

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ УМЕНЬШЕНИЯ ОСНОВНОГО ВРЕМЕНИ ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ РЕЗАНИЯ

Новиков Ф.В., Кленов О.С.
(ХНЭУ, г. Харьков, Украина)

Введение

Процессы шлифования характеризуются относительно высокой тепловой напряженностью, что приводит к появлению на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов [1,2]. Для уменьшения тепловой напряженности процесса используется прерывистое шлифование [1], обеспечивающее остывание обрабатываемой поверхности в момент прохождения впадины круга, а также повышение режущей способности круга. Весьма эффективны процессы электрохимического и электроэрозионного шлифования алмазными кругами на металлических связках [3], снижающие интенсивность трения образующихся стружек и обрабатываемого материала со связкой круга и соответственно температуру шлифования. Традиционно основным путем уменьшения тепловой напряженности процесса шлифования является снижение режимов резания. Однако это ведет к уменьшению производительности обработки, что не всегда эффективно. Поэтому представляется важным и актуальным проведение теоретического анализа температуры шлифования для поиска путей ее уменьшения без снижения производительности обработки. В связи с этим целью работы является оптимизация структуры и параметров операций шлифования с учетом температурного фактора.

Основное содержание работы

В работах [4,5] получена аналитическая зависимость для определения температуры θ при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью радиальной подачи $V_{рез}$:

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_{\delta a c} \cdot l_1}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (1)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; l_1 – снимаемый припуск, м; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К.

Как видно, уменьшить температуру можно уменьшением параметров σ , $V_{рез}$ и l_1 , т.е. повышением режущей способности круга, уменьшением производительности обработки и величины снимаемого припуска. Очевидно, обеспечить заданную температуру при одновременном увеличении производительности обработки можно уменьшением параметра l_1 , выполняя операцию шлифования за несколько переходов и таким образом разбивая припуск по переходам. Для реализации данного подхода необходимо решить задачу минимизации основного времени обработки при условии, что в конце каждого перехода температура шлифования θ равна заданной, а в начале каждого последующего перехода температура

шлифования θ может быть больше нуля. Иными словами, допускается, что к началу каждого перехода обрабатываемый образец может полностью и не остыть. Для решения указанной выше задачи необходимо определить оптимальные значения скорости радиальной подачи обрабатываемого образца и величины снимаемых припусков на каждом переходе. Рассмотрим первоначально операцию шлифования, выполняемую в два перехода. Тогда основное время обработки τ будет равно:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{\ddot{I}_1}{V_{\delta\dot{a}\zeta 1}} + \frac{\ddot{I}_2}{V_{\delta\dot{a}\zeta 2}}, \quad (2)$$

где $\Pi_1, \Pi_2, V_{рез1}, V_{рез2}$ – величины снимаемых припусков и скорости радиальных подач на 1-ом и 2-ом переходах; $\Pi_1 + \Pi_2 = \Pi$ – суммарный снимаемый припуск, м.

Температура в конце 1-го и 2-го переходов определяется зависимостями:

$$\theta = \sigma \cdot V_{\delta\dot{a}\zeta 1} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_1} = \sigma \cdot V_{\delta\dot{a}\zeta 1} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{\ddot{I}_1}{V_{\delta\dot{a}\zeta 1}} \right)},$$

$$\theta = \sigma \cdot V_{\delta\dot{a}\zeta 2} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot (\tau_1 + \tau_2)} = \sigma \cdot V_{\delta\dot{a}\zeta 2} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{\ddot{I}_1}{V_{\delta\dot{a}\zeta 1}} + \frac{\ddot{I}_2}{V_{\delta\dot{a}\zeta 2}} \right)}. \quad (3)$$

