

Исследование процессов обработки

УДК 621.923

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

* vvardon@mail.ru

Оптимизация режимов алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 с учетом нестационарности процесса

Рассмотрена оптимизация режимов алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 с учетом нестационарности процесса, обусловленной изменением во времени режущей способности рабочей поверхности шлифовального круга. Для оптимизации использовано врезное шлифование по упругой схеме с постоянной силой поджима заготовки к рабочей поверхности круга, кинематика которого аналогична шлифованию по жесткой схеме. Область возможных режимов алмазного шлифования по упругой схеме в начале обработки рассмотрена в системе координат скорость детали–сила поджима заготовки. Скорость детали определена заданным значением шероховатости обработанной поверхности изделия. Сила поджима заготовки выбрана минимальной, исходя из условий обеспечения отсутствия фазово-структурных превращений в поверхностном слое обрабатываемого материала, отсутствия окисления алмазов, неразрушения алмазных зерен. Нестационарность процесса учитывали, используя уравнения, описывающие изменение во время обработки текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга.

Ключевые слова: *шлифование, нестационарность, оптимизация, скорость детали, сила поджима, режущая способность, глубина резания.*

ВВЕДЕНИЕ

Минимизация затрат на осуществление процесса обработки при обеспечении заданных требований к качеству обработанной поверхности является одной из основных задач, решаемых при назначении оптимальных режимов обработки, которые в большинстве случаев находятся экспериментально-теоретическим методом. Использование этого метода подразумевает проведение целого комплекса экспериментальных исследований для получения зависимостей, описывающих технические ограничения, а следовательно, связано с большой трудоемкости поиска [1, 2]. Кроме того, полученные результаты невозможно использовать, если режимные параметры или время обработки выходят за пределы интервала, для которого были найдены урав-

нения технических ограничений. Но наиболее существенным недостатком экспериментально-теоретического метода является то, что он не учитывает изменение во времени режущей способности шлифовального круга, т. е. нестационарность процесса обработки. Как следствие, уравнения технических ограничений находят для условий, когда параметры рабочей поверхности круга (РПК) стабилизируются через некоторое время после начала обработки, что приводит к занижению режимов по сравнению с режимами шлифования рабочей поверхностью, параметры которой сформированы непосредственно во время правки, и, соответственно, к неполному использованию режущих возможностей круга.

Целью данной работы является оптимизация режимов алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 (относится к группе быстрорежущих сталей повышенной производительности – Р18К5Ф2, Р18М5Ф2, Р14Ф4, Р12Ф3, 11Р3АМ3Ф2, Р6АМ5Ф3) с учетом нестационарности процесса обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оптимизацию режимов шлифования с учетом нестационарности процесса для жесткой схемы шлифования (рис. 1, *а*) выполняли, воспользовавшись врезным шлифованием по упругой схеме с постоянной силой поджима образца к РПК (см. рис. 1, *б*), кинематика которого аналогична шлифованию по жесткой схеме.

Выбор указанной схемы обусловлен тем, что именно она обеспечивает стабильные показатели качества обработанной поверхности на протяжении всего времени обработки. Учитывая, что скорость шлифовального круга v_k определяется паспортом станка, режимами врезного шлифования по упругой схеме будут скорость детали v_d и усилие поджима образца к РПК P_n , рассчитанное с использованием параметров РПК, сформированных в процессе правки. Рабочая поверхность круга после правки имеет максимальную режущую способность и после определения оптимального значения скорости детали должна обеспечивать заданные высотные параметры шероховатости, которые с увеличением времени обработки снижаются.

Область возможных режимов шлифования алмазным кругом в начале обработки рассматривали в плоскости $t_{\phi}(P_n)Ov_d$ (рис. 2), в которой она ограничена кривыми, описываемыми уравнениями технических ограничений, налагаемых на режим шлифования станком ($v_{d \min}$, $v_{d \max}$), приспособлением для упругого поджима ($P_{n \min}$, $P_{n \max}$) образца к РПК (при этом диапазон сил упругого поджима определяет диапазон мгновенных значений фактической глубины резания при шлифовании ($t_{\phi \min}(P_{n \min})$, $t_{\phi \max}(P_{n \max})$), изделием (ТИ1 – по параметру шероховатости обработанной поверхности изделия Ra , ТИ2 – по температуре фазово-структурных превращений в поверхностном слое обрабатываемого материала), шлифовальным кругом (ТК1 – ограничение по прочности зерен; ТК2 – по температуре окисления алмазов). Нестационарность процесса обработки учитывали, используя текущую лимитированную режущую способность шлифовального круга (ТЛРСШК) – максимально возможную в данный момент времени производительность шлифования Q при условии выполнения всех технических ограничений. ТЛРСШК однозначно определяет максимально возможную в данный момент времени текущую лимитированную фактическую глубину шлифования (ТЛФГШ), рассчитываемую путем деления ТЛРСШК на площадь обрабатываемой поверхности детали. Соответственно, с учетом времени шлифования τ область возможных режимов будет представлять собой трехмерное пространство, ограниченное

