

УДК 621.91.01

В. В. Полтавец, д-р техн. наук, доцент
(ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, Россия)
Тел.: +7(949) 3349248; E-mail: fimp.msмо@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ВАНАДИЕВЫХ СТАЛЕЙ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМИ УПРАВЛЯЮЩИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

В статье предложен алгоритм определения оптимальной длительности периодов цикла «шлифование без управляющих воздействий – шлифование с управляющими воздействиями» по критерию минимальной удельной себестоимости обработки. Определена оптимальная длительность периодов цикла для плоского алмазного шлифования ванадиевой быстрорежущей стали P6M5Ф3.

Ключевые слова: технологическая себестоимость, переменные затраты, алмазное шлифование, режущая способность, сошлифованный материал.

V. V. Poltavets

OPTIMIZATION OF PROCESS OF DIAMOND GRINDING OF VANADIUM STEELS WITH PERIODIC SPARK-EROSION CONTROL ACTIONS

The paper proposes an algorithm for determining the optimal duration of cycle periods «grinding without control actions - grinding with control actions» by the criterion of minimum specific cost of machining. The optimal duration of cycle periods for flat diamond grinding of vanadium high-speed steel P6M5Ф3 is determined.

Keywords: manufacturing cost, variable expenses, diamond grinding, cutting capacity, ground material.

1. Введение

Основным показателем эффективности процесса технологических воздействий на предмет труда является технологическая себестоимость, т.е. сумма «только тех затрат, которые непосредственно связаны с данным вариантом технологической операции или технологического процесса» [1]. В качестве её расчётной величины при механической обработке принимают себестоимость станко-часа, которая включает наиболее весомые элементы, сказывающиеся на удельной себестоимости обработки [2]:

$$C_{сч} = Z_o + A + P_m + \mathcal{E} + I, \quad (1)$$

где Z_o – часовая заработная плата основного производственного рабочего;

A – амортизация производственного оборудования;

P_m – затраты на текущий ремонт и содержание оборудования;

\mathcal{E} – затраты на технологическую электроэнергию;

I – возмещение затрат на расход инструмента.

Поскольку процесс шлифования по своей природе является нестационарным [3], то для условий нестационарности процесса время технологических воздействий (время шлифования) и время управляющих воздействий (время обновления рабочей поверхности шлифовального круга) целесообразно измерять в минутах. Соответственно, при определении технологической себестоимости в качестве расчётной величины будет использоваться себестоимость станко-минуты обработки:

$$C_{см} = C_{сч}/60 = Z_{ом} + A_m + P_{тм} + \mathcal{E}_m + I_m, \quad (2)$$

где $Z_{ом}$, A_m , $P_{тм}$, \mathcal{E}_m , I_m – те же величины, что и в формуле (1), но приходящиеся на одну минуту работы шлифовального станка.

Составляющие себестоимости в формулах (1)-(2) рассчитываются по известным из технической литературы методикам [1, 4-6], но при этом от технологических режимов обработки и управляющих воздействий на рабочую поверхность круга (РПК) зависят только затраты на технологическую электроэнергию и затраты на алмазно-абразивный инструмент [7].

Таким образом, эти затраты являются переменными как относительно времени обработки, так и относительно времени обновления РПК при управляющих воздействиях [8]. Приведенные в технической литературе методики расчёта переменной части себестоимости разработаны преимущественно для схемы шлифования с фиксированными режимами и не учитывают связь величины затрат с состоянием РПК.

На основании анализа различных методов реализации управляющих воздействий на рабочую поверхность шлифовальных кругов из сверхтвёрдых материалов (СТМ) нами установлено, что наибольшим потенциалом для повышения степени управляемости технологической системой шлифования кругами из СТМ на металлической связке обладает электроэрозионный метод [9], который и принимается в дальнейшем в качестве основного метода обеспечения и поддержания высоких режущих свойств рабочей поверхности шлифовальных кругов.

Задача оптимизации при шлифовании с электроэрозионными воздействиями на РПК сводится к определению по критерию минимальной удельной себестоимости обработки оптимальных режимов электроэрозионных воздействий (ЭЭВ) на рабочую поверхность круга, осуществляемых одновременно с реализацией режимов резания, обеспечивающих максимальную производительность обработки при заданном качестве. В этом случае максимальная производительность обработки достигается как режимами резания, обеспечивающими максимальную производительность обработки, так и поддержанием высокой режущей способности круга во время обработки за счет дополнительных управляющих электроэрозионных воздействий, осуществляемых одновременно со шлифованием. Таким образом, управляющие электроэрозионные воздействия на РПК способствуют превращению нестационарного процесса в квазистационарный, когда режущая способность круга и производительность обработки стабилизируются во времени.

