

Ф.В. Новиков, д-р техн. наук, Р.А. Бережной,
С.А. Дитиненко, канд. техн. наук, Харьков, Украина,
Е.И. Иванов, канд. техн. наук, Мариуполь, Украина

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

При финишной обработке внутренних цилиндрических поверхностей деталей машин возникают проблемы, связанные с высокой трудоемкостью обеспечения требуемых параметров точности обработки [1,2,3]. В особой мере это относится к операциям шлифования внутренних цилиндрических поверхностей зубчатых колес для приводов шахтных конвейеров, точность изготовления которых должна соответствовать 6–7 качеству, радиальное биение – до 0,01 мм, шероховатость поверхности – $R_a=0,63$ мкм и менее. Как показывает практика, длительность операции внутреннего шлифования зубчатого колеса составляет до трех часов и более. Основной причиной низкой эффективности обработки являются возникающие (из-за низкой жесткости элементов технологической системы) упругие перемещения, которые вызывают значительные погрешности обработки и требуют длительного времени для их устранения. В связи с этим целью работы является обоснование условий уменьшения продолжительности обработки при обеспечении заданной точности обрабатываемых поверхностей.

Для решения поставленной задачи воспользуемся аналитическими зависимостями для определения упругого перемещения y , полученными применительно к круглому наружному (внутреннему) шлифованию по жесткой схеме (врезное шлифование со скоростью V_0) и по схеме выхаживания [4,5]:

$$y = y_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}} \right), \quad (1)$$

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}, \quad (2)$$

где $y_{уст} = B \cdot V_0$ – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе в установившемся во времени τ процессе шлифования, м; $B = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot F$ – постоянная времени образования упругого перемещения в технологической системе, с; c – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м; $K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования; P_z, P_y – соответственно тангенциальная и радиальная составляющие силы резания при шлифовании, Н; σ – условное

напряжение резания при шлифовании, Н/м²; F – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, м²; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; y_0 – начальный натяг в технологической системе, м.

При плоском (внутреннем продольном) многопроходном шлифовании по жесткой схеме и по схеме выхаживания величина y определяется

$$y = y_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{n}{B_1}} \right), \quad (3)$$

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{n}{B_1}}, \quad (4)$$

где $y_{уст} = B_1 \cdot t$; t – глубина шлифования, м; $B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ – безразмерный параметр; H – ширина шлифования, м; $V_{дет}$ – скорость детали, м/с.

Между параметрами B и B_1 существует связь

$$B_1 = \frac{B}{\tau_0}, \quad (5)$$

где $\tau_0 = L / S_{прод}$ – время одного продольного хода круга, с; L – длина хода круга, м; $S_{прод}$ – скорость продольной подачи, м/с.

Первоначально определим параметр B применительно к круглому внутреннему шлифованию по схеме продольного выхаживания отверстия (диаметром 100 мм и высотой 150 мм) зубчатого колеса, изготовленного из стали 18ХГН2МФБ твердостью HRC 57...63. Обработка производилась на внутришлифовальном станке мод. 3К229В абразивным кругом 100x20x63 25А 25 СМ1 8 с режимом шлифования: $V_{кр} = 35$ м/с; $V_{дет} = 30$ м/мин; $S_{прод} = 1,5$ м/мин. Перебег круга составлял 1/3 его высоты. Время одного продольного хода круга равно $\tau_0 = 7$ с.

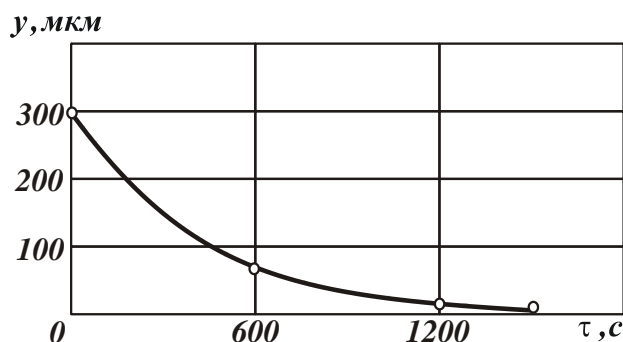


Рис. 1. Зависимость величины y от времени обработки τ .

На рис. 1 приведены экспериментально установленные значения y с течением времени обработки τ при шлифовании по схеме выхаживания с начальным натягом, равным $y_0 = 0,3$ мм. Как видно, величина y во времени τ непрерывно уменьшается. Подчиним данную закономерность аналитической

зависимости (2), для чего разрешим ее относительно параметра $B = \frac{\tau}{\ln(y_0/y)}$.

