

- Izd-vo «Science», 1979. – 328 p. (Rus.)
3. Shkil'ko V.V. Ekzoemissionnyy analysis of superficial layer of the real / V.V. Shkil'ko, V.V. Borisov, Yu.F. Nazarov // The Superficial layer, exactness, operating properties of details of machines and devices: Materials of the All-union scientific and technical seminar. M., 1986 – P. 41-43. (Rus.)
 4. Shkurupiy V.G. Pidvischennya to efficiency of technology of finish treatment of surfaces of details from a thin letter and ribbons: Diss on the receipt of sciences. degree of sciences : special. 05.02.08 «Technology» / of V.G. Shkurupiy – Odesa, 2006. – 21 p. (Ukr.)

Рецензент: С.С. Самогугин
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 12.04.2012

УДК 621.923

©Новиков Ф.В.¹, Жовтобрюх В.А.², Бенин Е.Ю.³

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПО КРИТЕРИЮ НАИМЕНЬШЕЙ СЕБЕСТОИМОСТИ

Получена аналитическая зависимость для определения себестоимости обработки с учетом основных изменяющихся статей затрат и установлены условия ее уменьшения. Доказано существование экстремума (минимума) себестоимости обработки от скорости резания и определены экстремальные значения основных параметров обработки, включая производительность, стойкость инструмента, количество инструментов, необходимых для обработки заданной партии деталей и т.д. Показана эффективность (с точки зрения уменьшения себестоимости и повышения производительности обработки) применения высокоскоростного резания. Установлена высокая степень сходимости теоретических и экспериментальных результатов.

Ключевые слова: себестоимость обработки, производительность, стойкость, эффективность высокоскоростное резание.

Новіков Ф.В., Жовтобрюх В.А., Бенин Є.Ю. Визначення оптимальних умов механічної обробки деталей машин за критерієм найменшої собівартості. Отримано аналітичну залежність для визначення собівартості обробки з урахуванням основних змінних статей витрат і встановлені умови її зменшення. Доведено існування екстремуму (мінімуму) собівартості обробки від швидкості різання й визначені екстремальні значення основних параметрів обробки, включаючи продуктивність, стійкість інструмента, кількість інструментів, необхідних для обробки заданої партії деталей і т.д. Показана ефективність (з погляду зменшення собівартості й підвищення продуктивності обробки) застосування високошвидкісного різання. Установлено високий ступінь збіжності теоретичних і експериментальних результатів.

Ключові слова: собівартість обробки, продуктивність, стійкість, ефективність високошвидкісне різання.

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Харьковский национальный экономический университет», г. Харьков

² инженер, ООО ВариУс, г. Днепропетровск

³ инженер, ООО «НПО «Свет шахтера», г. Харьков

F.V. Novikov, V.O. Zhovtobryukh, E.Yu. Benin. Determination of optimum terms machine parts mechanical treatment, according the criterion of the least production costs. Analytical dependence was received for determination of production costs with regard to the main changeable and the conditions for their decrease were determined. It was proved that there existed an extremum (minimum) of treatment production costs, depending on the cutting velocity and the ultimate values for the main parameters of treatment were designed, including productivity, tool's strength, the number of tools, required for the treatment of a given lot of parts etc. Efficiency (from point of diminishing of production costs and increase of the productivity of treatment) of application of the cutting was displayed. The high degree of possibility of likeness between theoretical and experimental results was shown.

Keywords: *treatment production costs treatment, productivity, firmness, efficiency the cutting.*

Постановка проблеми. В последние годы для обработки деталей машин наметилась тенденция применения современных металлорежущих станков типа «обрабатывающий центр» с ЧПУ, которые реализуют условия высокоскоростного резания и позволяют существенно повысить производительность и качество обработки [1, 2]. Вместе с тем, как показывает практика, в связи с высокой стоимостью данных станков и режущих инструментов (зарубежного производства) резко возрастает себестоимость обработки, и применение новых технологий высокоскоростной обработки становится экономически нецелесообразной.

Анализ последних исследований и публикаций. Для решения задачи эффективной механической обработки важно аналитически описать себестоимость обработки и определить условия ее уменьшения, теоретически и экспериментально установить влияние температурного фактора на стойкость режущего инструмента, производительность и качество обработки, который является доминирующим при высокоскоростном резании [1-4]. Это позволит научно обоснованно подойти к выбору оптимальных режимов резания и характеристик лезвийных инструментов при обработке на современных высокооборотных станках с ЧПУ.

Цель работы – обоснование оптимальных условий механической обработки по критерию себестоимости.

Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи проведем анализ себестоимости обработки C при продольном точении для четырех основных изменяющихся статей затрат. Первая статья учитывает затраты по заработной плате рабочего за обработку партии деталей. Вторая статья учитывает затраты по заработной плате рабочего, связанные с заменой изношенного инструмента. Третья и четвертая статьи учитывают затраты на режущий инструмент и электрическую энергию, потребляемую при обработке. Тогда

$$C = N \cdot t_0 \cdot S_{\text{час}} \cdot k + N_0 \cdot t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + N_0 \cdot Ц + N \cdot P \cdot t_0 \cdot S_{\text{элект}}, \quad (1)$$

- где N, N_0 – количество обрабатываемых деталей и потребляемых режущих инструментов;
 t_0 – основное технологическое время обработки, с;
 $S_{\text{час}}$ – тарифная ставка рабочего, грн/с;
 k – коэффициент, учитывающий всевозможные начисления на тарифную ставку рабочего;
 t_c – время, затрачиваемое на снятие затупившегося инструмента, установку переточенного и подналадку станка, с;
 $Ц$ – цена режущего инструмента, грн;
 P – эффективная мощность процесса резания, Вт;
 $S_{\text{элект}}$ – стоимость единицы электрической энергии, грн/Дж.