При ухудшении режущей способности РПК в результате изнашивания зёрен, а также засаливания межзёренного пространства и микрорельефа зёрен, определение условий, при которых интенсивность ухудшения режущей способности рабочей поверхности круга и ее восстановления с помощью электроэрозионных воздействий равны, нами предлагается выполнять на основе закономерностей, которые описывают изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга при шлифовании без электроэрозионных воздействий и в процессе восстановления режущей способности с помощью периодических ЭЭВ, осуществляемых одновременно со шлифованием образца на максимальных для используемого источника технологического тока режимах. В этом случае цикл обработки заготовки состоит из периодов «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» (рис. 1), а шлифование с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК представляет собой чередование таких циклов.

Как видно из рис. 1, шлифование без электроэрозионных воздействий на РПК на протяжении времени $\tau = T$ приводит к снижению режущей способности от величины Q_0 , которая была обеспечена электроэрозионной правкой, до установившейся величины

$Q_{уст}$, обусловленной износом зёрен и засаливанием межзёренного пространства. За время $\tau = \tau_{\text{ЭЭВ}}$ режущая способность РПК повышается до уровня Q_{np} , когда рельеф рабочей поверхности будет характеризоваться высокой режущей способностью при приемлемом расходе инструментального материала.

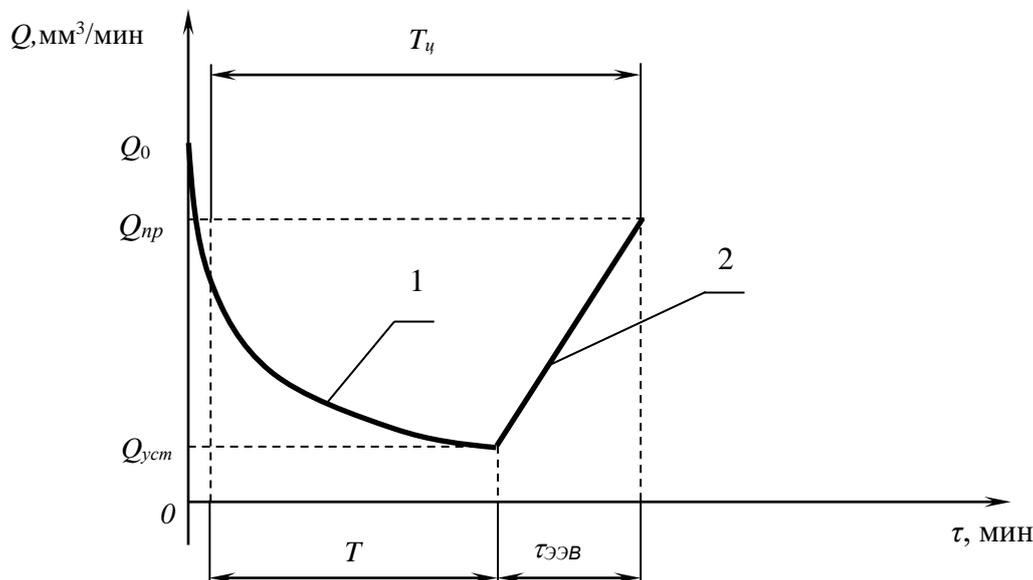


Рисунок 1. Периоды, составляющие цикл «шлифование без ЭЭВ (участок 1) – шлифование с ЭЭВ (участок 2)»

Таким образом, сущность оптимизации процесса обработки сводится к нахождению такой длительности периодов цикла T и $\tau_{\text{ЭЭВ}}$, а также величины Q_{np} , при которых удельная себестоимость цикла шлифования длительностью $T_{\text{ц}}$ была бы минимальной.

Целью данной работы является определение оптимальной длительности периодов T и $\tau_{\text{ЭЭВ}}$ при алмазном шлифовании труднообрабатываемых ванадийсодержащих сталей, характеризующихся «плохой шлифуемостью ввиду высокой твердости карбидов ванадия» [10]. В качестве представителя этой группы материалов принята быстрорежущая сталь повышенной производительности марки Р6М5Ф3.

