

DOI 10.32820/2079-1747-2020-25-70-78

УДК 621.923

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИИ ШЛИФОВАНИЯ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ПО ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ

©Новиков Ф. В., Дитиненко С. А.

Харьковский Национальный экономический университет имени Семена Кузнеця

Информация об авторах:

Новиков Федор Васильевич: ORCID: 0000-0001-6996-3356; novikovfv@i.ua; доктор технических наук; профессор кафедры Природоохранных технологий, экологии и безопасности жизнедеятельности; Харьковский Национальный экономический университет имени Семена Кузнеця, просп. Науки, 9-А, г. Харьков, 61166, Украина

Дитиненко Станислав Александрович: ORCID: 0000-0001-5382-2276; fokusnic1@rambler.ru кандидат технических наук; доцент кафедры Природоохранных технологий, экологии и безопасности жизнедеятельности; Харьковский Национальный экономический университет имени Семена Кузнеця, просп. Науки, 9-А, г. Харьков, 61166, Украина

Разработаны аналитические модели для определения производительности обработки и параметров операции круглого наружного продольного алмазного шлифования, включая технологические переходы черного шлифования и выхаживания, с учетом величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе на каждом переходе. На их основе проведена оптимизация структуры и параметров данной операции шлифования по критерию максимально возможной производительности с учетом ограничения по точности обработки, что позволило установить оптимальное соотношение припусков, удаляемых на переходах черного шлифования и выхаживания.

Теоретически доказано, что оптимальной по структуре операцией шлифования, обеспечивающей максимально возможную производительность с учетом ограничения по точности обработки (обусловленной упругими перемещениями, возникающими в технологической системе при шлифовании), является операция, включающая только технологический переход выхаживания. В этом случае весь припуск снимается на переходе выхаживания, а переход черного шлифования отсутствует. Для реализации такой операции шлифования необходимо в начале обработки создать натяг в технологической системе, равный или кратный величине снимаемого припуска. С целью обеспечения высокой режущей способности алмазного круга на металлической связке, которым осуществляется съем припуска на операции шлифования, необходимо использовать периодическую электроэрозионную правку, устраняющую засаливание круга и своевременно удаляя с рабочей поверхности круга затупившиеся алмазные зерна. Наиболее эффективным направлением применения предложенного технического решения являются технологические операции круглого наружного продольного алмазного шлифования с недостаточно жестким креплением обрабатываемой детали на станке.

Ключевые слова: технологическая система; упругие перемещения; выхаживание; шлифовальный круг; качество обработки; производительность обработки.

Новиков Ф. В., Дитиненко С. О. «Оптимізація структури і параметрів операції шліфування з урахуванням вимог за точністю обробки».

Розроблено аналітичні моделі для визначення продуктивності обробки та параметрів операції круглого зовнішнього поздовжнього алмазного шліфування, що включає технологі-

чні переходи чорнового шліфування і виходжування, з урахуванням величини пружного переміщення в технологічній системі, що виникає в технологічній системі на кожному переході. На їх основі проведено оптимізацію структури й параметрів даної операції шліфування за критерієм максимально можливої продуктивності з урахуванням обмеження за точністю обробки, що дозволило встановити оптимальне співвідношення припусків, які видаляються на переходах чорнового шліфування і виходжування.

Теоретично доведено, що оптимальною за структурою операцією шліфування, що забезпечує максимально можливу продуктивність з урахуванням обмеження за точністю обробки (обумовленою пружними переміщеннями, які виникають в технологічній системі при шліфуванні), є операція, що включає лише технологічний перехід виходжування. В цьому випадку весь припуск знімається на переході виходжування, а перехід чорнового шліфування відсутній. Для реалізації даної операції шліфування необхідно на початку обробки створити натяг в технологічній системі, рівний або кратний величині припуску, що знімається. З ціллю забезпечення високої ріжучої здатності алмазного круга на металевій зв'язці, яким здійснюється знімання припуску на операції шліфування, необхідно застосовувати періодичну електроерозійну правку, яка усуває засалювання круга та своєчасне видаляє з робочої поверхні круга затуплені алмазні зерна. Найбільш ефективним напрямком застосування запропонованого технічного рішення є технологічні операції круглого зовнішнього поздовжнього алмазного шліфування з недостатньо жорстким кріпленням оброблюваної деталі на верстаті.