плоскостями, проведенными параллельно соответствующим координатным плоскостям через точки $v_{д \min}$, $v_{д \max}$, $t_{ф \min}(P_{п \min})$, а также семейством кривых $t_{ф} = f(Q, \tau)$, описывающих изменение ТЛФГШ в точках диапазона ($v_{д \min}$, $v_{д \max}$), в которых $v_{д}$ удовлетворяет заданному параметру шероховатости Ra . Положение плоскости вдоль оси τ ограничено временем эксперимента.

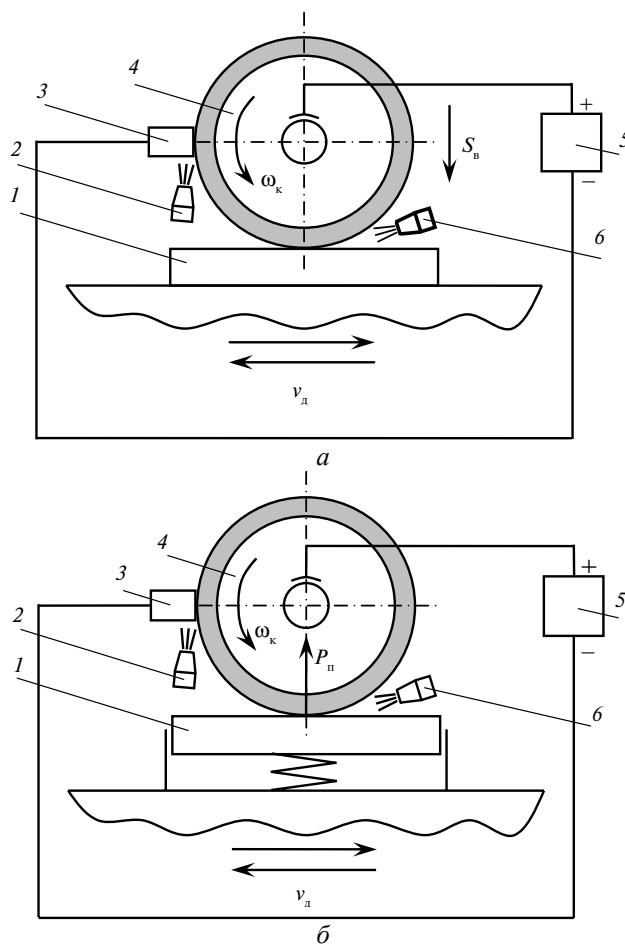


Рис. 1. Схема плоского врезного шлифования с электроэрозионным воздействием на РПК по жесткой схеме (а) и по упругой схеме с постоянной силой поджима $P_{п}$ заготовки к кругу (б): 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – сопло для подачи рабочей среды в межэлектродный промежуток; 3 – автономный электрод-инструмент; 4 – шлифовальный круг; 5 – источник технологического тока; 6 – сопло для подачи рабочей среды в зону резания.

Скорость детали, удовлетворяющую заданному параметру шероховатости Ra (см. рис. 2, точка 1 на кривой ТИ1), находили по методике [3], в которой решена задача определения высотных параметров шероховатости обработанной шлифованием поверхности:

$$v_{дТИ1} = \frac{120v_k \sqrt{2R_k \Delta R \cdot 10^{-3}} \sum_{i=1}^N F(i\Delta R) \sum_{N_1=1}^i (\sqrt{N_1} - \sqrt{N_1 - 1}) B'[(N - i - N_1 + 2)\Delta R]}{10^3 S_{3,п}}, \quad (1)$$

где $S_{3,п}$ – расстояние между зернами на рабочей поверхности круга, мм; N – номер интервала, на котором произошло перекрытие единичных срезов; i –

номера интервалов, входящих в N , $i = 1, 2, \dots, N$; N_1 – участки поверхности круга, обрабатывающие i -е интервалы; N_1 изменяется внутри i от 1 до $N - i + 1$; $F(i\Delta R)$ – вероятность попадания вершин алмазных зерен в i -й интервал; $B'(i\Delta R)$ – ширина среза на i -м интервале, мкм.

