

УДК 621.923

В. В. Габитов, П. Г. Матюха (г. Донецк)

Производительность и удельная себестоимость внутреннего врезного алмазного шлифования твердого сплава с периодическими электроэрозионными воздействиями

Исследовано влияние зернистости алмазного круга на производительность и удельную себестоимость внутреннего врезного шлифования по упругой схеме твердого сплава ВК15. Установлено, что периодическое электроэрозионное воздействие на рабочую поверхность круга с оптимальной периодичностью обеспечивает увеличение производительности обработки на 396 % и снижение удельной себестоимости на 305 % по сравнению со шлифованием без такого воздействия.

Ключевые слова: внутреннее врезное шлифование, упругая схема, производительность обработки, удельная себестоимость.

Повышение производительности обработки при минимальных затратах является одним из условий выпуска конкурентоспособной продукции. Решение этой задачи возможно за счет применения прогрессивных процессов обработки и использования высокопроизводительного инструмента.

В машиностроении и инструментальной промышленности при обработке высокопрочных труднообрабатываемых материалов используются шлифовальные алмазные круги на металлической связке. При этом необходимую режущую способность кругов осуществляют электроэрозионной правкой и поддерживают режущие свойства круга в процессе обработки непрерывным либо периодическим электроэрозионным воздействием (ЭЭВ) на рабочую поверхность круга (РПК). Однако обеспечить высокую производительность обработки при минимальной удельной себестоимости процесса возможно лишь путем его оптимизации.

В [1–3] оптимизацию режимов плоского врезного шлифования твердого сплава с периодическими ЭЭВ на РПК осуществляли по критерию минимальной удельной себестоимости обработки, учитывая изменение текущей лимитированной режущей способности круга (ТЛРСК). Недостатком такой оптимизации является то, что время обновления РПК с помощью ЭЭВ принято постоянным, независимо от состояния поверхности, с которой начинается восстановление режущих свойств. Кроме того, в литературе отсутствуют сведения о применении ТЛРСК для оптимизации процесса внутреннего врезного шлифования, а также о влиянии зернистости на производительность и удельную себестоимость внутреннего врезного шлифования по упругой схеме.

Целью работы было исследование влияния зернистости алмазных кругов на производительность и удельную себестоимость внутреннего врезного шлифования твердого сплава по упругой схеме (в дальнейшем – внутреннего шлифования) с периодическим ЭЭВ на РПК по критерию минимальной удельной себестоимости обработки.

© В. В. ГАБИТОВ, П. Г. МАТЮХА, 2012

Исследование проводили в два этапа. На первом этапе экспериментально находили параметры уравнений, описывающих изменение ТЛРСК и текущего лимитированного расхода алмазов (ТЛРА) в процессе шлифования, на втором – выполняли оптимизацию времени между периодическим ЭЭВ на РПК по критерию минимальной удельной себестоимости обработки.

Параметры уравнений, описывающих ТЛРСК и ТЛРА в процессе шлифования, определяли при внутреннем шлифовании на станке мод. 3А227П, модернизированном для ЭЭВ на РПК и обеспечивающем шлифование по упругой схеме [4] (рис. 1) с использованием в качестве источника технологического тока для ЭЭВ генератора импульсов мод. ИТТ-35.