Ключові слова: технологічна система; пружні переміщення; виходжування; шліфувальний круг; якість обробки; продуктивність обробки.

Novikov F., Ditinenko S. «Optimization of the structure and parameters of the grinding operation, taking into account the requirements for precision machining».

Analytical models have been developed to determine the processing performance and operation parameters of round external longitudinal diamond grinding, including technological transitions of rough grinding and nursing, taking into account the amount of elastic displacement that occurs in the technological system at each transition. On their basis, optimization of the structure and parameters of this grinding operation was carried out according to the criterion of the maximum possible productivity, taking into account limitations on processing accuracy, which made it possible to establish the optimal ratio of allowances removed at rough grinding and nursing transitions.

It has been theoretically proved that the grinding operation that is optimal in structure, ensuring the maximum possible productivity, taking into account the limitations on processing accuracy (due to elastic displacements that occur in the technological system during grinding), is an operation that includes only the technological transition of nursing. In this case, the entire allowance is removed at the transition nursing, and the transition rough grinding is absent. To implement such a grinding operation, it is necessary at the beginning of processing to create an interference fit in the technological system equal to or a multiple of the removed allowance. In order to ensure a high cutting ability of a diamond wheel on a metal bond, which removes the allowance for grinding operations, it is necessary to use periodic electroerosive dressing, which eliminates greasing of the wheel and timely removes blunt diamond grains from the working surface of the wheel. The most effective direction of application of the proposed technical solution is the technological operations of

round external longitudinal diamond grinding with insufficiently rigid fastening of the workpiece on the machine.

Keywords: technological system, elastic displacements, nursing, grinding wheel, processing quality, processing performance.

Введение

Метод шлифования является одним из основных методов финишной обработки деталей машин, обеспечивающий высокие показатели параметров качества и точности обрабатываемых поверхностей. В ряде случаев его применяют вместо предварительной лезвийной обработки, совмещая предварительное и окончательное шлифование, что повышает производительность обработки. Вместе с тем, на практике технологические возможности метода шлифования используются не в полной мере, что не всегда позволяет добиться требуемых показателей обработки, например, в связи с возникновением в технологической системе упругих перемещений, снижающих точность обработки. Это требует изыскания новых условий осуществления процесса шлифования с учетом управления упругими перемещениями в технологической системе. Для этого важно оценить технологические возможности управления упругими перемещениями в технологической системе и на этой основе разработать эффективные практические рекомендации по повышению точности и производительности обработки.

1. Анализ последних исследований и публикаций

Точность обработки является важнейшим показателем при изготовлении деталей машин. Поэтому определению условий механической обработки, обеспечивающих заданную точность, в научно-технической литературе уделяется значительное внимание [1, 2]. Особое место занимают работы [3 – 6], связанные с управлением упругими перемещениями в технологической системе, возникающие в процессе шлифования, т.е. на финишных операциях обработки деталей машин. Однако до настоящего времени недостаточно исследованы закономерности формирования параметров точности обработки в связи с возникновением упругих перемещений в технологической системе. Поэтому решение задачи по определению оптимальных условий шлифования, обеспечивающих максимально возможную производительность для заданной точности обработки, имеет большое теоретическое и практическое значение, позволяет научно обоснованно подойти к изготовлению высокоточных деталей с меньшими значениями трудоемкости и энергоемкости обработки.

