

Математическое моделирование и анализ технологических возможностей операций высокопроизводительного алмазного шлифования изделий из высокопрочных пластичных материалов

Гуцаленко Ю.Г., Новиков Ф.В., докт. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований высокопроизводительного алмазного шлифования

На ряде операций шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов используются алмазные круги на металлических связках, характеризующиеся чрезвычайно высокой износостойкостью и обеспечивающие повышение производительности и качества обработки при съеме относительно больших припусков. Для поддержания их высокой режущей способности разработаны эффективные методы электрохимической и электроэрозионной правки, комбинированные процессы шлифования, основанные на введении в зону резания дополнительной электрической энергии (например, процесс алмазно-искрового шлифования). Вместе с тем, их потенциальные возможности в полной мере не изучены и не используются на практике. Это, с одной стороны, сдерживает широкое внедрение алмазных кругов на металлических связках в производство, а с другой стороны, требует проведения комплекса исследований по выбору, обоснованию и реализации новых технологических возможностей алмазного шлифования на основе математического моделирования и оптимизации параметров операций шлифования. Полученные решения будут иметь большое значение при проектировании технологических операций круглого наружного (внутреннего) и плоского алмазного шлифования изделий из таких высокопрочных пластичных материалов как износостойкие наплавки, высокопрочные стали и т.д., шлифование которых абразивными и алмазными кругами затруднено в силу низких показателей производительности и качества обработки.

Цель работы – обоснование условий повышения эффективности операций алмазного шлифования изделий из высокопрочных пластичных материалов на основе математического моделирования операций и теоретического анализа их технологических возможностей [1]. Для этого разработана математическая (аналитическая) модель устойчивого во времени процесса высокопроизводительного шлифования алмазным кругом на металлической связке [2–8]. Ее основу составляет условие равномерного во времени износа круга при шлифовании (рис. 1)

$$\tau = \frac{H}{V_{св}} = \frac{x}{V_{зер}} \quad (1)$$

и вытекающее из него соотношение средней скорости износа зерна $V_{зер}$ и скорости износа связки $V_{св}$ круга