Расчетами установлено, что параметр B изменяется в небольших пределах (420...441 с). Это свидетельствует о том, что величина y изменяется во времени по экспоненциальному закону, описываемому зависимостью (2).

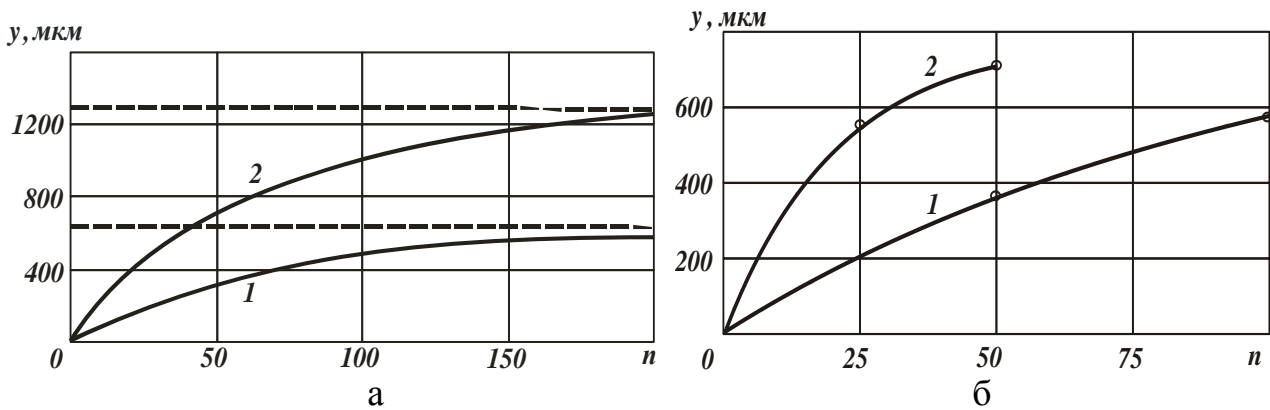


Рис. 2. Зависимость величины y от количества проходов круга n : 1 – $t=0,01$ мм; 2 – $t=0,02$ мм; а – расчетные значения; б – экспериментальные значения.

Зная параметр B , на основе зависимости (5) определим безразмерный параметр B_1 для $\tau_0=7$ с. Принимая $B=420...441$ с, установлено $B_1=60...63$. Такие большие значения B_1 свидетельствуют о том, что величина упругого перемещения y существенно превышает значения фактической глубины шлифования t_ϕ . Следовательно, при многопроходном внутреннем шлифовании по жесткой схеме (в соответствии с зависимостью (3)) будут образовываться в технологической системе значительные упругие перемещения. Величина $y_{уст} = B_1 \cdot t = 63 \cdot t$, входящая в зависимость (3), будет многократно превышать номинальную глубину шлифования t и даже величину снимаемого припуска, рис. 2,а. Выполнение условия $t_\phi \rightarrow t$ возможно при весьма большом количестве проходов круга $n > 3 \cdot B_1 = 190$. Практически весь процесс съема припуска будет протекать в неустановившемся режиме. Поэтому с целью сокращения трудоемкости обработки целесообразно шлифование вести не по жесткой схеме, которая на заключительном этапе требует продолжительного выхаживания, а по упругой схеме с начальным натягом в системе, кратным величине снимаемого припуска (т.е. весь припуск необходимо снимать по схеме выхаживания).

Для оценки достоверности сделанного вывода были проведены экспериментальные исследования величины упругого перемещения y в зависимости от количества проходов круга n при внутреннем шлифовании по жесткой схеме. Как следует из рис. 2,б, имеет место значительное увеличение упругого перемещения y с увеличением количества проходов круга n . При $t=0,02$ мм через 50 проходов круга величина y достигала значения 0,7 мм, т.е.

при врезании круга в обрабатываемую деталь на глубину 1 мм было удалено всего 0,3 мм припуска. При дальнейшей обработке наблюдалось существенное увеличение упругого перемещения в технологической системе, что не позволило продолжать процесс шлифования. Следовательно, удалить весь припуск (1 мм) в данных условиях не представляется возможным. В связи с этим были проведены опыты с меньшей глубиной шлифования $t=0,01$ мм. Через 50 проходов круга упругое перемещение равно $y=370$ мкм, а через 100 проходов – $y=550$ мкм. Как видно, и в этом случае имеют место значительные упругие перемещения в технологической системе, что не позволяет удалить весь снимаемый припуск.