2. Постановка проблемы

В известных математических моделях при определении упругих перемещений, возникающих в технологической системе при шлифовании, принимаются экспериментальные значения силы резания. Это не позволяет получить обобщенные аналитические решения, справедливые для широких диапазонов изменения параметров режимов шлифования. Поэтому в настоящей работе поставлена задача установить аналитические решения с учетом аналитического представления составляющих силы резания. Научными предпосылками для решения данной задачи стали важные теоретические результаты, приведенные в работе [7], в которой составляющие силы резания выражены через условное напряжение резания (энергоемкость обработки) и производительность обработки. Это позволяет значительно упростить решение задачи и получить вполне однозначные аналитические решения по управлению в процессе шлифования упругими перемещениями в технологической системе и на этой основе прове-

сти оптимизацию структуры и параметров операции алмазного шлифования с учетом требований по точности обработки.

3. Целью исследования является теоретическое обоснование условий повышения точности и производительности обработки при шлифовании на основе проведения оптимизации структуры и параметров операции шлифования по критерию максимально возможной производительности с учетом ограничения по точности обработки.

4. Изложение основного материала

В работе проведен теоретический анализ путей повышения производительности обработки на операции круглого наружного продольного шлифования цилиндрической детали диаметром $D_{дет}$ и длиной $l_{дет}$ с учетом ограничения по точности обработки (точности размера), обусловленной возникающими упругими перемещениями элементов технологической системы.

В общем виде фактическая производительность обработки определяется: $Q_{ф} = v / \tau$, где $v = \pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot (П - \delta)$ – объем материала, снимаемый за время τ с цилиндрической детали, м³; $П$ – снимаемый припуск, м; δ – величина упругого перемещения, м; $\tau = n \cdot \tau_0$ – время шлифования, с; $n = П / t$ – количество продольных ходов круга; t – глубина шлифования, м; $\tau_0 = l_{дет} / S_{прод}$ – время одного продольного хода круга, с; $S_{прод}$ – скорость продольной подачи, м/с. После преобразований получено $Q_{ф} = Q_{ном} \cdot (1 - \delta / П)$, где $Q_{ном} = \pi \cdot D_{дет} \cdot t \cdot S_{прод}$ – номинальная производительность обработки, м³/с.

Между величинами δ и $Q_{ном}$ существует связь [7, 8]:

$$\delta = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma \cdot S_{мгн}}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma \cdot Q_{ф}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \approx \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}, \quad (1)$$

где P_y, P_z – радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, Н; c – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м; $K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

Из зависимости (1) следует, что величины δ и $Q_{ном}$ связаны линейной зависимостью. Следовательно, уменьшение δ требует пропорционального уменьшения $Q_{ном}$ и $Q_{ф}$, что не эффективно, в особенности при съеме больших припусков. Эффективным может быть решение, связанное с применением цикла круглого наружного продольного шлифования, включающего два этапа. На первом этапе производится черновое шлифование с максимально возможной производительностью обработки $Q_{ном}$. На втором этапе – чистовое шлифование с меньшей производительностью обработки $Q_{ном}$, определяемой из зависимости (1) и обеспечивающей заданную точность обработки δ . Величина снимаемого припуска на втором этапе равна величине упругого перемещения, возникающего на первом этапе шлифования.

Средняя фактическая производительность рассмотренного цикла круглого наружного продольного шлифования определяется зависимостью

$$Q_{cp} = \frac{\pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot l_{\text{дем}} \cdot \Pi}{(\tau_1 + \tau_2)}, \quad (2)$$

где τ_1, τ_2 – продолжительности первого и второго этапов цикла шлифования, с.

Как видно, средняя фактическая производительность цикла шлифования Q_{cp} для заданных значений $D_{\text{дем}}, l_{\text{дем}}$ и Π определяется двумя параметрами: τ_1 и τ_2 . Физически они связаны между собой, т.к. время $\tau_1 = \Pi_1 / S_{\text{non}}$ (где S_{non} – скорость поперечной подачи, м/с) определяет величину упругого перемещения на этапе чернового шлифования, которое равно снимаемому припуску Π_2 на этапе выхаживания и соответственно определяет время τ_2 :

$$\Pi_2 = \frac{v}{F} + \delta, \quad (3)$$

где $F = \pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot l_{\text{дем}}$ – площадь обрабатываемой поверхности, м².