$$\frac{V_{зер}}{V_{св}} = \eta, \quad (2)$$

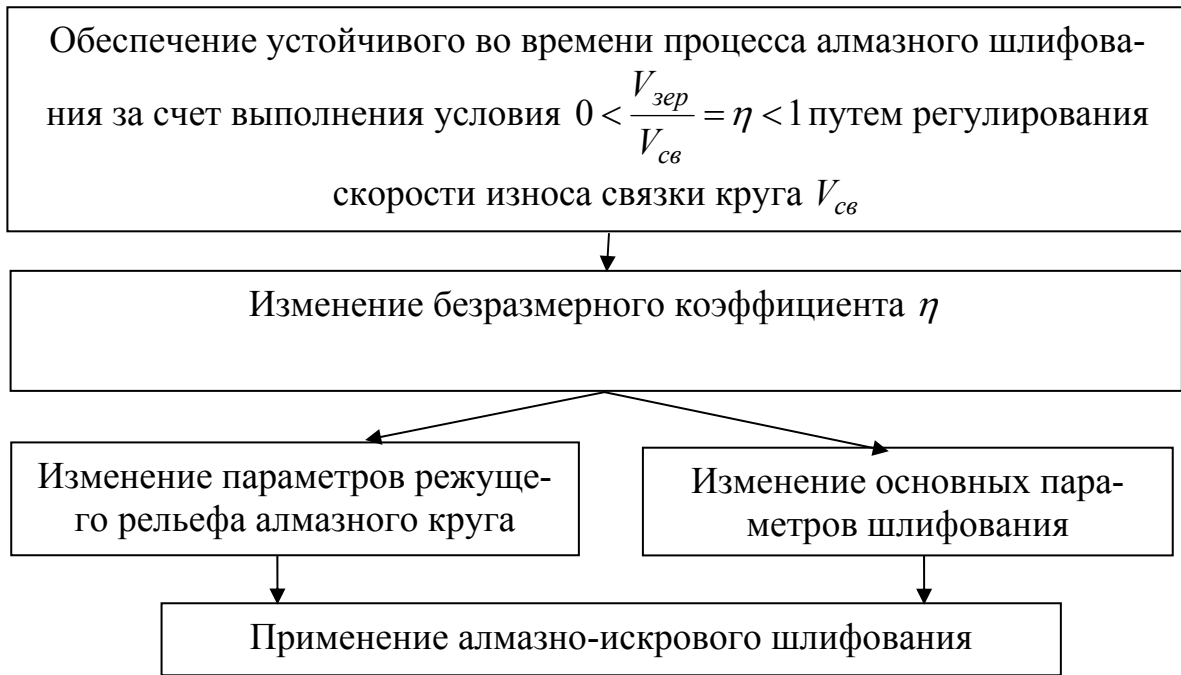


Рис. 3. Структурная схема, показывающая влияние скорости износа связки круга $V_{св}$ на основные параметры шлифования.

Теоретически установлено, что с увеличением скорости износа связки $V_{св}$ безразмерный коэффициент η и величина x неограниченно уменьшаются; параметры H и H_{max} стремятся принять значение

$$H_0 = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр}}},$$

а производительность обработки Q - увеличивается, рис. 2. Этим показано, что связь между скоростью износа связки $V_{св}$ и параметрами шлифования обусловлена безразмерным коэффициентом η , рис. 3. Следовательно, обеспечить выполнение условия $V_{св} > V_{зер}$ можно, прежде всего, за счет регулирования скорости износа связки $V_{св}$, реализуя режим самозатачивающего алмазного круга или применяя алмазно-искровое шлифование, позволяющее интенсифицировать процесс разрушения металлической связки круга. Из этого вытекает, что при алмазно-искровом шлифовании увеличение скорости износа связки круга $V_{св}$ приводит к уменьшению безразмерного коэффициента $\eta \rightarrow 0$ и соответственно величины линейного износа зерна x .

Получены аналитические зависимости, описывающие параметры устойчивого во времени режущего рельефа алмазного круга и основные технологические показатели высокопроизводительного алмазного шлифования изделий из высокопрочных пластичных материалов с учетом разделения максимальной высоты выступающих зерен над уровнем связки b на три составляющие, равные соответственно величине линейного износа максимально выступающего над уровнем связки зерна x , максимальной толщине среза H_{max} и толщине слоя Δ , заполняемого образующимися стружками и другими продуктами обработки (рис. 1):

$$b = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot B \cdot (1 - \eta^2)}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} + \frac{Q}{V_{кр} \cdot B} \cdot \xi, \quad (3)$$

где $Q = B \cdot V_{dem} \cdot t$ - производительность обработки, м³/с; B - ширина круга, м; ξ - коэффициент, учитывающий степень заполнения стружкой межзеренного пространства круга ($\xi > 1$).

Первое слагаемое в правой части уравнения (3) определяет глубину внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга H , а второе – высоту межзеренного пространства круга, заполняемого стружкой Δ . По мере затупления зерен (увеличения безразмерного коэффициента $\eta \rightarrow 0$) при условии $b = const$ первое слагаемое увеличивается, а второе уменьшается.

Безразмерный коэффициент ξ зависит от обрабатываемого материала. При обработке твердых сплавов и других хрупких материалов $\xi \approx 1$. При обработке пластичных материалов $\xi > 1$. Очевидно, при определенных условиях безразмерный коэффициент ξ может принимать относительно большие значения, тогда второе слагаемое уравнения (3) примет значение, близкое к величине b . В этом случае процесс шлифования практически неосуществим. Для эффективного ведения процесса шлифования необходимо уменьшить безразмерный коэффициент ξ , например, за счет применения алмазно-искрового шлифования, обеспечивающего частичное сгорание стружек.

Наибольшее влияние на производительность обработки Q оказывает безразмерный коэффициент η , т.к. при условии $\eta \rightarrow 1$ первое слагаемое уравнения (3) стремится к бесконечности.

