

УДК 621.923

Ф.В. НОВИКОВ, В.И. ПОЛЯНСКИЙ**УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ**

Проведено аналіз питомої роботи (енергоємності обробки) процесів механічної обробки різанням і встановлені умови її зменшення. Показано, що умови зменшення енергоємності обробки узгоджуються з умовами зменшення витрат на обробку, пов'язаних із заробітною платою робітника-верстатника, витратою ріжучих інструментів і електроенергії. Цим доведено можливість оцінки ефективності застосування процесів механічної обробки різанням на основі аналізу енергоємності обробки, не вдаючись до економічних методів оцінки. Це дозволяє виконувати вибір раціональних процесів механічної обробки різанням з використанням технічних параметрів, таких як енергоємність обробки і робота різання.

Ключові слова: механічна обробка різанням, питома робота, енергоємність обробки, витрати на обробку, ріжучі інструменти, електроенергія.

Проведен анализ удельной работы (энергоёмкости обработки) процессов механической обработки резанием и установлены условия ее уменьшения. Показано, что условия уменьшения энергоёмкости обработки согласуются с условиями уменьшения затрат на обработку, связанных с заработной платой рабочего-станочника, расходом режущих инструментов и электроэнергии. Этим доказана возможность оценки эффективности применения процессов механической обработки резанием на основе анализа энергоёмкости обработки, не прибегая к экономическим методам оценки. Это позволяет производить выбор рациональных процессов механической обработки резанием с использованием технических параметров, таких как энергоёмкость обработки и работа резания.

Ключевые слова: механическая обработка резанием, удельная работа, энергоёмкость обработки, затраты на обработку, режущие инструменты, электроэнергия.

The analysis of the specific work (processing energy intensity) of machining processes and cutting conditions are set to decrease it. It is shown that the conditions of reducing energy intensity of treatment are consistent with the terms of reducing the cost of processing non-wage worker, machine operator, cutting tools and consumption of electricity. This proves the ability to assess the effectiveness of processes machining based on the analysis of processing power intensity without resorting to economic valuation methods. This allows the rational selection of cutting machining processes using the technical parameters, such as processing and power consumption of the cutting operation.

Keywords: machining, specific work, the energy intensity of processing, the processing costs, cutting tools, power.

Постановка проблеми. Создание конкурентоспособной машиностроительной продукции требует обеспечения высоких показателей производительности и качества на операциях металлообработки. Это достигается применением технологических процессов механической обработки резанием, которые характеризуются относительно низкой удельной работой (энергоёмкостью обработки), в результате чего снижаются силы и температура резания. К таким технологическим процессам следует отнести лезвийную обработку, которая, как известно, является менее энергоёмкой по сравнению с абразивной обработкой. В свою очередь, наименее энергоёмким процессом абразивной обработки следует рассматривать прерывистое шлифование, которое обеспечивает поддержание в процессе обработки высокой режущей способности абразивного круга вследствие специфики его ударного взаимодействия с обрабатываемым материалом. В итоге резко снижаются силы и температура резания, повышаются производительность и качество обрабатываемых поверхностей. Все это указывает эффективность уменьшения удельной работы процесса механической обработки резанием и требует разработки надежных методов ее оценки.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследованию удельной работы процессов механической обработки в научно-технической литературе уделено большое внимание [1–3]. Так, установлено, что наименьшие значения удельной работы (энергоёмкости обработки) достигаются при обработке металлов давлением (методами пластического деформирования без образования стружки). При этом энерго-

ёмкость обработки может во много раз быть меньше энергоёмкости процессов механической обработки резанием. Вместе с тем, исследования энергоёмкости обработки a производятся, как правило, с использованием экспериментальных методов и физических зависимостей $a = P/Q$ или $a = A/V$, где P , A – соответственно мощность и работа резания; Q – производительность обработки; V – объем снятого материала. Для более обоснованного определения энергоёмкости обработки важно располагать ее аналитическими зависимостями, что позволит теоретически определять условия ее уменьшения, обеспечивая одновременно повышение производительности и качества обрабатываемых поверхностей деталей машин.