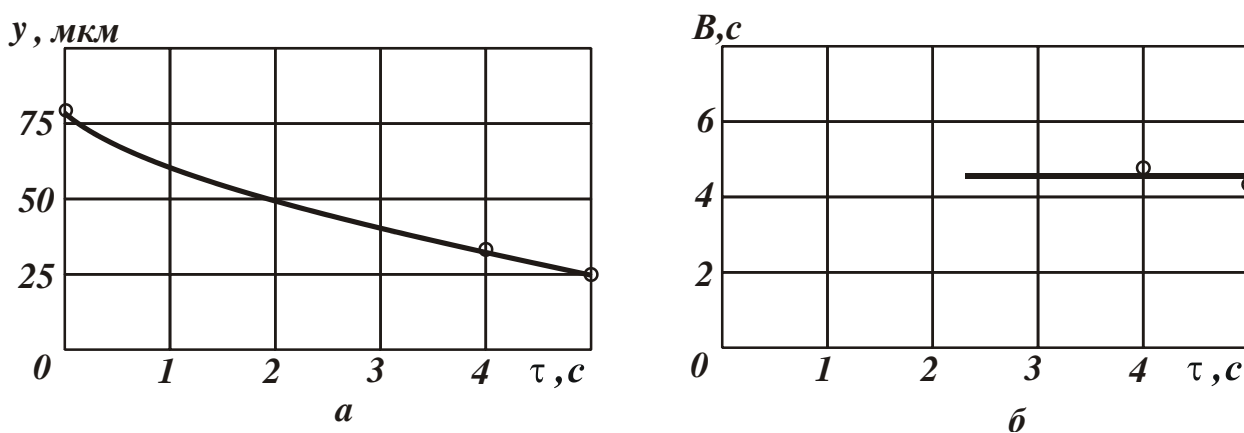


Рис. 3. Зависимости величины y (а) и параметра B (б) от времени обработки τ .

Очевидно, для того чтобы уменьшить величину упругого перемещения в технологической системе, необходимо значительно уменьшить глубину шлифования t . Однако, это ведет к снижению производительности обработки, что не эффективно. Таким образом, экспериментально показано, что ведение процесса внутреннего шлифования по жесткой схеме в данных условиях не целесообразно. Такие большие значения y и безразмерного параметра B_1 обусловлены низкой жесткостью технологической системы, равной $c=260$ кГс/мм.

Для сравнения были определены параметры B и B_1 при круглом наружном и плоском шлифовании. В первом случае измерения величины упругого перемещения y производились при круглом наружном шлифовании по схеме выхаживания на круглошлифовальном станке мод. 3У143МВ. Обработывалась цилиндрическая деталь из стали 45 абразивным кругом 1А1 400х80х203 24А 40 СМ1 К6, скорость круга – $V_{кр}=35$ м/с, скорость детали – $V_{дет}=13,2$ м/мин, начальный натяг в технологической системе – $y_0=80$ мкм. Как следует из рис. 3,а, через 4 с шлифования величина упругого перемещения уменьшилась с 80 мкм до 35 мкм, а через 5 с шлифования – до 25 мкм.

Используя расчетную зависимость и экспериментальные значения упругого перемещения $y=35$ мкм и 25 мкм соответственно для $\tau=4$ с и 5с, определен параметр B . В первом случае он равен 4,88с, во втором случае – 4,27с, рис. 3,б. По сравнению с внутренним шлифованием (рис. 2,б), при

круглом наружном шлифовании параметр B значительно меньше. Это связано с более высокой жесткостью технологической системы при круглом наружном шлифовании.

Были также проведены экспериментальные исследования упругих перемещений при плоском шлифовании по жесткой схеме на плоскошлифовальном станке мод. 3Л722В с использованием абразивного круга 1А1 400х80х203 24А 40 СМ1 К6. Съем припуска осуществлялся за один проход круга с глубиной шлифования $t=0,05$ мм; $V_{кр}=35$ м/с; $V_{дет}=24$ м/мин. В результате установлено, что фактическая глубина шлифования при этом составила $t_{ф}=30$ мкм, а $y=20$ мкм. Для определения безразмерного параметра B_1 была использована аналитическая зависимость (4). Подставляя в нее исходные данные: $n=1$; $y=20$ мкм; $t=50$ мкм, получено уравнение относительно неизвестной величины B_1 :

$$B_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{B_1}} \right) = 0,4 . \quad (6)$$

Решая уравнение, установлено $B_1=0,45$. Как видно, данное значение B_1 значительно меньше аналогичных значений $B_1=60...63$, полученных при круглом внутреннем продольном шлифовании. Это связано с более высокой жесткостью технологической системы при плоском шлифовании.

