

СВЯЗЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ВЕЛИЧИНОЙ УПРУГОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук (ХНЭУ, Харьков)
Полянский В.И. (ООО "Империя Металлов", Харьков)
Рябенков И.А., канд. техн. наук (ГП ХМЗ "ФЭД")

The terms of increase of exactness and productivity of tooling are in-process certain on finish operations

Повышение точности и производительности обработки является важнейшим условием совершенствования операций финишной обработки высокоточных деталей гидроаппаратуры и других ответственных деталей [1, 2, 3]. Данная проблема в настоящее время успешно решается применением современных металлорежущих станков и инструментов, обладающих высокими технологическими возможностями. Это относится и к лезвийной, и к абразивной обработке. Вместе с тем, при использовании новых станков и инструментов важно правильно производить выбор оптимальных условий обработки, в максимальной степени использующих их потенциальные возможности. В связи с этим, актуальны вопросы обоснования технологических закономерностей формирования точности и качества обрабатываемых поверхностей и повышения эффективности обработки. Несмотря на большое количество опубликованных работ, данный вопрос в полной мере не решен [4, 5]. Это требует разработки новых теоретических подходов к анализу технологических возможностей финишной механической обработки. Цель работы – определение условий повышения точности и производительности механической обработки на финишных операциях. Важным, но не изученным, является вопрос определения оптимального количества проходов инструмента как при лезвийной, так и при абразивной обработке.

Поэтому произведем оценку влияния количества проходов инструмента n на величину упругого перемещения y при условии обеспечения одинаковой производительности обработки при съеме заданного припуска Π на основе решения, приведенного в работе [6], согласно которому y в условиях многопроходного шлифования по жесткой схеме определяется зависимостью

$$y = B_1 \cdot t \cdot (1 - \varepsilon^{-n}) = B_1 \cdot t \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{B_1}\right)^n} \right], \quad (1)$$

где $\varepsilon = 1 + \frac{1}{B_1}$ – уточнение на проходе; $B_1 = \frac{\sigma \cdot \pi \cdot D_{дет} \cdot S_{прод}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ – безразмерный параметр; σ – условное напряжение резания, Н/м² (энергоемкость обработки, Дж/м³); $D_{дет}$ – диаметр отверстия в детали, м; $S_{прод}$ – скорость продольной по-

дачи, м/с; t – номинальная глубина шлифования, м; c – жесткость технологической системы, Н/м; $K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования; P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; Π – снимаемый припуск, м; n – количество проходов инструмента.

Из зависимости (1) следует, что с увеличением n величина y непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению $B_1 \cdot t$, при котором фактическая глубина шлифования t_ϕ равна номинальной глубине шлифования t .

Преобразуем зависимость (1) с учетом $t = \Pi / n$. Номинальную производительность обработки $Q_{ном}$ представим в виде $Q_{ном} = \pi \cdot D_{дет} \cdot S_{прод} \cdot t$. Тогда, для обеспечения заданной $Q_{ном}$ скорость продольной подачи $S_{прод}$ с увеличением n должна пропорционально увеличиваться по зависимости

$$S_{прод} = \frac{Q_{ном} \cdot n}{\pi \cdot D_{дет} \cdot \Pi}, \quad (2)$$

а t , наоборот, пропорционально уменьшаться в соответствии с зависимостью $t = \Pi / n$. С учетом сказанного, безразмерный параметр B_1 опишется

$$B_1 = \frac{\sigma \cdot Q_{ном} \cdot n}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi}. \quad (3)$$

Подставляя зависимость (3) в (1), получим

$$y = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi}{\sigma \cdot Q_{ном} \cdot n} \right)^n} \right]. \quad (4)$$

Из зависимости (4) вытекает неоднозначное влияние количества проходов круга n на величину упругого перемещения y . В связи с этим произведем количественную оценку влияния n на величину y для заданной $Q_{ном}$. Для

удобства расчетов представим $B_{1\text{баз}} = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi}$, где $B_{1\text{баз}}$ – базовое значение безразмерного параметра B_1 .

