

## ПРЕЦИЗИОННАЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ

**Дитиненко С.А.**, канд. техн. наук, доц., **Крюк А.Г.**, канд. техн. наук, проф.  
(Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, Харьков, Украина)

*Приведены результаты исследований прецизионного шлифования цилиндрических твердосплавных изделий алмазными кругами на металлических связках с предварительным образованием на зернах площадок износа, что позволило существенно уменьшить высоту микронеровностей на обрабатываемых поверхностях и снизить трудоемкость обработки*

*Ключевые слова: алмазное шлифование, твердосплавные изделия, шероховатость поверхности, производительность обработки, трудоемкость, точность обработки*

*Наведено результати досліджень прецизійного шліфування циліндричних твердосплавних виробів алмазними кругами на металевих зв'язках з попереднім утворенням на зернах майданчиків зносу, що дозволило суттєво зменшити висоту мікронерівностей на оброблюваних поверхнях і знизити трудомісткість обробки*

*Ключові слова: алмазне шліфування, твердосплавні вироби, шорсткість поверхні, продуктивність обробки, трудомісткість, точність обробки*

*The results of investigations of precision grinding of cylindrical carbide articles with diamond circles on metal bonds with preliminary formation on the grains of wear areas have been presented, which made it possible to significantly reduce the height of microroughness on the surfaces to be treated and to reduce the processing complexity*

*Keywords: diamond grinding, carbide products, surface roughness, processing capacity, labor input, processing precision*

В машиностроении, особенно в авиационном производстве, широко применяются изделия из твердых сплавов цилиндрической формы (вставки, инструменты для обработки материалов давлением и резанием и т.д.), к качеству обработки которых предъявляются высокие требования. Например, шероховатость обработки цилиндрических поверхностей – на уровне  $R_a = 0,1$  мкм и менее. При этом возникает необходимость съема больших припусков – до 2-х мм на сторону и более. Применение традиционных технологий обработки указанных изделий, включающих операции шлифования абразивными и алмазными кругами, операции доводки алмазными пастами, характеризуется высокой трудоемкостью обработки, в особенности на операциях доводки. Это требует совершенствования технологий шлифования с целью снижения трудоемкости операций доводки, а в лучшем случае – исключение их из технологических процессов обработки, обеспечивая требуемые показатели качества обработки на операциях шлифования.

Перспективным направлением решения данных задач является применение технологий шлифования алмазными кругами на металлических связках, которые обладают большими технологическими возможностями с точки зрения повышения производительности и снижения технологической себестоимости обработки. Однако, как известно, данные технологии не обеспечивают высоких показателей шероховатости и точности обработки, особенно в условиях шлифования с относительно низкой жесткостью технологической системы, что

имеет место на операциях круглого наружного шлифования. Это требует разработки новых более эффективных технологий шлифования алмазными кругами на металлических связках, в том числе с применением электроэрозионной правки, позволяющих наряду с повышением производительности и снижением технологической себестоимости обработки улучшить параметры качества обработки (шероховатость и точность обрабатываемых поверхностей) до уровня показателей доводки свободным абразивом (алмазными пастами). В связи с этим актуальна задача разработки и внедрения эффективного технологического процесса прецизионной обработки цилиндрических твердосплавных изделий с применением алмазных кругов на металлических связках.

В работе предложено новое решение задачи оптимизации структуры и параметров операции круглого наружного шлифования по критерию наибольшей производительности с учетом ограничения по точности обработки. Установлено, что в связи с возникновением в технологической системе упругого перемещения  $\delta$ , фактическая производительность обработки  $Q_{\phi}$  всегда меньше номинальной производительности  $Q_{ном}$  на величину второго слагаемого  $\delta / \Pi$  зависимости:

$$Q_{\phi} = Q_{ном} \cdot \left(1 - \frac{\delta}{\Pi}\right), \quad (1)$$

где  $\delta = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ ;  $\Pi$  – снимаемый припуск, м;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коэффициент шлифования;  $P_y$ ,  $P_z$  – соответственно радиальная и тангенциальная составляющие силы резания при шлифовании, Н;  $\sigma$  – условное напряжение резания при шлифовании, Н/м<sup>2</sup>;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с.