Цель работы – проведение теоретических исследований удельной работой (энергоёмкости обработки) процессов механической обработки резанием и анализ условий ее уменьшения.

Изложение основного материала. Условия уменьшения удельной работы процесса механической обработки резанием можно установить на основе аналитической зависимости, приведенной в работе [4]:

$$a = \frac{\sigma_{сж}}{\operatorname{tg}\beta} = \frac{2\sigma_{сж}}{K_{рез}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²;

β – условный угол сдвига обрабатываемого материала (0 ... 45°);

$$K_{рез} = P_z / P_y;$$

P_z , P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н.

Исходя из приведенной зависимости (1), удельная работа (энергии) процесса a имеет размерность Н/м², поскольку от размерности Дж/м³ с учетом размерности Дж=Н·м, несложно перейти к размерности Н/м². Следовательно, с физической точки зрения удельная работа (энергии) процесса a идентична условному напряжению резания σ , равному отношению тангенциальной составляющей силы резания P_z к площади поперечного сечения среза $S_{срез}$.

При максимальном значении условного угла сдвига обрабатываемого материала $\beta=45^\circ$ удельная работа (энергии) процесса $a = \sigma_{сж}$, что равносильно разрушению прямолинейного бруса в условиях его сжатия силой P_z . Таким образом, наименьшее значение параметра a равно пределу прочности на сжатие обрабатываемого материала $\sigma_{сж}$, а наибольшее значение параметра a , исходя из условия $\beta=0$, равно бесконечности. Следовательно, параметр a изменяется в широких (бесконечных) пределах и основным условием его уменьшения до минимального значения $a = \sigma_{сж}$ является увеличение условного угла сдвига обрабатываемого материала $\beta \rightarrow 45^\circ$.

Очевидно, с физической точки зрения условное напряжение резания σ не может превышать предельное значение $\sigma_{сж}$. В данном случае это связано с тем, что условное напряжение резания σ определяется отношением $P_z / S_{срез}$, а не отношением тангенциальной составляющей силы резания P_z к фактической площади контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента, которая может многократно (до 10 раз) превышать площадь поперечного сечения среза $S_{срез}$. Поэтому противоречивое, на первый взгляд, условие $\sigma > \sigma_{сж}$ и обусловлено превышением фактической площади контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента над площадью поперечного сечения среза $S_{срез}$.

Согласно формуле К. А. Зворыкина [5], угол сдвига материала β равен:

$$\beta = 45^\circ + \frac{(\gamma - \psi)}{2}, \quad (2)$$

где γ – положительный передний угол режущего инструмента;

ψ – условный угол трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента ($tg\psi = f$ – коэффициент трения).

Следовательно, увеличить угол сдвига β и соответственно уменьшить параметр a можно увеличением угла γ и уменьшением угла ψ (коэффициента трения f). Для отрицательного переднего угла ре-

жущего инструмента γ формула К. А. Зворыкина принимает вид:

$$\beta = 45^\circ - \frac{(\gamma + \psi)}{2}. \quad (3)$$

В этом случае с увеличением отрицательного переднего угла режущего инструмента γ угол сдвига материала β уменьшается, что приводит к увеличению параметра a . Этим объясняются более высокие значения энергоемкости обработки процесса шлифования и в целом процессов абразивной обработки (которые имеют место на практике) по сравнению с процессами лезвийной обработки вследствие резания абразивными зёрнами, имеющими отрицательные передние углы. Применение эффективных технологических сред, способствующих уменьшению интенсивности трения в зоне резания и соответственно уменьшению угла ψ , приводит к увеличению угла сдвига материала β и уменьшению удельной работы (энергии) процесса a .

Из зависимости (1) для определения параметра a следует его уменьшение с увеличением коэффициента $K_{рез} = P_z / P_y$. Экспериментально установлено, что с уменьшением угла сдвига β уменьшается коэффициент $K_{рез} = P_z / P_y$, принимая значения меньше единицы. Это соответствует условиям абразивной обработки. При лезвийной обработке коэффициент $K_{рез} > 1$ и параметр a принимает меньшие значения, чем при абразивной обработке.