Из этого следует, что основным условием существенного увеличения

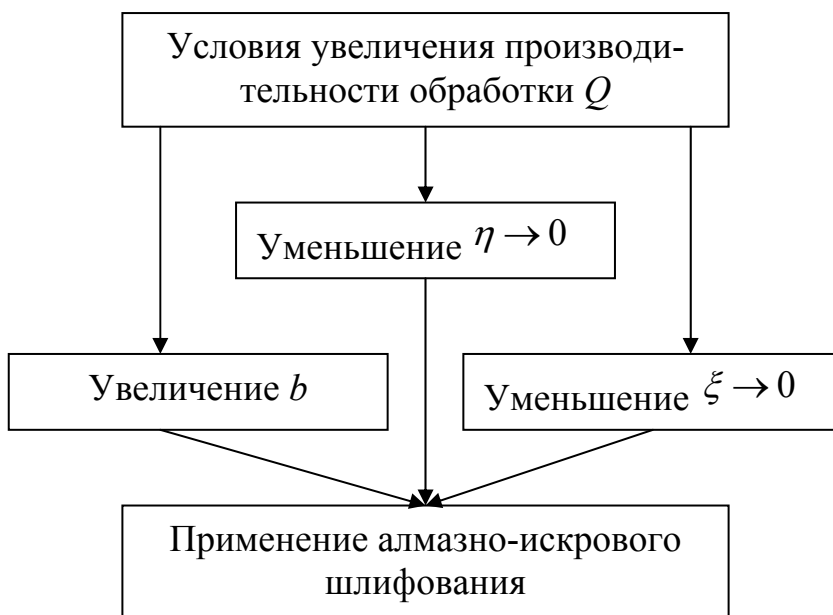


Рис. 4. Структурная схема условий увеличения производительности обработки Q .

производительности обработки необходимо рассматривать обеспечение высокой остроты режущих зерен. При этом необходимо добиваться увеличенного выступания зерен над уровнем связки (увеличения b) и уменьшения коэффициента ξ . Эффективным техническим решением данной задачи является применение метода алмазно-искрового шлифования. За счет возбуждения в зоне резания электрических разрядов происходит тер-

мическое разрушение поверхностных слоев металлической связки алмазного

круга и частичное сгорание (испарение) образующихся стружек обрабатываемого металла или сплава. В результате осуществляется целенаправленное принудительное удаление затупившихся зёрен, обеспечиваются основные условия повышения производительности обработки Q (рис. 4): уменьшаются безразмерные коэффициенты η и ξ , увеличивается параметр b .

Разрешим уравнение (3) относительно неизвестного параметра Q для условия $\eta < 0,8$:

$$Q = \frac{V_{кр} \cdot B \cdot b^2}{\xi \cdot \left[\sqrt{\frac{1}{4 \cdot \xi \cdot (H_0 - x)^{2/3}} \cdot \frac{630 \pi \cdot \bar{X}^3}{m} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} + b} + \frac{0,5}{\xi^{1/2} \cdot (H_0 - x)^{1/3}} \cdot \frac{630 \pi \cdot \bar{X}^3}{m} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \right]^2}. \quad (4)$$

где

$$H_0 = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}}}.$$

Наибольшее влияние на производительность обработки Q оказывает разность параметров $(H_0 - x)$. С ее уменьшением производительность обработки Q уменьшается вплоть до нуля. Это происходит за счет увеличения величины линейного износа зерна x до значения H_0 , т.е. при выполнении условия $x \rightarrow H_0$. Поэтому с целью увеличения производительности обработки Q следует уменьшать величину x и увеличивать параметр H_0 , который по физической сути определяет максимальную толщину среза неизношенными зернами круга (т.е. при шлифовании вновь заправленным кругом). Уменьшение величины линейного износа зерна x предполагает уменьшение безразмерного коэффициента $\eta = x / H$.

Решение уравнения (3) для случая $0,8 < \eta < 1,0$:

$$Q = \frac{(b - x) \cdot V_{кр} \cdot B}{\xi}. \quad (5)$$

Производительность обработки Q тем больше, чем больше максимальная высота выступания изношенных зерен над уровнем связки круга $(b - x)$, соответственно параметры $V_{кр}$, B и меньше безразмерный коэффициент ξ .

Экспериментально установлено (рис. 5,а), что с увеличением силы тока I при плоском алмазно-искровом шлифовании удельный расход алмаза q и параметр шероховатости обработки R_a непрерывно увеличиваются. При этом скорость износа связки круга $V_{св}$, которая с физической точки зрения пропорциональна произведению удельного расхода алмаза q и производительности обработки Q , также увеличивается. Следовательно, уменьшается безразмерный коэффициент η , согласно зависимости (2).

