

УДК 621.923

П. Г. Матюха*, В. В. Полтавец

Донецкий национальный технический университет, г. Покровск

*matjuha_pg@mail.ru

Определение режима обновления режущей способности круга с учетом ее изменения во время обработки

Рассмотрено определение режима шлифования по “жесткой” схеме с периодическим электроэрозионным воздействием на рабочую поверхность шлифовального круга в автономной зоне в условиях изменяющейся во время обработки режущей способности рабочей поверхности круга. В основу расчета положены математические зависимости, описывающие изменение режущей способности круга при врезном шлифовании по “упругой” схеме с постоянной силой поджима заготовки к рабочей поверхности круга, кинематика которого аналогична шлифованию по “жесткой” схеме. Скорость детали определена заданным значением шероховатости обработанной поверхности изделия. Сила поджима заготовки выбрана исходя из условий обеспечения отсутствия фазово-структурных превращений в поверхностном слое обрабатываемого материала. Изменение режущей способности круга в процессе шлифования по “жесткой” схеме учитывали, используя уравнения, описывающие изменение во время обработки текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга при шлифовании по “упругой” схеме. На основе анализа различных способов расчета одного из элементов режима шлифования – глубины резания – определено ее значение, гарантирующее отсутствие фазово-структурных превращений в поверхностном слое обрабатываемого материала при максимально возможной производительности обработки.

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

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблем, связанных с повышением производительности обработки труднообрабатываемых материалов при условии достижения заданного качества обработанной поверхности является актуальной задачей для современного производства.

Современная машиностроительная отрасль промышленности широко использует в качестве конструкционных и инструментальных сталей труднообрабатываемые ванадиевые штамповые стали и быстрорежущие стали повышенной производительности. В состав этих сталей входят очень твердые карбиды хрома, вольфрама, молибдена, ванадия, твердость которых превышает твердость электрокорунда и карбида кремния [1, 2], что является причиной их плохой обрабатываемости шлифованием.

В литературе широко представлены следующие способы повышения производительности и качества обработанной поверхности при шлифовании труднообрабатываемых материалов:

– использование кругов из современных синтетических алмазов [3];
– шлифование с дополнительными электро-физико-химическими воздействиями на рабочую поверхность круга (РПК) одновременно с обработкой заготовки [4–7];

– оптимизация режимов шлифования [8].

В [9] в основе способа определения режимов обработки при шлифовании с режимами, устанавливаемыми механизмами подачи станка (“жесткая” схема обработки), используются данные об изменении текущей лимитированной режущей способности круга в процессе шлифования с постоянной силой поджима образца к рабочей поверхности круга (“упругая” схема) и во время периодического обновления режущей способности за счет электроэрозионных воздействий (ЭЭВ). Вместе с тем, не исследовано влияние способа обновления режущей способности круга электроэрозионными воздействиями на глубину шлифования при шлифовании по “жесткой” схеме.

Целью работы является определение режима обновления режущей способности РПК электроэрозионным способом по критерию максимальной производительности и минимальной себестоимости обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как уже отмечалось, при определении режимов шлифования по “жесткой” схеме (рис. 1, а) используются данные об изменении текущей лимитированной режущей способности круга в процессе шлифования по “упругой” схеме с постоянной силой поджима образца к рабочей поверхности круга (рис. 1, б) и периодического обновления режущей способности за счет электроэрозионных воздействий.

При врезном шлифовании по “жесткой” схеме фиксированными элементами режима резания являются скорость круга v_k , м/с, продольная скорость стола $v_{ст}$, м/мин и величина вертикальной подачи S_B , мм/ход, которая определяет глубину шлифования t , мм. Элементами электроэрозионных воздействий являются напряжение холостого хода U_{xx} , В и величина силы тока I_{cp} , А при непрерывных электроэрозионных воздействиях. При шлифовании с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК процесс представляет собой чередование циклов, состоящих из периодов шлифование без ЭЭВ–шлифование с ЭЭВ (рис. 2). В этом случае элементами режима электроэрозионных воздействий являются длительность соответствующих периодов и сила тока.