Разрешая зависимости относительно скоростей $V_{рез1}$ и $V_{рез2}$ с учетом (2), приходим к квадратному уравнению относительно неизвестной величины $\sqrt{\tau}$:

$$\tau - \frac{\ddot{I}_2}{\sqrt{A}} \cdot \sqrt{\tau} - \frac{\ddot{I}_1^2}{A} = 0, \quad (4)$$

$$\text{где } A = \left(\frac{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda}{2} \right) \cdot \left(\frac{\theta}{\sigma} \right)^2; \quad \left(\frac{\ddot{I}_1}{V_{\delta\dot{a}\zeta 1}} + \frac{\ddot{I}_2}{V_{\delta\dot{a}\zeta 2}} \right) = \tau.$$

Решение уравнения с учетом $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1$:

$$\tau = \frac{1}{A} \cdot \left[\frac{(\ddot{I} - \ddot{I}_1)}{2} + \sqrt{\frac{(\ddot{I} - \ddot{I}_1)^2}{4} + \ddot{I}_1^2} \right]^2. \quad (5)$$

Как видно, величина Π_1 неоднозначно влияет на основное время обработки τ , т.е. имеет место экстремум функции τ от величины Π_1 . Для определения экстремального значения Π_1 подчиним функцию τ необходимому и достаточному условиям экстремума. В результате установлено, что функция τ от величины Π_1 имеет минимум (рис. 1, а). Экстремальные значения Π_1, Π_2 , а также минимальное значение τ равны:

$$\dot{I}_1 = 0,4 \cdot \dot{I} ; \dot{I}_2 = 0,6 \cdot \dot{I} ; \tau_{\min} = \tau_1 + \tau_2 = (0,16 + 0,48) \cdot \frac{\dot{I}^2}{A} = 0,64 \cdot \frac{\dot{I}^2}{A} . \quad (6)$$

Из зависимости (6) вытекает, что основное время обработки τ_1 на первом переходе в 3 раза меньше основного времени обработки τ_2 на втором переходе и составляет 25% от основного времени обработки τ на операции шлифования, рис. 1,б. Как следует из рис. 2,а, скорость $V_{рез1}$ в 2,5 раза, а скорость $V_{рез2}$ в 1,25 раза больше скорости $V_{рез}$ при шлифовании в один переход. Основное время обработки τ при шлифовании в 3 перехода:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = \frac{\dot{I}_1}{V_{\delta\dot{a}\zeta1}} + \frac{\dot{I}_2}{V_{\delta\dot{a}\zeta2}} + \frac{\dot{I}_3}{V_{\delta\dot{a}\zeta3}} , \quad (7)$$

где Π_1, Π_2, Π_3 и $V_{рез1}, V_{рез2}, V_{рез3}$ – соответственно величины снимаемых припусков и скорости радиальных подач на первом, втором и третьем переходах; $\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 = \Pi$ – суммарный снимаемый припуск, м.

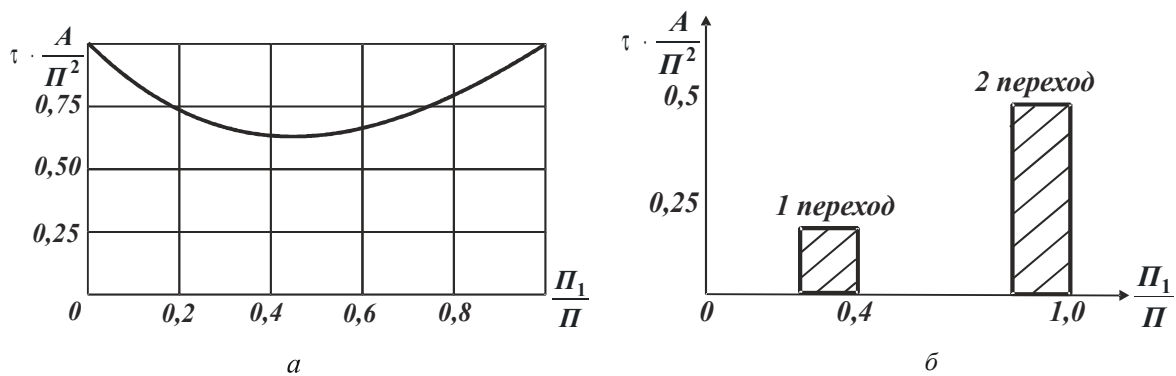


Рис. 1. Зависимость $\tau \cdot A / \Pi^2$ от Π_1 / Π (а) и характер изменения величины $\tau \cdot A / \Pi^2$ по переходам (б)