2. Алгоритм определения оптимальной длительности периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» по критерию минимальной удельной себестоимости обработки

Удельная себестоимость шлифования представляет собой отношение себестоимости шлифования за время цикла $T_{\text{ц}}$ к объему материала V_m , удаленного с поверхности заготовки за это же время:

$$C_{\text{уд}}(T_{\text{ц}}) = \frac{C_{\text{шл}}(T_{\text{ц}})}{V_m(T_{\text{ц}})}, \quad (3)$$

где $C_{\text{шл}}$ – себестоимость цикла шлифования, для которого осуществляется расчет удельной себестоимости $C_{\text{уд}}$, руб;

V_m – объем материала, удаляемого с поверхности заготовки за цикл обработки $T_{\text{ц}}$, мм³.

Расчет объёма удаленного материала выполняется с использованием экспериментально определяемых законов изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга (ТЛРСШК) в периоды шлифования без ЭЭВ и шлифования с ЭЭВ.

Если оптимизация осуществляется по двум параметрам – времени шлифования без электроэрозионных воздействий T и времени формирования режущей способности РПК, до которой необходимо вести восстановление режущих свойств с помощью электроэрозионных воздействий, τ_{np} , то в этом случае целевая функция удельной себестоимости шлифования, сформированная на основе (3), приобретает вид:

$$C_{\text{уд}}(\tau_{\text{ш}}, T) = \frac{C_{\text{ц}}(\tau_{\text{ш}}, T)}{V_{\text{ш}}(\tau_{\text{ш}}, T)} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $C_{\text{ц}}(\tau_{np}, T)$ – технологическая себестоимость цикла, руб;

$V_{\text{ш}}(\tau_{np}, T)$ – объем сошлифованного материала за цикл обработки, мм³.

Рассмотрим алгоритм оптимизации удельной себестоимости обработки, в котором учитываются:

1) законы изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга и шлифования с ЭЭВ (рис. 2, а);

2) законы изменения интенсивности расхода алмазов в периоды шлифования без ЭЭВ и в процессе восстановления режущих свойств электроэрозионными воздействиями на РПК (рис. 2, б).

В системе координат $Q_1 - O - \tau$ снижение режущей способности при шлифовании без электроэрозионных воздействий (кривая 1 на рис. 2, а) описывается уравнением

$$Q_1 = Q_{\text{шл}} = Q_{\text{уст}} + \Delta Q \exp[\beta_Q(\tau - \tau_0)], \quad (5)$$

где $\Delta Q = (Q_0 - Q_{\text{уст}})$ – амплитуда снижения значения ТЛРСШК при шлифовании до квазипостоянного значения, мм³/мин;

$Q_1, Q_{\text{уст}}, Q_0$ – соответственно значения текущей, установившейся и исходной ТЛРСШК, мм³/мин;

β_Q – эмпирический коэффициент, мин⁻¹;

τ_0 – момент времени, при котором экспериментально определялась исходная ТЛРСШК Q_0 , ($\tau_0 \approx 1$ мин).

Уравнение, описывающее восстановление режущей способности РПК в системе координат $Q_2 - O_2 - \tau_2$, при совпадении ее начала с началом системы координат $Q_1 - O - \tau$ имеет такой вид (прямая 2 на рис. 2, а):

$$Q_2 = K_Q \tau. \quad (6)$$

В точке Q_T , с которой начинается восстановление режущих свойств РПК, в результате переноса начала системы координат $Q_2 - O_2 - \tau_2$ в эту точку, уравнение (6) примет вид:

$$Q_2 = Q_{\text{шл+ЭЭВ}} = K_Q \cdot \tau + (K_Q \cdot T - Q_T). \quad (7)$$

Аналогичного вида зависимости описывают изменение расхода алмазов в периоды шлифования без ЭЭВ и в процессе восстановления режущих свойств круга с помощью электроэрозионных воздействий на РПК.