Тогда зависимость (4) примет вид

$$y = B_{1\text{баз}} \cdot \Pi \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{B_{1\text{баз}} \cdot n} \right)^n} \right]. \quad (5)$$

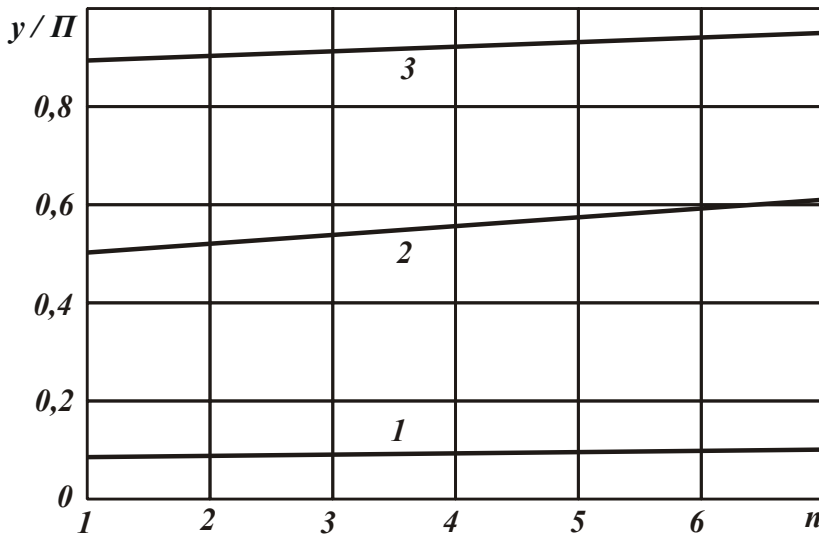


Рис. 1. Зависимость относительной величины y/P от количества проходов круга n :

1 – $B_{1\bar{\sigma}_{аз}} = 0,1$; 2 – $B_{1\bar{\sigma}_{аз}} = 1$; 3 – $B_{1\bar{\sigma}_{аз}} = 10$.

Безразмерный параметр $B_{1\bar{\sigma}_{аз}}$, также как и безразмерный параметр B_1 , может изменяться в широких пределах: $0 < B_{1\bar{\sigma}_{аз}} < \infty$. Поэтому рассмотрим три принципиальных случая: 1) $0 < B_{1\bar{\sigma}_{аз}} < 1$; 2) $B_{1\bar{\sigma}_{аз}} = 1$; 3) $B_{1\bar{\sigma}_{аз}} > 1$. На рис. 1 приведены рассчитанные по зависимости (5) значения y/P в зависимости от количества проходов круга n для разных значений $B_{1\bar{\sigma}_{аз}}$.

Как следует из рис. 1, с увеличением количества проходов круга n относительная величина y/P (независимо от безразмерного параметра $B_{1\bar{\sigma}_{аз}}$) увеличивается, однако несущественно. При $n \geq 4$ относительная величина y/P почти не изменяется. Следовательно, наименьшее значение y/P при заданной номинальной производительности обработки $Q_{ном}$ можно достичь при съеме припуска Π за один проход круга ($n=1$). Однако, фактически с одинаковой эффективностью (точностью и производительностью обработки) съем заданного припуска Π можно производить и за большее количество проходов круга, т.е. схемы многопроходного и однопроходного шлифования в данном случае практически равнозначны. Из двух входящих в зависимость (5) переменных параметров $B_{1\bar{\sigma}_{аз}}$ и n , основное влияние на относительную величину y/P оказывает параметр $B_{1\bar{\sigma}_{аз}}$. С его изменением относительная величина y/P может изменяться в широких пределах (рис. 1). Чем меньше безразмерный параметр $B_{1\bar{\sigma}_{аз}}$, тем меньше относительная величина y/P . При $B_{1\bar{\sigma}_{аз}} = 10$ относительная величина y/P приближается к единице, т.е. справедливо условие $y \rightarrow \Pi$.