Уменьшение величины  $\delta$  (определяющей точность размера обработки) требует уменьшения  $Q_{ном}$ . Однако, это не эффективно, т.к. при этом уменьшается  $Q_{\phi}$ . Эффективнее операцию круглого наружного шлифования выполнить в два перехода: черновое шлифование и выхаживание. Тогда средняя фактическая производительность операции шлифования  $Q_{ср}$  определится:

$$Q_{ср} = \frac{Q_{ном}}{\left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}, \quad (2)$$

где  $\tau_1, \tau_2$  – время переходов чернового шлифования и выхаживания, с;  $\tau_1 = \Pi / S_{нон}$ ;  $S_{нон}$  – поперечная подача, м/ход.

Для определения времени  $\tau_2$  получено дифференциальное уравнение интенсивности съема материала при выхаживании с учетом упругих перемещений в технологической системе:

$$\frac{dv}{d\tau} + A \cdot v = B, \quad (3)$$

где  $A = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot F}$ ;  $B = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi_1}{\sigma}$ ;  $v$  – объем снятого материала,  $m^3$ ;

$\Pi_1, \Pi_2$  – припуски, удаляемые на переходах черного шлифования и выхаживания,  $m$ ;  $F$  – площадь обрабатываемой цилиндрической поверхности,  $m^2$ .

С учетом начального условия  $\delta /_{\tau=0} = \Pi_2$  решение уравнения (3):

$$Q_{\phi} = Q_{\phi_2} \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \tau}{\sigma \cdot F}}; \quad \delta = \Pi_2 \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \tau}{\sigma \cdot F}}; \quad Q_{\phi_2} = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi_2}{\sigma}. \quad (4)$$

Основное время операции круглого наружного шлифования:

$$(\tau_1 + \tau_2) = \frac{F}{c \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_1 \cdot \left[ \frac{1}{k_2} + z \cdot \ln \left( \frac{k_2}{k_0} \right) \right] = \frac{F}{c \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_1 \cdot \Phi, \quad (5)$$

где  $z = \left( \frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_2 / \left( \frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_1$  – безразмерный коэффициент,  $z \geq 1$ ; индексы 1 и 2 соответствуют переходам черного шлифования и выхаживания;

$k_2 = \Pi_2 / \Pi$ ;  $k_0 = \delta_0 / \Pi$ ;  $\delta_0$  – точность размера обработки,  $m$ .

Рассмотрим случай 1 ( $z = 1$ ). Исходя из рис. 1,а, наименьшее значение безразмерной функции  $\Phi$  (определяющей основное время операции шлифования) достигается при  $\tau_1 = 0$ , т.е. оптимальная по структуре операция шлифования включает лишь переход выхаживания (и естественно, непродолжительный переход создания начального натяга в технологической системе).

