

Ю.Г. Гуцаленко, В.И. Полянский, Харьков, Украина

## **УМЕНЬШЕНИЕ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

*Проведено теоретичний аналіз закономірностей формування силової напруженості процесу шліфування на макрорівні. Визначено шляхи підвищення продуктивності обробки на основі вибору раціональної схеми силового навантаження зони різання алмазними кругами з розвинутим ріжучим рельєфом.*

*Проведен теоретический анализ закономерностей формирования силовой напряженности процесса шлифования на макроуровне. Определены пути повышения производительности обработки на основе выбора рациональной схемы силового нагружения зоны резания алмазными кругами с развитым режущим рельефом.*

*JU.G. GUCALENKO, V.I. POLJANSKIJ  
REDUCTION OF POWER INTENSITY FOR INCREASE OF THE DIAMOND GRINDING  
PRODUCTIVITY RESOURCE*

*Theoretical analysis of regularities of forming of grinding action force tension at macrolevel is done. The ways of higher processing productivity on the base of rational circuit decision for power load of a cutting zone by use of the diamond wheels with developed cutting relief are defined.*

**Введение.** Проблему эффективного применения сверхтвёрдого режущего потенциала алмазных кругов для шлифования труднообрабатываемых твердосплавных и быстрорежущих материалов отличает многоотраслевая актуальность: производство и оперативная реновация режущей способности инструментов из таких материалов востребованы от машино-, авиа-, судо-, приборостроения до полиграфии и сферы жилищно-коммунального хозяйства. Однако в практике многих инструментальных производств, и не только мелко-масштабных, обработка по-прежнему полностью или преимущественно ведется с использованием традиционных абразивных кругов. Это связано с тем, что алмазные круги на металлических связках в условиях высокопроизводительного съема материала работают весьма нестабильно: быстро затупляются, засаливаются и теряют режущую способность. В особой мере это относится к алмазным кругам на высокопрочных металлических связках типа М2-01. Подобные круги обладают чрезвычайно высокой износостойкостью, однако вследствие недостаточно стабильной режущей способности, не поддерживаемой эффективным самозатачиванием, без специальных организационно-технологических мероприятий не позволяют устойчиво обеспечивать требуемую производительность обработки, процесс шлифования протекает с высокой силовой и тепловой напряженностью, что отрицательно сказывается на качестве и точности обработки. Использование же современных технологий высокопроизводительной правки (обработки) круга, в том числе с введением

в зону резания (или автономно) дополнительной электрической энергии, как это широко апробировано алмазно-искровым шлифованием [1], все еще не стало привычным атрибутом массовой технологической культуры инструментальных производств.

В этих реалиях с целью повышения эффективности шлифования предлагается перейти от жесткой схемы к упругой, т.е. осуществляемой с постоянным радиальным усилием. Это позволяет регулировать силовую и тепловую напряженность процесса, улучшает технологические параметры шлифования. Однако проблема обеспечения стабильно высокой производительности обработки при этом на практике все равно полностью не решается. Под этим углом зрения рассмотрим возможности повышения эффективности алмазно-искрового шлифования на основе моделирования и оптимизации процесса с опорой на известные теоретические результаты [2, 3].

**Основное содержание работы.** Проведем теоретический анализ изменения тангенциальной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания при шлифовании, которые описываются аналитическими зависимостями:

$$P_z = \sigma \cdot S_{\text{мгн}} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{\text{кр}}} \quad , \quad (1)$$

$$P_y = \frac{P_z}{K_{\text{ш}}} \quad , \quad (2)$$

где:  $\sigma$  – условное напряжение резания при шлифовании, Н/м<sup>2</sup>;  $S_{\text{мгн}}$  – суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м<sup>2</sup>;  $Q$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $V_{\text{кр}}$  – скорость круга, м/с;  $K_{\text{ш}} = P_{z1} / P_{y1}$  – коэффициент шлифования.