Температура шлифования θ в конце первого, второго и третьего переходов определяется на основе зависимости (1):

$$\theta = \sigma \cdot V_{\delta\dot{a}\zeta1} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_1} = \sigma \cdot V_{\delta\dot{a}\zeta1} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{\dot{I}_1}{V_{\delta\dot{a}\zeta1}} \right)} , \quad (8)$$

$$\theta = \sigma \cdot V_{\delta\dot{a}\zeta2} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot (\tau_1 + \tau_2)} = \sigma \cdot V_{\delta\dot{a}\zeta2} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{\dot{I}_1}{V_{\delta\dot{a}\zeta1}} + \frac{\dot{I}_2}{V_{\delta\dot{a}\zeta2}} \right)} , \quad (9)$$

$$\theta = \sigma \cdot V_{\delta\dot{a}\zeta3} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)} = \sigma \cdot V_{\delta\dot{a}\zeta3} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{\dot{I}_1}{V_{\delta\dot{a}\zeta1}} + \frac{\dot{I}_2}{V_{\delta\dot{a}\zeta2}} + \frac{\dot{I}_3}{V_{\delta\dot{a}\zeta3}} \right)} . \quad (10)$$

Разрешая зависимости (8), (9) и (10) относительно $V_{рез1}$, $V_{рез2}$, $V_{рез3}$ с учетом (7), приходим к квадратному уравнению относительно неизвестной величины $\sqrt{\tau}$:

$$\tau - \frac{\dot{I}_3}{\sqrt{A}} \cdot \sqrt{\tau} - (\tau_1 + \tau_2) = 0. \quad (11)$$

Решение квадратного уравнения:

$$\tau = \frac{1}{4A} \cdot \left\{ \dot{I}_3 + \sqrt{\dot{I}_3^2 + \left[\dot{I}_2 + \sqrt{(\dot{I}_2^2 + 4\dot{I}_1^2)} \right]^2} \right\}^2. \quad (12)$$

Установлено, что функция τ имеет экстремум (минимум) от двух переменных: Π_1 и Π_2 . Экстремальные значения параметров Π_1 ; Π_2 ; Π_3 ; τ равны

$$\dot{I}_1 = 0,224 \cdot \dot{I}; \quad \dot{I}_2 = 0,337 \cdot \dot{I}; \quad \dot{I}_3 = 0,439 \cdot \dot{I}, \quad (13)$$

$$\tau_{\min} = (0,05 + 0,15 + 0,314) \cdot \frac{\dot{I}^2}{A} = 0,514 \cdot \frac{\dot{I}^2}{A}. \quad (14)$$

Как видно, по сравнению с шлифованием в два перехода основное время обработки на первом и втором переходах существенно меньше (рис. 2, б). По сравнению с шлифованием в два перехода (рис. 2, а) скорости $V_{рез1}$, $V_{рез2}$, $V_{рез3}$ также увеличились (рис. 3, а).