По мере износа лезвийного инструмента его фактический передний положительный угол уменьшается, что приводит к уменьшению угла сдвига материала β и увеличению параметра a . В этом случае значения удельной работы (энергии) процессов лезвийной и абразивной обработки могут быть сопоставимы, что имеет место, например, при обработке алмазно-абразивными инструментами, характеризующимися высокой остротой режущих кромок и низким коэффициентом трения.

Параметры режима резания, исходя из приведенной зависимости, в явном виде не влияют на параметр a , однако они влияют на углы γ и ψ , входящие в зависимость для определения угла сдвига материала β . Так, экспериментально установлено, что увеличение скорости резания при лезвийной обработке приводит к уменьшению интенсивности трения в зоне резания, условного угла трения ψ и соответственно к увеличению угла сдвига материала β и уменьшению удельной работы (энергии) процесса a . Это позволяет уменьшить силовую и тепловую напряженность процесса резания и повысить показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей.

С увеличением подачи увеличивается фактический передний угол инструмента, что также способствует увеличению угла сдвига материала β и уменьшению удельной работы (энергии) процесса a .

При шлифовании параметр a следует рассматривать суммой двух слагаемых, обусловленных энергией «чистого резания» и энергией трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом. Приведенная выше зависимость для определения параметра a получена лишь для условий «чистого резания». Поэтому уменьшить параметр a при шлифовании можно, прежде всего, за счет уменьшения или даже исключения трения связки круга с обрабатываемым материалом.

Экспериментально установлено, что энергия обработки, обусловленная трением связки круга с обрабатываемым материалом, может многократно (до 10 раз) превышать энергию «чистого резания». В связи с этим следует применять эффективные методы правки кругов, например, электроэрозионную или электрохимическую правку алмазных кругов на прочных металлических связках типа М2-01, которые фактически не поддаются обычной механической правке, осуществляемой с помощью абразивного бруска или абразивного круга. Это обеспечивает высокую режущую способность алмазного круга и высокие показатели производительности, точности и качества обработки при шлифовании [6].

Рассматривая $V = Q \cdot t$, параметр a может быть представлен в виде:

$$a = \frac{P \cdot t}{V} = \frac{P}{Q}, \quad (4)$$

где V – объем снимаемого материала, м³;
 Q – производительность обработки, м³/с;
 P – мощность резания, Вт;
 t – время обработки, с.

Следовательно, для заданной мощности резания P , определяемой, например мощностью металлорежущего станка, увеличить производительность обработки Q можно исключительно уменьшением параметра a за счет применения менее энергоемких способов обработки [7; 8].

Затраты на обработку, связанные с заработной платой рабочего-станочника, выражаются:

$$З = N \cdot t_0 \cdot S_1 \cdot k, \quad (5)$$

где N – количество обрабатываемых деталей;
 t_0 – основное технологическое время обработки, мин;
 S_1 – тарифная ставка рабочего, грн/мин;
 k – коэффициент, учитывающий всевозможные начисления на тарифную ставку рабочего.

Представляя $N \cdot t_0 = V_{\Sigma} / Q$, получено:

$$З = \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k}{Q}, \quad (6)$$

где V_{Σ} – объем материала, снимаемого с N деталей, м³.

Как видно, затраты на обработку $З$ вполне однозначно определяются производительностью обработки Q : чем больше Q , тем меньше $З$.

Выражая $Q = P / a$, имеем:

$$З = \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k \cdot a}{P} = \frac{S_1 \cdot k \cdot A}{P}, \quad (7)$$

где $A = a \cdot V_{\Sigma}$ – работа резания, Дж.

Для заданных значений V_{Σ} и P , уменьшить затраты на обработку $З$ можно за счет уменьшения параметра a или работы резания A . Поэтому процессы лезвийной обработки, которые характеризуются меньшими значениями параметров a и A по сравнению с процессом шлифования, требуют и меньших затрат для их практической реализации [7; 8].

Из зависимости (7) также следует, что с увеличением мощности станка P затраты на обработку $З$ уменьшаются, т.е. целесообразно обработку производить на металлорежущих станках повышенной мощности.