Учитывая эффективность съема припуска за один проход круга (с точки зрения повышения точности и производительности обработки), проведем анализ зависимости (5), которая равносильна зависимости (1), для случая $n=1$ с учетом $B_{1\bar{\sigma}_{аз}} = B_1$:

$$y = \frac{\Pi}{\left(1 + \frac{1}{B_1}\right)} = \frac{\Pi}{\varepsilon} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\Pi} + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot Q_{ном}}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\Pi} + \frac{1}{y_{уст}}\right)}, \quad (6)$$

где $y_{уст} = B_1 \cdot \Pi = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$.

На рис. 2 приведены рассчитанные по зависимости (6) значения относительной величины y/Π с изменением безразмерного параметра B_1 . Как видно, с увеличением B_1 относительная величина y/Π непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице. Это свидетельствует о том, что с увеличением B_1 уменьшается съём материала. Очевидно, начиная с определенного значения B_1 , съём материала практически прекратится. Следовательно, целесообразно обработку производить при небольших значениях $B_1 \rightarrow 0$. В этом случае можно обеспечить требуемое значение y/Π . При невыполнении данного условия необ-

ходимо уменьшать безразмерный параметр $B_1 = \frac{\sigma \cdot \pi \cdot D_{дет} \cdot S_{прод}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ за счет изме-

нения величин, входящих в зависимость для его определения. Основной варьируемой величиной в данной зависимости следует рассматривать скорость продольной подачи $S_{прод}$, уменьшая которую можно всегда добиться требуемого значения B_1 и соответственно значения y/Π , т.е. требуемую точность обработки при съеме заданного припуска Π . Однако, уменьшение скорости продольной подачи $S_{прод}$ ведет к снижению номинальной производительности обработки $Q_{ном}$, что не всегда целесообразно. Поэтому в зависимости для определения безразмерного параметра B_1 необходимо в первую очередь изменять все другие параметры и, лишь в крайнем случае, уменьшать $S_{прод}$. Исходя из этого, задавая значения B_1 , установим характер изменения скорости продольной подачи $S_{прод}$ от основных параметров шлифования:

$$S_{прод} = \frac{B_1 \cdot c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\pi \cdot D_{дет} \cdot \sigma}. \quad (7)$$

Как видно, скорость продольной подачи $S_{прод}$ тем больше, чем больше параметры c , $V_{кр}$ и меньше $\sigma/K_{ш}$ и $D_{дет}$. Необходимо отметить, что уменьшение скорости продольной подачи $S_{прод}$ в связи с увеличением диаметра детали $D_{дет}$ не приводит к снижению номинальной производительности обработки $Q_{ном} = \pi \cdot D_{дет} \cdot S_{прод} \cdot t$. Во всех остальных случаях (связанных с уменьшением параметров c , $V_{кр}$ и увеличением отношения $\sigma/K_{ш}$) уменьшение $S_{прод}$ предполагает уменьшение $Q_{ном}$.

При съеме припуска за один проход безразмерный параметр B_1 можно представить зависимостью $B_1 = y_{уст}/\Pi$. Следовательно, уменьшение B_1 предполагает уменьшение величины $y_{уст}$. Для эффективного ведения процесса шлифования, как показано выше, должно выполняться условие $0 < B_1 < 1$ или