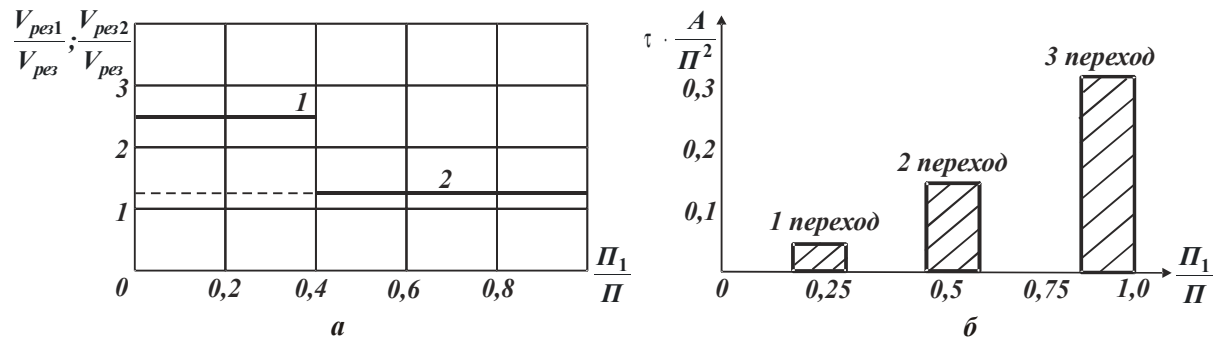


Рис. 2. Характер расположения зависимостей $V_{рез1}/V_{рез}$ (1) и $V_{рез2}/V_{рез}$ (2) на двух переходах (а) и характер изменения величины $\tau \cdot A / \Pi^2$ по переходам (б)

Следовательно, увеличение количества переходов позволяет увеличить скорости $V_{рез1}$, $V_{рез2}$, $V_{рез3}$ при заданной температуре шлифования θ , а это способствует снижению основного времени обработки при шлифовании. Произведем оценку основного времени обработки τ при шлифовании в четыре перехода:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 = \frac{\ddot{I}_1}{V_{\dot{\alpha}\zeta 1}} + \frac{\ddot{I}_2}{V_{\dot{\alpha}\zeta 2}} + \frac{\ddot{I}_3}{V_{\dot{\alpha}\zeta 3}} + \frac{\ddot{I}_4}{V_{\dot{\alpha}\zeta 4}}, \quad (15)$$

где $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$ и $V_{рез1}, V_{рез2}, V_{рез3}, V_{рез4}$ – соответственно величины снимаемых припусков и скорости радиальных подач на первом, втором, третьем и четвертом переходах; $\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4 = \Pi$ – суммарный снимаемый припуск, м.

Пользуясь вышеприведенной методикой, установлены экстремальные значения $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$ и минимум функции τ :

$$\ddot{I}_1 = 0,146 \cdot \ddot{I}; \quad \ddot{I}_2 = 0,219 \cdot \ddot{I}; \quad \ddot{I}_3 = 0,285 \cdot \ddot{I}; \quad \ddot{I}_4 = 0,35 \cdot \ddot{I}, \quad (16)$$

$$\tau_{\min} = (0,021 + 0,063 + 0,133 + 0,233) \cdot \frac{\ddot{I}^2}{A} = 0,45 \cdot \frac{\ddot{I}^2}{A}. \quad (17)$$

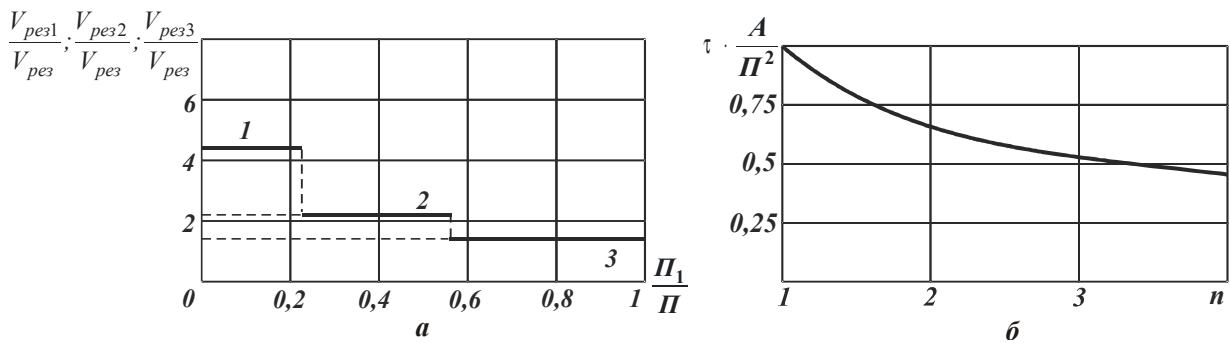


Рис. 3. Характер расположения зависимостей $V_{рез1}/V_{рез}$ (1), $V_{рез2}/V_{рез}$ (2), $V_{рез3}/V_{рез}$ (3) на трех переходах (а) и зависимость $\tau \cdot A / \Pi^2$ от количества переходов n