Рассмотрим методику нахождения элементов режима на примере врезного шлифования стали Р6М5Ф3 кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80 100 М2-01, характеризующегося интенсивным ухудшением режущей способности в результате засаливания межзеренного пространства РПК. Необходимые сведения об изменении текущей лимитированной режущей способности круга (ТЛРСК) при шлифовании без электроэрозионных воздействий и с электроэрозионными воздействиями на РПК получим экспериментально при шлифовании на станке 3Г71 с постоянным усилием поджима обрабатываемого образца к рабочей поверхности круга. Источник технологического тока – генератор импульсов модели ИГТ-35. Режимы шлифования: $v_k = 35$ м/с, продольная скорость стола $v_{ст} = 6$ м/мин, усилие поджима образца к РПК – 80 Н; электрические режимы: средняя величина тока $I_{cp} = 10$ А, напряжение холостого хода $U_{xx} = 60$ В. Рабочая среда – 0,3 %-ный водный раствор кальцинированной соды.

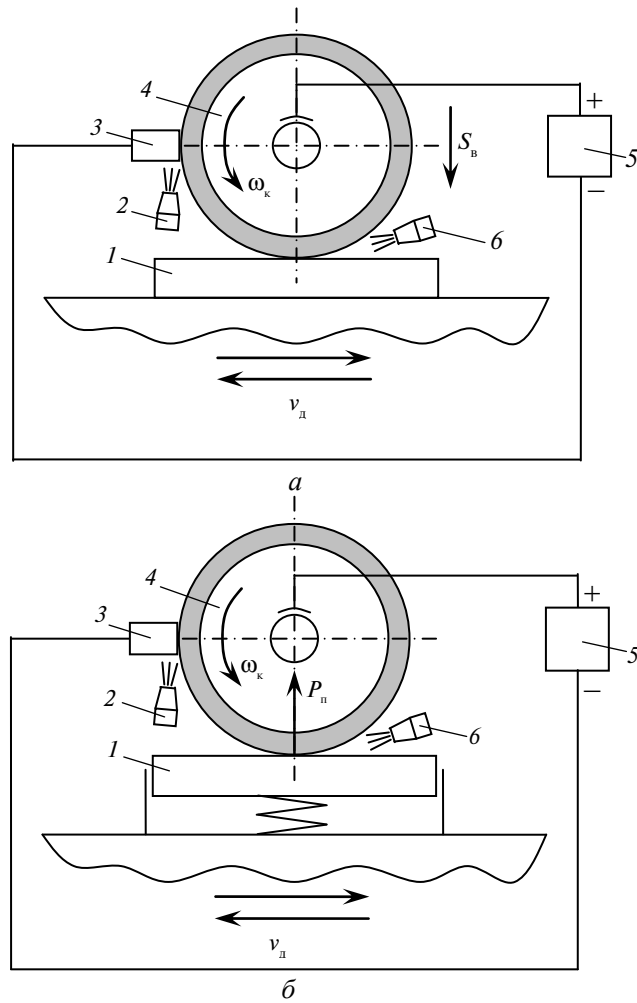


Рис. 1. Плоское врезное шлифование по “жесткой” (а) и “упругой” схемах с постоянной силой поджима P_n заготовки к кругу (б) с электроэрозионным воздействием на РПК: 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – сопло для подачи рабочей среды в межэлектродный промежуток; 3 – автономный электрод-инструмент; 4 – шлифовальный круг; 5 – источник технологического тока; 6 – сопло для подачи рабочей среды в зону резания.

Продольная скорость стола найдена из условия обеспечения высотного параметра шероховатости обработанной поверхности $Ra = 0,4$ мкм по методике, изложенной в [9], усилие поджима образца к РПК – из условия отсутствия фазово-структурных превращений в поверхностном слое обработанной поверхности [9].