Воспользовавшись приведенными в [3] аналитическими зависимостями для определения условного напряжения резания  $\sigma$  и приравняв их правые части, получим:

$$\frac{2 \cdot \sigma_{\text{сж}}}{K_{\text{ш}}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot HV}{(1 - \eta)}} \quad , \quad (3)$$

где  $\sigma_{\text{сж}}$ ,  $HV$  – соответственно предел прочности обрабатываемого материала на сжатие и твердость по Виккерсу, Н/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного зерна;  $\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления зерен круга, изменяется в пределах 0...1 ( $\eta \rightarrow 0$  для острого зерна,  $\eta \rightarrow 1$  для затупленного зерна круга; кинематико-геометрический смысл этого коэффициента в процессах устойчивого шлифования со стабильно поддерживаемыми высотными характеристиками режущего рельефа рабочей поверхности круга подробно рассмотрен в работе [4]). Из (3) получаем аналитическое выражение коэффициента шлифования вида:

$$K_{ш} = \sqrt{\frac{4 \cdot \sigma_{сж}}{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV} \cdot (1 - \eta)}. \quad (4)$$

После подстановки (4) и выражения для  $\sigma$  из левой части (3) в (1) и (2) имеем:

$$P_z = \sqrt{\frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV \cdot \sigma_{сж}}{(1 - \eta)}} \cdot \frac{Q}{V_{кр}}, \quad (5)$$

$$P_y = \frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV}{2 \cdot (1 - \eta)} \cdot \frac{Q}{V_{кр}}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) следует, что при шлифовании по жесткой схеме (при выполнении условия  $Q = const$ ) с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta \rightarrow 1$  составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$  неограниченно увеличиваются. Это хорошо согласуется с экспериментальными данными, согласно которым в процессе шлифования по мере затупления круга (т.е. с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta \rightarrow 1$ ) сила резания существенно возрастает, в системе появляются вибрации, и ведение процесса шлифования в таких условиях становится неэффективным.

Основным условием снижения силы резания при заданной производительности обработки  $Q$  является повышение «остроты» режущих зерен (уменьшение безразмерного коэффициента  $\eta$ ). Большой эффект в этом плане достигается в технологиях алмазно-искрового шлифования. Однако, как показывает практика, стабилизировать безразмерный коэффициент  $\eta$  в процессе высокопроизводительного алмазно-искрового шлифования шлифования все же весьма сложно, а в отсутствие следящей системы, контролирующей состояние рабочей поверхности круга, и вовсе не удастся – с течением времени обработки круг постепенно затупляется, что и отражает постоянное увеличение коэффициента  $\eta$  и, соответственно, составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$ .

В этих условиях важно найти такое решение, которое позволило бы нивелировать существенное влияние изменения остроты режущего рельефа, характеризуемой безразмерным коэффициентом  $\eta$ , на силу резания (ее составляющие  $P_z$  и  $P_y$ ).

Судя по зависимостям (5) и (6), изменение безразмерного коэффициента  $\eta$  в меньшей мере влияет на изменение составляющей силы резания  $P_z$ , чем на составляющую силы резания  $P_y$ . Следовательно, в процессе шлифования более эффективно зафиксировать тангенциальную составляющую силы резания  $P_z$ , т.е. обработку вести по упругой схеме с фиксированной силой  $P_z$ . Это приведет к меньшему изменению (уменьшению) производительности

обработки  $Q$  с течением времени шлифования по сравнению с реализацией упругой схемы при условии  $P_y = const$  в условиях алмазно-искрового шлифования с повышенной остротой режущего рельефа (увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$ ). Однако реализовать на практике упругую схему шлифования с  $P_z = const$  значительно сложнее, чем упругую схему с  $P_y = const$ . Одним из эффективных вариантов такой реализации можно рассматривать схему глубинного плоского или круглого (наружного и внутреннего) шлифования. В данном случае глубина шлифования  $t$  и ширина шлифования  $B$  задаются неизменными величинами.