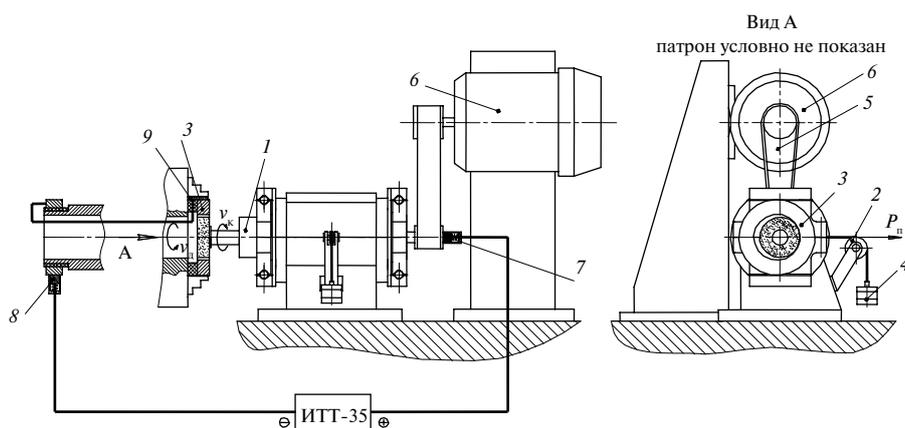


Рис. 1. Схема внутреннего шлифования по упругой схеме с периодическими ЭЭВ на РПК: шлифовальная головка (1), нагрузочное устройство (2), образец (3), груз (4), ось (5), электродвигатель (6), скользящий контакт (7, 8), пластина (9).

Особенностью конструкции шлифовальной бабки является то, что шлифовальная головка установлена с возможностью перемещения на шариковых направляющих относительно стола станка в горизонтальной плоскости. На корпусе шлифовальной бабки закреплено нагрузочное устройство, которое обеспечивает поджим рабочей поверхности шлифовального круга к обрабатываемой поверхности образца с постоянной силой P_n за счет груза определенной массы. Кроме того, ось, проходящая через центры шкивов электродвигателя и шлифовальной головки, расположена в вертикальной плоскости, что минимизирует влияние силы натяжения ремня на усилие поджима РПК к поверхности образца. Для осуществления ЭЭВ на РПК в процессе правки и периодических воздействий при шлифовании положительный полюс источника технологического тока подключали через скользящий контакт к шпинделю шлифовальной головки, а отрицательный – к образцу через скользящий контакт и изолированную от кулачка патрона пластину.

Шлифование образца из твердого сплава ВК15 осуществляли алмазными кругами 1А1 40×16×10×3 АС6 зернистостью 100/80, 125/100, 200/160 на металлической связке М2-01 100 %-ной концентрации. Начальный диаметр шлифуемого отверстия $D_0 = 45$ мм, ширина обрабатываемой поверхности $B = 10$ мм.

Перед экспериментом круги правили электроэрозионным способом на чугунном электроде со средней величиной тока $I_{cp} = 10$ А до полного обновления РПК. Значение напряжения на межэлектродном промежутке, образованном кругом и образцом, в процессе электроэрозионных воздействий состав-

ляло $U_{sm} = 1,5$ В, рабочей средой был 0,3 %-ный водный раствор кальцинированной соды.

Восстановление режущей способности круга (до значения $Q_1 = 350$ мм³/мин) в процессе шлифования твердого сплава ВК15 с помощью ЭЭВ на РПК осуществляли на тех же режимах.

Режущую способность РПК и расход алмазов при шлифовании по упругой схеме определяли в процессе обработки в периоды 0,25, 0,5, 1, 2, 5, 10, 15, 30, 45 мин при $v_k = 26$ м/с, $v_d = 24$ м/мин, силе прижима РПК к образцу $P_n = 20$ Н. Такой режим обеспечивает точность обработки по 6-му качеству с параметром шероховатости $Ra = 1,25$ мкм при обработке кругом зернистостью 100/80.

В результате экспериментов было установлено, что изменения ТЛРСК и ТЛРА при шлифовании без ЭЭВ описываются экспоненциальными зависимостями вида

$$Q(\tau) = Q_{уст} + \Delta Q \exp(-\beta_Q \tau), \quad (1)$$

$$M(\tau) = M_{уст} + \Delta M \exp(-\beta_M \tau), \quad (2)$$

где $Q(\tau)$, $Q_{исх}$, $Q_{уст}$, $M(\tau)$, $M_{уст}$, $M_{исх}$ – соответственно текущее, исходное и установившееся значение режущей способности круга и расхода алмазов; $\Delta Q = Q_{исх} - Q_{уст}$ – амплитуда снижения режущей способности, мм³/мин; $\Delta M = M_{исх} - M_{уст}$ – амплитуда снижения текущего расхода алмазов, мг/мин; β_Q , β_M – эмпирические коэффициенты, 1/мин; τ – продолжительность шлифования, мин.

