

DOI 10.32820/2079-1747-2018-22-27

УДК 621.923

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛМАЗНО-ИСКРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ

© **Новиков Ф. В., Дитиненко С. А.**

Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця

Інформація про авторів:

Новиков Федір Васильович – ORCID: 0000-0001-6996-3356; fokusnic1@rambler.ru; доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, пр. Науки, 9-А, м. Харьков, 61166, Украина

Дитиненко Станіслав Олександрович – ORCID: 0000-0001-5382-2276; fokusnic1@rambler.ru; кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, пр. Науки, 9-А, м. Харьков, 61166, Украина

Теоретично і експериментально обґрунтовано нові технологічні можливості ефективного застосування алмазно-іскрового шліфування при обробці матеріалів підвищеної твердості, які полягають в реалізації високопродуктивних схем глибинного шліфування з невеликою швидкістю деталі й багатопрохідного шліфування зі збільшеною швидкістю деталі, близькою до швидкості круга. Теоретично показано, що основною умовою суттєвого підвищення продуктивності обробки є підтримка на робочій поверхні алмазного круга на металевій зв'язці високої гостроти ріжучих зерен. Встановлено, що для ефективного здійснення алмазно-іскрового шліфування необхідно реалізувати умову мінімуму відносної витрати алмазу, що визначається оптимальним розміром лінійного зносу зерен до моменту їх об'ємного руйнування або випадіння зі зв'язки круга без руйнування. Показано, що для зменшення висот мікронерівностей на оброблюваній поверхні до значення $Ra = 0,1$ мкм необхідно на робочій поверхні алмазного круга штучно створювати плосковершинні зерна, використовуючи алмазно-іскрове шліфування, а потім шліфування алмазним олівцем. Теоретичні рішення підтверджено експериментально та впроваджено у виробництво.

Ключові слова: алмазно-іскрове шліфування; алмазний круг; металева зв'язка; глибинне шліфування; плосковершинні зерна; продуктивність обробки; якість обробки.

Новиков Ф. В., Дитиненко С. А. «Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования».

Теоретически и экспериментально обоснованы новые технологические возможности эффективного применения алмазно-искрового шлифования при обработке материалов повышенной твердости, состоящие в реализации высокопроизводительных схем глубинного шлифования с небольшой скоростью детали и многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали, близкой к скорости круга. Теоретически показано, что основным условием существенного повышения производительности обработки является поддержание на рабочей поверхности алмазного круга на металлической связке высокой остроты режущих зерен. Установлено, что для эффективного осуществления алмазно-искрового шлифования необходимо реализовать условие минимума относительного расхода алмаза, определяемого оптимальной величиной линейного износа зерен до момента их объемного разрушения или выпадения из связки круга без разрушения. Показано, что для уменьшения высот

микронеровностей на обрабатываемой поверхности до значения $Ra=0,1$ мкм необходимо на рабочей поверхности алмазного круга искусственно создавать плосковершинные зерна, используя алмазно-искровое шлифование, а затем шлифование алмазным карандашом. Теоретические решения подтверждены экспериментально и внедрены в производство.

Ключевые слова: режущий инструмент; композитные материалы; формообразование; механическая обработка; твердосплавный инструмент.

Novikov F., Ditinenko S. «Improving the efficiency of diamond spark grinding».

Theoretically and experimentally substantiated the new technological possibilities for the effective application of diamond-spark grinding when processing materials of increased hardness, which consist in the implementation of high-performance deep grinding schemes with a low part speed and multi-pass grinding with an increased part speed close to the speed of a circle. It is theoretically shown that the main condition for a significant increase in processing performance is to maintain a high sharpness of the cutting grains on the working surface of the diamond wheel on the metal binder. It has been established that for the effective implementation of diamond-spark grinding, it is necessary to realize the condition of minimum relative diamond consumption, determined by the optimal linear wear of the grains until the moment of their volume destruction or falling out of the bond of the circle without destruction. It is shown that in order to reduce the micron roughness heights on the treated surface to a value of $Ra = 0.1 \mu\text{m}$, it is necessary to artificially create flat-top grains on the working surface of the diamond wheel using diamond spark grinding and then grinding with a diamond pencil. Theoretical solutions are confirmed experimentally and introduced into production.

Key words: diamond spark grinding; diamond wheel; metal bond; deep grinding; flat grain; processing performance; processing quality.

1. Постановка проблемы.