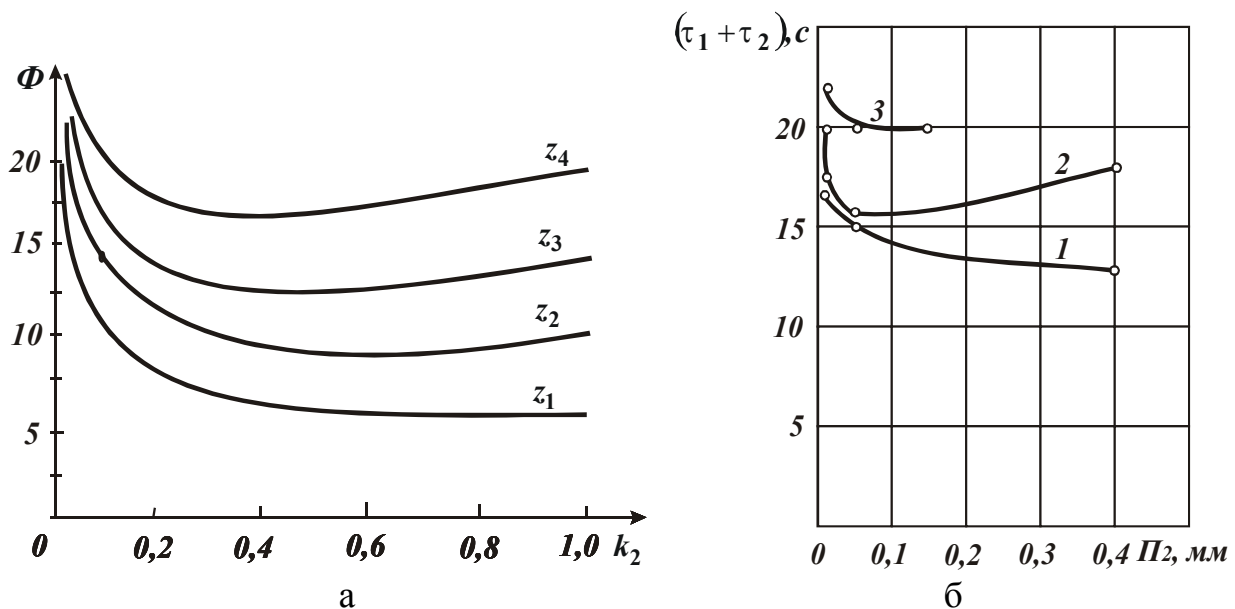


Рис. 1 – Зависимость безразмерной функции  $\Phi$  от безразмерного коэффициента  $k_2$  ( $z_1 = 1$ ;  $z_2 = 2$ ;  $z_3 = 3$ ;  $z_4 = 4$ ) (а) и зависимость основного времени операции шлифования  $(\tau_1 + \tau_2)$  от припуска  $\Pi_2$  при обработке: 1 – алмазным кругом (1А1 300x25x5 АС6 125/100 М1-10 4) после его электроэрозионной правки; 2 – затупленным алмазным кругом (после 10 минут работы); 3 – алмазным кругом с плосковершинными зернами (б).

Рассмотрим случай 2 ( $z > 1$ ). Исходя из рис. 1,а, для  $z > 1$  безразмерная функция  $\Phi$  с увеличением коэффициента  $k_2$  изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. С увеличением  $z$  экстремальные значения функции  $\Phi$  увеличиваются и смещаются в область меньших значений  $k_2$ . Это указывает на значительное влияние коэффициента  $z$  (определяющего режущую способность круга) на структуру операции шлифования. Чем “острее” круг, тем эффективнее удалять большую часть припуска на переходе выхаживания. При шлифовании недостаточно “острым” кругом практически весь припуск необходимо удалять на переходе черного шлифования и лишь незначительную его часть – на переходе выхаживания. Теоретические результаты подтверждены экспериментально (рис. 1,б). При шлифовании “острым” алмазным кругом на металлической связке М1-10 (после электроэрозионной правки, кривая 1) время  $(\tau_1 + \tau_2)$  с увеличением  $\Pi_2$  непрерывно уменьшается, что соответствует кривой  $z = 1$  (рис. 1,а). При шлифовании приработанным алмазным кругом зависимость  $(\tau_1 + \tau_2) - \Pi_2$  трансформируется в экстремальную, что соответствует кривым для  $z > 1$  (рис. 1,а). При шлифовании алмазным кругом (после электроэрозионной правки, а затем его обтачивания алмазным правящим карандашом, т.е. со значительными площадками износа на зернах), зависимость  $(\tau_1 + \tau_2)$  от  $\Pi_2$  реализуется лишь для небольших значений  $\Pi_2$ . В результате основная часть припуска удаляется на переходе черного шлифования. Этим подтверждены теоретические результаты, на основании которых определены основные пути уменьшения длительности оптимальной по структуре операции шлифования, включающей лишь переход выхаживания:

$$\tau = \frac{F}{c \cdot V_{кр}} \cdot \frac{\sigma}{K_{ш}} \cdot \ln \frac{\Pi}{\delta_0}, \quad (6)$$

где  $\frac{\sigma}{K_{ш}} = \frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV}{2 \cdot (1 - \eta)}$ ;  $\eta = \frac{x}{(x + H_{max})}$ ;  $HV$  – твердость (по Виккерсу) обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – половина угла при вершине режущего зерна, рабочая часть которого представлена в форме усеченного конуса;  $\eta$  – безразмерный коэффициент, изменяется в пределах 0...1;  $x$  – условная величина линейного износа зерна, м;  $H_{max}$  – максимальная толщина среза, м.