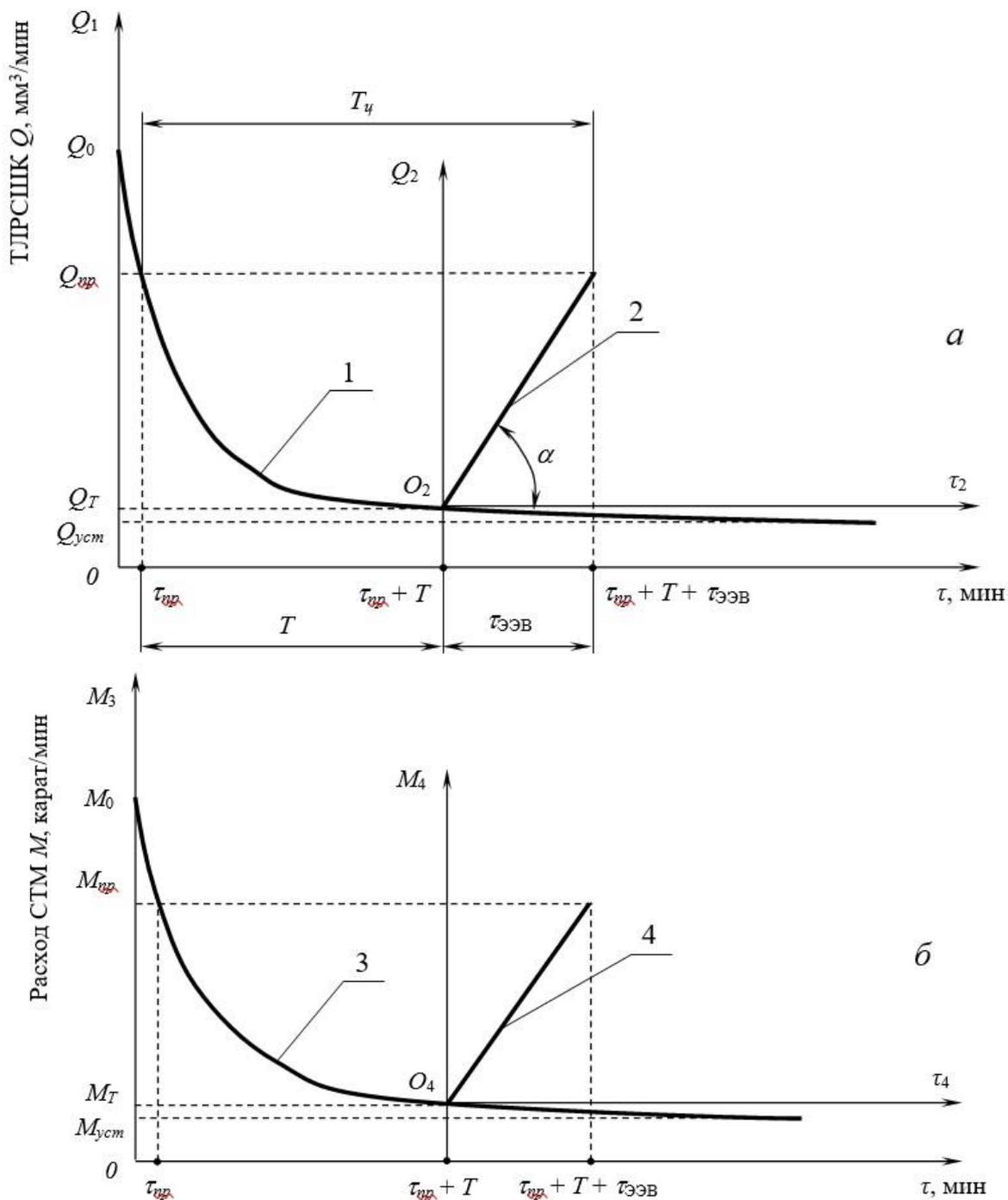


Рисунок 2. Изменение ТЛРСШК (а) и расхода алмазов (б) при шлифовании без ЭЭВ (линии 1, 3) и с электроэрозионными воздействиями на РПК (линии 2, 4) в различные периоды цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ»

Так, в частности, уравнение, описывающее расход алмазов при шлифовании без электроэрозионных воздействий в системе координат $M_3 O \tau$ (кривая 3 на рис. 2, б), имеет вид:

$$M_3 = M_{\text{улл}} = M_{\text{уст}} + \Delta M \exp [\beta_M(\tau - \tau_0)], \quad (8)$$

где $\Delta M = (M_0 - M_{\text{уст}})$ – амплитуда снижения расхода алмазов при шлифовании без ЭЭВ, карат/мин;

$M_3, M_{\text{уст}}, M_0$ – соответственно значения текущего, установившегося и исходного расхода алмазов, карат/мин;

β_M – эмпирический коэффициент, мин^{-1} ;

τ_0 – момент времени, при котором экспериментально определялся исходный расход алмазов M_0 , ($\tau_0 \approx 1$ мин).