Традиционно основным методом обработки материалов повышенной твердости является шлифование алмазными кругами на металлических связках. Это относится к обработке различных металлических и неметаллических материалов: твердых сплавов, керамических материалов, стекла и хрусталя, природных и искусственных алмазов. Однако при этом постоянно возникает сложная проблема восстановления режущей способности алмазного круга, который при шлифовании быстро затупляется и засаливается. Применение методов его механической правки, как показывает практика, малоэффективна, поскольку не удастся качественно вскрыть алмазоносный слой круга. Наиболее эффективными оказались методы электроэрозионной и электрохимической правки, основанные на непрерывном или периодическом введении в зону резания или автономно к алмазному кругу дополнительной электрической энергии, обеспечивающей электроэрозионное разрушение и электрохимическое растворение металлической связки. Особенно эффективен метод алмазно-искрового шлифования (АИШ), разработанный в Харьковском политехническом институте группой ученых под руководством докт. техн. наук, профессора Беззубенко Н. К. Наряду с высокой эффективностью электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке, этот метод обес-

печивает предразрушение поверхностного слоя обрабатываемого материала, что облегчает процесс резания и повышает производительность и качество обработки. Метод получил широкое применение на практике, однако требует дальнейшего развития с точки зрения выбора оптимальных условий обработки материалов повышенной твердости.

2. Анализ последних исследований и публикаций.

В работах [1; 2] всесторонне теоретически и экспериментально обоснованы технологические возможности АИШ и даны практические рекомендации по его эффективному применению. По результатам исследований АИШ защищены кандидатские и докторские диссертации [3–5], что указывает на перспективность его применения. Вместе с тем, технологические возможности АИШ на практике используются далеко не полностью, что требует проведения дальнейших исследований, главным образом, с точки зрения оптимизации параметров режима резания и выбора оптимальных схем шлифования.

3. Цель исследования – обоснование новых технологических возможностей алмазно-искрового шлифования при обработке материалов повышенной твердости.

4. Основное содержание.

В работе [6] показано, что максимально возможная производительность обработки $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ при алмазном шлифовании определяется аналитической зависимостью:

$$Q = \frac{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot B \cdot (1 - \eta)}{600 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot \rho}} \cdot \left(\frac{P_{y1}}{2 \cdot \sigma_{сж}} \right)^{1,5}, \quad (1)$$

где B – ширина шлифования, м; $V_{дет}$, $V_{кр}$ – скорости детали и круга, м/с; t – глубина шлифования, м; γ – половина угла при вершине режущего конусообразного зерна; \bar{X} – зернистость круга, м; m – объемная концентрация зерен круга; $\rho = 1/R_{дет} + 1/R_{кр}$; $R_{дет}$, $R_{кр}$ – радиусы детали и круга, м; P_{y1} – радиальная составляющая силы резания, действующая на зерно, Н; $\sigma_{сж}$ – предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, Н/м²; η – безразмерный коэффициент, определяющий степень остроты режущего рельефа алмазного круга ($\eta \rightarrow 0$ – для острых зерен, $\eta \rightarrow 1$ – для затупленных зерен).

Наряду с традиционными параметрами B , $V_{дет}$, $V_{кр}$, \bar{X} , m , $R_{дет}$, $R_{кр}$, P_{y1} , $\sigma_{сж}$ зависимость (1) содержит новый безразмерный коэффициент η . При высокой остроте режущего рельефа, т.е. при условии $\eta \rightarrow 0$, можно добиться существенного повышения производительности обработки. Собственно этим и объясняется эффективность применения АИШ – за счет непрерывного электроэрозионного воздействия на металлическую связку алмазного круга и непрерывного обновления его режущего рельефа (своевременного удаления зату-

пившихся алмазных зерен из металлической связки круга) можно обеспечить выполнение условия $\eta \rightarrow 0$. Другими методами правки круга реализовать это условие невозможно.

Следует отметить, что кроме поддержания на рабочей поверхности круга высокой остроты режущего рельефа, данный метод шлифования фактически исключает трение металлической связки алмазного круга с обрабатываемым материалом – основного источника высокой энергоемкости обработки и, соответственно, высоких значений силы и температуры резания. Это позволяет дополнительно повысить производительность и качество обработки, исключить образование температурных дефектов на обрабатываемой поверхности.

Экспериментально установлено [6], что обеспечение высокой остроты режущего рельефа алмазного круга приводит к его повышенному износу. Это также вытекает из аналитической зависимости для определения относительного расхода алмаза:

$$q = \frac{10^{-3} \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot \Delta_l \cdot V_{кр}}{\rho_m \cdot V_{дем} \cdot t \cdot \eta}, \quad (2)$$

где ρ_a , ρ_m – плотности алмаза и обрабатываемого материала, кг/м³; Δ_l – линейный износ зерна за одно касание с материалом, м; α – коэффициент, учитывающий плотность связки круга в зависимости от концентрации алмазных зерен.