Величина упругого перемещения δ в общем виде определяется зависимостью (1). Между параметрами v и Q_{ϕ} существует связь [7, 9]:

$$Q_{\phi} = \frac{dv}{d\tau}. \quad (4)$$

С учетом зависимостей (1) и (4) уравнение (3) примет вид линейного дифференциального уравнения с правой частью:

$$\frac{dv}{d\tau} + A \cdot v = B, \quad (5)$$

где $A = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot F}$; $B = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi_1}{\sigma}$.

Общее решение данного дифференциального уравнения имеет вид [10]:

$$v = \left[\int d\tau \cdot B \cdot e^{\int A \cdot d\tau} + C_1 \right] \cdot e^{-\int A \cdot d\tau}, \quad (6)$$

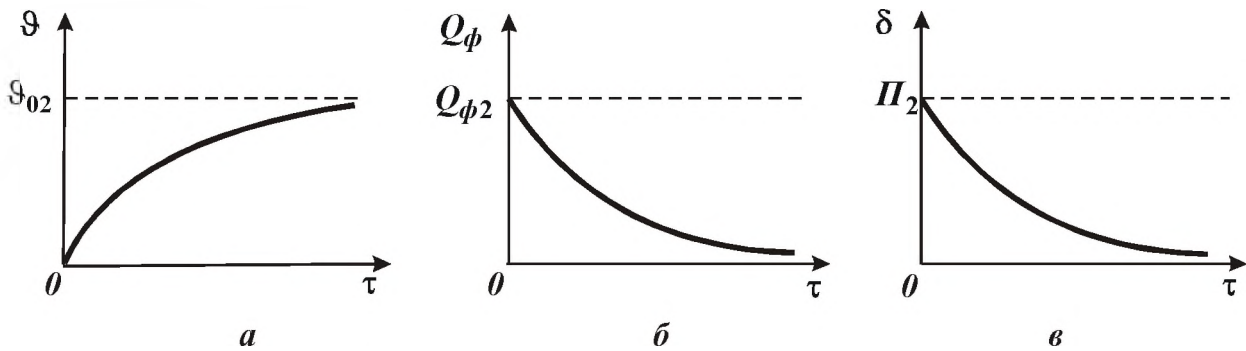
где C_1 – постоянная интегрирования, устанавливается из начального условия.

После несложных преобразований установленного решения (6), исходя из начального условия: $\delta|_{\tau=0} = \Pi_2$, получено:

$$v = v_{02} \cdot \left(1 - e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot F} \tau} \right); \quad Q_{\phi} = Q_{\phi 2} \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot F} \tau}; \quad \delta = \Pi_2 \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot F} \tau}, \quad (7)$$

где $v_{02} = \Pi_2 \cdot F$; $Q_{\phi 2} = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi_2}{\sigma}$.

Из приведенных зависимостей следует, что с течением времени обработки τ на этапе выхаживания объем снятого материала v увеличивается, а фактическая (текущая) производительность обработки Q_{ϕ} и величина упругого перемещения δ уменьшаются по экспоненциальному закону (рис. 1).

Рис. 1 – Изменение параметров δ (а), Q_{ϕ} (б) и δ (в) во времени τ

Как видно, за счет применения этапа выхаживания можно существенно уменьшить величину δ и добиться требуемой точности обработки δ_o . Однако, это достигается за счет снижения производительности обработки $Q_{\phi} \rightarrow 0$.

Из зависимости (7) можно определить время $\tau = \tau_2$, затрачиваемое на этапе выхаживания для обеспечения требуемой точности обработки δ_o :

$$\tau_2 = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot (\ln \Pi_2 - \ln \delta_o). \quad (8)$$

Для определения времени τ_1 следует представить: $\tau_1 = n \cdot \tau_0$, где $n = \Pi / t$ и $\delta_o = l_{дет} / S_{прод}$ – количество и время продольного хода круга, с. Глубину шлифования t следует выразить через упругое перемещение $\delta = \Pi_2$, возникающее на этапе черного шлифования, и определяемое зависимостью (1), с учетом $Q_{ном} = B_1 \cdot t \cdot V_{дет}$, где B_1 – продольная подача, м/об:

$$\tau_1 = \frac{l_{дет} \cdot \sigma \cdot B_1 \cdot V_{дет} \cdot \Pi}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot S_{прод} \cdot \Pi_2}. \quad (9)$$