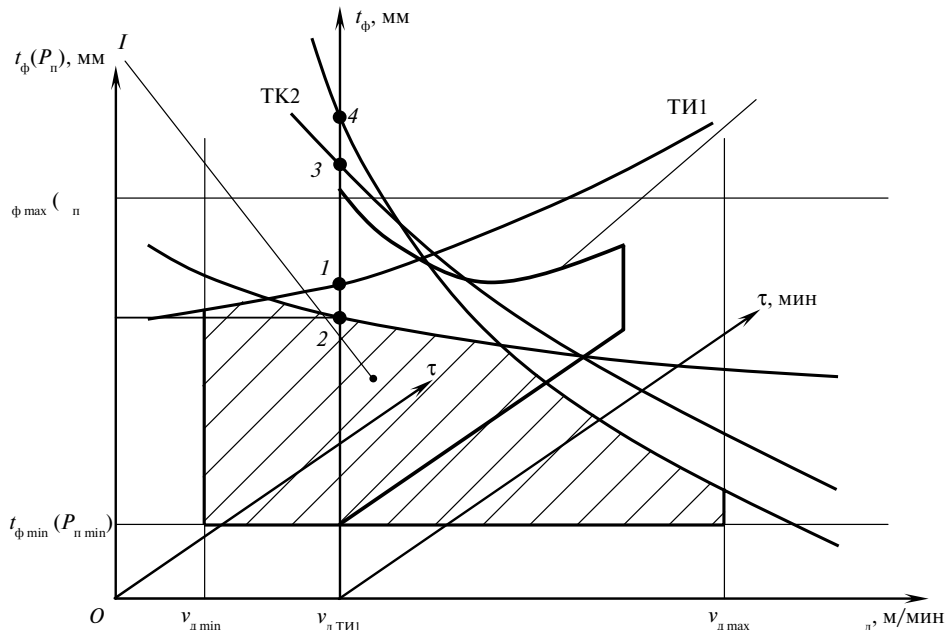


Рис. 2. Определение режимов обработки с учетом нестационарности процесса при врезном алмазном шлифовании по упругой схеме: область возможных режимов при исходном состоянии РПК (I), кривая $t_{\phi} = f(Q, \tau)$ при $v_d = v_{d \text{ ТИ1}}$ (II).

Как установлено в [4], в процессе шлифования с увеличением времени обработки τ среднее арифметическое отклонение профиля обработанной поверхности Ra уменьшается, достигая определенной стабильной величины. Это обусловлено уменьшением разновысотности зерен на рабочей поверхности круга с последующей ее стабилизацией. Использование скорости детали, определенной заданному детали значению средней высоты неровностей профиля Ra , и параметров РПК, сформированных во время электроэрозионной правки и характеризующихся большей разновысотностью, приведет к уменьшению производительности обработки. В результате уменьшения разновысотности параметр Ra будет уменьшаться.

Номер интервала, на котором должно произойти поперечное перекрытие срезов в соответствии с заданным значением параметра Ra , определяли по формуле

$$N = \frac{4Ra}{\Delta R},$$

где ΔR – принятая величина интервала расчета, мкм.

Определим скорость детали при врезном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5Ф3 алмазным кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80–100–М2-01, если значение параметра шероховатости обработанной поверхности $Ra = 0,4$ мкм.

Исходными данными для расчета скорости детали, ограниченной среднее арифметическим отклонением профиля обработанной поверхности Ra , явля-

ются параметры РПК [5]: угол заострения $\varepsilon = 91^\circ$, радиус округления вершины $\rho = 6,69$ мкм (для модели режущей части зерна в виде конуса с округленной вершиной); расстояние между зернами на РПК $S_{з.п} = 0,30$ мм, параметры распределения разновысотности вершин зерен после электроэрозионной правки, описываемого законом Вейбулла, $m = 2,23$, $x_0 = 2946$.

После расчета по разработанной программе для ПЭВМ по формуле (1) с использованием вышеприведенных исходных данных получили, что заданный параметр шероховатости $Ra = 0,4$ мкм при скорости круга $v_k = 35$ м/с обеспечивается скоростью детали $v_{дТИ1} = 6,21$ м/мин (для дальнейших расчетов принимали $v_{дТИ1} = 6$ м/мин).