Аналогичный вывод можно сделать, анализируя график изменения параметра R_a с помощью аналитической зависимости:

$$R_a = 2 \cdot 5 \sqrt{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} \cdot \frac{4 \cdot \pi^4 \cdot \bar{X}^6 \cdot R_{дет}^2 \cdot S_{np}^2 \cdot \rho}{\text{tg}^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot B^2}}, \quad (6)$$

где S_{np} - скорость продольной подачи, м/с.

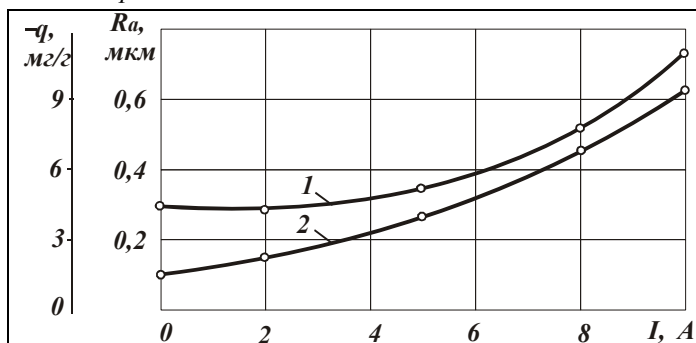


Рис. 5,а. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности R_a (1) и удельного расхода алмаза q (2) от силы тока I : обрабатываемый материал - сталь ХЗФ8; алмазный круг - 1А1 250х15х5 АС6 100/80 М2-01 4; режим шлифования - $V_{кр}=35$ м/с, $V_{дет}=10$ м/с, $S_{нон}=3,3$ мм/дв. ход, $t=0,018$ мм; номинальная производительность обработки $Q=300$ мм³/мин.

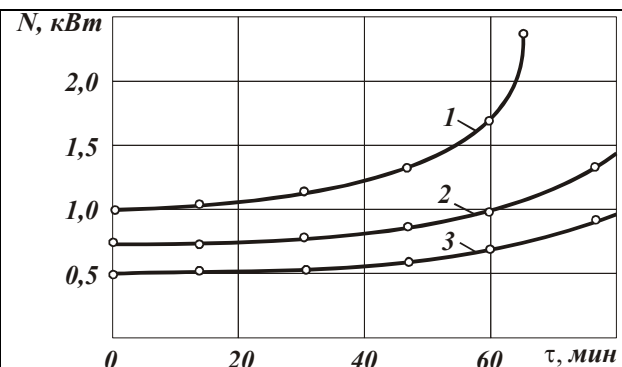


Рис. 5,б. Зависимость мощности резания N от времени обработки τ : 1 - $I=0$; 2 - $I=5$ А; 3 - $I=10$ А; обр. материал - сталь ХЗФ8; алмазный круг - 1А1 250х15х5 АС6 100/80 М2-01 4; режим шлифования - $V_{кр}=35$ м/с, $V_{дет}=10$ м/с, $S_{нон}=3,3$ мм/дв. ход, $t=0,018$ мм; номинальная производительность обработки $Q=300$ мм³/мин.

Как следует из рис. 5,а, с увеличением силы тока I параметр R_a увеличивается, что, согласно зависимости (6), ведет к уменьшению безразмерного коэффициента η .

Уменьшение мощности шлифования N с увеличением силы тока I (рис. 5,б) также связано с уменьшением безразмерного коэффициента η вследствие осуществления процесса резания более острыми зернами круга.

Используя полученные экспериментальные данные производительности обработки Q , удельного расхода алмаза q , мощности шлифования N , параметра шероховатости обработки R_a , по соответствующим методикам расчетно-экспериментальным путем были определены значения безразмерного коэффициента η для алмазного и алмазно-искрового шлифования. Установлено, что во всех случаях безразмерный коэффициент η меньше при алмазно-искровом шлифовании. Исходя из зависимости (2), это соответствует большей скорости износа металлической связки круга (за счет ее ударно-термического разрушения от действия электрических разрядов), а согласно уравнения (3) - большей производительности алмазно-искрового шлифования.