В общем случае изменение режущей способности круга в процессе шлифования описывается экспоненциальной зависимостью вида

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

где $\Delta Q = (Q_{исх} - Q_{уст})$ – амплитуда снижения значения ТРЛСК при шлифовании; Q , $Q_{уст}$, $Q_{исх}$ – значения текущей, установившейся и исходной ТЛРСК, мм³/мин; β_Q – эмпирический коэффициент, мин⁻¹.

Эта формула содержит постоянную компоненту $Q_{уст}$, описывающую квазипостоянное значение режущей способности и переменную во времени ком-

поненту $\Delta Q_{\text{exp}} - \beta_Q \tau$, описывающую характер изменения режущей способности круга до ее стабилизации.

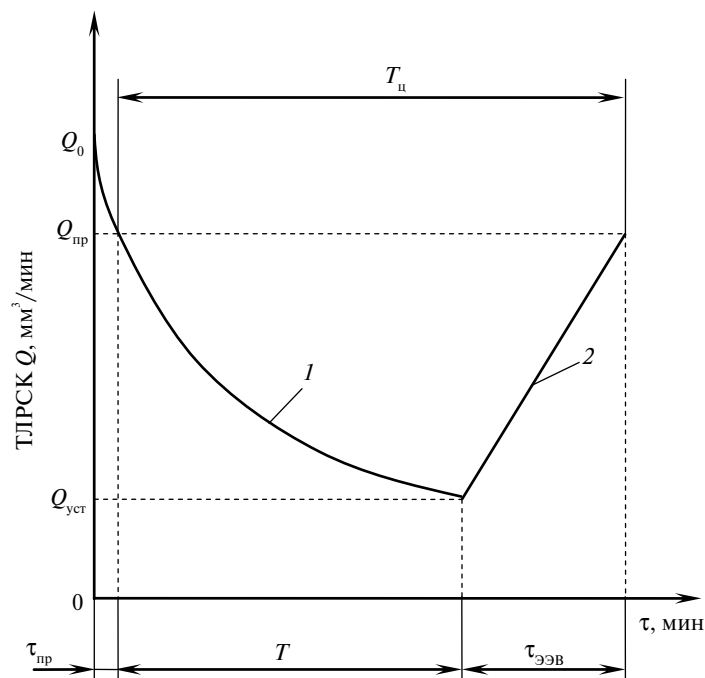


Рис. 2. Периоды, составляющие цикл: шлифование без ЭЭВ (1) и шлифование с ЭЭВ (2) при периодических электроэрозионных воздействиях на РПК.

В результате обработки протоколов экспериментов были найдены числовые значения составляющих формулы (1) для текущей лимитированной режущей способности круга $Q(\tau)$, мм³/мин и текущего расхода алмазов $M(\tau)$, мг/мин при шлифовании без электроэрозионных воздействий:

$$Q(\tau) = 30 + 721e^{-0,11\tau}, \quad (2)$$

$$M(\tau) = 2 + 183e^{-0,15\tau}, \quad (3)$$

а при шлифовании с электроэрозионными воздействиями на РПК с целью восстановления режущей способности РПК – уравнениями прямых, которые имеют вид

$$Q(\tau) = 30 + 57\tau, \quad (4)$$

$$M(\tau) = 2 + 1,6\tau. \quad (5)$$

Используя методику, описанную в [9], и уравнения (2)–(5) с помощью специальной программы на ПЭВМ по критерию минимальной удельной себестоимости обработки была выполнена оптимизация длительностей периодов цикла шлифование без ЭЭВ–шлифование с ЭЭВ. Установлено, что оптимальное время периода шлифования без ЭЭВ составляет $T = 5,41$ мин, а время периода шлифования с ЭЭВ $\tau_{\text{ЭЭВ}} = 5,66$ мин.