Усилие поджима, обеспечивающее отсутствие фазово-структурных превращений в поверхностном слое обрабатываемого материала на протяжении всего времени шлифования по упругой схеме, определяли по формуле, приведенной в [5]:

$$P_{н2} = \frac{\left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \sin \omega}}{\sin \beta} + K_3 M f_3 \right) z_p C}{1 + \left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \sin \omega}}{\sin \beta} + K_3 M f_3 \right) z_p \alpha \frac{4a60V_k \sqrt{H} \alpha_B}{\lambda V_d \sqrt{\pi}} K_{ш}}. \quad (2)$$

где $M = 1 + 2(\pi/4 - \beta)$ – коэффициент, определяемый соотношением нормальных и касательных напряжений в плоскости сдвига σ/τ_s ; a_z – максимальная толщина среза, мм; β , ω – соответственно угол сдвига и угол действия; K_3 – коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на поверхности контакта зерна с деталью; μ – коэффициент трения задней поверхности зерна о поверхность резания; f_3 – площадь зоны контакта задней поверхности зерна с заготовкой, мм² (в принятой модели режущей части зерна $f_3 = b l_z$); l_z – длина площадки контакта на зерне, мм; b – ширина единичного среза, мм; z_p – количество одновременно контактирующих с заготовкой режущих зерен; a , λ – коэффициенты температуропроводности, м²/с и теплопроводности, Вт/(м·К) обрабатываемого материала соответственно; H – безразмерная полуширина источника тепла; α_B – коэффициент ввода, учитывающий количество тепла, поступающее в деталь; C , α – соответственно начальная ордината и коэффициент в линейной зависимости $\tau_s = C - \alpha T$, отражающей влияние температурно-скоростных факторов в условиях шлифования на величину касательных напряжений τ_s ; $K_{ш}$ – коэффициент шлифования.

Условие отсутствия фазово-структурных превращений в материале заготовки при обработке представляли в виде неравенства [6]

$$0,95T_{кр} < T < 1,00T_{кр}, \quad (3)$$

где $T_{кр}$ – критическая температура, выше которой происходят фазово-структурные превращения в материале заготовки, К.

Максимальную температуру на поверхности резания определяли по формуле [5]

$$T = \frac{\left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \sin \omega}}{\sin \beta} + K_3 M f_3 \right) z_p C \frac{4a60V_k \sqrt{H} \alpha_B}{\lambda V_d \sqrt{\pi}} K_{ш}}{1 + \left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \sin \omega}}{\sin \beta} + K_3 M f_3 \right) z_p \alpha \frac{4a60V_k \sqrt{H} \alpha_B}{\lambda V_d S \sqrt{\pi}} K_{ш}}. \quad (4)$$

Неравенство (3) с учетом формулы (4) решали относительно фактической глубины шлифования t_{ϕ} с использованием параметров РПК, сформированных во время правки [5]. Так как t_{ϕ} входит в равенство (4) в неявном виде через выражения для определения максимальной толщины запытообразного среза a_z , площади зоны контакта задней поверхности зерна с заготовкой f_z , количества одновременно контактирующих с заготовкой зерен z_p и др., то, ввиду трансцендентности уравнения (4) относительно t_{ϕ} , для решения неравенства (3) использовали численные методы, реализуемые на ПЭВМ. Найденное в ходе решения значение t_{ϕ} является максимально возможной исходной глубиной шлифования t_0 , обеспечивающей отсутствие фазово-структурных изменений дефектов на поверхности заготовки в начале обработки.

Усилие поджима, обеспечивающее отсутствие фазово-структурных превращений в поверхностном слое обрабатываемого материала, рассчитывали с использованием следующих исходных данных для стали Р6М5Ф3 [5]: коэффициент температуропроводности $a = 4,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 19,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, температура начала фазово-структурных превращений $T_{кр} = 815 \text{ К}$, допустимые касательные напряжения в условиях шлифования $\tau_s = (1761 - 0,185T) \text{ МПа}$, диаметр шаровой модели зерна $d = 132 \text{ мкм}$, исходная глубина шлифования $t_0 = 15 \text{ мкм}$. В результате расчета получили $P_{п2} = 85 \text{ Н}$.

Усилие поджима заготовки к РПК по температуре окисления алмазных зерен определяли по формуле, приведенной в [7]:

$$P_{п3} = \frac{0,95T_{ок}(\lambda_1 + 2,25\lambda A^* \sqrt{F_0})\pi n_p d^2 \sqrt{lB}}{4,52A^* \delta \sqrt{\omega_1 \nu_k K_{ш}}}, \quad (5)$$

где $T_{ок}$ – температура окисления алмазов, К;
 $A^* = A_1 - \frac{8\lambda_k F_0}{\ln 4h/d\lambda_1} \frac{A_{ср}}{1 + \frac{8\lambda_k F_0}{\ln 4h/d\lambda_1}}$; λ_k – коэффициент теплопроводности алма-

зоносного слоя, Вт/(м·К); F_0 – критерий Фурье; h – высота цилиндрической модели зерна наиболее вероятного размера, м; d – диаметр основания цилиндрической модели зерна наиболее вероятного размера, м; λ_1 – коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/(м·К); ω_1 – коэффициент температуропроводности алмаза, м²/с; $A_{ср} = \frac{A_1 + A_2}{2}$ – безразмерная функция, учитывающая

среднюю температуру рабочего и нерабочего торцов зерна; A_1 и A_2 – безразмерные функции, учитывающие температуру рабочего торца зерна и нерабочего торца зерна соответственно; n_p – количество режущих зерен на квадратном миллиметре рабочей поверхности круга, шт/мм²; l – длина дуги контакта единичного зерна с кругом, м; B – ширина шлифования, м.