Как видно, при шлифовании в четыре перехода минимальное основное время обработки $\tau \cdot A / \Pi^2$ меньше, чем при шлифовании в три перехода, т.е. с увеличением количества переходов наблюдается уменьшение $\tau \cdot A / \Pi^2$, рис. 3, б. На рис. 4 показан характер изменения основного времени обработки $\tau \cdot A / \Pi^2$ и скоростей $V_{рез1}, V_{рез2}, V_{рез3}, V_{рез4}$ при шлифовании в четыре перехода по отношению к шлифованию в один переход, когда $V_{рез} = A / \Pi$. По сравнению с шлифованием в один переход скорость $V_{рез1}$ увеличилась в 6,952 раза, скорость $V_{рез2}$ – в 3,476 раза, скорость $V_{рез3}$ – в 2,142 раза, а скорость $V_{рез4}$ – в 1,502 раза. По сравнению с шлифованием в два перехода (рис. 1, б) и в три перехода (рис. 2, а) скорости $V_{рез1}, V_{рез2}, V_{рез3}, V_{рез4}$ также увеличились.

Аналогичным образом можно проанализировать характер изменения основного времени обработки и соответственно скоростей и снимаемых припусков для большего количества переходов. Однако тенденции их изменения, выявленные при анализе шлифования в два, три и четыре перехода, сохраняются. Это указывает на эффективность осуществления шлифования с переменной во времени скоростью $V_{рез}$.

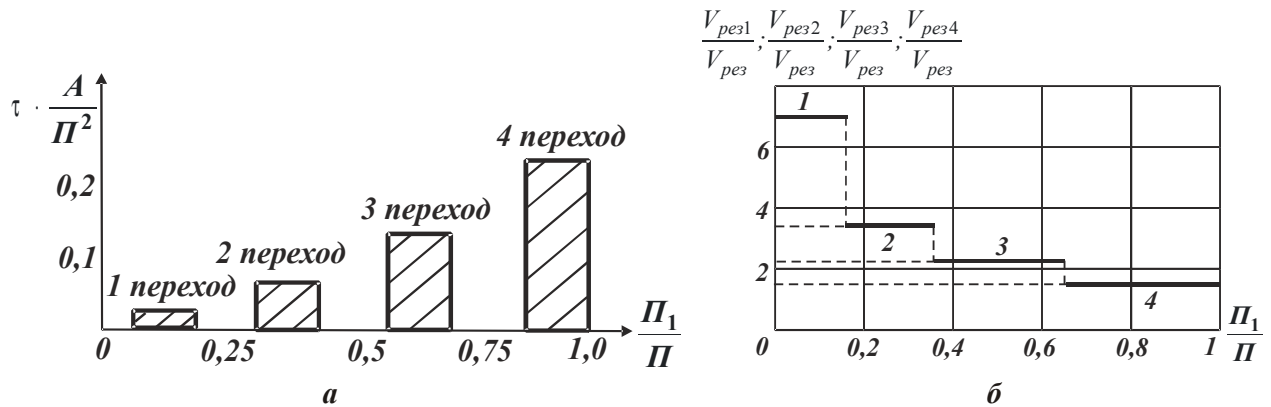


Рис. 4. Характер изменения величины $\tau \cdot A / \Pi^2$ по переходам (а) и характер расположения зависимостей $V_{рез1}/V_{рез}$ (1), $V_{рез2}/V_{рез}$ (2) и $V_{рез3}/V_{рез}$ (3) $V_{рез4}/V_{рез}$ (4) на четырех переходах (б)

Чем больше отличие максимального и минимального значений скоростей, тем меньше будет основное время обработки при шлифовании. Исходя из этого, наиболее эффективным следует рассматривать вариант шлифования, когда скорость $V_{рез}$ во времени уменьшается от своего максимального значения до нуля. Очевидно, для реализации данного условия требуется создание автоматизированных циклов шлифования, что представляет значительные сложности. Более просто данное условие реализовать за счет, например, создания в технологической системе начального натяга, который при шлифовании (выхаживании) приведет к уменьшению во времени скорости $V_{рез}$ вплоть до нуля.