Как показывает практика шлифования внутренних цилиндрических поверхностей зубчатых колес приводов шахтных конвейеров, на точность обработки значительное влияние оказывают термоупругие деформации детали, возникающие в процессе шлифования. Особенно опасен неравномерный нагрев обрабатываемой детали. Поэтому с целью обеспечения равномерного охлаждения после шлифования обрабатываемая деталь не снимается со станка до ее полного охлаждения. Это приводит к повышению трудоемкости операции шлифования. Чтобы оценить возможности уменьшения степени нагрева детали при шлифовании, определим работу резания, которая практически полностью превращается в теплоту. Количество тепла, выделяющегося при резании, равно

$$Q = \int_0^{\tau} N(\tau) \cdot d\tau , \quad (7)$$

где $N(\tau) = P_z(\tau) \cdot V_{кр}$ – мощность шлифования, Вт.

При врезном шлифовании $P_z(\tau)$ с учетом зависимости (1) выражается

$$P_z(\tau) = K_{ш} \cdot P_y(\tau) = K_{ш} \cdot c \cdot y = K_{ш} \cdot c \cdot y_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}} \right) . \quad (8)$$

Подставляя зависимость (8) в (7), имеем

$$Q_{врез} = K_{ш} \cdot c \cdot B \cdot y_{уст} \cdot \left(\frac{\tau}{B} + e^{-\frac{\tau}{B}} - 1 \right) . \quad (9)$$

При шлифовании этого же образца по схеме выхаживания (с начальным натягом y_0) величина упругого перемещения y определится зависимостью (2). Соответственно, тангенциальная составляющая силы резания $P_z(\tau)$ равна

$$P_z(\tau) = K_{ш} \cdot P_y(\tau) = K_{ш} \cdot c \cdot y = K_{ш} \cdot c \cdot y_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (10)$$

Подставляя зависимость (10) в (7), имеем

$$Q_{вых} = K_{ш} \cdot c \cdot B \cdot y_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}}\right). \quad (11)$$

На рис. 4,а заштрихованным показаны площади, соответствующие значениям $Q_{врез}$ и $Q_{вых}$. Как видно, с увеличением времени обработки τ величины $Q_{врез}$ и $Q_{вых}$ увеличиваются, однако с разной интенсивностью. Так $Q_{врез}$ увеличивается более интенсивно. Поэтому оценим соотношение $Q_{врез}/Q_{вых}$ для $y_{уст} = y_0$ и $B=440$ с, рис. 4. Как видно, с увеличением τ соотношение $Q_{врез}/Q_{вых}$ увеличивается. При $\tau/B=4$ соотношение $Q_{врез}/Q_{вых}=3,075$. Следовательно, съём всего припуска по схеме выхаживания при внутреннем шлифовании зубчатого колеса позволяет в 3 раза уменьшить тепловыделения по сравнению с врезным шлифованием (по жесткой схеме). Несомненно, это приведет к снижению температуры шлифования и времени охлаждения обрабатываемой детали, что в конечном итоге позволит снизить термоупругие деформации обрабатываемой детали и трудоемкость операции шлифования.

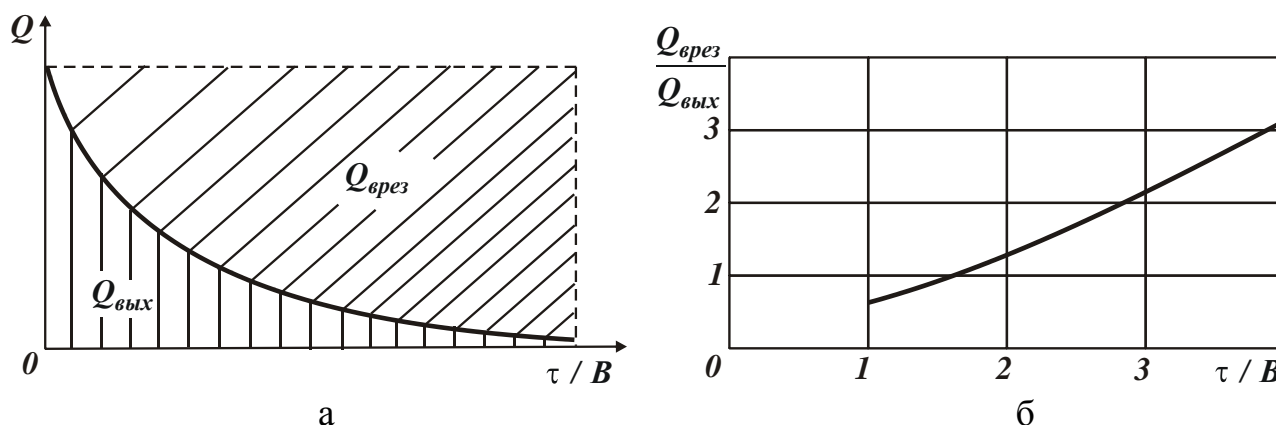


Рис. 4. Характер изменения величин $Q_{врез}$ и $Q_{вых}$ при изменении τ/B (а) и зависимость $Q_{врез}/Q_{вых}$ от τ/B (б).