$0 < y_{уст} / \Pi < 1$. Из этого вытекает, что $y_{уст}$ должна быть значительно меньше величины снимаемого припуска Π . Зависимость (6) можно представить

$$\frac{1}{y} = \frac{1}{\Pi} + \frac{1}{y_{уст}} \quad \text{или} \quad (7)$$

$$y = y_{уст} \cdot \frac{1}{(1 + B_1)}. \quad (8)$$

Из зависимости (6) вытекает, что уменьшить величину упругого перемещения y однозначно можно уменьшением параметров Π и $y_{уст}$. При этом характер изменения зависимости (6) определяется соотношением параметров Π и $y_{уст}$. В случае $\Pi \gg y_{уст}$ зависимость (6) приближенно может быть описана

$$y \approx y_{уст}. \quad (9)$$

Тогда справедливо условие $t_\phi \approx t = \Pi$, а $B_1 \rightarrow 0$, что имеет место при высокой жесткости технологической системы и небольших значениях σ / K_{uu} (высокой режущей способности круга). Необходимо отметить, что полученное теоретическое решение, описываемое зависимостью (5), справедливо и при лезвийной обработке, т.е. и в этом случае с точки зрения повышения точности и производительности обработки целесообразно съём припуска производить за один проход инструмента. При $n=1$ и $t = \Pi$ зависимость (5) применительно к лезвийной обработке упрощается и описывается

$$y = \frac{t}{\left(1 + \frac{1}{B_1}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{t} + \frac{1}{y_{уст}}\right)}, \quad (10)$$

где $y_{уст} = B_1 \cdot t = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{рез} \cdot V}$ – установившееся значение упругого перемещения,

м; $K_{рез} = P_z / P_y$; $Q_{ном} = S_{прод} \cdot t \cdot V$ – номинальная производительность обработки, м³/с; V – скорость резания (скорость вращения детали), м/с.

Зависимость (10) можно также представить в виде

$$\frac{1}{y} = \frac{1}{t} + \frac{1}{y_{уст}} \quad \text{или} \quad (11)$$

$$y = y_{уст} \cdot \frac{1}{(1 + B_1)}. \quad (12)$$

Как отмечалось выше, в общем случае безразмерный параметр B_1 может изменяться в широких пределах. В случае $B_1 < 1$, согласно зависимости $y = B_1 \cdot t_\phi$, справедливо соотношение $y < t_\phi$, а при $B_1 > 1$ – соотношение $y > t_\phi$. Очевидно, для нормального протекания процесса обработки и более полного использования потенциальных возможностей режущего инструмента необходимо стремиться к реализации условия $B_1 < 1$. В этом случае, исходя из зависимости (12), отношение $y / y_{уст}$ может изменяться в пределах 0,5...1. Причем, с

уменьшением безразмерного параметра $B_1 \rightarrow 0$ будет выполняться условие $y \rightarrow y_{уст}$. Следовательно, при заданной номинальной производительности обработки $Q_{ном}$ величина упругого перемещения y фактически не будет зависеть от номинальной глубины резания t , т.е. с одинаковой эффективностью можно производить съём припуска различной величины Π .

Из зависимости (10) следует, что уменьшить величину y можно различными путями: уменьшением отношения $\sigma / K_{рез}$, номинальной производительности обработки $Q_{ном}$ и увеличением параметров c и V . Несомненно, более эффективным путем является уменьшение отношения $\sigma / K_{рез}$ и увеличение параметров c и V . Уменьшать $Q_{ном}$ следует в том случае, когда все резервы, связанные с уменьшением отношения $\sigma / K_{рез}$ и увеличением параметров c и V , исчерпаны.

Полученное теоретическое решение имеет исключительно важное значение для понимания физической сути процессов механической обработки. Это связано с тем, что, несмотря на многообразие методов механической обработки и конструкций режущих инструментов, за счет уменьшения скорости продольной подачи $S_{прод}$ практически во всех случаях можно уменьшить безразмерный параметр B_1 до необходимого значения и обеспечить требуемое значение y / Π . Иными словами, какой бы несовершенной была конструкция режущего инструмента с точки зрения его режущей способности (определяемой высокими значениями $\sigma / K_{рез}$), уменьшая $S_{прод}$, мы уменьшаем безразмерный параметр B_1 до необходимого значения. Точно также недостаток жесткости технологической системы можно с избытком компенсировать уменьшением $S_{прод}$. Именно этим обстоятельством можно объяснить возможность реализации на практике режущих свойств различных лезвийных и абразивных инструментов.