В работе теоретически выявлен и экспериментально подтвержден экстремальный характер изменения удельного расхода алмаза q и технологической себестоимости обработки с изменением производительности Q и безразмерного коэффициента η при шлифовании изделий из высокопрочных пластичных материалов:

$$q = \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кр} \cdot B \cdot \alpha}{Q} \cdot \frac{V_{зеп}}{\left[1 - \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{\left(b - \frac{Q \cdot \xi}{V_{кр} \cdot B} \right)^3} \right]} \approx \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \frac{630 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^3 \cdot D_{кр} \cdot \alpha \cdot V_{зеп}}{m \cdot V_{кр} \cdot b^3} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{\eta \cdot (1 - \eta)}, \quad (7)$$

где ρ_a , ρ_m - соответственно плотности алмаза и обрабатываемого материала, кг/м³; $D_{кр}$, B - соответственно диаметр и ширина алмазного круга, м; α - коэффициент, учитывающий плотность связки в зависимости от концентрации алмазных зёрен в круге.

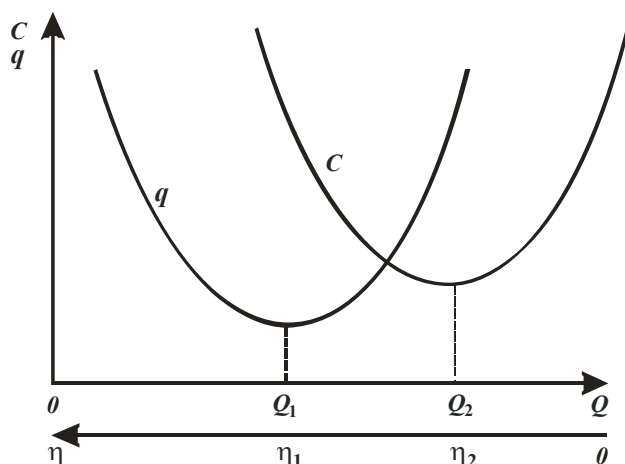


Рис. 6. Зависимости удельного расхода алмаза q и технологической себестоимости C от производительности обработки Q и безразмерного коэффициента η (где $\eta_2 > \eta_1$).

Так, на основе зависимости (7) установлено, что экстремум (минимум) удельного расхода алмаза q достигается при $\eta=0,5$. Установлено так же, что в точке минимума технологической себестоимости обработки экстремальное значение производительности больше, а экстремальное значение безразмерного коэффициента η меньше, чем в точке минимума удельного расхода алмаза (рис. 6). Этим подтверждена достоверность полученных теоретических решений

и сделан вывод о том, что в основу расчета оптимальных параметров рассматриваемых операций алмазного шлифования необходимо положить безразмерный коэффициент η , который определяет соотношение $V_{зеп} / V_{св}$ и условия формирования основных показателей обработки.

С учетом этого теоретически и экспериментально обоснованы технологические возможности повышения эффективности операций алмазного шлифования. На основе аналитических зависимостей для определения шероховатости обработки и удельного расхода алмаза и соответствующих экспериментальных данных произведена оценка влияния кинематического и физического (обусловленного безразмерным коэффициентом η) факторов на формирование основных показателей алмазного шлифования. Так, с увеличением η коэффициент

$k = 5 \sqrt{\frac{(1 - \eta)^4}{(1 + \eta)^2}}$, входящий в зависимость (6), уменьшается, табл. 1. Это указывает

на возможность значительного уменьшения параметра R_a за счет создания на зернах площадок, особенно в диапазоне $\eta > 0,8$.

Таблица 1

Расчётные значения коэффициента k

η	0	0,3	0,5	0,8	0,9	0,95
k	1,0	0,64	0,48	0,41	0,12	0,07

В работе аналитически установлена связь безразмерного коэффициента η с известным соотношением a_z / R , определяющим условия стружкообразования при микрорезании отдельным зерном (где a_z - толщина среза, м; R - радиус округления вершины зерна). По данным проф. Крагельского И.В., переход от процесса упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала к процессу микрорезания осуществляется при условии $a_z / R > 0,04$. Это соответствует изменению безразмерного коэффициента η в пределах 0,13...0,91, табл. 2. Чем больше соотношение a_z / R , т.е. чем интенсивнее процесс стружкообразования при шлифовании, тем меньше значения η и больше производительность обработки Q , исходя из уравнения (3). Наибольшему значению $\eta = 0,91$ (при $\gamma = 45^\circ$) соответствует наименьшее значение $a_z / R = 0,04$. Такое же значение η получено экспериментально при шлифовании алмазными зёрнами с искусственно созданными на них площадками. За счет этого, например, по данным Дитиненко С.А., удалось уменьшить параметр шероховатости обработки R_a с 2,0 до 0,1 мкм.