Если при определении режимов врезного шлифования по “жесткой” схеме продольная скорость стола принимается равной продольной скорости стола

при шлифовании по “упругой” схеме, то при определении постоянного значения глубины шлифования t_{ϕ} возможны несколько подходов:

- определение глубины шлифования на основе эксперимента, когда шлифование осуществляется по “упругой” схеме с постоянными электроэрозионными воздействиями на РПК с силой тока, найденной из условия равенства энергий, затраченных на обновление рабочей поверхности круга в период шлифования с ЭЭВ и за весь цикл обработки [9];

- определение глубины шлифования по количеству сошлифованного материала за цикл шлифование без ЭЭВ–шлифование с ЭЭВ, при этом электроэрозионные воздействия на РПК осуществляются периодически с длительностями периодов цикла и силой тока, аналогичными оптимальным значениям, найденным при шлифовании по “упругой” схеме;

- определение глубины шлифования по значению фактической глубины шлифования, найденной из уравнения, описывающего изменение фактической глубины шлифования в соответствии с изменением ТЛРСК, путем подстановки в уравнение $t_{\phi} = f(\tau)$ значения времени периода шлифования без ЭЭВ.

Рассмотрим определение глубины шлифования по данным эксперимента, когда шлифование осуществлялось по “упругой” схеме с постоянными электроэрозионными воздействиями на РПК со средним значением силы тока. Среднее значение силы тока таких воздействий $I_{\text{ср.п}}$ рассчитаем из условия равенства энергий, затраченных на обновление рабочей поверхности круга в период шлифования с ЭЭВ и за весь цикл шлифование без ЭЭВ–шлифование с ЭЭВ:

$$I_{\text{ср.п}} = I_{\text{ср.н}} \frac{\tau_{\text{ЭЭВ}}}{T + \tau_{\text{ЭЭВ}}}, \quad (6)$$

где $I_{\text{ср.п}}$ – среднее значение тока непрерывных электроэрозионных воздействий; $I_{\text{ср.н}}$ – среднее значение тока периодических электроэрозионных воздействий; $\tau_{\text{ЭЭВ}}$ – время периода восстановления режущих свойств РПК; T – время периода шлифования без ЭЭВ.

После подстановки оптимальных значений периодов цикла, найденных ранее, и значения силы тока периодических электроэрозионных воздействий $I_{\text{ср}} = 10$ А, получим $I_{\text{ср.п}} = 5$ А.

В процессе эксперимента, когда шлифование осуществлялось с постоянным усилием поджима образца к РПК на режимах $P_{\text{п}} = 80$ Н, $v_{\text{к}} = 35$ м/с, $v_{\text{ст}} = 6$ м/мин и $I_{\text{ср.п}} = 5$ А, было установлено, что текущая лимитированная режущая способность круга и текущий расход алмазов описываются зависимостями, которые имеют вид

$$Q(\tau) = 76 + 506e^{-0,13\tau}, \quad (7)$$

$$M(\tau) = 12 + 225e^{-0,18\tau}. \quad (8)$$

Тогда постоянное значение глубины шлифования по “жесткой” схеме, гарантирующее стабильность показателей качества обработанной поверхности, определится по установившемуся значению режущей способности

$$t_{\phi} = \frac{Q_{\text{уст}}(L + 2l_{\text{пер}})}{1000v_{\text{ст}}BL}, \quad (9)$$

где $Q_{\text{уст}}$ – установившееся значение ТЛРСК, мм³/мин; B и L – ширина и длина образца соответственно, мм; $l_{\text{пер}}$ – величина перебега, мм.

После подстановки в формулу (9) значения $Q_{уст} = 76 \text{ мм}^3/\text{мин}$ (6), а также размеров шлифуемого образца $L \times B = 100 \times 15 \text{ мм}$ и величины перебега $l_{пер} = 10 \text{ мм}$, значение глубины шлифования будет равно $0,001 \text{ мм/ход}$. В этом случае количество (W , мм^3) удаленного материала за час шлифования на указанных режимах находится по формуле

$$W = 60n_{ст}BLt_{ф}, \quad (10)$$

где $n_{ст}$ – частота ходов стола, ход/мин; B , L – ширина и длина образца, мм; $t_{ф}$ – глубина шлифования.

Частота ходов стола равна

$$n_{ст} = \frac{1000v_{ст}}{L + 2l_{пер}}.$$

После подстановки в формулу (10) соответствующих значений получим $W = 4500 \text{ мм}^3$, а средняя производительность обработки будет равна $75 \text{ мм}^3/\text{мин}$.