Рассмотрим закономерности формирования погрешностей при механической обработке отверстий. Первоначально проанализируем процесс растачивания отверстия при съеме припуска за один проход инструмента (рис. 3 [4]). Величина упругого перемещения y , как и в предыдущих случаях, определяется зависимостью $y = P_y / c$, где $P_y = P \cdot \cos \varphi$ – радиальная составляющая силы резания, Н; P – сила резания, возникающая в плоскости резания, Н; φ – угол резца в плане.

Увеличение угла резца в плане φ приводит к увеличению осевой составляющей силы резания $P_x = P \cdot \sin \varphi$ (рис. 3), т.е. имеет место перераспределение составляющих силы резания P_y и P_x . Уменьшая P_y за счет увеличения угла резца в плане φ , мы увеличиваем P_x , т.к. суммарная сила резания P , возникающая в плоскости резания, остается постоянной.

При условии $B_1 < 1$ зависимость (12), описывающая величину упругого перемещения y при однопроходной обработке, упрощается и принимает вид

$$y \approx y_{уст} = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{рез} \cdot V}, \quad (13)$$

где $K_{рез} = P_z / P$; $Q_{ном} = S_{прод} \cdot t \cdot V$.

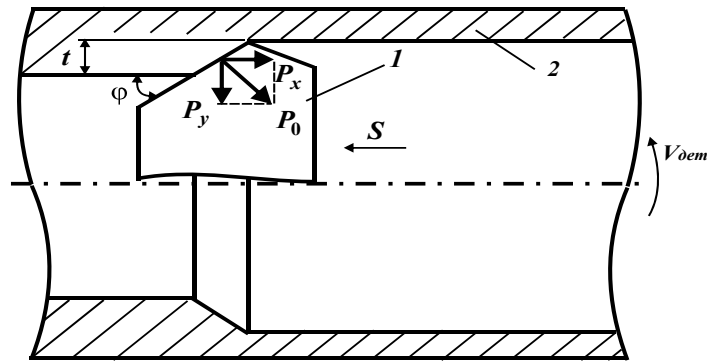


Рис. 3. Расчетная схема параметров процесса растачивания отверстия: 1 – ре-зец; 2 – обрабатываемая деталь.

Соответствующая этой величине y сила резания P выразится

$$P = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{K_{рез} \cdot V}. \quad (14)$$

Тогда радиальная составляющая силы резания P_y и величина упругого перемещения y опишутся:

$$P_y = \frac{\sigma \cdot Q_{ном} \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot V}; \quad (15)$$

$$y = \frac{\sigma \cdot Q_{ном} \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез} \cdot V}. \quad (16)$$

Полученная зависимость (16) согласуется с аналогичной зависимостью для определения величины упругого перемещения y , установленной в работе [1] другим методом расчета. В зависимость (16), в отличие от зависимости (12), входит угол резца в плане φ , с увеличением которого ($\varphi \rightarrow 90^\circ$) величина упругого перемещения y существенно уменьшается, повышая тем самым точность обработки. Следовательно, угол φ является дополнительным важным фактором повышения точности и производительности обработки при окончательном растачивании отверстий. При предварительной обработке угол φ , наоборот, необходимо уменьшать с целью увеличения ширины среза b и уменьшения толщины среза a при заданной производительности обработки $Q_{ном} = a \cdot b \cdot V$. Это позволит уменьшить интенсивность износа режущего инструмента и соответственно повысить его стойкость. Уменьшение интенсивности износа режущего инструмента важно также и при окончательной обработке отверстий, например, при их зенкерование и развертывании. Этим можно объяснить то, что угол φ (угол заборной части) у зенкеров и разверток устанавливается небольшим.