Определение усилия поджима заготовки к РПК по температуре окисления алмазных зерен выполняли, используя следующие исходные данные: диаметр основания цилиндрической модели зерна $d = 115 \text{ мкм}$, высота цилиндрической модели зерна $h = 115 \text{ мкм}$, критерий Фурье $F_0 = 0,35$, коэффициент теплопроводности алмаза $\lambda_1 = 530 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, коэффициент температуропроводности алмаза $\omega_1 = 0,000083 \text{ м}^2/\text{с}$, эквивалентный коэффициент теплопроводности алмазоносного слоя $\lambda_k = 296 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, безразмерные функции, учитывающие температуру рабочего торца зерна $A_1 = 1,3$, температуру нерабочего торца зерна $A_2 = 0,79$, среднюю температуру рабочего и нерабочего торцов

зерна $A_{cp} = 1,045$, длина дуги контакта единичного зерна с кругом $l = 1,936$ мм.

Рассчитанное по формуле (5) усилие поджима $P_{пз} = 100$ Н.

Усилие поджима заготовки к РПК, ограниченное механической прочностью алмазных зерен, определяли по формуле, которая выведена на основе методик, приведенных в [8, 9]:

$$P_{п4} = \frac{\frac{[p]S}{S_{3,п}^2} (bl_3 + ba_{z_{пр}} \sin \gamma) F\left(a_{z_{max}} + \frac{R_z}{2} - a_{z_{пр}}\right)}{\sqrt{1 + K_{ш}^2}}. \quad (6)$$

где $[p]$ – разрушающее давление на поверхности контакта единичного алмазного зерна с заготовкой, МПа; S – площадь зоны контакта заготовки со шлифовальным кругом, мм²; $S_{3,п}$ – расстояние между зернами на рабочей поверхности круга, мм; γ – передний угол для сферической модели режущей части зерна; $a_{z_{пр}}$ – предельная толщина единичных срезов, превышение которой приводит к разрушению алмазного зерна, мм; $a_{z_{max}}$ – максимальная толщина среза зернами, наиболее выступающими из связки, мм; R_z – значение высотного параметра шероховатости R_z на поверхности резания, мм; $F(a_{z_{max}} + R_z/2 - a_{z_{пр}})$ – значение функции распределения Вейбулла, определяющее вероятное количество зерен, удаляющих срезы, при которых произойдет разрушение зерен.

Исходные данные для расчета усилия поджима заготовки к РПК, ограниченного механической прочностью алмазных зерен, имеют следующие значения: разрушающее давление на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой $[p] = 26660$ МПа, предельная толщина среза для зернистости 100/80 $a_{z_{пр}} = 0,462$ мкм, максимальная толщина среза зернами, наиболее выступающими из связки $a_{z_{max}} = 1,846$ мкм; разрушающая нагрузка на единичное зерно $P_{разр} = 21$ Н, количество зерен, которые разрушатся при шлифовании на заданных режимах $z_{разр} = 9,869$.

В результате расчета по формуле (6) получили усилие $P_{п4} = 198$ Н.

Как видно из приведенных расчетов, усилие поджима в точке 2 (см. рис. 2) удовлетворяет всем рассмотренным техническим ограничениям, следовательно, определять закономерность влияния времени обработки на текущую лимитированную режущую способность шлифовального круга и обусловленную нею ТЛФГШ (кривая $t_{ф} = f(Q, \tau)$ при $v_d = v_{d_{ти1}}$ на рис. 2) следует при $P_{п2} = 85$ Н и $v_{d_{ти1}} = 6$ м/мин.

Для получения регрессионной зависимости $Q_{a,ш} = f(\tau)$, описывающей изменение ТЛРСШК во время шлифования, были проведены эксперименты на станке ЗГ71, модернизированном для осуществления электроэрозионной правки и электроэрозионных воздействий (ЭЭВ) на РПК одновременно со шлифованием. Обработку образцов из быстрорежущей ванадиевой стали Р6М5Ф3 осуществляли алмазным кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80–100–М2-01 на вышеприведенных режимах с использованием устройства, обеспечивающего упругий поджим образца к РПК с постоянной силой [5]. В качестве источника технологического тока использовали генератор импульсов мод. ИТТ-35. Охлаждение проводили 0,3 %-ным водным раствором кальцинированной соды.