Глубина шлифования при обработке по “жесткой” схеме, когда электроэрозионные воздействия на РПК осуществляются периодически с оптимальными длительностями периодов цикла ($T = 5,41 \text{ мин}$, $\tau_{ЭЭВ} = 5,66 \text{ мин}$) и силой тока $I_{ср} = 10 \text{ А}$, из условия равенства количества удаленного материала при шлифовании по “упругой” и “жесткой” схемам за время одного цикла шлифование без ЭЭВ–шлифование с ЭЭВ определится по следующей формуле:

$$t_{ф} = \frac{V_{оц}(L + 2l_{пер})}{T_{ц}1000V_{ст}BL}, \quad (11)$$

где $V_{оц}$ – количество удаленного материала по “упругой” схеме шлифования с периодическими ЭЭВ на РПК за время цикла с оптимальными значениями его периодов, мм^3 ; $T_{ц}$ – время цикла, мин.

В этом случае количество удаленного материала за один цикл определяется по формуле [9]

$$V_{оц} = Q_{уст}T - \frac{\Delta Q}{\beta_Q} (\exp(\beta_Q(\tau_{пр})) - \exp(\beta_Q(T + \tau_{пр}))) + (K_Q T - Q_T) \frac{1}{K_Q} (Q_{пр} - Q_T) + \frac{(Q_{пр} - Q_T)^2}{2K_Q}, \quad (12)$$

где ΔQ – амплитуда снижения значения ТЛРСК при шлифовании, $\text{мм}^3/\text{мин}$; $Q_{уст}$ – установившееся значение ТЛРСК, $\text{мм}^3/\text{мин}$; β_Q – эмпирический коэффициент в уравнении, описывающем влияние времени шлифования на ТЛРСК без электроэрозионных воздействий на РПК, мин^{-1} ; $\tau_{пр}$ – оптимальное время приработки, т. е. время, обеспечивающее такое значение ТЛРСК, до которого необходимо вести восстановление режущих свойств с помощью электроэрозионных воздействий, мин; T – оптимальное значение времени ЭЭВ на РПК, мин; K_Q – эмпирический коэффициент в уравнении, описывающем влияние времени шлифования на ТЛРСК в процессе электроэрозионных воздействий на РПК, мин^{-1} ; $Q_{пр}$ – значение ТЛРСК при оптимальном значении времени приработки, $\text{мм}^3/\text{мин}$; Q_T – значение ТЛРСК при оптимальном значении длительности периода шлифование без ЭЭВ, $\text{мм}^3/\text{мин}$.

После подстановки в формулу (12) значений ее составляющих из формул (2) и (4) ($Q_{уст} = 30 \text{ мм}^3/\text{мин}$, $\Delta Q = 731 \text{ мм}^3/\text{мин}$, $\tau_{пр} = 0,01 \text{ мин}$, $\beta_Q = -0,11$, $Q_{пр} = 760 \text{ мм}^3/\text{мин}$, $K_Q = 57$), оптимального значения периода шлифование без ЭЭВ и режущей способности при этом значении ($T = 5,41 \text{ мин}$, $Q_T = 435 \text{ мм}^3/\text{мин}$), а в формулу (10) – размеров образца $L \times B = 100 \times 15 \text{ мм}$, продольной скорости стола $v_{ст} = 6 \text{ м/мин}$ и оптимального времени цикла $T_{ц} = 11,07 \text{ мин}$ в результате вычислений получим значение глубины шлифования, равное $0,0077 \text{ мм}$.