Зависимость для определения суммы двух статей затрат на обработку, связанных с заработной платой рабочего-станочника и расходом режущих инструментов, принимает вид:

$$З = N \cdot t_0 \cdot S_1 \cdot k + N_0 \cdot Ц, \quad (8)$$

где $N_0 = N / n$ – количество потребляемых режущих инструментов;

$n = T / t_0$ – количество деталей, обработанных одним инструментом;

T – стойкость режущего инструмента, мин;

$Ц$ – цена режущего инструмента, грн;

С учетом зависимости для определения стойкости режущего инструмента $T = \frac{C_4}{V_{рез}^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}$ [5] и зави-

симости $N \cdot t_0 = V_{\Sigma} / Q$, затраты на обработку $З$ описываются:

$$З = \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k}{Q} + \frac{V_{\Sigma} \cdot Ц}{C_4} \cdot \frac{Q^{m_1-1}}{S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q}}, \quad (9)$$

где C_4 , m_1 , q , p – постоянные, определяются экспериментально ($m_1 > p > q$; $m_1 > 1$);

$Q = V_{рез} \cdot t \cdot S$ – производительность обработки

при продольном точении, м³/мин;

$V_{рез}$ – скорость резания, м/мин;

t – глубина резания, м;

S – подача, м/об.

Расчетами установлено, что затраты на обработку $З$ с изменением производительности обработки Q изменяются по экстремальной зависимости, проходя точку минимума (рис. 1) [9]. Поэтому, подчиняя функцию $З$ необходимому условию экстремума $З'_Q = 0$, определены экстремальные значения произ-

водительности обработки $Q_{экстр}$, стойкости инструмента $T_{экстр}$ и минимальные затраты на обработку Z_{min} :

$$Q_{экстр} = \left[\frac{C_4}{T_{экстр}} \cdot S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q} \right]^{\frac{1}{m_1}} ; \quad (10)$$

$$T_{экстр} = \frac{C_4 \cdot (m_1 - 1)}{S_1 \cdot k} ; \quad (11)$$

$$Z_{min} = \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k}{Q_{экстр}} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right]. \quad (12)$$

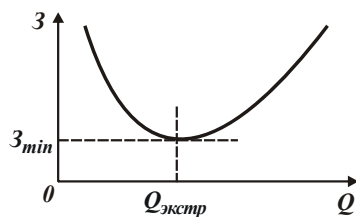


Рис. 1 – Зависимость затрат Z от производительности обработки Q

Как видно, с уменьшением $T_{экстр}$ увеличивается значение $Q_{экстр}$ и уменьшается Z_{min} , т.е. повышается эффективность механической обработки резанием. Это достигается за счет уменьшения параметра m_1 , определяющего износостойкость инструментального материала: чем меньше m_1 , тем она выше. Этим можно объяснить высокую эффективность применения новых твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства ($1 < m_1 < 3$), которые в настоящее время широко внедряются на машиностроительных предприятиях Украины и обеспечивают повышение производительности и качества обработки при одновременном снижении себестоимости обработки.

Необходимо отметить, что для отечественных режущих инструментов, изготовленных из твердых сплавов и быстрорежущих сталей, как правило, выполняется условие $m_1 > 5$. Этим значениям параметра m_1 соответствует достаточно высокая стойкость твердосплавных режущих инструментов – на уровне 60 мин. Стойкость указанных выше новых сборных конструкций твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства устанавливается меньше (в связи с меньшими значениями параметра m_1), что и предопределяет многократное повышение производительности обработки Q и снижение затрат на обработку Z .

Например, на ряде операций лезвийной обработки деталей из труднообрабатываемых материалов за счет применения новых сборных конструкций твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства удалось в более чем 5

раз повысить производительность обработки и примерно во столько же раз снизить себестоимость обработки при обеспечении высоких требований к точности и качеству обрабатываемых поверхностей. При этом также достигнуто увеличение скорости резания, что открывает новые технологические возможности широкого применения высокоскоростного резания на современных высокооборотных станках с ЧПУ типа “обрабатывающий центр”.