Тогда, с учетом  $Q = B \cdot V_{dem} \cdot t$  (где  $V_{dem}$  – скорость детали, м/с), зависимости (5) и (6) примут вид:

$$P_z = \sqrt{\frac{\pi \cdot tg \gamma \cdot HV \cdot \sigma_{сж}}{(1-\eta)}} \cdot \frac{B \cdot V_{dem} \cdot t}{V_{кр}}, \quad (7)$$

$$P_y = \frac{\pi \cdot tg \gamma \cdot HV}{2 \cdot (1-\eta)} \cdot \frac{B \cdot V_{dem} \cdot t}{V_{кр}}. \quad (8)$$

Как следует из зависимости (7), с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$  при заданных значениях  $P_z$ ,  $B$ ,  $t$  в процессе шлифования будет уменьшаться скорость детали  $V_{dem}$ , что приведет к уменьшению производительности обработки  $Q$ . Однако, уменьшение скорости детали  $V_{dem}$  будет не столь существенно, т.к. величины  $(1-\eta)$  и  $V_{dem}$  входят в зависимость (7) с разными степенями. Здесь важно добиться того, чтобы увеличение безразмерного коэффициента  $\eta$  не выходило за определенный предел, когда значительному уменьшению величины  $(1-\eta)$  соответствует и резкое уменьшение  $V_{dem}$ , а значит и существенное уменьшение производительности обработки  $Q$ .

Таким образом, повысить эффективность алмазно-искрового шлифования при использовании упругой схемы с  $P_z = const$  можно, ограничивая верхний предел изменения безразмерного коэффициента  $\eta$ . Это достигается, например, периодическим прерыванием процесса шлифования на время электроэрозионной правки для восстановления режущей способности алмазного круга на металлической связке.

При использовании упругой схемы с  $P_y = const$  очевидно, что переменной величиной в процессе шлифования будет не скорость детали  $V_{dem}$ , а глубина шлифования  $t$ . Скорость детали должна быть постоянной ( $V_{dem} = const$ ). Тогда изменению (увеличению) безразмерного коэффициента  $\eta$  в процессе шлифования при заданных значениях  $P_y$ ,  $B$ ,  $V_{dem}$  будет непрерывно соответ-

ствовать уменьшение глубины шлифования  $t$ . Причем значительно интенсивнее, чем это относилось к скорости детали  $V_{дет}$  при шлифовании по упругой схеме с  $P_z = const$ , т.к. величины  $(1-\eta)$  и  $t$  входят в зависимость (8) с одинаковой степенью.

Приведенный теоретический анализ показывает наиболее эффективные области применения алмазно-искрового шлифования, когда его реализация позволяет стабилизировать режущую способность инструмента, в особенности алмазных кругов на высокопрочных металлических связках (например, М2- 01), с течением времени обработки.

При шлифовании алмазным кругом на менее твердой металлической связке М1-01 процесс во многих случаях может протекать довольно стабильно в режиме самозатачивания. При этом можно говорить о стабилизации безразмерного коэффициента  $\eta$  во времени обработки и предпочтительности применения жесткой схемы шлифования (при выполнении условия  $Q = const$ ). Составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$ , судя по зависимостям (7) и (8), будут постоянными в процессе шлифования. Поэтому нет необходимости в применении упругой схемы с  $P_y = const$ , т.к. жесткую схему шлифования реализовать на станке конструктивно более просто.

Из сопоставления выражений (5) и (6) видно, что тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  определяется произведением параметров  $HV \cdot \sigma_{сж}$ , а радиальная составляющая силы резания  $P_y$  – лишь твердостью обрабатываемого материала  $HV$ . Очевидно, что с увеличением твердости обрабатываемого материала  $HV$  радиальная составляющая силы резания  $P_y$  будет пропорционально увеличиваться, а тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  – увеличиваться с меньшей интенсивностью, т.к. известно, что увеличение параметра  $\sigma_{сж}$  менее интенсивно, чем изменение параметра  $HV$ . Следовательно, с увеличением твердости обрабатываемого материала (параметра  $HV$ ) важно уменьшить радиальную составляющую силы резания  $P_y$ .

Эффективным решением в таких случаях следует рассматривать увеличение скорости круга  $V_{кр}$ , т.е. чем тверже обрабатываемый материал, тем большего внимания заслуживает обращение к ресурсу увеличения скорости круга.