Регрессионная зависимость $Q_{a,ш} = f(\tau)$ для алмазного шлифования быстрорежущей стали Р6М5Ф3 без ЭЭВ (рис. 3) описывается уравнением

$$Q_{a,ш} = 15,8 + 648,2 \exp(-0,243\tau). \quad (7)$$

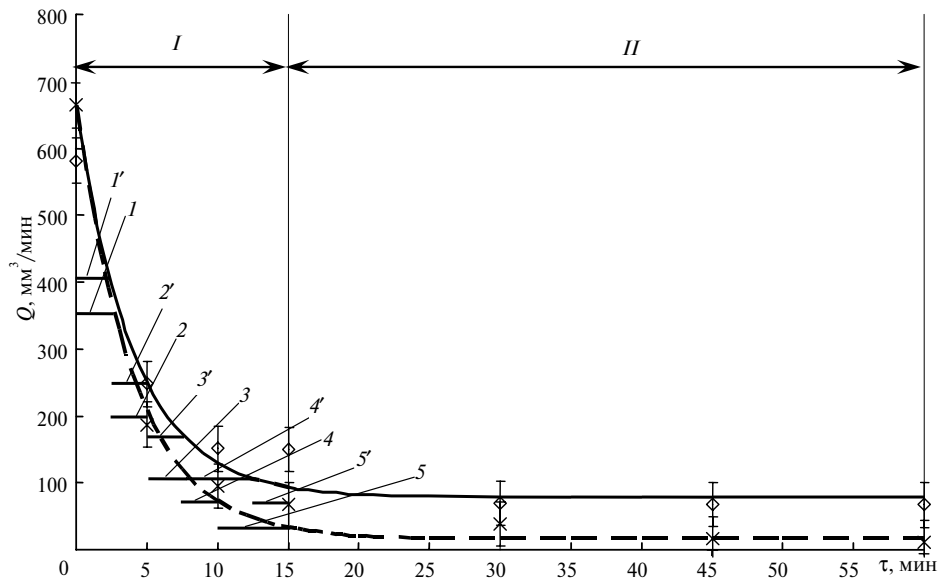


Рис. 3. Зависимость текущей лимитированной режущей способности алмазного круга 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80–100–М2-01 от времени обработки при врезном шлифовании по упругой схеме быстрорежущей ванадиевой стали Р6М5Ф3 без ЭЭВ (---) и с ЭЭВ с силой тока $I_{cp} = 6$ А (—): участки приработки (I) и стабильной режущей способности круга (II); вертикальная подача $S_{в.АШ} = 5,0$ (1), 3,0 (2), 2,0 (3), 1,0 (4), 0,5 (5) мкм/ход, $S_{в.АШ+ЭЭВ} = 5,5$ (1'), 3,5 (2'), 2,5 (3'), 1,5 (4'), 1,0 (5') мкм/ход.

Как видно на рис. 3, стабилизация режущей способности шлифовального круга происходит на 30-й минуте обработки, что, как установлено в [10], объясняется засаливанием межзеренного пространства на РПК обрабатываемым материалом и образованием контактных площадок на зернах.

Среднюю величину тока электроэрозионных воздействий, обеспечивающих удаление продуктов засаливания из межзеренного пространства, определяли по формуле [11]

$$I_{cp} = \frac{10^{-3}(-x_0 \ln 0,05)^{\frac{1}{m}} \pi D_k B_k \left(1 - \frac{P_V}{2} \frac{K}{100}\right)}{\tau_3 c U_{sm}}, \quad (8)$$

где D_k, B_k – диаметр и высота шлифовального круга соответственно, мм; P_V – объемная доля алмазов в алмазоносном слое при 100 %-ной относительной концентрации алмаза; K – относительная концентрация алмазов, %; τ_3 – время, за которое шлифовальный круг потерял режущую способность в результате изнашивания зерен и засаливания межзеренного пространства, мин; c – эмпирический коэффициент; U_{sm} – расчетная величина напряжения на эрозионном промежутке, В.

После подстановки в формулу (8) следующих данных: $\tau_3 = 30$ мин, $c = 0,18$, $U_{sm} = 21$ В, средняя сила тока электроэрозионных воздействий составила $I_{cp} = 6$ А.

Изменение ТЛРСШК при шлифовании с одновременным электроэрозионным воздействием на РПК в автономной зоне с силой тока $I_{cp} = 6$ А (см. рис. 3) описывается уравнением

$$Q_{а.ш+ЭЭВ} = 78,4 + 584,6 \exp(-0,243\tau). \quad (9)$$

Как видно из приведенных на рис. 3 кривых $Q_{a.ш} = f(\tau)$ и $Q_{a.ш+\text{ЭЭВ}} = f(\tau)$, при обоих способах шлифования имеются участок приработки *I*, характеризующийся интенсивным уменьшением режущей способности и увеличенным расходом алмазов, и участок со стабильным значением режущей способности *II*.