При восстановлении режущей способности РПК за счет ЭЭВ повышение режущей способности РПК и рост текущего расхода алмазов описываются следующими линейными зависимостями:

$$Q_{ЭЭВ}(\tau) = K_Q \tau + B_Q; \quad (3)$$

$$M_{ЭЭВ}(\tau) = K_M \tau + B_M. \quad (4)$$

Коэффициенты β_Q , β_M , K_Q , K_M , B_Q , B_M уравнений (1)–(4) для исследуемых алмазных кругов приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Параметры уравнений (1) и (3) для разной зернистости алмазного круга

Зернистость	Шлифование				
	без ЭЭВ			с ЭЭВ	
	$Q_{уст}$, мм ³ /мин	ΔQ , мм ³ /мин	β_Q	K_Q , мм ³ /мин	B_Q , мм ³ /мин
100/80	40	371,7	-0,24	384,3	35
125/100	30	409,2	-0,28	732,1	25,4
200/160	20	400,1	-0,13	250,4	17,5

Используя параметры уравнений (1)–(4), приведенные в табл. 1, 2, оптимизировали времени между ЭЭВ для восстановления режущей способности РПК с помощью методики, в которой процесс шлифования чередуется с периодическим ЭЭВ, т. е. повторяются циклы шлифование–шлифование с ЭЭВ [1, 2]. Отличие методики, предложенной авторами в данной работе, заключа-

ется в том, что расчет удельной себестоимости внутреннего шлифования выполнен с учетом фактического расхода алмазов в циклах шлифование–шлифование с ЭЭВ, а также состояния РПК, с которого начинается ее обновление.

Таблица 2. Параметры уравнений (2) и (4) для разной зернистости алмазного круга

Зернистость	Шлифование				
	без ЭЭВ			с ЭЭВ	
	$M_{уст.}$, мг/мин	ΔM , мг/мин	β_M	K_M , мг/мин	B_M , мг/мин
100/80	0,4	105,4	-1,56	170	0,23
125/100	0,7	114,3	-0,76	63,1	0,72
200/160	0,5	166,8	-0,98	121,6	22,7

Рассмотрим процесс шлифования с периодическими ЭЭВ на РПК за станко-час как ряд повторяющихся циклов (рис. 2).

Промежуток времени $0-\tau_1$ соответствует этапу приработки РПК, сформированной в процессе электроэрозионной правки. Этот этап характеризуется наибольшим значением режущей способности РПК и интенсивным износом рабочего слоя круга и считается законченным, когда текущая режущая способность круга достигает значения Q_1 (см. рис. 2, а), соответствующего моменту, когда текущий расход алмазов M_1 стабилизируется из-за выпадения наиболее выступающих из связки зерен (см. рис. 2, б).

За период $\tau_1-\tau_2$ изменяется ТЛРСК в процессе шлифования, время τ_2 соответствует моменту достижения режущей способности круга значения Q_2 , когда начинается восстановление режущей способности круга.

Период $\tau_2-\tau_3$ соответствует изменению ТЛРСК в процессе обработки при введении ЭЭВ в зону резания. При этом происходит восстановление режущей способности круга от значения Q_2 до Q_1 . Данный период характеризуется интенсивным ростом режущей способности за счет удаления продуктов засаливания круга и частиц связки, что приводит также к увеличению расхода рабочего слоя круга.

В момент времени τ_3 , когда текущая режущая способность круга достигает исходного заданного значения Q_1 , ЭЭВ прекращают и круг продолжает работу в режиме обычного шлифования до очередного падения режущей способности до уровня Q_2 , после чего цикл повторяется.