Время цикла шлифования ($\tau_1 + \tau_2$) с учетом (8) и (9) выразится:

$$(\tau_1 + \tau_2) = \frac{l_{дет} \cdot \sigma \cdot B_1 \cdot V_{дет} \cdot \Pi}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot S_{прод} \cdot \Pi_2} + \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot (\ln \Pi_2 - \ln \delta_o). \quad (10)$$

На этапах черного шлифования и выхаживания соотношение $\sigma / K_{ш}$, определяющее режущую способность круга, различно в связи с различными значениями глубины шлифования. Поэтому значения $\sigma / K_{ш}$, входящие в первое и второе слагаемое зависимости (10), различны. Обозначая значения $\sigma / K_{ш}$ на этапах черного шлифования и выхаживания соответственно: $\left(\frac{\sigma}{K_{ш}}\right)_1$ и $\left(\frac{\sigma}{K_{ш}}\right)_2$, $z = \left(\frac{\sigma}{K_{ш}}\right)_2 / \left(\frac{\sigma}{K_{ш}}\right)_1$ – безразмерный коэффициент ($z \geq 1$), зависимость (10) примет вид:

$$(\tau_1 + \tau_2) = \left(\frac{\sigma}{K_{ш}}\right)_1 \cdot \left[\frac{l_{дет} \cdot B_1 \cdot V_{дет} \cdot \Pi}{c \cdot V_{кр} \cdot S_{прод} \cdot \Pi_2} + \frac{F}{c \cdot V_{кр}} \cdot z \cdot (\ln \Pi_2 - \ln \delta_o) \right]. \quad (11)$$

Параметр Π_2 в первом слагаемом зависимости (11) входит в знаменатель, а во втором слагаемом – в числитель, т.е. оказывает противоположное влияние на время $(\tau_1 + \tau_2)$. Подчиняя функцию $(\tau_1 + \tau_2)$ необходимому условию экстремума при $z=1$, получено:

$$\Pi_2 = \frac{B_1 \cdot t \cdot V_{\text{дет}} \cdot \Pi}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot S_{\text{прод}} \cdot t} = \frac{Q \cdot \Pi}{Q} = \Pi, \quad (12)$$

где Q – производительность обработки на этапе чернового шлифования, м³/с.

Следовательно, экстремальное значение параметра Π_2 равно Π . Вторая производная функции $(\tau_1 + \tau_2)$ в точке экстремума $\Pi_2 = \Pi$ принимает положительное значение, т.е. в точке экстремума $\Pi_2 = \Pi$ достигается минимум функции $(\tau_1 + \tau_2)$. Поэтому с целью уменьшения общего времени цикла шлифования необходимо исключить этап чернового шлифования, т.е. сьем припуска производить лишь на этапе выхаживания, создавая в технологической системе начальный натяг, равный снимаемому припуску Π [11].

Для установления зависимости $(\tau_1 + \tau_2)$ от параметра Π_2 следует принять $\Pi_2 = k_2 \cdot \Pi$ (где k_2 – безразмерный коэффициент, изменяющийся в пределах 0...1) и $k_2 = 1$. Тогда приходим к оптимальному циклу шлифования, обеспечивающему минимум функции $(\tau_1 + \tau_2)$. Для анализа следует преобразовать зависимость (10) с учетом $F = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}}$ и $\delta_o = k_0 \cdot \Pi$ к виду:

$$(\tau_1 + \tau_2) = \frac{\sigma \cdot l_{\text{дет}}}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left[\frac{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot Q}{k_2 \cdot Q} + \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot (\ln k_2 \cdot \Pi - \ln k_0 \cdot \Pi) \right] = \frac{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}} \cdot \sigma}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \Phi. \quad (13)$$

где $\Phi = \left[\frac{1}{k_2} + \ln \left(\frac{k_2}{k_0} \right) \right]$.