Уравнение, описывающее расход алмазов при шлифовании с электроэрозионными воздействиями на РПК в системе координат $M_4 O_4 \tau_4$, при совпадении ее начала с началом системы координат $M_3 O \tau$ также имеет линейный вид (прямая 4 на рис. 2, б):

$$M_4 = K_M \tau. \quad (9)$$

В точке M_T , с которой начинается восстановление режущих свойств РПК, в результате переноса начала системы координат $M_4 O_4 \tau_4$ в эту точку, уравнение (9) примет вид:

$$M_4 = M_{\text{улл}+\text{ЭЭВ}} = K_M \cdot \tau + (K_M \cdot T - M_T). \quad (10)$$

Затраты на технологическую электроэнергию за время полного цикла T_u состоят из затрат на электрическую энергию в течение шлифования без ЭЭВ и затрат на электрическую энергию при шлифовании с ЭЭВ. Для плоского шлифования эти слагаемые определяются следующим образом:

– затраты на электроэнергию в период шлифования без ЭЭВ, руб,

$$\dot{Y}_{\phi\ddot{e}} = \frac{\ddot{O}_{1\dot{e}\dot{A}\dot{\Delta}\dot{\div}}}{60} \int_{\tau_{\text{лб}}}^{\dot{O}+\tau_{\text{лб}}} \left(\frac{N_{\dot{\delta}}}{\eta_{\dot{a}\dot{a}}} + N_{\dot{a}} + N_i \right) d\tau; \quad (11)$$

– затраты на электроэнергию в период шлифования с ЭЭВ, руб,

$$\dot{Y}_{\phi\ddot{e}+\dot{y}\dot{y}\dot{a}} = \frac{\ddot{O}_{1\dot{e}\dot{A}\dot{\Delta}\dot{\div}}}{60} \int_0^{\tau_{\dot{y}\dot{y}\dot{a}}} \left(\frac{N_p}{\eta_{\dot{a}\dot{a}}} + N_{\dot{a}} + N_i + N_{\dot{y}\dot{y}\dot{a}} \right) d\tau. \quad (12)$$

В формулах (11) и (12):

N_p – мощность резания, кВт;

$\eta_{\dot{\delta}}$ – КПД главного привода плоскошлифовального станка;

$N_{\dot{e}}$ – мощность двигателя насоса гидропривода продольной подачи стола плоскошлифовального станка, кВт;

N_o – мощность двигателя насоса подачи СОТС в зону резания, кВт;

$N_{\text{ээв}}$ – мощность ЭЭВ, кВт;

$C_{1\text{кВтч}}$ – стоимость электроэнергии, руб/(кВт·ч).

В соответствии с рис. 2, а, время периодических ЭЭВ для восстановления режущих свойств РПК, определяется выражением

$$\tau_{\text{ЭЭВ}}(\tau_{np}, T) = (Q_{np} - Q_T) \operatorname{ctg} \alpha = \frac{1}{K_Q} (Q_{np} - Q_T), \quad (13)$$

где α – угол наклона прямой 2 к оси абсцисс.

Воспользовавшись уравнением (5), описывающим изменение ТЛРСШК при шлифовании без ЭЭВ, найдем зависимости для расчета количества сошлифованного материала (в объёмной размерности) в период приработки и в момент времени $\tau_{np} + T$, которые примут вид:

$$Q_{np} = Q_{уст} + \Delta Q \exp [\beta_Q (\tau_{np} - \tau_0)], \quad (14)$$

$$Q_T = Q_{уст} + \Delta Q \exp [\beta_Q (\tau_{np} + T - \tau_0)]. \quad (15)$$

После подстановки формул (14) и (15) в (13) длительность периода ЭЭВ на РПК $\tau_{\text{ЭЭВ}}$ как функции от τ_{np} и T будет определяться выражением

$$\tau_{\text{ЭЭВ}}(\tau_{id}, T) = \frac{\Delta Q [\exp(\beta_Q (\tau_{id} - \tau_{\text{энб}})) - \exp(\beta_Q (T + \tau_{id} - \tau_{\text{энб}}))]}{K_Q}. \quad (16)$$

Затраты, связанные с расходом инструмента I , состоят из затрат на расход алмазов при шлифовании без ЭЭВ $I_{шл}$, руб,

$$\dot{E}_{\phi\bar{e}}(\tau_{id}, T) = \ddot{O}_{\dot{\Delta}\bar{e}\bar{i}} \int_{\tau_{id}}^{\dot{O} + \tau_{id}} \dot{I}_{\phi\bar{e}}(\tau) d\tau, \quad (17)$$

и затрат на расход алмазов при шлифовании с ЭЭВ на РПК $I_{шл + \text{ЭЭВ}}$, руб,

$$\dot{E}_{\phi\bar{e} + \text{ЭЭВ}}(\tau_{id}, T) = \ddot{O}_{\dot{\Delta}\bar{e}\bar{i}} \int_{\tau_{id} + T}^{\dot{O} + \tau_{id} + \tau_{\text{ЭЭВ}}} \dot{I}_{\phi\bar{e} + \text{ЭЭВ}}(\tau) d\tau. \quad (18)$$

В формулах (17) и (18):

$M(\tau)$ и $M_{шл + \text{ЭЭВ}}(\tau)$ – функции, описывающие расход алмазов соответственно при шлифовании без ЭЭВ и с ЭЭВ (формулы (8) и (10)), карат/мин;

$C_{алм}$ – стоимость карата алмазов, руб/карат.