Представленный на рис. 2 период $0-\tau_5$ включает время приработки $\tau_{пр}$; время обработки $\tau_1-\tau_4$ – определенное количество циклов $N_{ц}$, состоящих из периодов шлифования и шлифования с ЭЭВ на РПК; неполный цикл, длительностью $\tau_{ост}$. Количество целых циклов $N_{ц}$ определяется выражением

$$N_{ц} = \frac{\tau_5 - \tau_{пр}}{T + \tau_{ЭЭВ}}. \quad (5)$$

Полученное значение необходимо округлить до меньшего целого значения. Время оставшегося неполного цикла равно

$$\tau_{ост} = \tau_5 - \tau_{пр} - N_{ц}(T + \tau_{ЭЭВ}). \quad (6)$$

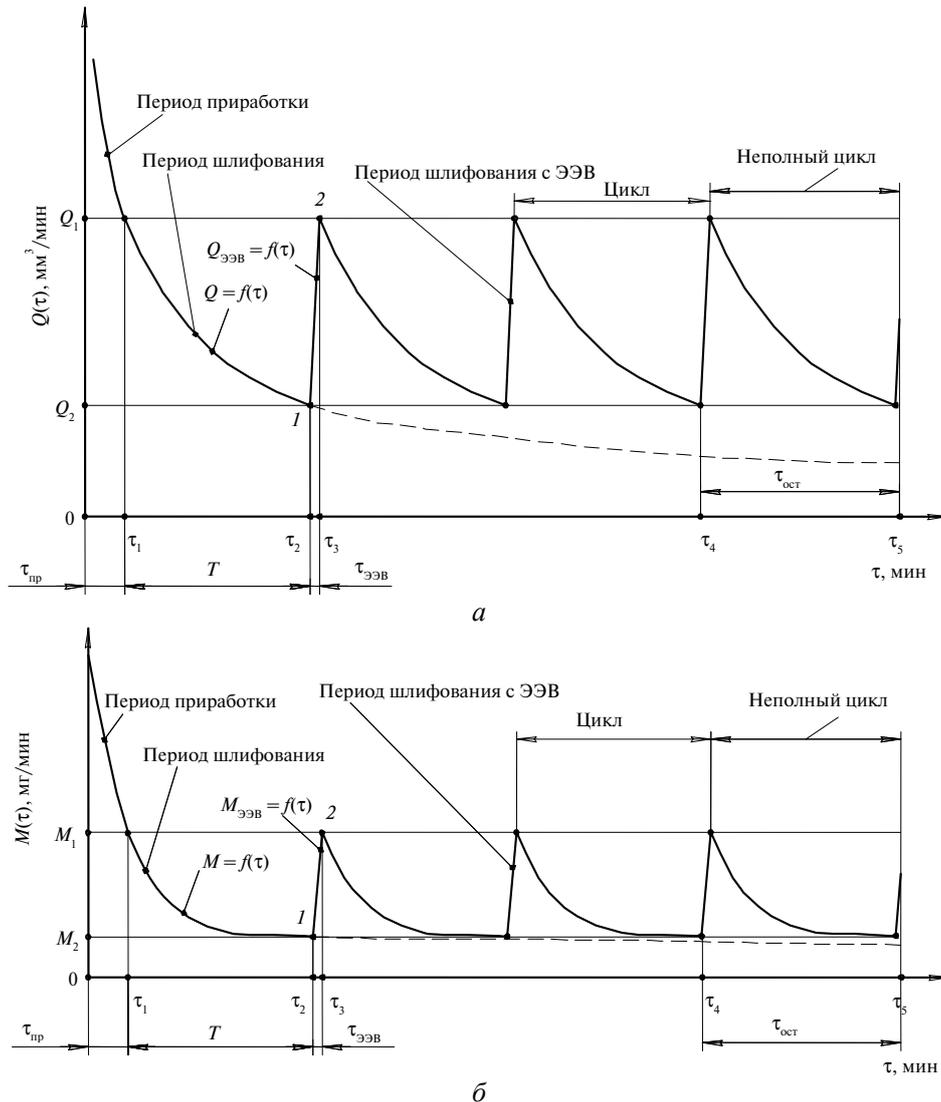


Рис. 2. Изменение во времени текущей лимитированной режущей способности круга (а) и текущего лимитированного расхода алмазов (б) при внутреннем шлифовании с периодическим ЭЭВ на РПК.

В зависимости от значения $\tau_{\text{ост}}$, величина последнего неполного цикла может включать как часть периода шлифования (если $\tau_{\text{ост}} \leq T$), так и период шлифования T с частичным восстановлением режущей способности за счет ЭЭВ (если $\tau_{\text{ост}} > T$).