Сделанные теоретические выводы подтверждаются практикой комбинированных методов обработки с электроэрозионной поддержкой развитости режущего рельефа алмазных шлифовальных кругов. Так, по данным Н.П. Иванова применение круглого наружного шлифования по упругой схеме при условии  $P_z = const$  (эксперименты проводились с использованием источников как импульсного, так и постоянного тока [5]) позволяет не только повысить производительность обработки с более длительным временем сохранения алмазным кругом на металлической связке относительно высокой режущей способности, но и устранить вибрации, которые практически не уст-

раняются при шлифовании по упругой схеме с  $P_y = const$ , особенно при относительно низкой режущей способности алмазного круга.

**Выводы.** Предлагаемые решения предусматривают смягчение отрицательной роли снижения остроты круга на выходные показатели процесса шлифования и предполагают повышение обоснованности практического выбора организационно-технологических альтернатив между шлифованием по жесткой или упругой схеме, а при выборе последней – наиболее корректного варианта реализации в условиях конкретной производственной задачи. Несомненно, что главная задача состоит в устойчивой и рациональной стабилизации остроты круга в процессе высокопроизводительного шлифования, дальнейшем развитии для этого теории и практики алмазно-искрового шлифования в том числе. Понимание практической привлекательности полного решения этой задачи неотделимо от понимания ее чрезвычайной технико-экономической сложности, требующей терпеливой постепенности и упорной настойчивости одновременно и конкурентно. Представленная разработка последовательно использует обобщенный на принципах унификации и постоянно развиваемый аналитический подход и выполнена в этом направлении.

**Список использованных источников:** 1. Беззубенко Н.К., Гуцаленко Ю.Г. Интенсифицированное шлифование и специальные станки // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №5/1(47). – С. 70-71. 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. Високопродуктивне шліфування: Навч. посібник / О.В. Якимів, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков О.О. Якимів. – К.: ІСДО, 1995. – 180 с. 4. Гуцаленко Ю.Г. Стойкость круга в рабочих процессах рационального стабильного шлифования // Вісн. Нац. техн. ун-ту „Харк. політехн. ін-т”. Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – 2005. – № 24. – С. 50-63. 5. Иванов Н.П. Электроэрозионное формирование высоты рельефа рабочей поверхности алмазных кругов при использовании источника постоянного тока // Резание и инструмент. – 1984. – Вып. 32. – С. 21-27. 6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 9. ”Проектирование технологических процессов в машиностроении”. – Одесса: ОНПУ, 2005.

*Поступила в редколлегию 04.04.2011*

**Bibliography (transliterated):** 1. Bezzubenko N.K., Gucalenko Ju.G. Intensificirovannee shlifovanie i special'nye stanki // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2010. – №5/1(47). – S. 70-71. 2. Teoreticheskie osnovy rezanija i shlifovanija materialov: Ucheb. posobie / A.V. Jakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov, B.S. Serov, A.A. Jakimov. – Odessa: OGPU, 1999. – 450 s. 3. Visokoproduktivne shlifuvannja: Navch. posibnik / O.V. Jakimiv, F.V. Novikov, G.V. Novikov O.O. Jakimiv. – K.: ISDO, 1995. – 180 s. 4. Gucalenko Ju.G. Stojkost' kruga v rabochih processah racional'nogo stabil'nogo shlifovanija // Visn. Nac. tehn. un-tu „Hark. politehn. in-t”. Temat. vip.: Tehnologii v mashinobuduvanni. – 2005. – № 24. – S. 50-63. 5. Ivanov N.P. Jelek-trojeriozionnoe formirovanie vysoty rel'efa rabochej poverhnosti almaznyh krugov pri is-pol'zovanii istochnika postojannogo toka // Rezanie i instrument. – 1984. – Vyp. 32. – S. 21-27. 6. Fiziko-matematicheskaja teorija processov obrabotki materialov i tehnologii mashinostroe-nija / Pod obw. red. F.V. Novikova i A.V. Jakimova. V desjati tomah. – T. 9. ”Proektirovanie teh-nologicheskikh processov v mashinostroenii”. – Odessa: ONPU, 2005.