Производительность обработки на участке приработки определяли при шлифовании с переменной глубиной, найденной по формуле

$$t_{\phi} = \frac{Q(k_{\text{дис}} \tau_{\text{дис}})}{BLn_{\text{ст}}}, \quad (10)$$

где $\tau_{\text{дис}}$ – время шлифования, по истечении которого осуществляется дискретное изменение вертикальной подачи $S_{\text{в}}$, мин; $Q(k_{\text{дис}} \tau_{\text{дис}})$ – ТЛРСШК в момент времени обработки $\tau = k_{\text{дис}} \tau_{\text{дис}}$, мм³/мин; $k_{\text{дис}}$ – количество дискретных изменений вертикальной подачи, $k_{\text{дис}} = 1, 2, 3, \dots$; L – длина заготовки, мм; $n_{\text{ст}}$ – частота ходов стола, ход/мин.

Для значения времени дискретного изменения $S_{\text{в}}$, равного 2,5 мин, по формуле (10) рассчитали глубину шлифования. Соответствующие значения вертикальной подачи в период приработки РПК (длительность этого периода составила $\tau_{\text{пр}} = 15$ мин) $S_{\text{в АШ}}$ и $S_{\text{в АШ+\text{ЭЭВ}}}$ приведены на рис. 3.

Производительность обработки на участке приработки рассчитывали как сумму площадей прямоугольников, ограниченных по вертикали прямыми, проведенными через точки на оси абсцисс $\tau = k_{\text{дис}} \tau_{\text{дис}}$, а по горизонтали – осью абсцисс и отрезками, которые соответствуют дискретным значениям подачи $S_{\text{в}}$ (см. рис. 3). Производительность обработки на участке стабильной режущей способности длительностью $\tau_{\text{ст}} = 45$ мин определяли как площадь прямоугольника, ограниченного по вертикали прямыми, проведенными через точки на оси абсцисс $\tau = 15$ и 60 мин, а по горизонтали – осью абсцисс и асимптотой к соответствующей кривой ТЛРСШК.

Производительность обработки при шлифовании с ЭЭВ на РПК при силе тока $I_{\text{ср}} = 6$ А, определенная с учетом изложенного выше, по сравнению со шлифованием без ЭЭВ на участке приработки увеличивается на 40 %, а на участке со стабильным значением режущей способности РПК – в 2 раза.

ВЫВОДЫ

При оптимизации режимов шлифования по жесткой схеме нестационарность процесса учитывается с помощью текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга, математическое описание которой находят по экспериментальным данным при шлифовании по упругой схеме с постоянной силой поджима заготовки к РПК, при условии, что кинематика обработки по упругой схеме аналогична шлифованию по жесткой схеме. ТЛРСШК определяет максимально возможную в данный момент времени текущую лимитированную фактическую глубину шлифования.

Область возможных режимов при шлифовании по упругой схеме как нестационарном процессе в системе координат $t_{\phi} v_{\text{д}} \tau$ представляет собой трехмерное пространство, ограниченное плоскостями, проведенными параллельно соответствующим координатным плоскостям через точки $v_{\text{д min}}$, $v_{\text{д max}}$, $t_{\phi \text{ min}}(P_{\text{н min}})$, а также семейством кривых $t_{\phi} = f(Q, \tau)$, описывающих изменение ТЛФГШ в точках диапазона ($v_{\text{д min}}$, $v_{\text{д max}}$), в которых $v_{\text{д}}$ удовлетворяет заданному параметру шероховатости *Ra*. Положение плоскости вдоль оси τ ограничено временем эксперимента.

Оптимальными параметрами режима шлифования по жесткой схеме кругом 1A1 250×76×15×5 AC6 100/80–100–M2-01 быстрорежущей ванадиевой стали Р6М5Ф3 с управляющими электроэрозионными воздействиями в автономной зоне являются: сила тока $I_{cp} = 6$ А, скорость круга $v_k = 35$ м/с, скорость детали $v_d = 6$ м/мин, вертикальная подача S_v изменяется дискретно, глубина шлифования $t_{\phi} = 1$ мкм. Обработка при таких параметрах обеспечивает повышение производительности шлифования на участке приработки на 40 %, а на участке со стабильным значением режущей способности РПК – в 2 раза по сравнению со шлифованием без электроэрозионных воздействий.