Таблица 2

Расчетные значения η

γ , град	a_z / R					
	0,04	0,01	0,2	0,3	0,5	1,0
45	0,91	0,805	0,67	0,58	0,45	0,29
60	0,78	0,6	0,43	0,33	0,23	0,13

Установленная связь безразмерного коэффициента η и соотношения a_z / R позволяет оценить возможность осуществления процесса микрорезания при шлифовании для конкретных значений η , полученных, например, исходя из минимума технологической себестоимости обработки или из условия обеспечения заданной шероховатости и т.д. При необходимости – позволяет корректировать установленные значения η .

В работе получены аналитические зависимости для определения составляющих силы резания, в частности, радиальной составляющей силы резания P_y , выраженной через радиус округления вершины зерна R :

$$P_y = 2,25 \cdot \left(\frac{R}{X}\right)^2 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{m \cdot Q \cdot HV}{315 \cdot \pi}\right)^2 \cdot \frac{B \cdot \tau_{сдв}}{V_{дет} \cdot V_{кр} \cdot \rho}}, \quad (8)$$

где HV , $\tau_{сдв}$ - твёрдость (по Виккерсу) и предел прочности на сдвиг обрабаты-

ваемого материала, Н/м².

Исходя из зависимости (8), наибольшее влияние на P_y оказывает соотношение R/\bar{X} . Для начального момента обработки можно принять $\bar{X}=2R$. По мере износа зерна параметр R и соответственно P_y увеличиваются, а $\bar{X}<2R$. Чтобы уменьшить P_y в процессе шлифования необходимо регулировать параметр R путем введения в зону резания дополнительной электрической энергии, своевременно удаляя затупившиеся зерна, т.е. поддерживая в процессе заданное значение R . Эффективно также увеличивать зернистость круга \bar{X} с целью снижения интенсивности роста параметра R , что хорошо согласуется с практикой алмазного шлифования.

Обеспечить уменьшение P_y при условии $Q = const$ можно увеличением скоростей детали $V_{дет}$ и круга $V_{кр}$, т.е. применением многопроходного высокоскоростного шлифования.

На основе приведенных решений может быть предложена следующая методика выбора оптимальных параметров операций алмазно-искрового шлифования изделий из высокопрочных пластичных материалов (рис. 7).



Рис. 7. Структурная схема выбора оптимальных условий алмазно-искрового шлифования.

Данная методика отличается от известных аналогичных методик и позволяет в большей степени использовать потенциальные возможности алмазного шлифования.

Список литературы:

1. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Одесса: ОГПУ, 1995. – 36 с.
2. Гуцаленко Ю.Г. Алмазное электроэрозионное шлифование теплостойких наплавов. - Авиационно-космическая техника и технология. Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. - Харьков: ХАИ, 2000, вып.14. – С. 355- 357.
3. Новиков Г.В., Гуцаленко Ю.Г. Роль кинематического и физического факторов в процессе шлифования. - Резание и инструмент в технологических системах. – Междунар. научно-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 58. – С. 116-123.
4. Гуцаленко Ю.Г., Новиков Г.В. Формирование режущего рельефа круга и обеспечение производительности обработки при алмазном электроэрозионном шлифовании. – Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”: Збірка наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2001. – № 6. – С. 48-52.
5. Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г. Условия повышения производительности алмазного шлифования. – Вісник НТУ ”ХПІ”. Збірка наукових праць. Тем. вип.: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2001. - № 4. – С. 194-197.
6. Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г. Формирование рабочей поверхности алмазного круга в процессе шлифования. – Вісник НТУ “ХПІ” Збірник наукових праць. Тем. вип.: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002. - № 9, т. 10. – С. 115-120.
7. Гуцаленко Ю.Г. Алмазно-искровое шлифование высокопрочных пластичных материалов. – Вісник інженерної академії України, спец. випуск, Київ, 2002. – С. 259 – 262.
8. Гуцаленко Ю.Г. Производительность процесса алмазного электроэрозионного шлифования. - Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. - Труды 5-й Международной научно-технической конференции, 28-29 мая 2002 г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2002. – С. 293 - 296.