В работе также получено новое решение задачи существенного уменьшения шероховатости цилиндрических поверхностей при круглом наружном шлифовании. В основу решения положена идея о возможности значительного уменьшения шероховатости поверхности за счет применения алмазного круга на металлической связке с примерно одновысотным выступанием режущих зерен из связки, полученным в результате электроэрозионной правки круга и его последующего обтачивания алмазным правящим карандашом. Для обоснования данного решения разработана аналитическая модель формирования шероховатости цилиндрических поверхностей при шлифовании и произведен расчет параметра шероховатости  $R_{max}$  для круга с одновысотным выступанием режущих зерен без учета (уравнение (7)) и с учетом (уравнение (8)) образования на них площадок износа:

$$R_{max}^{1,5} \cdot (R_{max} + x) = \frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{6 \cdot \text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{1}{D_{кр}} + \frac{1}{D_{дет}}}; \quad (7)$$

$$\left[ \left( R_{max} + \frac{3 \cdot x}{4} \right)^2 - \frac{x^2}{16} \right] \cdot \sqrt{R_{max}} = \frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{6 \cdot \text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{1}{D_{кр}} + \frac{1}{D_{дет}}}, \quad (8)$$

где  $\bar{X}$  – зернистость круга, м;  $m$  – объемная концентрация зерен круга;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с;  $D_{кр}, D_{дет}$  – диаметры круга и детали, м.

При условии  $x=0$  уравнения (7) и (8) принимают вид зависимости:

$$R_{max} = \left( \frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{6 \cdot \text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{1}{D_{кр}} + \frac{1}{D_{дет}}} \right)^{0,4}. \quad (9)$$

Установлено, что из всех входящих в уравнения (7) и (8) параметров наибольшее влияние на  $R_{max}$  оказывает величина  $x$ , особенно в случае образования на зернах площадок износа (рис. 2). С увеличением  $x$  можно существенно (вплоть до нуля) уменьшить параметр  $R_{max}$ . Выполненные экспериментальные исследования подтвердили теоретические результаты. При шлифовании алмазным кругом на металлической связке 1A1 300x20x5 AC6 125/100 M1-10 4 (после его электроэрозионной правки, а затем обтачивания алмазным правящим карандашом) параметр шероховатости  $R_a$  уменьшился с 2,2 до 0,1 мкм, т.е. примерно в 20 раз (кривая 2, рис. 3). При этом изменение режимов шлифования и приработка круга (кривая 1, рис. 3) не привели к существенному уменьшению шероховатости обработки. Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволило сделать вывод о том, что эффект значительного уменьшения шероховатости обработки обусловлен, во-первых, созданием примерно одновысотного выступания режущих зерен над уровнем связки круга, во-вторых, образованием на режущих зернах площадок износа.