Изменение фактической глубины шлифования t_{ϕ} при обработке образца по “упругой схеме” в соответствии с изменением ТЛРСК во время обработки $Q(\tau)$, описывается формулой

$$t(\tau) = \frac{Q_{уст}}{n_{ст}BL} + \frac{\Delta Q}{n_{ст}BL} \exp(-\beta_Q \tau). \quad (13)$$

Определим глубину шлифования по “жесткой” схеме из уравнения (13), которое после подстановки необходимых значений примет вид

$$t_{\phi}(\tau) = 1,3 \cdot 10^{-5} (30 + 721 e^{-0,11\tau}). \quad (14)$$

После подстановки в уравнение (14) значения времени периода шлифования без ЭЭВ $\tau = 5,41 \text{ мин}$ значение фактической глубины шлифования t_{ϕ} по “жесткой” схеме, а следовательно, и величины вертикальной подачи, будет равно $0,006 \text{ мм}$.

В этом случае количество удаленного материала W за час врезного шлифования по “жесткой” схеме на режимах $v_{ст} = 6 \text{ м/мин}$, $t_{\phi} = 0,006 \text{ мм}$ будет равно 27000 мм^3 , а средняя производительность обработки составит $540 \text{ мм}^3/\text{мин}$, что в 6 раз больше по сравнению со шлифованием с постоянными электроэрозионными воздействиями на рабочую поверхность круга с силой тока 5 А .

Как показывает выполненный анализ, определение глубины шлифования по формуле (9) дает наименьшее значение t_{ϕ} . Это объясняется тем, что сила тока непрерывных электроэрозионных воздействий на РПК найдена из условия равенства энергий, затраченных на обновление рабочей поверхности круга в период шлифования с ЭЭВ и за весь цикл, которое справедливо для случая, когда объем связи, подлежащий удалению электроэрозионным способом, со временем не изменяется. В условиях интенсивного засаливания межзеренного пространства на рабочей поверхности круга найденное значение силы тока электроэрозионных воздействий по формуле (6) не обеспечивает за время цикла обновления ее режущей способности. Это подтверждается тем, что, несмотря на электроэрозионные воздействия на РПК, уменьшение режущей способности круга и расхода алмазов происходит по экспоненциальной зависимости.

Определение величины вертикальной подачи по формуле (11) дает максимальное значение t_{ϕ} , что обусловлено увеличением режущей способности РПК в период шлифования с электроэрозионными воздействиями с силой тока, при которой интенсивность удаления продуктов засаливания превышает интенсивность самого засаливания.

Глубина шлифования, определенная по формуле (14), соответствует величине ТЛРСК в конце периода шлифование без ЭЭВ и в дальнейшем уменьшаться не может, так как начинается увеличение режущей способности РПК за счет электроэрозионных воздействий. Назначение этой глубины шлифования в качестве элемента режима для шлифования по “жесткой” схеме гаран-

тирует отсутствие фазово-структурных превращений в поверхностном слое обрабатываемого материала.

Таким образом, режим врезного шлифования по “жесткой” схеме стали Р6М5Ф3 кругом АС6 100/80 100 М2-01 с периодическими электроэрозионными воздействиями на рабочую поверхность круга будет следующим: $v_k = 35$ м/с, $v_{ст} = 6$ м/мин, $t_{ф} = 0,006$ мм, $I_{ср} = 10$ А, $T = 5,41$ мин, $\tau_{ЭЭВ} = 5,66$ мин.

ВЫВОДЫ

Предпочтительным способом обновления режущей способности РПК при шлифовании по “жесткой” схеме являются периодические электроэрозионные воздействия на рабочую поверхность круга с оптимальными значениями периодов цикла шлифование баз ЭЭВ–шлифование с ЭЭВ, а использование математических зависимостей, описывающих текущую лимитированную режущую способность круга при шлифовании по “упругой” схеме, позволяет существенно снизить трудоемкость поиска режимов для шлифования по “жесткой” схеме.

При шлифовании по “жесткой” схеме с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК величину глубины шлифования необходимо определять из уравнения, описывающего изменение фактической глубины шлифования в соответствии с изменением ТЛРСК при шлифовании по “упругой” схеме, по значению времени периода шлифования без ЭЭВ. При этом производительность обработки повышается в 6 раз по сравнению со шлифованием с постоянными электроэрозионными воздействиями на рабочую поверхность круга с силой тока 5 А.