Необходимо отметить, что в данном случае обработка производится несколькими лезвиями инструмента и технологическая система в радиальном направлении уравнивается двумя одинаковыми по величине, но разными

по знаку силами P_y (рис. 3). Вследствие этого результирующая сила ΔP_y , также как и величина упругого перемещения y , равна нулю и погрешности обработки, связанные с упругими перемещениями в технологической системе, не образуются. Угол φ , согласно зависимости (16), не будет влиять на величину y . Этим объясняется возможность уменьшения угла φ у зенкеров и разверток.

В случае обработки отверстия со съемом неравномерного припуска результирующая сила ΔP_y и соответственно величина y не будут равны нулю. Это приведет к образованию погрешностей обработки отверстия (в виде эллипсности и конусности). Величина y , определяемая зависимостью (16), примет вид

$$y = \frac{\sigma \cdot (Q_{ном1} - Q_{ном2}) \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез} \cdot V} = \frac{\sigma \cdot S_{прод} \cdot (t_1 - t_2) \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}}, \quad (17)$$

где $Q_{ном1} = S_{прод} \cdot t_1 \cdot V$; $Q_{ном2} = S_{прод} \cdot t_2 \cdot V$; t_1, t_2 – наибольшая и наименьшая глубины резания, м.

Как видно, величина y тем больше, чем больше разность глубин резания $t_1 - t_2$, т.е. чем больше неравномерность снимаемого припуска. В этом случае уменьшение угла φ ведет к увеличению величины y . Поэтому основным условием ее уменьшения является увеличение количества лезвий инструмента и соответственно уменьшение разности глубин резания $t_1 - t_2$ и сил резания, действующих на каждое лезвие инструмента. Данная закономерность справедлива и при рассверливании отверстий (рис. 3). При условии $t_1 = t_2$ (т.е. при съеме равномерного припуска) величина упругого перемещения $y=0$, и может быть достигнута высокая точность обработки отверстия. При условии $t_1 > t_2$ (т.е. при съеме неравномерного припуска) величина упругого перемещения $y > 0$, что приведет к образованию погрешностей обработки отверстия. В отличие от зенкера и развертки, сверло, как правило, имеет два лезвия. Поэтому уменьшить величину y в этом случае можно увеличением угла сверла в плане 2φ . Как показывает практика, угол φ у сверла может быть равен 60^0 и более, т.е. значительно превышает угол φ у зенкеров и разверток.

Сравним значения величины упругого перемещения y , возникающей в технологической системе при растачивании и рассверливании отверстия и описываемой соответственно зависимостями (16) и (17). Очевидно, при рассверливании разность глубин резания $t_1 - t_2$ меньше глубины резания t при растачивании отверстия. Поэтому, на первый взгляд, может показаться, что величина y при рассверливании меньше. Однако следует учитывать то, что энергоемкость обработки σ при рассверливании больше в связи с худшими условиями стружкообразования при резании. Кроме того, при рассверливании скорость резания V значительно меньше. В связи с этим, при заданной производительности обработки величина y при рассверливании будет больше, чем при растачивании отверстия, что собственно и предопределяет широкое применение растачивания на практике на опе-

рациях финишной обработки отверстий. С этих позиций рассверливание эффективно использовать как предварительную обработку отверстий.

Список литературы: 1. 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. 2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.7. "Точность обработки деталей машин" – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с. 3. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г.Б. Лурье. – Л.: Машиностроение, 1984. – 103 с. 4. Рябенков І.О. Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / І.О. Рябенков. – Одеса, 2009. – 21 с. 5. Ковальчук А.Н. Оптимизация структуры и параметров операций шлифования ответственных валов приводов шахтных конвейеров: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / А.Н. Ковальчук. – Одесса, 2008. – 21 с. 6. Новиков Ф.В. Оптимизация структуры и параметров операций шлифования плоских и внутренних цилиндрических поверхностей деталей / Ф.В. Новиков, Р.А. Бережной // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 101. – С. 28-39.