Таблица 1

Расчетные значения безразмерной функции Φ для $k_0 = 0,01$

k_1	1,0	0,5	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Φ	5,6	5,9	6,7	8,0	12,3	21,7	50,7	100,0

Из табл. 1 следует, что с уменьшением коэффициента k_2 с 1,0 до 0,1 безразмерная функция Φ увеличилась незначительно (приблизительно в 2 раза), а с уменьшением коэффициента k_2 от 0,1 до 0,01 – увеличилась существенно (приблизительно в 8 раз). В общем, при уменьшении коэффициента k_2 от 1,0 до 0,01 (т.е. во всем возможном диапазоне) безразмерная функция Φ увеличилась приблизительно в 18 раз. Это указывает на то, что оптимальное (минимальное) значение функции Φ (при $k_2 = 1,0$) значительно меньше максимального значения, равного $\Phi = 100,0$.

Поскольку в диапазоне изменения коэффициента $k_2 = 1,0 \dots 0,2$ безразмерная функция Φ изменяется мало (увеличилась всего в 1,4 раза), можно рекомендовать для практического применения цикл шлифования, включающий этап чернового шлифования (реализующий значения $k_2 = 1,0 \dots 0,2$) и этап выхаживания. Уменьшение значения коэффициента k_2 ,

начиная с 0,1, приводит к значительному уменьшению безразмерной функции Φ (уменьшению производительности обработки), что не эффективно.

Заслуживает внимания вопрос о характере изменения первого и второго слагаемых функции Φ в зависимости от коэффициента k_2 . Поэтому в табл. 2 приведены расчетные значения двух слагаемых функции Φ , первое из которых определяет безразмерное время этапа чернового шлифования, а второе – безразмерное время этапа выхаживания.

Таблица 2

Расчетные значения слагаемых: $1/k_2$ и $\ln(k_2/k_0)$ и их отношения для $k_0 = 0,01$

k_2	1,0	0,5	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
$I_1 = 1/k_2$	1,0	2,0	3,3	5,0	10,0	20,0	50,0	100,0
$\ln(k_2/k_0)$	4,6	3,9	3,4	3,0	2,3	1,7	0,7	0
I_1/I_2	0,22	0,51	0,97	1,67	4,35	11,76	71,4	∞

С уменьшением коэффициента k_2 первое слагаемое, равное $1/k_2$, увеличивается, а второе слагаемое, равное $\ln(k_2/k_0)$, наоборот, уменьшается вплоть до нуля. Отличие от нуля первого слагаемого для значения $k_2 = 1,0$ связано с тем, что на этапе чернового шлифования отсутствует съем материала. Здесь происходит лишь упругое деформирование технологической системы на величину снимаемого припуска $\Pi_2 = \Pi$. Иными словами, этап чернового шлифования служит для создания начального натяга в технологической системе, равного величине снимаемого припуска $\Pi_2 = \Pi$. В табл. 2 также приведены расчетные значения соотношения двух слагаемых функции Φ , которое с уменьшением коэффициента k_2 неограниченно увеличивается.

С целью обеспечения высокой режущей способности алмазного круга на металлической связке, которым осуществляется съем припуска на операции шлифования, необходимо использовать периодическую электроэрозионную правку, устраняющую засаливание круга и своевременно удаляя с рабочей поверхности круга затупившиеся алмазные зерна.

Выводы

В работе разработаны аналитические модели для определения производительности обработки и параметров операции круглого наружного продольного алмазного шлифования, включая технологические переходы чернового шлифования и выхаживания, с учетом величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе на каждом переходе. На их основе проведена оптимизация структуры и параметров данной операции шлифования по критерию максимально возможной производительности с учетом ограничения по точности обработки. Теоретически доказано, что оптимальная по структуре операция шлифования включает лишь переход выхаживания с начальным натягом в технологической системе, равным или кратным снимаемому припуску. Наиболее эффективным направлением применения предложенного технического решения являются технологические операции круглого наружного продольного алмазного шлифования с недостаточно жестким креплением обрабатываемой детали на станке.