Розглянуто визначення режиму шліфування за “жорсткою” схемою з періодичним електроерозійним впливом на робочу поверхню шліфувального круга в автономній зоні в умовах зміни під час обробки різальної здатності круга. В основу розрахунку покладено математичні залежності, які описують зміну різальної здатності круга при врізному шліфуванні за “пружною” схемою з постійною силою підтиску заготовки до робочої поверхні круга, кінематика якого аналогічна шліфуванню за “жорсткою” схемою. Швидкість деталі визначена заданими значеннями шорсткості обробленої поверхні виробу. Сила підтиску заготовки вибрана виходячи з умов забезпечення відсутності фазово-структурних перетворень в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу. Зміну різальної здатності круга в процесі шліфування за “жорсткою” схемою враховували, використовуючи рівняння, що описують зміну під час обробки поточної лімітованої різальної здатності шліфувального круга. На основі аналізу різних способів розрахунку одного з елементів режиму шліфування – глибини різання – визначено її значення, яке гарантує відсутність фазово-структурних перетворень в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу при максимально можливій продуктивності обробки.

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

It is considered the determination of conditions of grinding by “rigid” setup with periodic spark-erosive actions on wheel working surface in the standalone area amid changing cutting capacity of wheel working surface during machining. Mathematical dependences describing the change of cutting capacity of wheel at infeed grinding by “elastic” setup with constant force of pressure of workpiece to wheel working surface are taken as a basis of calculation, wherein the kinematics of grinding by “elastic” setup is same as grinding by “rigid” setup. Workpiece speed is determined by given value of roughness of the machined surface of workpiece. Force of pressure is chosen proceeding from the condition of providing of absence of phase and structural changes in the surface layer of material being machined. Change of cutting capacity of wheel in the process of grinding by “rigid” setup was taken into account, using equations describing the change of the current limited cutting capacity of grinding wheel during the machining by elastic setup. On the basis of analysis of different ways of calculation of one of the elements of grinding conditions such as cutting depth it is determined the value of depth

guaranteeing absence of phase and structural changes in the surface layer of material being machined with maximum possible productivity of machining.

Keywords: *grinding, workpiece speed, force of pressure, cutting capacity, cutting depth.*

1. *Захаренко И. П., Савченко Ю. Я., Лавриненко В. И., Дегтяренко С. М.* Прогрессивные методы абразивной обработки металлов. – К.: Техніка, 1990. – 152 с.
2. *Ковальчук Ю. М., Букин В. А., Глазовский Б. А. и др.* Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.
3. *Лавріненко В. І., Новіков М. В.* Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник / Заг. ред. М. В. Новіков. – К.: ІНМ ім. М. В. Бакуля НАН України, 2013. – 456 с.
4. *Грабченко А. И.* Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Дис. в форме научного доклада ... докт. техн. наук. – Харьков: ХГПУ, 1995. – 59 с.
5. *Узунян М. Д.* Повышение эффективности алмазного шлифования твердых сплавов путем прогнозирования и стабилизации работоспособности кругов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – М.: Мосстанкин, 1989. – 40 с.
6. *Беззубенко Н. К.* Процесс алмазно-искрового шлифования // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1981. – Вып. 26. – С. 39–42.
7. *Матюха П. Г.* Високопродуктивне шліфування ванадієвих штампових та інструментальних сталей. – Донецьк: ДВНЗ “ДонНТУ”, 2008. – 222 с.
8. *Матюха П. Г., Азарова Н. В., Цокур В. П., Габитов В. В.* Якість обробленої поверхні та продуктивність шліфування ванадієвих інструментальних сталей: Моногр. – Донецьк: Ноулідж (Донецьке відділення), 2014. – 164 с.
9. *Матюха П. Г., Полтавец В. В., Бурдин А. В., Габитов В. В.* Шлифование труднообрабатываемых материалов кругами из алмаза и эльбора: Монография. – Черкассы: Вертикаль, издатель Кандыч С. Г., 2015. – 252 с.

Поступила 16.05.16