Из зависимостей (10) – (12) следует, что минимальное значение Z_{min} тем меньше, чем больше экстремальное значение $Q_{экстр}$. Сравнивая полученное значение $Q_{экстр}$ с расчетным значением $Q = P / a$, можно оценить экономическую эффективность рассматриваемого процесса обработки. Если $Q_{экстр} > Q$, то, очевидно, мощности станка недостаточно для реализации минимального значения Z_{min} . Если $Q_{экстр} < Q$, то, наоборот, в процессе обработки недоиспользуется мощность станка.

При условии $Q_{экстр} = Q$ зависимость (12) для определения минимального значения Z_{min} принимает вид:

$$\begin{aligned} Z_{min} &= \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k \cdot a}{P} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right] = \\ &= \frac{S_1 \cdot k \cdot a \cdot A}{P} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

В итоге получена зависимость, аналогичная зависимости (7) для определения затрат на обработку по заработной плате рабочего-станочника без учета статьи затрат на инструменты.

Из зависимости (13) следует, что чем меньше параметр a для заданного значения мощности резания P , или работа резания A тем меньше Z_{min} . Следовательно, и в данном случае удельная работа (энергии) процесса a и работа резания A определяют условия уменьшения затрат на обработку и увеличения производительности обработки.

Условие $Q_{экстр} = Q$ можно использовать для определения оптимальных параметров режима резания, характеристик инструментов и других технико-экономических показателей обработки.

Зависимость для определения суммы двух статей затрат на обработку, связанных с заработной платой рабочего-станочника и расходом электроэнергии, описывается:

$$Z = N \cdot t_0 \cdot S_1 \cdot k + N \cdot A \cdot S_{элект}, \quad (14)$$

где $S_{элект}$ – стоимость единицы электроэнергии, грн./Дж.

С учетом $A = P \cdot t_0$ зависимость (14) изменится:

$$Z = N \cdot A \cdot \left(\frac{S_1 \cdot k}{P} + S_{элект} \right) =$$

$$= V_{\Sigma} \cdot a \cdot \left(\frac{S_1 \cdot k}{P} + S_{\text{елект}} \right). \quad (15)$$

Как видно, затраты на обработку Z однозначно определяются работой резания A или удельной работой (энергии) процесса a . Чем меньше эти параметры, тем меньше затраты на обработку Z . Поэтому параметры A и a можно самостоятельно использовать для оценки эффективности механической обработки резанием, не прибегая к экономическим методам оценки. Это позволит производить выбор оптимальных параметров обработки, а также сравнение и выбор технологических способов обработки, выполняя по сути структурно параметрический анализ и синтез технологических процессов, обеспечивая направленный выбор оптимальных вариантов технологических маршрутов и параметров технологических операций.

Зависимость (15) можно представить в следующем виде:

$$Z = N \cdot A \cdot t_0 \cdot \left(\frac{S_1 \cdot k}{A} + \frac{S_{\text{елект}}}{t_0} \right). \quad (16)$$

Произведение параметров $A \cdot t_0$ определяет энергетический критерий «действие технологической системы» $D = A \cdot t_0$ [10], который предложено использовать в качестве основного параметра для выбора метода обработки поверхностей. Однако, наряду с этим параметром, в знаменатели двух слагаемых зависимости (16) входят самостоятельно параметры A и t_0 . Поэтому критерий D не может однозначно определять затраты на обработку Z и следовательно не может быть использован в качестве основного параметра для выбора метода обработки поверхностей. Основными параметрами необходимо рассматривать A и a , которые вполне однозначно определяют затраты на обработку Z и которые можно также, как и параметр Z самостоятельно использовать для оценки экономической эффективности различных способов обработки.

Выводы. Приведены аналитические зависимости для определения удельной работы (энергоёмкости обработки) процессов механической обработки резанием и установлены условия ее уменьшения. Показано, что уменьшение энергоёмкости обработки согласуется с условиями уменьшения затрат на обработку, связанных с заработной платой рабочего-станочника, расходом режущих инструментов и электроэнергии. Этим доказана возможность оценки эффективности применения процессов механической обработки резанием на основе анализа энергоёмкости обработки, не прибегая к экономическим методам оценки. Это позволяет производить выбор рациональных процессов механической обработки резанием с использованием технических параметров, таких как энергоёмкость обработки и работа резания.