Объем сошлифованного материала за время цикла $V_{мц}(\tau_{np}, T)$, состоит из объемов удаленного материала за период шлифования без ЭЭВ $V_{мшл}$ и за период шлифования с ЭЭВ $V_{мшл + \text{ЭЭВ}}$:

$$V_{мц}(\tau_{np}, T) = V_{мшл}(\tau_{np}, T) + V_{мшл + \text{ЭЭВ}}(\tau_{np}, T). \quad (19)$$

Объем удаленного материала за период шлифования без ЭЭВ определяется путем интегрирования уравнения (5) на отрезке времени от τ_{np} до $\tau_{np} + T$:

$$V_{i \text{ } \phi\ddot{e}}(\tau_{i\ddot{o}}, T) = \int_{\tau_{i\ddot{o}}}^{T+\tau_{i\ddot{o}}} [Q_{\phi\ddot{n}\ddot{o}} + \Delta Q \exp(\beta_Q(\tau - \tau_0))] d\tau. \quad (20)$$

Объем удаленного материала за период ЭЭВ определяется интегрированием уравнения (7) на соответствующем отрезке времени (см. рис. 2, а):

$$V_{i \text{ } \phi\ddot{e} + \dot{Y}\dot{Y}\dot{A}}(\tau_{i\ddot{o}}, T) = \int_{\tau_{i\ddot{o}} + T}^{\dot{O} + \tau_{i\ddot{o}} + \tau_{\dot{Y}\dot{Y}\dot{A}}} [K_Q \cdot \tau + (K_Q \cdot T - Q_T)] d\tau. \quad (21)$$

С учетом зависимостей (2), (11)-(12), (13), (17)-(18), (20)-(21) общий вид целевой функции оптимизации процесса алмазного шлифования может быть представлен следующим выражением:

$$C_{\phi\ddot{a}\ddot{o}}(\tau_{i\ddot{o}}, \dot{O}) = \frac{(C_{\dot{m}} + \dot{A}_i + \dot{D}_{\dot{o} \ i})(T + \tau_{\dot{Y}\dot{Y}\dot{A}}(\tau_{i\ddot{o}}, \dot{O})) + \dot{Y}_{\phi\ddot{e}}(\tau_{i\ddot{o}}, \dot{O}) + \dot{E}_{\phi\ddot{e}}(\tau_{i\ddot{o}}, \dot{O}) + \dot{Y}_{\phi\ddot{e} + \dot{Y}\dot{Y}\dot{A}}(\tau_{i\ddot{o}}, \dot{O}) + \dot{E}_{\phi\ddot{e} + \dot{Y}\dot{Y}\dot{A}}(\tau_{i\ddot{o}}, \dot{O})}{V_{i \text{ } \phi\ddot{e}}(\tau_{i\ddot{o}}, T) + V_{i \text{ } \phi\ddot{e} + \dot{Y}\dot{Y}\dot{A}}(\tau_{i\ddot{o}}, T)}. \quad (22)$$

Минимум функции (22) отыскивается численными методами с помощью специализированных математических пакетов.

3. Расчет оптимальных значений периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» для ванадиевой стали Р6М5Ф3

Исходными данными для решения задачи оптимизации с использованием функции (22) при плоском алмазном шлифовании являются: режимы резания – скорость круга V_k , скорость стола V_{cm} и сила поджима заготовки к РПК P_n ; режимы ЭЭВ – напряжение холостого хода U_{xx} , максимальный ток периодических ЭЭВ I_n ; паспортные данные станка, величина средней номинальной заработной платы станочника; затраты на ремонт и техническое обслуживание оборудования и источника технологического тока, стоимость электроэнергии и стоимость алмазов.

Закон изменения текущей лимитированной режущей способности круга в процессе шлифования без ЭЭВ и в процессе шлифования с ЭЭВ с целью восстановления режущих свойств РПК, а также закон изменения текущего расхода алмазов при шлифовании без ЭЭВ и при шлифовании с ЭЭВ с целью восстановления режущих свойств РПК определяли экспериментальным путём.

Эксперименты с целью определения законов изменения текущей лимитированной режущей способности круга и текущего расхода алмазов в процессе шлифования стали Р6М5Ф3 проводили на режимах $V_k = 35$ м/с, $V_{cm} = 6$ м/мин и силе поджима заготовки к РПК $P_n = 80$ Н.