Очевидно, что объем сошлифованного материала за время выполнения цикла шлифование–шлифование с ЭЭВ будет одинаковым независимо от его порядкового номера $N_{\text{ц}}$, поскольку уравнения $Q(\tau)$ и $Q_{\text{ЭЭВ}}(\tau)$, описывающие изменение режущей способности круга, одинаковы для всех циклов, имеет место лишь смещение цикла по шкале времени. Поэтому для определения объема удаленного материала достаточно рассчитать объем материала, удаленный за один цикл и общее количество циклов. Таким образом, объем уда-

ленного материала в процессе обработки за время шлифования τ_5 , с учетом этапа приработки круга $\tau_{пр}$ и неполного цикла $\tau_{ост}$, будет составлять

$$Q_{0-\tau_5} = \int_0^{\tau_{пр}} Q(\tau) d\tau + N_{ц} \left(\int_{\tau_{пр}}^{\tau_{пр}+T} Q(\tau) d\tau + \int_{\tau_{пр}+T}^{\tau_{пр}+T+\tau_{ЭВ}} Q_{ЭВ}(\tau) d\tau \right) + \int_{\tau_{пр}}^{\tau_{пр}+\tau_{ост}} Q(\tau) d\tau,$$

если $\tau_{ост} \leq T$; (7)

$$Q_{0-\tau_5} = \int_0^{\tau_{пр}} Q(\tau) d\tau + N_{ц} \left(\int_{\tau_{пр}}^{\tau_{пр}+T} Q(\tau) d\tau + \int_{\tau_{пр}+T}^{\tau_{пр}+T+\tau_{ЭВ}} Q_{ЭВ}(\tau) d\tau \right) + \int_{\tau_{пр}}^{\tau_{пр}+T} Q(\tau) d\tau + \int_{\tau_{пр}+T}^{\tau_{пр}+\tau_{ост}} Q_{ЭВ}(\tau) d\tau,$$

если $\tau_{ост} > T$.

Аналогичным образом можно записать и выражения для определения количества израсходованных алмазов за время обработки τ_5 :

$$M_{0-\tau_5} = \int_0^{\tau_{пр}} M(\tau) d\tau + N_{ц} \left(\int_{\tau_{пр}}^{\tau_{пр}+T} M(\tau) d\tau + \int_{\tau_{пр}+T}^{\tau_{пр}+T+\tau_{ЭВ}} M_{ЭВ}(\tau) d\tau \right) + \int_{\tau_{пр}}^{\tau_{пр}+\tau_{ост}} M(\tau) d\tau,$$

если $\tau_{ост} \leq T$; (8)

$$M_{0-\tau_5} = \int_0^{\tau_{пр}} M(\tau) d\tau + N_{ц} \left(\int_{\tau_{пр}}^{\tau_{пр}+T} M(\tau) d\tau + \int_0^{\tau_{ЭВ}} M_{ЭВ}(\tau) d\tau \right) + \int_{\tau_{пр}}^{\tau_{пр}+T} M(\tau) d\tau + \int_{\tau_{пр}+T}^{\tau_{пр}+\tau_{ост}} M_{ЭВ}(\tau) d\tau,$$

если $\tau_{ост} > T$.

Длительность периода шлифования с ЭЭВ $\tau_{ЭВ}$ определяется с учетом времени восстановления режущей способности (3).

Себестоимость периода шлифования $0-\tau_5$ определяется в зависимости от длительности периода приработки $\tau_{пр}$, количества циклов шлифование–шлифование с ЭЭВ и длительности неполного цикла $\tau_{ост}$.