На финишных операциях обработки внутренних цилиндрических поверхностей зубчатых колес приводов шахтных конвейеров традиционно используется внутреннее продольное шлифование по жесткой схеме с периодическим выхаживанием. Операция обработки весьма трудоемка, длится более трех часов при съеме припуска 0,5 мм на сторону. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что в условиях шлифования с низкой жесткостью в технологической системе целесообразно

съем всего припуска производить по схеме выхаживания, т.е. с отключенной радиальной подачей, создавая в системе начальный натяг, равный или кратный величине снимаемого припуска. При этом эффективность обработки возрастает с увеличением снимаемого припуска. В связи с этим, данная схема обработки положена в основу совершенствования операции внутреннего шлифования зубчатых колес.

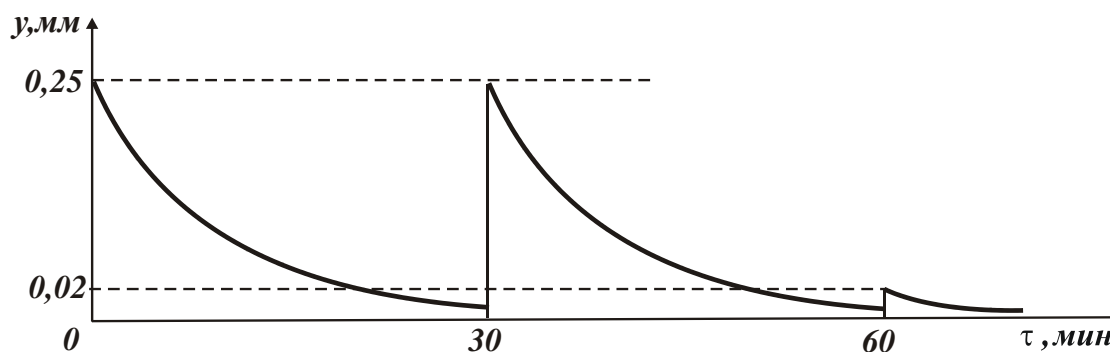


Рис. 5. Характер изменения величины y с течением времени обработки τ .

Опытами установлено, что съем припуска величиной 0,5 мм на сторону может быть произведен за три перехода. На первом переходе в технологической системе создается начальный натяг величиной 0,25 мм, и обработка осуществляется фактически до момента прекращения искрения в зоне резания. При этом обеспечивается точность размера обрабатываемой поверхности на уровне 10–20 мкм. На втором переходе в технологической системе повторно создается натяг величиной 0,25 мм и обработка опять же производится до момента прекращения искрения в зоне резания. Затем оставшийся припуск величиной до 20 мкм удаляется на третьем переходе так же по схеме выхаживания, рис. 5. В результате реализации данной структуры операции внутреннего шлифования производительность обработки увеличилась почти в 2 раза. Продолжительность операции уменьшилась до 2 часов. При этом обеспечиваются требуемые параметры точности и шероховатости обработки. Существенно (с 60 до 30 минут) уменьшилось также время охлаждения обрабатываемой детали после шлифования, которое осуществляется без съема нагретой детали со станка с целью устранения ее термоупругих деформаций и повышения таким образом точности обработки. Это свидетельствует об уменьшении выделяемого при резании тепла, что согласуется с приведенными выше теоретическими решениями.

Список литературы: 1. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Сверщев, В.П. Ларшин. – К.: Техніка, 1983. – 182 с. 2. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М.М. Тверской. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с. 3. Рябенков И.А. Повышение эффективности финишной обработки деталей гидроаппаратуры на основе выбора рациональной структуры и параметров операций: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / И.А. Рябенков. – Одесса, 2009. – 21 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. ”Механика резания материалов” – Одесса:

ОНПУ, 2002. – 580 с. **5**. Новиков Ф.В. Повышение точности и производительности механической обработки / Ф.В. Новиков, Р.А. Бережной // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2009. – Вип. 81. – С. 29-38.