Список литературы

1. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Гусарев В. С. Технологическая энергоэкономика / В. С. Гусарев // Вісник Інженерної Академії України. – Київ, 2001. – Вип. 3 (частина 1). – С. 174–176.
3. Гусарев В. С. Энергетическая эффективность технологических процессов / В. С. Гусарев // Авиационно-космическая техника и технология: Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков: ГАУ им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2000. – Вып. 14. – С. 41–44.
4. 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.
5. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
6. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування: монографія / Ф. В. Новіков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с.
7. Кремнев Г. П. Системы технологий: учебное пособие / Г. П. Кремнев, Ф. В. Новиков, В. М. Колесник. – Днепропетровск: ЛІРА, 2015. – 140 с.
8. Технология обработки типовых деталей: учебное пособие / Г.П. Кремнев, В.М. Колесник, Ф.В. Новиков и др. – Харьков: Изд-во "С.А.М.", 2014. – 156 с.
9. Жовтобрюх В.А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных параметров операций по критерию себестоимости: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / В.А. Жовтобрюх. – Мариуполь, 2012. – 21 с.
10. Яровой Ю. В. Применение принципа наименьшего действия для выбора варианта технологического процесса / Ю. В. Яровой // Физические и компьютерные технологии : Труды 14-й Международ. науч.-техн. конф. (Харьков, 24–25 сентября 2008 г.). – Х. : ХНПК "ФЭД", 2008. – С. 181–182.

References (transliterated)

1. Matalin A. A. Tekhnologiya mashinostroeniya: uthebnik / A. A. Matalin. – L.: Mashinostroenie, 1985. – 496 s.
2. Gysarev V. S. Tekhnologitheskaya tnergoekonomika / V. S. Gysarev // Visnyk Inzhenernoy Akademiyi Ukrainy. – Kyiv, 2001. – Vyp. 3 (thastyna 1). – S. 174–176.
3. Gysarev V. S. Energetitheskaya effektivnost tekhnologitheskikh protsessov / V. S. Gysarev // Aviatsionno-kosmitheskaya tekhnika i tekhnologiya: Trudy Gosudarstvennogo aerokosmitheskogo universiteta im. N. E. Zhukovskogo «KhAI». – Kharkov: GAU im. N. E. Zhukovskogo «KhAI», 2000. – Vyp. 14. – S. 41–44.
4. Fiziko-matematitheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya / Pod obsh. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. – V 10 tomakh. – Odessa: ONPU, 2002. – T. 1. "Mekhanika rezaniya materialov". – 580 s.
5. Bobrov V. F. Osnovy teorii rezaniya metallov / V. F. Bobrov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 343 s.
6. Novikov F. V. Vysokoproduktyvne almazne shlifuvannya: monografiya / F. V. Novikov. – Kharkov: Vyd. KhNEU, 2014. – 412 s.
7. Kremnev G. P. Sistemy tekhnologiy: uthebnoe posobie / G. P. Kremnev, F. V. Novikov, V. M. Kolesnik. – Dnepropetrovsk: LIRA, 2015. – 140 s.
8. Tekhnologiya obrabotki tipovykh detaley: uthebnoe posobie / G. P. Kremnev, V. M. Kolesnik, F. V. Novikov i dr. – Kharkov: Izd-vo "S.A.M.", 2014. – 156 s.
9. Zhovtobriurh V. A. Povyshenie tffektivnosti mekhanitheskoy obrabotki detaley gidravlitheskikh sistem putem vybora ratsionalnykh parametrov operatsiy po kriteriyu sebestoimosti: avtoeff. diss. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 " Tekhnologiya mashinostroeniya" / V. A. Zhovtobriurh. – Mariupol, 2012. – 21 s.
10. Yarovoy Yu. V. Primenenie printsipa naimenshego deystviya dlya vybora varianta tekhnologitheskogo protsesssa / Yu. V. Yarovoy // Fizitheskie i kompiuternye tekhnologii: Trudy 14-oy Mezhdunar. nauthn.-tekhn. konf. (Kharkov, 24–25 sentyabrya 2008). – Kharkov: KhNPK "FED", 2008. – S. 181–182.

Поступила (received) 03.03.2016