Если $\tau_{ост} \leq T$, то себестоимость шлифования за время шлифования τ_5 определяется по формуле

$$C_{шл} = (З_0 + A_T + P_{тр} + Э_{шл}) \tau_5 + C_{СТМ} + Э_{ЭВ} \tau_{ЭВ} N_{ц}, \quad (9)$$

где $З_0$ – часовая заработная плата основных рабочих (шлифовщиков), грн; A_T – амортизация технологического оборудования, грн; $P_{тр}$ – затраты на текущий ремонт и содержание оборудования, грн; $Э_{шл}$ – затраты на технологическую электроэнергию при шлифовании, грн; $C_{СТМ}$ – затраты на износ круга из сверхтвердых материалов, грн; $Э_{ЭВ}$ – затраты на технологическую электроэнергию при ЭЭВ, грн.

Если $\tau_{ост} > T$, то себестоимость шлифования равна

$$C_{шл} = (З_0 + A_T + P_{тр} + Э_{шл}) \tau_5 + C_{СТМ} + Э_{ЭВ} \tau_{ЭВ} N_{ц} + Э_{ЭВ} (\tau_{ост} - T). \quad (10)$$

Составляющие формул (9) и (10) определяли по рекомендациям [5].

Для расчета удельной себестоимости шлифования $C_{уд}$ по формулам (1)–(10) в зависимости от периода T между ЭЭВ составлена программа для ПЭВМ в среде программирования Mathcad.

С использованием этой программы был рассчитан оптимальный период между ЭЭВ при внутреннем шлифовании отверстия образца из твердого сплава ВК15 исследуемыми кругами за время обработки $\tau_5 = 60$ мин.

Расчеты составляющих себестоимости осуществляли по нормативным данным на декабрь 2011 г. [6]. Средняя месячная заработная плата в машиностроительной отрасли составляла 3438 грн, первоначальная стоимость станка мод. 3A227П $C_{ст} = 40000$ грн; первоначальная стоимость источника технологического тока (ИТТ) $C_{ИТТ} = 5000$ грн; категория ремонтной сложности механической части оборудования K_M : станка – 8,5, ИТТ – 1; категория ремонтной сложности электрической части оборудования $K_э$: станка – 12, ИТТ – 3 [7]; стоимость 1 кВт·ч электроэнергии $C_э = 0,2$ грн/(кВт·ч); мощность двигателя гидропривода станка $N_г = 2,2$ кВт; мощность двигателя насоса охлаждения $N_о = 0,12$ кВт; мощность двигателя привода бабки изделия $N_и = 0,76$ кВт; стоимость одного карата алмазов зернистостей: $C_{а 100/80} = 0,72$ грн/карат, $C_{а 125/100} = 0,87$ грн/карат, $C_{а 200/160} = 0,91$ грн/карат.

Результаты расчета оптимального времени $T_{опт}$ между ЭЭВ и удельной себестоимости шлифования твердого сплава ВК15 по разработанной программе в соответствии с описанной методикой представлены в табл. 3.

Таблица 3. Влияние зернистости круга на производительность шлифования твердого сплава ВК15 с периодическим ЭЭВ при минимальной удельной себестоимости обработки

Зернистость	$T_{опт}$, мин	$\tau_{ЭЭВ}$, мин	$Q_{ст-ч}$, мм ³ /мин	Повышение производительности, %	$C_{уд}$, грн/мм ³	Снижение удельной себестоимости, %
100/80	1	0,21	275	318	0,0016	244
125/100	1	0,12	270	396	0,0019	305
200/160	3	0,37	296	315	0,0016	269

Примечание. $Q_{ст-ч}$ – производительность шлифования за станко-час.

Среднюю производительность шлифования за станко-час $Q_{ст-ч}$ при шлифовании без ЭЭВ оценивали количеством сошлифованного материала, найденного путем интегрирования уравнения (1) в пределах 0–60 мин. В этом случае средняя производительность обработки для зернистости 100/80 составила 66 мм³/мин, для 125/100 – 54 мм³/мин и для 200/160 – 71 мм³/мин. Слабое влияние зернистости на производительность обработки объясняется использованием упругой схемы шлифования с одинаковой силой поджима РПК к поверхности образца, определяемой точностью обработки. При этом увеличение зернистости приводит к уменьшению количества одновременно работающих зерен, а также уменьшению глубины их внедрения в обрабатываемый материал. Удельная себестоимость была равна для зернистости 100/80 – 0,0055 грн/мм³, для 125/100 – 0,0077 грн/мм³ и для 200/160 – 0,0059 грн/мм³.

