S_{\text{конт}}, \quad (3)$$

где  $S_{\text{конт}} = 0.5 \cdot \pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot H^2 \cdot \psi_2$  - фактическая площадь контакта зерна с материалом,  $\text{м}^2$ ;  $\psi_2$  - вероятность участия зерна в резании;  $\psi_2 = 0,44$ ;  $0,5$  - коэффициент, учитывающий отсутствие контакта с обрабатываемым материалом тыльной части зерна при его движении;  $H$  - максимальная глубина внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга при шлифовании, отсчитывая ее от вершины неизношенного максимально выступающего зерна [4]:

$$H = \bar{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{\rho} \cdot t}{\text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{\text{кр}} \cdot (1 - \eta^2)}}, \quad (4)$$

где  $V_{\text{дет}}$  - скорость вращения детали, м/мин;  $\rho$  - радиус округления режущей кромки абразивного зерна, мм;  $m$  - концентрация абразивных частиц шлифовального круга, %;  $\bar{X}$  - средний размер зерна абразивного круга;  $t$  - глубина шлифования, мм.

После несложных преобразований, с учетом (3) разрешая (4) относительно  $V_{\text{дет}}$ , имеем:

$$V_{\text{дет}} = \frac{8.73 \cdot 10^{-4} \cdot m \cdot V_{\text{кр}} \cdot (1 - \eta^2)}{\text{tg}^2 \gamma \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{\rho} \cdot t} \cdot \left( \frac{P_{y1}}{HV} \right)^{1.5}. \quad (5)$$

Максимально возможная производительность обработки шлифованием  $Q_{\text{шл}} = l_{\text{дет}} \cdot V_{\text{дет}} \cdot t$ , обусловленная прочностью зерна  $P_{y1}$ , с учетом зависимости (5) определится [4]:

$$Q_{\text{шл}} = \frac{8.73 \cdot 10^{-4} \cdot m \cdot V_{\text{кр}} \cdot (1 - \eta^2) \cdot l_{\text{дет}} \cdot \sqrt{t}}{\text{tg}^2 \gamma \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{\rho}} \cdot \left( \frac{P_{y1}}{HV} \right)^{1.5}, \quad (6)$$

где  $l_{\text{дет}}$  - длина шлифования, мм.

Увеличить  $Q_{\text{шл}}$  можно увеличением  $m$ ,  $l_{\text{дет}}$ ,  $V_{\text{кр}}$ ,  $t$ ,  $P_{y1}$  и уменьшением  $\bar{X}$ ,  $HV$ ,  $\rho$  и  $\eta$ .

Все эти исследования производительности при шлифовании справедливы при использовании шлифовальных кругов с плотной структурой.

Нами экспериментально были проведены исследования шлифования с дополнительным введением в зону обработки гидроабразивной струи. Рассмотрим параметры, влияющие на производительность и качество поверхности при наличии гидроабразивной струи.

В отличие от неуправляемых процессов природного разрушения твердых тел при соударении с частицами микронных размеров технологическая гидроабразивная обработка является процессом управляемым. Основными управляемыми факторами для гидроструйной обработки являются: давление струи  $P$  (Мпа); скорость гидроабразивной струи  $v$  (м/с); угол соударения технологической струи с разрушаемой поверхностью  $\alpha$  (град); зернистость абразива  $\bar{X}$ ; концентрация абразивных частиц в жидкости  $m$  (%); кинетические и динамические характеристики направляющего аппарата (струйного устройства). Главные [5] организующие технологическое разрушение поверхности факторы включают в себя большое число контролируемых и неконтролируемых параметров. Неконтролируемость таких параметров, как формирование ядра струи, размерность разрушения, перекрытие сложносоединенных поверхностей, зернистость абразива в процессе обработки влечет за собой неопределенность поведения первоначально контролируемых параметров: физико-химические свойства поверхности, масса абразивных частиц, вязкость суспензии и др.

Так как основными показателями технологичности гидроабразивной обработки являются производительность, качество поверхности и ее эксплуатационные свойства, то все технологические параметры рассмотрены применительно к трем названным показателям. Основным параметром, влияющим на производительность обработки, является давление воздуха, разгоняющего струю, который дополняется зернистостью абразива. Увеличение давления струи приводит к увеличению скорости движения абразивных частиц, которая в квадратичной зависимости влияет на кинетическую энергию, что определяет ударно-режущее действие струи. Кроме того, с увеличением давления увеличивается интенсивность дробления абразивных частиц, это приводит к снижению съема материала, а относительно малые давления не позволяют разгонять абразивные частицы до скоростей соударения, при которых процесс съема материала может протекать интенсивно. Зависимость производительности обработки от давления воздуха и зернистости абразива не линейная [5]. Зернистость необходимо выбирать в зависимости от исходной шероховатости поверхности.