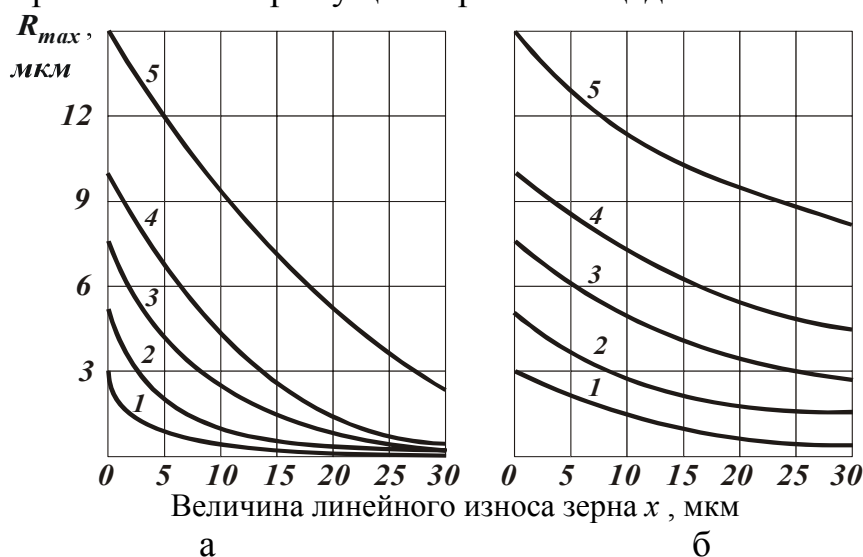


Рис. 2. Зависимости шероховатости поверхности  $R_{max}$  от величины линейного износа зерна  $x$  на основе: а – уравнения (7); б – уравнения (8); 1 –  $\bar{R}_{max} = 3$  мкм; 2 –  $\bar{R}_{max} = 5$  мкм; 3 –  $\bar{R}_{max} = 7,5$  мкм; 4 –  $\bar{R}_{max} = 10$  мкм; 5 –  $\bar{R}_{max} = 15$  мкм

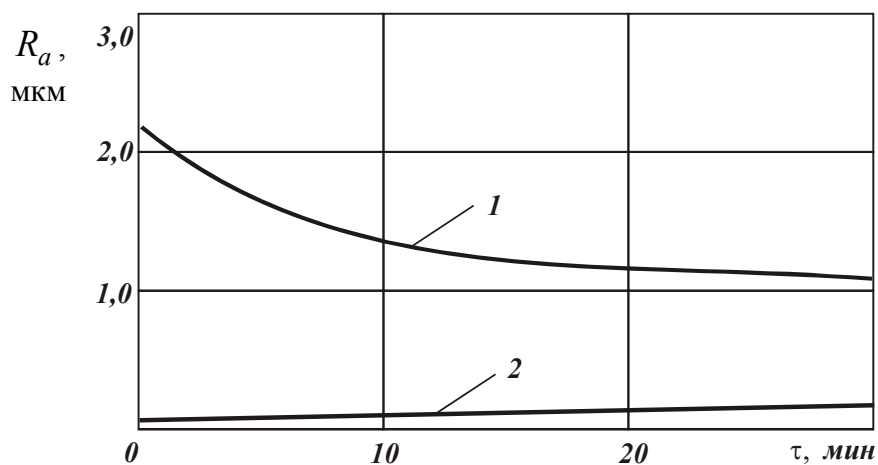


Рис. 3 – Зависимости шероховатости поверхности  $R_a$  от времени шлифования  $\tau$  :  
 1 – после электроэрозионной правки круга;  
 2 – после создания площадок на вершинах зерен круга

Экспериментально установлено, что при шлифовании алмазным кругом на металлической связке М1-01 с течением времени обработки наблюдается некоторое увеличение параметра шероховатости  $R_a$  (кривая 2, рис. 3) вследствие подключения в работу новых более острых зерен. Применение более износостойкого алмазного круга на металлической связке М1-10 позволило устранить данный недостаток – шероховатость обработки практически стабилизировалась во времени на уровне  $R_a = 0,1-0,2$  мкм при изменении глубины шлифования в пределах  $0,01 - 0,025$  мкм.