Как следует из табл. 3, наибольшая производительность обработки достигается при шлифовании кругом зернистостью 200/160 при минимальной удельной себестоимости. Повышение производительности при шлифовании твердого сплава ВК15 с периодическими ЭЭВ с оптимальным временем между электроэрозионными воздействиями на РПК кругами исследованных зернистостей находится в пределах 315–396 %, а снижение себестоимости обработки – в пределах 244–305 % по сравнению с аналогичными показателями шлифования без ЭЭВ кругом, запрограммированным электроэрозионным способом.

ВЫВОДЫ

При шлифовании твердого сплава ВК15 с периодическим ЭЭВ с оптимальным временем между ЭЭВ кругами исследованных зернистостей производительность обработки повышается на 315–396 %, а себестоимость снижается на 244–305 % по сравнению со шлифованием без ЭЭВ кругом, заправленным электроэрозионным способом.

Зернистость шлифовального круга оказывает влияние на время между ЭЭВ, обеспечивающим минимальную себестоимость обработки.

При шлифовании без ЭЭВ по упругой схеме с одинаковой силой поджима РПК к поверхности образца зернистость практически не влияет на производительность обработки, так как увеличение зернистости приводит к уменьшению количества одновременно работающих зерен и глубины их внедрения в обрабатываемый материал.

Досліджено вплив зернистості алмазного круга на продуктивність та питому собівартість внутрішнього врізного шліфування за пружною схемою твердого сплаву ВК15. Встановлено, що періодичний електроерозійний вплив на робочу поверхню круга з оптимальною періодичністю забезпечує збільшення продуктивності оброблення на 396 % та зниження питомої собівартості на 305 % в порівнянні зі шліфуванням без такого впливу.

Ключові слова: внутрішнє врізне шліфування, пружна схема, продуктивність обробки, питомі собівартість.

The authors have studied the influence of diamond wheel grain size on the grinding rate and specific cost of internal plunge-cut elastic-mode grinding of VK15 (WC–15Co). Periodic electric-discharge actions on the wheel working surface, with an optimal cyclicity, provide an 396 % improvement of the grinding rate and an 305 % reduction of specific cost in comparison to grinding performed with no such actions.

Keywords: internal plunge-cut grinding, elastic-mode grinding, grinding rate, specific cost.

1. Матюха П. Г., Полтавец В. В., Стрелков В. Б. Определение оптимального интервала времени между электроэрозионными воздействиями на рабочую поверхность круга при алмазном шлифовании твердого сплава // Прогресивні технології і системи машинобудування. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 31. – С. 203–209.
2. Стрелков В. Б. Определение себестоимости алмазного шлифования твердых сплавов при периодических электроэрозионных воздействиях на рабочую поверхность круга // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Серія: Машинобудування і машинознавство / За ред. Є. О. Башков (голова) та ін. – Донецьк: ДонНТУ. – 2005. – Вип. 92. – С. 109–117.
3. Матюха П. Г., Стрелков В. Б. Расчет объема сошлифованного материала в процессе алмазного шлифования твердого сплава ВК8 с периодическими электроэрозионными воздействиями на рабочую поверхность круга // Сверхтв. материалы. – 2005. – № 1. – С. 51–57.
4. Пат. 94813 С2 Україна, МПК В24В 47/00. Шліфувальна бабка / П. Г. Матюха, В. В. Габітов, М. С. Войтов, А. О. Благодарний. – Заявл. 19.11.2009; Опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11.
5. Полтавец В. В. Себестоимость шлифования с управляющими воздействиями на РПК // Прогресивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – Вип. 10. – С. 202–207.
6. Середня номінальна заробітна плата за видами економічної діяльності у 2011 році. – www.donetskstat.gov.ua/statinform – Дата доступу: груд. 2011.
7. Типовая система технического обслуживания и ремонта металло- и деревообрабатывающего оборудования / Минстанкопром СССР, ЭНИМС. – М.: Машиностроение, 1988. – 672 с.