Сила удара абразивных частиц значительно зависит от угла наклона струи и ее длины ( $L$ ), при этом эти зависимости влияют как на производительность обработки, так и на качество поверхности. При анализе технологических возможностей гидроабразивной обработки было установлено, что качество и производительность обработки в некоторой степени зависят от угла наклона струи. Было установлено, что съем материала максимален при угле атаки  $45^\circ$ . Отклонение максимума съема при угле  $45^\circ$ , объясняется разрушением поверхности преимущественно в результате процесса микрорезания, сила резания будет больше при угле атаки, меньшем  $45^\circ$  [5]. При углах, меньших  $25^\circ$ , когда абразивные частицы недостаточно внедряются в обрабатываемую поверхность, вступает в силу отношение глубины внедрения зерна  $h$  к радиусу скругления  $r$  его режущей кромки ( $h/r \leq 0,5$ ) и производительность процесса уменьшается. Таким образом, угол атаки в значительной мере влияет на производительность обработки.

Взаимосвязь параметров, определяющих площадь следа струи, длину струи и угол соударения струи с обрабатываемой поверхностью можно представить в виде схемы, показанной на рис. 2. Площадь следа струи  $F$  (в  $\text{мм}^2$ ), определяющая массу разрушенного материала можно представить в виде [5]:

$$F = F_0 \cdot a, \quad (7)$$

где  $F_0$  - площадь сечения плоской струи,  $\text{мм}^2$ ;  $a$  - коэффициент расширения струи за счет конуса распыления и угла ее наклона. Экспериментально установлено, что

$a = 1,4...2.$

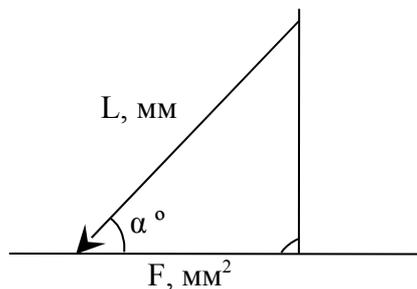


Рис. 2. Взаимосвязь параметров, определяющих площадь следа струи  $F$ , длину струи  $L$  и угол соударения струи с обрабатываемой поверхностью  $\alpha^\circ$

Исходя из сказанного ранее, производительность гидроабразивной обработки  $Q_{ГАО}$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) можно представить в виде:

$$Q_{ГАО} = \frac{m \cdot v \cdot \bar{X} \cdot P \cdot t \cdot F_0 \cdot a}{HV \cdot L \cdot \sin \alpha} \quad (8)$$

где  $t$  - глубина съема материала при гидроабразивной обработке, мм

Объединив выражение (2), которое характеризует производительность при шлифовании и выражение (8), характеризующее производительность при гидроабразивной обработке, получим:

$$Q = \frac{2 \cdot P_y \cdot V_{kp}}{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV} \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{0.5 \cdot \pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot HV \cdot x^2}{P_{y1}}} \right) + \frac{m \cdot v \cdot \bar{X} \cdot P \cdot t \cdot F_0 \cdot a}{HV \cdot L \cdot \sin \alpha} \quad (9)$$

Уравнение (10) получено на основании теоретического анализа комбинированного метода шлифования с применением гидроабразивной струйной суспензии.

Экспериментальные исследования кругов с плотной и средней структурой (1-6) шлифовальных кругов подтвердили, что абразивные частицы струи не входят в зазор между инструментом и обрабатываемой деталью, они размельчаются в потоке. Структуру № 7-9 в шлифовальных кругах классифицируют как открытую. Абразивные частицы из струи могут входить в зазор, но добавка производительности небольшая, положительными эффектами являются уменьшение шероховатости обработанной поверхности, за счет удаления на ней микровыступов, и промывка круга. Для предложенного комплексного процесса обработки наилучшие результаты получены при применении высокопористых шлифовальных кругов со структурой № 10 – 15.

В теории шлифования [6] в качестве базового параметра принята толщина слоя, снимаемого одним зерном высокопористого шлифовального круга. Из-за статистической неопределенности условий взаимодействия множества абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью в зоне контакта инструмента с заготовкой практически невозможно адекватно формализовать его значение. Это связано с разновысотностью зерен, разнообразием формы режущей кромки, статистическим характером их распределения по площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью заготовки.