Электроэрозионные воздействия на РПК с целью восстановления режущей способности круга выполняли с величиной среднего тока $I_{cp} = 10$ А при напряжении холо-

стого хода $U_{xx} = 60$ В. Рабочая среда для ЭЭВ представляла собой 0,3%-ный водный раствор кальцинированной соды.

Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость шлифования быстрорежущей стали Р6М5Ф3 алмазным кругом АС6 100/80-4-М2-01 представлено на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что поверхность, описываемая функцией удельной себестоимости шлифования, имеет выраженный экстремум.

В результате решения задачи оптимизации для алмазных кругов различных зернистостей найдены оптимальные значения периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ», которые приведены в табл. 1.

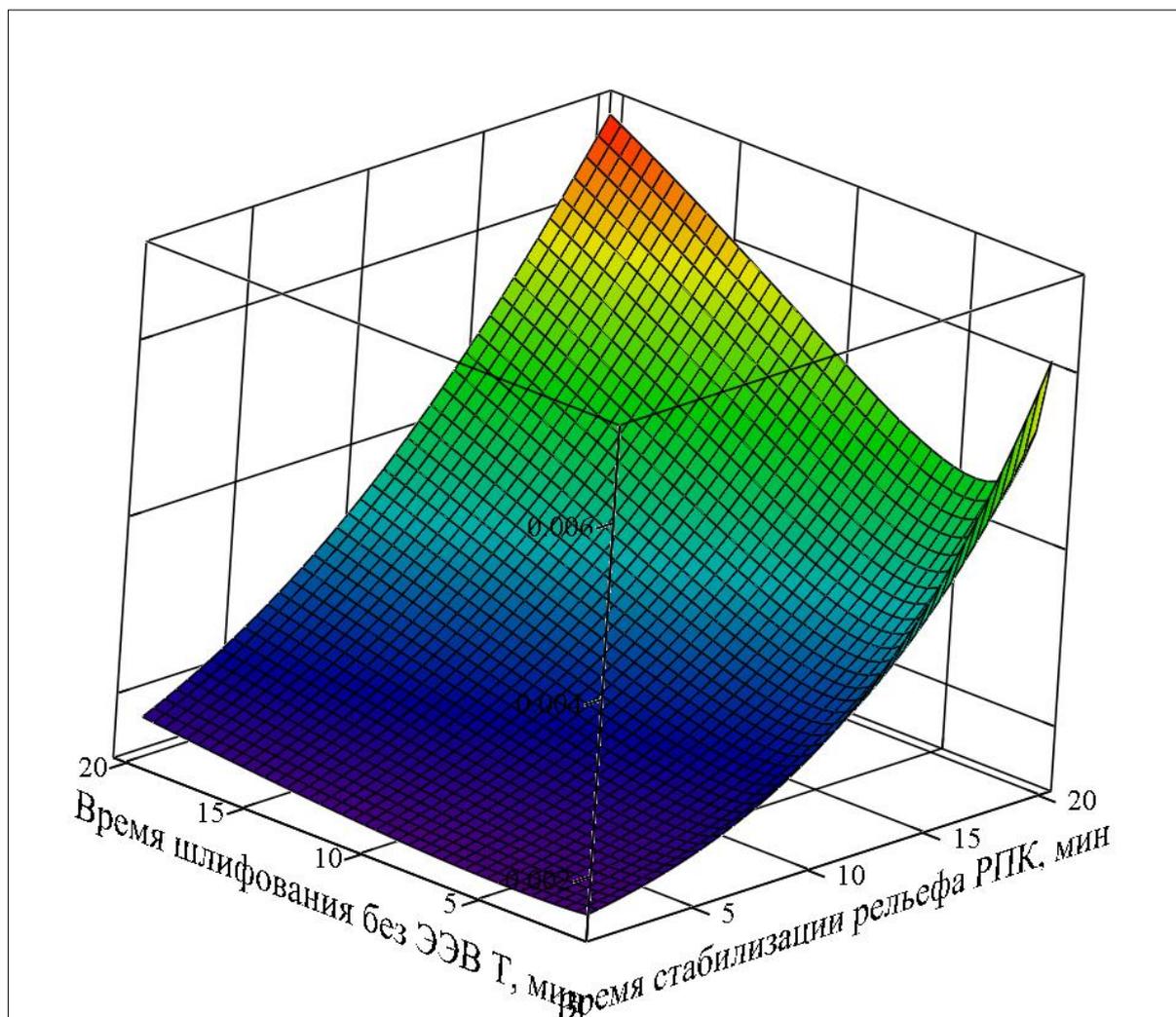


Рисунок 3. Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость плоского врезного шлифования стали Р6М5Ф3 алмазным кругом АС6 100/80-4-М2-01