Рассмотренная методика оптимизации режимов шлифования с учетом нестационарности процесса, основанная на определении текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга, может быть использована при обработке как кругами из СТМ, так и абразивными кругами деталей из различных материалов.

Розглянуто оптимізацію режимів алмазного шліфування сталі Р6М5Ф3 з урахуванням нестационарності процесу, яка обумовлена зміною в часі різальної здатності робочої поверхні шліфувального круга. Для оптимізації використано врізне шліфування за пружною схемою з постійною силою підтиску заготовки до робочої поверхні круга, кінематика якого аналогічна шліфуванню за жорсткою схемою. Область можливих режимів алмазного шліфування за пружною схемою на початку оброблення розглянуто в системі координат швидкість деталі–сила підтиску заготовки. Швидкість деталі визначено заданим значенням шорсткості обробленої поверхні виробу. Силу підтиску заготовки вибрано мінімальною, виходячи із умов забезпечення відсутності фазово-структурних перетворень в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу, відсутності окислення алмазів, неруйнування алмазних зерен. Нестационарність процесу враховано через використання рівнянь, які описують зміну в часі оброблення поточної лімітованої різальної здатності шліфувального круга.

Ключеві слова: шліфування, нестационарність, оптимізація, швидкість деталі, сила підтиску, різальна здатність, глибина різання.

The paper addresses optimization of machining conditions in diamond grinding of steel R6M5F3 taking into account the process unsteadiness. The optimization is accomplished for plunge-cut grinding by the elastic mode with a constant workpiece-to-wheel pressing force, the kinematics of the process being similar to the rigid-mode one. The region of possible machining conditions for an early stage of the elastic-mode diamond grinding is considered in the coordinates “workpiece speed—workpiece pressing force”. The workpiece speed is determined for a specified machined surface roughness. The workpiece pressing force is chosen to be minimal based on the condition of ensuring no phase-structural transformations in the surface layer of the workpiece material, no diamond oxidation, and no destruction of diamond grits. The process unsteadiness was allowed for through the use of the equations describing the time variation of the current limited cutting ability of the grinding wheel.

Keywords: grinding, unsteadiness, optimization, workpiece speed, pressing force, cutting ability, depth of cut.

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справ. / Под ред. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Узунян М. Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2003. – 359 с.
3. Матюха П. Г., Терехова Л. К. Расчет параметров шероховатости шлифованной поверхности // Известия вузов. Сер. Машиностроение. – 1982. – Вып. 10. – С. 101–105.
4. Полтавец В. В., Матюха П. Г., Цокур В. П., Стрелков В. Б. Влияние явлений, сопровождающих процесс алмазного шлифования труднообрабатываемых материалов, на высотные параметры шероховатости обработанной поверхности // Наук. праці Дон. нац. техн. ун-ту. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2012. – Вип. 9 (205). – С. 56–63.

5. Матюха П. Г. Високопродуктивне шліфування ванадійових штампових та інструментальних сталей. – Донецьк: ДВНЗ “ДонНТУ”, 2008. – 222 с.
6. Матюха П. Г., Полтавець В. В. Влияние времени обработки на глубину алмазного шлифования по упругой схеме // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международ. сб. науч. тр. – Донецк: ДонГТУ, 1998. – Вып. 5. – С. 117–121.
7. Матюха П. Г., Стрелков В. Б. Определение силы поджима образца к кругу, ограниченной температурой графитизации алмазных зерен // Наук. праці Дон. нац. техн. ун-ту. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2004. – Вип. 71. – С. 41–46.
8. Матюха П. Г., Габитов В. В. Определение оптимального усилия поджима образца к рабочей поверхности круга при шлифовании стали Р6М5Ф3 кругами из СТМ // Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2009. – Вип. 3. – С. 55–62.
9. Матюха П. Г., Бурдин А. В. Определение силы поджима комбинированного образца к режущей поверхности круга, ограниченной механической прочностью алмазных зерен // Сверхтв. материалы. – 2011. – № 3. – С. 65–73.
10. Матюха П. Г., Полтавець В. В., Гринев А. А. Вклад процессов засаливания межзеренного пространства и изнашивания алмазных зерен в ухудшение режущей способности круга при шлифовании по упругой схеме // Прогрессивные технологии и системы в машиностроении. Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: ДонГТУ, 1999. – Вып. 7. – С. 117–121.
11. Пат. 52776 Україна. МПК В24В 1/00, В24В 53/00, В23Н 5/04. Спосіб шліфування / П. Г. Матюха, В. В. Полтавець, А. О. Гриньов, В. Б. Стрелков. – Опубл. 15.01.03. Бюл. № 1.

Донецкий национальный технический ун-т

Поступила 21.05.13