Список использованных источников

1. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Х. : ГП "УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. – 448 с.
2. Управление процессом шлифования / А. В. Якимов, А. Н. Паршаков, В. И. Свирщев, В. П. Ларшин. – К. : Техніка, 1983. – 182 с.
3. Колев К. С. Точность обработки и режимы резания / К. С. Колев, Л. М. Горчаков. – М. : Машиностроение, 1976. – 144 с.
4. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г. Б. Лурье. – Ленинград : Машиностроение, 1984. – 103 с.
5. Лурье Г. Б. Шлифование металлов / Г. Б. Лурье. – М. : Машиностроение, 1969. – 197 с.
6. Ковальчук А. Н. Оптимизация структуры и параметров процесса съема припусков при шлифовании с непрерывно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи круга / А. Н. Ковальчук // *Високі технології в машинобудуванні : Збірник наукових праць НТУ"ХПІ"*. – Харків, 2006. – Вип. 2 (13). – С. 41-47.
7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2002. – Т. 1. "Механика резания материалов". – 580 с.
8. Дитиненко С. О. Обґрунтування умов підвищення продуктивності, точності та якості обробки при алмазному шліфуванні / С. О. Дитиненко, А. Г. Крюк, Ф. В. Новиков // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 41 (1317), 2018. – С. 18–23.
9. Теоретические основы резания и шлифования материалов : учеб. пособ. / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Б. С. Серов, А. А. Якимов. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.
10. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике : 4-е изд. / М. Я. Выгодский – М. : Гос. изд. физ.-мат. лит., 1959. – 783 с.
11. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки : монография / Ф. В. Новиков. – Днепр : ЛИРА, 2018. – 400 с.

References

1. Sizyy, YuA & Stalinskiy, D V 2016, *Dinamika i teplofizika shlifovaniya*, GP UkrNTTS Energostal, Khar'kov.
2. Yakimov, AV, Parshakov, AN, Svirshchev, VI & Larshin, VP 1983, *Upravleniye protsessom shlifovaniya*, Tekhnika, Kiyev.
3. Kolev, KS & Gorchakov, LM 1976, *Tochnost obrabotki i rezhimy rezaniya*, Mashinostroyeniye, Moskva.
4. Lurye, GB 1984, *Progressivnyye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya*, Mashinostroyeniye, Leningrad.
5. Lurye, GB 1969, *Shlifovaniye metallov*, Mashinostroyeniye, Moskva.
6. Kovalchuk, AN 2006, 'Optimizatsiya struktury i parametrov protsessa syema pripuskov pri shlifovanii s nepreryvno izmenyayushcheyasya vo vremeni skorostyu radialnoy podachi kruga', *Vysoki tekhnolohiyi v mashynobuduvanni*, no. 2 (13), pp. 41-47.
7. Novikov, FV & Yakimov, AV (ed.) 2002, *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya*, vol. 1 Mekhanika rezaniya materialov, Odesskij nacionalnyj politehnicheskij universitet, Odessa.
8. Dytynenko, SO, Kryuk, AH & Novikov, FV 2018, 'Obgruntuvannya umov pidvyshchennya produktyvnosti, tochnosti ta yakosti obrobky pry almaznomu shlifuvanni', *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*, Seriya: Innovatsiyini tekhnolohiyi ta obladdannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhiyi, Kharkiv, no. 41 (1317), pp. 18-23.
9. Yakimov, AV, Novikov, FV, Novikov, GV, Serov, BS & Yakimov, AA 1999, *Teoreticheskiye osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov*, Odesskij nacionalnyj politehnicheskij universitet, Odessa.
10. Vygodskiy, MYa 1959, *Spravochnik po vysshey matematike*, 4th edn, Moskva.
11. Novikov, FV 2018, *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki*, LIRA, Dnepr.

Статья поступила в редакцию 16 марта 2020 г.