Таблица 1. Оптимальные значения периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» при обработке ванадиевой быстрорежущей стали Р6М5Ф3 кругами из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей

Наименование периода	Зернистость		
	100/80	160/125	200/160
Время формирования параметров рельефа РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, t_{np} , мин	0,01	0,01	0,01
Время шлифования без ЭЭВ, T , мин	5,41	4,28	5,54
Время шлифования с ЭЭВ, $t_{ЭЭВ}$, мин	5,66	5,48	5,16

Из табл. 1 следует, что время формирования параметров рельефа РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, t_{np} , пренебрежимо мало по сравнению со временем периода шлифования без ЭЭВ, T , и временем шлифования с ЭЭВ, осуществляемыми одновременно с обработкой, $t_{ЭЭВ}$. Следовательно, при оптимизации длительности периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» это время можно не учитывать.

Различие между оптимальными значениями времени шлифования без ЭЭВ, T , и времени шлифования с ЭЭВ, осуществляемыми одновременно с обработкой, $t_{ЭЭВ}$, для алмазных кругов трёх исследованных зернистостей статистически несущественно.

4. Заключение

При обработке ванадиевых сталей алмазными шлифовальными кругами время периода шлифования без электроэрозионных воздействий, T , и время шлифования с ЭЭВ, осуществляемыми одновременно с обработкой, $t_{ЭЭВ}$, соизмеримы и для трёх исследованных зернистостей кругов должны составлять 5-6 минут, исходя из достижения минимальной удельной себестоимости обработки.

Предложенный алгоритм определения оптимальной длительности периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» по критерию минимальной удельной себестоимости обработки может быть распространён на другие виды обрабатываемых материалов и на иные способы восстановления режущей способности шлифовальных кругов из СТМ, при использовании которых управляющие воздействия осуществляются без прерывания процесса обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проничев, Н. Д. Проектирование технологии в машиностроении и оценка её экономической эффективности: электронное учебное пособие / Н. Д. Проничев, А. П. Шулёпов; Самарский гос. аэрокосмический ун-т имени академика С. П. Королева. – Самара: Самарский гос. аэрокосмический ун-т, 2010. – 37 с.
2. Экономическое обоснование выбора алмазного круга/ М. Ф. Семко, М. Д. Узунян, Э. П. Юфа. – Харьков: Прапор, 1971. – 100 с.
3. Полтавец, В. В. Оптимизация режимов шлифования с учётом нестационарности процесса / В. В. Полтавец, П. Г. Матюха // Научные труды ДонНТУ. Серия Машиностроение и машиноведение. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2013. – Вып. 1 (190)'2013. – С. 81-91.
4. Экономическое обоснование технологических процессов машиностроительных производств: учебное пособие / И. В. Пичужкин и др.; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 160 с. – ISBN 5-89368-760-4.

5. Князева, И. А. Экономика машиностроительного производства: учебное пособие /И. А.Князева. – Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2015. – 220 с.

6. Мельников, А. С. Технология машиностроения: основы снижения затрат на производство машины: учебное пособие / А. С. Мельников, М. А. Тамаркин, А. И. Азарова; Донской гос. технический ун-т. – Ростов-на-Дону: Донской гос. технический ун-т, 2013. – 167 с.

7. Полтавец, В. В. Себестоимость шлифования с управляющими воздействиями на РПК / В. В. Полтавец// Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научн. трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – Вып. 10. – С. 202-207.

8. Полтавец, В. В. Определение переменной части себестоимости алмазного шлифования с управлением состоянием рабочей поверхности круга / В. В. Полтавец, О. А. Гаркуша // Инженер. Студенческий научно-технический журнал. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – № 3. – С. 102-104.

9. Полтавец, В. В. Повышение степени управляемости технологической системой шлифования кругами из сверхтвердых материалов за счет воздействий на характеристики инструмента / В. В. Полтавец // Научные труды ДонНТУ. Серия Машиностроение и машиноведение. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – Вып. 6 (154). – С. 79-86.

10. Зубков, Н. Н. Инструментальные материалы для изготовления лезвийных инструментов / Н. Н. Зубков // Наука и образование: электронный научно-технический журнал. – Москва: МГТУ имени Н.Э. Баумана. – № 5, май 2013 г. – С. 75-100.

Поступила в редколлегию 09.02.2024 г.