Произведена оценка достоверности расчета шероховатости цилиндрических поверхностей при шлифовании. Для этого первоначально была получена упрощенная аналитическая зависимость (9) для определения параметра  $R_{max}$ , затем - уточненные зависимости, учитывающие разновысотное выступание зерен над уровнем связки и вероятностный характер участия зерен в резании. Установлено, что во всех трех случаях зависимости имеют вид зависимости (9), отличающиеся лишь цифровыми множителями. Рассчитанное по зависимости (9) значение  $R_a = 0,2 \cdot R_{max}$  для исходных данных:  $tg\gamma = 1$ ;  $m = 100$ ;  $\bar{X} = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м;  $V_{кр} = 30$  м/с;  $V_{дет} = 15$  м/мин;  $D_{кр} = 0,3$  м;  $D_{дет} = 0,014$  м равно  $0,86$  мкм, рассчитанное с учетом разновысотного выступания зерен над уровнем связки –  $R_a = 1,5$  мкм и рассчитанное с учетом вероятностного участия зерен в резании –  $R_a = 2,43$  мкм. Как видно, расчет по уточненным зависимостям ведет к увеличению значений  $R_a$ . По сравнению с экспериментальным значением  $R_a = 1,9$  мкм, учет разновысотного выступания зерен над уровнем связки дает заниженное (в пределах 20%), а учет вероятностного характера участия зерен в резании дает завышенное (в пределах 27%) значения  $R_a$ . Данные результаты позволили впервые с единых позиций количественно оценить влияние различных факторов на условия формирования шероховатости поверхности при шлифовании и приблизить расчетную схему к реальной. На основе полученных результатов обоснован выбор оптимального варианта технологического

процесса прецизионной обработки цилиндрических твердосплавных изделий по критериям наибольшей производительности и наименьшей технологической себестоимости обработки с учетом ограничений по точности и шероховатости обработки. Показано, что требуемые значения точности размера (менее 10 мкм) и шероховатости обработки ( $R_a = 0,1$  мкм) достигаются при  $\eta = 0,91$ . Такое большое значение безразмерного коэффициента  $\eta$ , приближающегося к предельному ( $\eta \rightarrow 1$ ), обусловлено образованием на режущих зернах значительных площадок износа (после обтачивания алмазного круга алмазным правящим карандашом). Шлифование алмазным кругом после электроэрозионной правки обеспечивает практически нулевые значения коэффициента  $\eta$  в связи с высокой остротой режущих зерен круга.

Экспериментально установлено, что увеличение коэффициента  $\eta$  от 0 до 0,91 привело к уменьшению средней производительности рассматриваемого в работе цикла круглого наружного шлифования всего в 2 раза (рис. 4,а). При этом мощность шлифования увеличилась незначительно - всего в 2 раза, т.е. алмазный круг на металлической связке после его электроэрозионной правки и последующего обтачивания алмазным правящим карандашом обладает достаточно высокой режущей способностью, позволяет одновременно обеспечить высокопроизводительный сьем обрабатываемого материала и уменьшить шероховатость обработки в 10...20 раз до значений  $R_a = 0,1 \dots 0,2$  мкм.

Произведен анализ технологической себестоимости обработки на операции шлифования на основе полученной аналитической зависимости, учитывающей две изменяющиеся статьи затрат, связанные с заработной платой рабочего и расходом алмазных кругов. Теоретически установлено, что с увеличением коэффициента  $\eta \rightarrow 1$  технологическая себестоимость обработки  $C$  непрерывно уменьшается (рис. 4,б). Это свидетельствует о возможности реализации для установленных условий шлифования ( $\eta = 0,91$ ) практически минимального значения  $C$ .