Тем не менее, усредненная величина возможных толщин среза является удобным параметром количественной оценки термодинамических условий процесса шлифования, интенсивности изнашивания инструмента, формирования качественных показателей поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Для упрощенной схемы шлифования кругом [6], при которой абразивные зерна равномерно распределены на рабочей поверхности круга и имеют одинаковую высоту вершин над связкой, можно установить связь параметров процесса с толщиной удаляемого слоя. Из кинематики взаимодействия шлифовального круга при круглом наружном продольном шлифовании периферией круга толщину среза  $a_z$  определяют по следующей зависимости

$$a_z = \frac{V_{\text{аб}}}{60 \cdot V_{\text{эп}}} \cdot l_{\zeta}^{0,5} \cdot t_{\delta}^{0,5} \left( \frac{D+d}{D \cdot d} \right)^{0,5} \cdot \frac{S}{B}, \quad (11)$$

где  $t_{\phi}$  – фактическая глубина, мм;  $l_3$  – среднее расстояние между зернами, мм;  $D$  – диаметр шлифовального круга, мм;  $B$  – высота шлифовального круга, мм;  $d$  – диаметр заготовки, мм;  $S$  – продольная подача шлифовального круга, мм/об.

Для начала процесса образования стружки, необходимо выполнить условие:  $a_z \geq K \cdot \rho$ , где  $K$  – общее число зерен, вступающих в контакт с участком обрабатываемой поверхности во время одного прохода;  $\rho$  – радиус округления режущей кромки абразивного зерна, мм.

Общее число зерен  $K$ , вступающих в контакт с участком обрабатываемой поверхности во время одного прохода, определяется следующим выражением

$$K = \frac{V_{\text{эп}}}{V_{\text{аб}}} \cdot \frac{L_K}{l_{\zeta}}, \quad (12)$$

где  $L_K$  – длина контакта круга с заготовкой, мм.

Чтобы обеспечить внедрение абразивного зерна с радиусом округления вершин  $\rho$ , необходимо, чтобы фактическая глубина шлифования  $t_{\phi}$  соответствовала значению [6]:

$$t_{\delta} \geq K \cdot \rho \cdot \frac{V_{\text{эп}}}{V_{\text{аб}}} \cdot \frac{L_K}{l_{\zeta}}, \quad (13)$$

Если  $K$  встреч с режущими зернами круга недостаточно для того, чтобы обработать всю поверхность, то обработка ее не ограничится одним проходом и фактическая глубина резания зерен  $t_{\phi}$  будет больше, чем подача на врезание  $t$ . При этом фактическая глубина резания  $t_{\phi} = n \cdot t$ , где  $n$  – число проходов.

Тогда уравнение (11) примет вид:

$$a_z = \frac{V_{\text{аб}}}{60 \cdot V_{\text{эп}} + 2 \cdot V_{\text{аб}}} \cdot l_{\zeta}^{0,5} \cdot (n \cdot t)^{0,5} \left( \frac{D+d}{D \cdot d} \right)^{0,5} \cdot \frac{S}{B} \quad (14)$$

Сравнение между собой кругов с различной структурой показало, что при переходе к высоким номерам структуры абразивного инструмента с соответствующим уве-

личением  $l_3$  при прочих равных условиях обработки, толщина срезаемого слоя возрастает и, следовательно, производительность обработки также возрастает.

### **Выводы**

На сьем материала при введении в зону обработки гидроабразивной струи значительное влияние оказывает концентрация струи абразивного материала. Под термином «концентрация струи» следует понимать массу абразивного материала, попадающего на единицу обрабатываемой поверхности в единицу времени, которая складывается из объемной массы абразива в жидкости и производительности струйного аппарата. Комплексная обработка поверхности имеет перспективы дальнейших исследований и практической проверки в лабораторных условиях.

**Список литературы:** 1. Мишнаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов. – К.: Наукова думка, 1982. – 192 с. 2. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Якимов А.А. Высокопроизводительная обработка абразивно-алмазными инструментами. – К., Техніка, 1993. – 152 с. 3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения: В 10 т. Т. 4. Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов/ Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – Одесса, 2002. 4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учебное пособие./ А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 5. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техника, 1989. – 208 с. 6. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ КОМПЛЕКСНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

Проволоцький О.Є., Мохеб Мохаммад

В статті запропоновані теоретичні дослідження інтегрованих технологій з використанням шліфування і гідроабразивного струменя.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Проволоцкий А.Е., Мохеб Мохаммад

В статье предложены теоретические исследования интегрированных технологий с использованием шлифования и гидроабразивной струи.

### **RESEARCH OF THE PRODUCTIVITY OF COMPLEX TECHNOLOGICAL PROCESSES**

Provolotsky A.E., Moheb Mohammad

In the paper the theoretical researches of computer-integrated technologies are offered with the use of grinding and hydroabrasive stream.

*Рецензент: д.т.н., проф. Калафатова Л.П.*