Как следует из зависимости (2), при условии $\eta \rightarrow 0$ относительный расход алмаза $q \rightarrow \infty$. Естественно, для эффективного осуществления АИШ необходимо увеличить значение η . Расчетами установлено, что существует экстремальное значение $\eta_{экстр} = 0,88$, при котором относительный расход алмаза принимает минимальное значение. С физической точки зрения условие минимума относительного расхода алмаза обусловлено существованием оптимальной величины линейного износа зерен до момента их объемного разрушения или выпадения из связки круга без разрушения. Исходя из сказанного, в зависимости (1) следует принять $\eta = 0,88$, а расчет скорости детали $V_{дем}$ производить по аналитической зависимости:

$$V_{дем} = \frac{Q}{B \cdot t} = \frac{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot (1-\eta)}{600 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \rho \cdot t}} \cdot \left(\frac{P_{y1}}{2 \cdot \sigma_{сж}} \right)^{1,5}. \quad (3)$$

Из зависимостей (1) и (3) также вытекает возможность существенного повышения производительности обработки за счет применения глубинного продольного алмазного шлифования с небольшой скоростью детали $V_{дем}$ и шириной шлифования B , равной или близкой к высоте круга. Как правило, реализовать эту схему шлифования в обычных условиях затруднено в связи с увеличением силы и температуры резания. Однако, применяя АИШ и непрерывно поддерживая высокую режущую способность алмазного круга, появляется возможность практической реализации данной схемы шлифования. Это доказано многолетней практикой ее применения на разных технологических операциях, включая шлифование твердосплавных инструментов, изделий с высокопрочными наплавленными материалами и т.д.

Профессор Беззубенко Н. К. в своих работах [1, 2] неоднократно указывал на эффективность применения АИШ с увеличенной скоростью детали $V_{дет}$ (до значения скорости круга $V_{кр}$) и небольшой глубиной шлифования t . В работе [6] теоретически обоснована правомочность этой схемы многопроходного шлифования. Расчетами установлено, что с увеличением глубины шлифования t при соответствующем уменьшении скорости детали $V_{дет}$ (при фиксированной площади поперечного сечения среза) производительность обработки первоначально уменьшается, а затем увеличивается, проходя точку минимума, в которой, как доказано теоретически, глубина шлифования принимает значение, близкое к максимальной толщине среза (рис. 1).

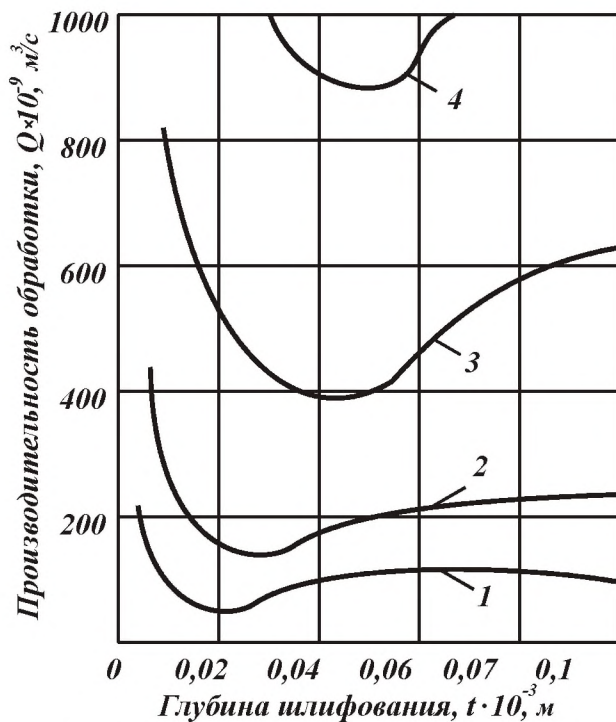


Рис. 1 – Зависимость производительности обработки Q от глубины шлифования t для заданных значений фиксированной (предельной) площади поперечного сечения среза S : $m = 100$; $\bar{X} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м; $B = 22,5 \cdot 10^{-3}$ м; $\rho = 17$ м⁻¹; $V_{кр} = 30$ м/с; 1 – $S = 400$ мкм²; 2 – $S = 900$ мкм²; 3 – $S = 1600$ мкм²; 4 – $S = 2500$ мкм²

существенное уменьшение шероховатости обработанной поверхности при шлифовании до значения $Ra=0,1$ мкм. В этом случае алмазный круг для качественного вскрытия алмазосодержащего слоя подвергают электроэрозионной правке. Затем в процессе шлифования алмазного карандаша производится срез острых вершин алмазных зерен круга. В результате образуются плосковершинные зерна, шлифование которыми резко уменьшает высоту микронеровностей на обработанной поверхности, особенно при шлифовании твердосплавных изделий. Разработанный высокоэффективный технологический процесс шлифования алмазными кругами с плосковершинными зернами внедрен в инструментальное производство ГП ХМЗ