Результаты исследований использованы при разработке эффективного процесса круглого наружного абразивного шлифования колец подшипников. Установлено, что применение шлифования с уменьшающейся по переходам скоростью радиальной подачи круга (в соответствии с предложенным в работе алгоритмом расчета) позволяет исключить образование на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов при одновременном увеличении производительности обработки.

Выводы

Теоретически обоснована возможность существенного уменьшения основного времени обработки при заданной температуре шлифования за счет выполнения операции в несколько переходов. Для этого на основе минимизации основного времени обработки по величинам снимаемых припусков на каждом переходе определены оптимальные значения скорости радиальной подачи обрабатываемого образца. Показано, что с увеличением количества переходов основное время обработки уменьшается и, например, при шлифовании в три перехода становится в два раза меньше, чем при обработке в один переход. Этим доказано, что уменьшение скорости радиальной подачи обрабатываемого образца с каждым последующим переходом позволяет повысить производительность обработки при заданной температуре шлифования.

Список литературы: 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 2. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с. 3. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: Навч. посібник / За редакцією А.І. Грабченко – Харків, ХДПУ, 1999. – 436 с. 4. Физико-математи-

ческая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 10. ”Концепции развития технологии машиностроения ” – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с. 5. Кленов О.С. Теоретический анализ уменьшения температуры при шлифовании твердосплавных режущих пластин // Физические и компьютерные технологии: труды 14-й международной научно-технической конференции. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2008. – С. 469-473.

ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЗМЕНШЕННЯ ОСНОВНОГО ЧАСУ ОБРОБКИ ПРИ ШЛІФУВАННІ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕННЯ ПО ТЕМПЕРАТУРІ РІЗАННЯ

Новіков Ф.В., Кленов О.С.

У роботі проведена оптимізація структури й параметрів операцій шліфування за критерієм мінімуму основного часу обробки з урахуванням обмеження по температурі різання. Визначено оптимальні значення швидкості радіальної подачі оброблюваного зразка й величин припусків на кожному переході. Показано, що зі збільшенням кількості переходів основний час обробки істотно зменшується. Цим доведена ефективність виконання операції шліфування в кілька переходів зі зменшеною в часі швидкістю радіальної подачі.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ УМЕНЬШЕНИЯ ОСНОВНОГО ВРЕМЕНИ ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ РЕЗАНИЯ

Новиков Ф.В., Кленов О.С.

В работе проведена оптимизация структуры и параметров операций шлифования по критерию минимума основного времени обработки с учетом ограничения по температуре резания. Определены оптимальные значения скорости радиальной подачи обрабатываемого образца и величин снимаемых припусков на каждом переходе. Показано, что с увеличением количества переходов основное время обработки существенно уменьшается. Этим доказана эффективность выполнения операции шлифования в несколько переходов с уменьшающейся во времени скоростью радиальной подачи.

DETERMINATION OF THE REDUCTION OF THE MACHINING TIME WITH GRINDING TAKING INTO ACCOUNT THE RESTRICTION ON CUTTING TEMPERATURE

Novikov F.W., Klenov O.S.

In this paper an optimization of the structure and parameters of grinding operations on the criterion of a minimum main machining time taking into account the restrictions on cutting temperature. Optimum values of the radial feed speed of the sample being machined and removed allowance for each pass. We show that the increase in the number of passes the main machining time is significantly reduced. This proved the effectiveness of grinding operations in a few passes with decreasing time-velocity radial feed speed.

Рецензент: д.т.н., проф. Калафатова Л.П.