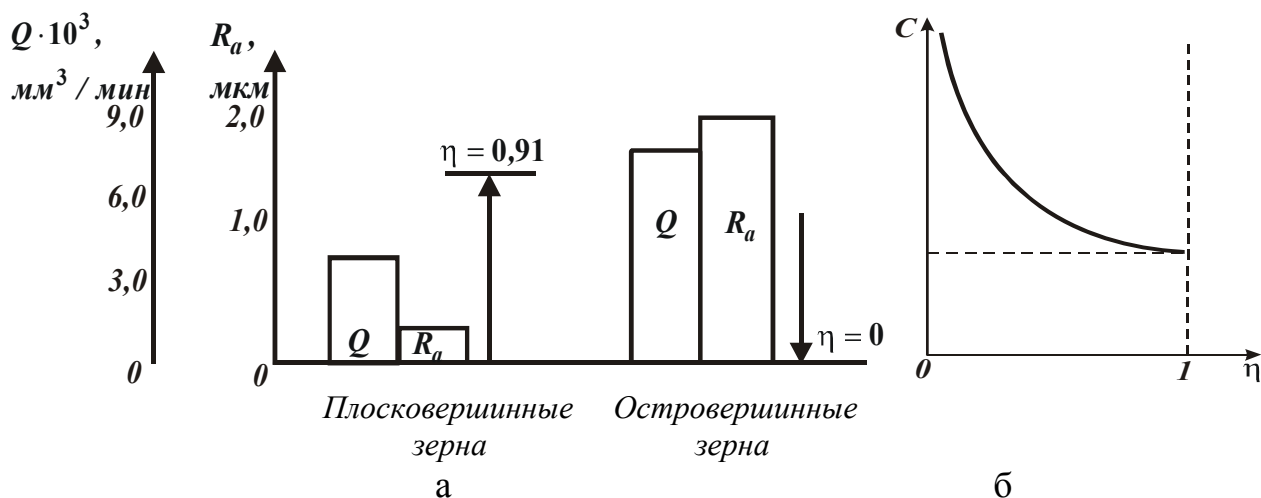


Рис. 4 – Значения производительности  $Q$  и шероховатости обработки  $R_a$  при шлифовании (а) и зависимость технологической себестоимости  $C$  от  $\eta$  (б)

Таблица 1

Сравниваемые варианты технологического процесса обработки специальной твердосплавной развертки (диаметр – 20 мм, длина – 30 мм, припуск – 1 мм)

№ варианта	Операция круглого наружного продольного шлифования	Операция доводки алмазной пастой	Время обработки, мин
1	Алмазный круг 1А1 300х20х5 АС6 125/100 М1-10 4 после электроэрозионной правки и обтачивания алмазным правящим карандашом; $R_a = 0,1$ мкм; $\tau = 2$ мин.	Нет	2
2	Алмазный круг 1А1 300х20х5 АС6 125/100 М1-10 4 после электроэрозионной правки; $R_a = 1,0$ мкм; $\tau = 1$ мин.	Припуск – 0,02 мм; $R_a = 0,1$ мкм; $\tau = 4$ мин.	5
3	Алмазный круг 1А1 300х20х5 АС4 100/80 В2-01 4; $R_a = 0,4$ мкм; $\tau = 3$ мин.	Припуск – 0,02 мм; $R_a = 0,1$ мкм; $\tau = 4$ мин.	7

Сравнение трех вариантов технологического процесса обработки цилиндрической поверхности специального твердосплавного инструмента (двух предложенных и базового варианта, приведенных в табл. 1) показало, что по критерию наибольшей производительности обработки эффективно применение первого варианта. Исключение из технологического процесса операции доводки позволяет также существенно снизить технологическую себестоимость обработки. Для реализации данных условий шлифования разработана специальная технология подготовки алмазного круга к работе, включающая балансирование круга, затем с помощью электроэрозионной правки окончательное устранение биения (в пределах 10 мкм), качественное вскрытие алмазоносного слоя круга и обтачивание его алмазным правящим карандашом с целью обеспечения примерно одновысотного выступания режущих зерен над связкой круга и высокой чистоты обрабатываемой поверхности. Разработанный технологический процесс прецизионной обработки цилиндрических твердосплавных изделий внедрен на ГП ХМЗ “ФЭД”.

**Список литературы:** 1. Дитиненко С.А. Обоснование условий уменьшения шероховатости обработки при шлифовании / С.А. Дитиненко // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса, 2001. – Вып. 5. – С. 77–80. 2. Новиков Ф.В. Технология и теория прецизионной обработки твердосплавных инструментов алмазными кругами на металлических связках / Ф.В. Новиков, С.А. Дитиненко // Физические и компьютерные технологии: Труды 8-й Межд. научн.-техн. конф., 9-10 декабря 2003 г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2003. – С. 34–39. 3. Дитиненко С.А. Параметрическая оптимизация цикла круглого наружного продольного алмазного шлифования специальных твердосплавных инструментов / С.А. Дитиненко // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. “Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні”. – Харків: ХДТУСГ, 2004. – Вип. 26. – С. 61–70. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2004. – Т. 7. “Точность обработки деталей машин”. – 546 с.