Следовательно, важным условием повышения производительности обработки является применение многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали $V_{дет}$ (близкой к скорости круга $V_{кр}$) и применение глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали $V_{дет}$. Однако для практической реализации этих схем шлифования алмазными кругами на металлической связке необходимо применение АИШ, обеспечивающего непрерывное поддержание высокой остроты алмазного круга и снижение энергоемкости обработки, силы и температуры резания. Новым направлением эффективного применения АИШ следует рассматривать подготовку алмазного круга на металлической связке для создания на его рабочей поверхности плосковершинных зерен [7], обеспечивающих

«ФЭД» на операциях шлифования твердосплавных инструментов, что позволило повысить качество обработки и исключить в ряде случаев последующую трудоемкую операцию притирки алмазным порошком.

Выводы

Определены условия повышения производительности обработки при алмазно-искровом шлифовании, состоящие в применении высокопроизводительных схем глубинного шлифования с небольшой скоростью детали и многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали, близкой к скорости круга. Показано, что для эффективного осуществления алмазно-искрового шлифования необходимо реализовать условие минимума относительного расхода алмаза. Установлено, что уменьшить параметр шероховатости поверхности до значения $Ra=0,1$ мкм при шлифовании можно созданием на рабочей поверхности алмазного круга плосковершинных зерен, используя первоначально алмазно-искровое шлифование, а затем шлифование алмазным карандашом.

Список використаних джерел:

1. Беззубенко Н. К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Н. К. Беззубенко. – Харьков : Харьк. гос. техн. ун-т, 1995. – 56 с.
2. Беззубенко Н. К. К вопросу выбора режима работы режущих зерен при алмазно-искровом шлифовании / Н. К. Беззубенко // *Резание и инструмент*. – 1979. – Вып. 22. – С. 3-6.
3. Новиков Г. В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями: дис. ... канд. техн. наук: спец.: 05.02.08 "Технология машиностроения" / Г. В. Новиков. – Харьков : ХПИ, 1989. – 210 с.
4. Фадеев В. А. Алмазное шлифование твердых сплавов с введением в зону резания дополнительной энергии постоянного тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец.: 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / В. А. Фадеев; Харьков. гос. техн. ун-т. – Харьков, 1995. – 21 с.
5. Узунян М. Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов / М. Д. Узунян. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2003. – 359 с.
6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. В 10 Т. / Под общ. ред. Ф. В. Новикова, А. В. Якимова. – Одесса : ОНПУ, 2002. – Т. 1. "Механика резания материалов". – 580 с.
7. Технологии производства: проблемы и решения : монография / Ф. В. Новиков [и др.]. – Днепр : ЛИРА, 2018. – 536 с.

References

1. Bezzubenko, NK 1995, 'Povyshenie jeffektivnosti almaznogo shlifovaniya putem vvedeniya v zonu obrabotki dopolnitel'noj jenerгии v forme jelektricheskikh razrjadov', Doct.tecn.n. abstract, Harkovskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, Harkov.
2. Bezzubenko, NK 1979, 'K voprosu vybora rezhima raboty rezhushhix zeren pri almazno-iskrovom shlifovanii', *Rezanie i instrument*, iss. 22, pp. 3-6.
3. Novikov, GV 1989, 'Povyshenie jeffektivnosti almazno-iskrovogo shlifovaniya detalej s vysokopročnymi pokrytijami', Kand.tecn.n. thesis, Harkovskij politehničeskij institut, Harkov.
4. Fadeev, VA 1995, 'Almaznoe shlifovanie tverdyh splavov s vvedeniem v zonu rezaniya dopolnitel'noj jenerгии postojannogo toka', Kand.tecn.n. abstract, Harkovskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, Harkov.
5. Uzunjan, MD 2003, *Almazno-iskrovoe shlifovanie tverdyh splavov*, Nacionalnyj tehničeskij universitet Harkovskij politehničeskij institut, Harkov.
6. Novikov, FV & Jakimov, AV (eds.) 2002, *Fiziko-matematičeskaja teorija processov obrabotki materialov i tehnologii mashinostroeniya*, vol. 1 *Mehanika rezaniya materialov*, Odesskij nacionalnyj politehničeskij universitet, Odessa.
7. Novikov, FV, Zhovtobryukh, VA, Ditinenko, SA, Kryuk, AG, Savchenko, NF, Shkurupiy, VG, Polyanskiy, VI, Ryabekov, IA & Novikov, DF 2018, *Tehnologii proizvodstva: problemy i reshenija*, LIRA, Dnepr.

Стаття надійшла до редакції 17 жовтня 2018 р.