С учетом соотношений $N_0 = N/n$, $P = \sigma \cdot Q$, $n = T/t_0$, $t_0 = \vartheta/Q$ и $\vartheta_{\text{сум}} = N \cdot \vartheta$, получим

$$C = N \cdot t_0 \cdot S_{\text{час}} \cdot k + N \cdot \frac{t_0}{T} \cdot (t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + Ц) + \vartheta_{\text{сум}} \cdot \sigma \cdot S_{\text{элект}}, \quad (2)$$

- где n – количество деталей, обработанных одним инструментом;
 σ – условное напряжение резания (энергоёмкость обработки), Н/м²;

Q – производительность обработки, м³/с;
 T – стойкость режущего инструмента, с;
 \mathcal{G} – объем металла, снимаемого с одной детали, м³;
 $\mathcal{G}_{\text{сум}}$ – объем металла, снимаемого с N деталей, м³.

Как известно [1], с изменением режимов резания и других условий обработки параметр σ мало изменяется, для конкретного материала он остается почти одним и тем же. Поэтому третье слагаемое при заданном значении $\mathcal{G}_{\text{сум}}$ в первом приближении можно рассматривать постоянным. Тогда

$$C = N \cdot \frac{\mathcal{G}}{Q} \cdot S_{\text{чac}} \cdot k + N \cdot \frac{\mathcal{G}}{Q} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{чac}} \cdot k + \mathcal{C})}{T}, \quad (3)$$

где $Q = V \cdot t \cdot S$ – производительность обработки (при продольном точении), м³/с;
 V – скорость резания, м/мин;
 t – глубина резания, м;
 S – подача, м/об.

Исходя из зависимости (3), себестоимость обработки C уменьшается с уменьшением \mathcal{G} и увеличением Q . Однако, очевидно, с увеличением производительности обработки Q будет уменьшаться стойкость режущего инструмента T , что приведет к увеличению C . Следовательно, в общем виде имеет место неоднозначный характер изменения себестоимости обработки C от производительности Q .

Стойкость инструмента T для продольного точения описывается [1]:

$$T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}, \quad (4)$$

где C_4, m_1, q, p – постоянные для определенных условий обработки.

Подставим (4) в (3) с учетом $\alpha_1 = N \cdot \mathcal{G} \cdot S_{\text{чac}} \cdot k$; $\alpha_2 = N \cdot \frac{\mathcal{G} \cdot (t_c \cdot S_{\text{чac}} \cdot k + \mathcal{C})}{C_4}$:

$$C = \frac{\alpha_1}{Q} + \alpha_2 \cdot \frac{Q^{m_1-1}}{S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q}}. \quad (5)$$

Подчиним функцию C необходимому условию экстремума: $C'_Q = 0$. Тогда экстремальная производительность обработки $Q = Q_{\text{экстр}}$ определится

$$Q_{\text{экстр}} = \left[\frac{S_{\text{чac}} \cdot k \cdot C_4}{(t_c \cdot S_{\text{чac}} \cdot k + \mathcal{C}) \cdot (m_1 - 1)} \cdot S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q} \right]^{\frac{1}{m_1}}. \quad (6)$$

Как видно, экстремальное значение производительности обработки $Q_{\text{экстр}}$ тем больше, чем больше параметры C_4, S, t и меньше t_c, \mathcal{C} . Следовательно, глубину резания t целесообразно устанавливать равной величине снимаемого припуска. Подачу S также следует устанавливать максимально возможной исходя из условий прочности инструмента или мощности привода станка.

Увеличение параметра C_4 может быть достигнуто за счет повышения физико-механических свойств инструментального материала. Однако, это предполагает увеличение цены инструмента \mathcal{C} . Соответствующие экстремальному значению производительности обработки $Q_{\text{экстр}}$, экстремальные значения скорости резания $V_{\text{экстр}}$, стойкости инструмента $T_{\text{экстр}}$, основного технологического времени обработки $t_{0\text{экстр}}$, количества деталей, обрабатываемых одним инструментом $n_{\text{экстр}}$, количества потребляемых режущих инструментов $N_{0\text{экстр}}$ и минимальное значение себестоимости обработки C определяются зависимостями

$$V_{\text{экстр}} = \frac{Q_{\text{экстр}}}{S \cdot t} = \left[\frac{S_{\text{час}} \cdot k \cdot C_4}{(t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + \Pi) \cdot (m_1 - 1)} \right]^{\frac{1}{m_1}} \cdot \frac{1}{S^{\frac{p}{m_1}} \cdot t^{\frac{q}{m_1}}}; \quad (7)$$

$$T_{\text{экстр}} = \frac{(t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + \Pi) \cdot (m_1 - 1)}{S_{\text{час}} \cdot k}; \quad (8)$$

$$t_{0\text{экстр}} = \frac{\vartheta}{Q_{\text{экстр}}} = \vartheta \cdot \left[\frac{(t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + \Pi) \cdot (m_1 - 1)}{S_{\text{час}} \cdot k \cdot C_4} \cdot \frac{1}{S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q}} \right]^{\frac{1}{m_1}}; \quad (9)$$

$$n_{\text{экстр}} = \frac{T_{\text{экстр}}}{t_{0\text{экстр}}} = \frac{1}{\vartheta} \cdot \left[\frac{(t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + \Pi) \cdot (m_1 - 1)}{S_{\text{час}} \cdot k} \right]^{1-\frac{1}{m_1}} \cdot (C_4 \cdot S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q})^{\frac{1}{m_1}}; \quad (10)$$

$$N_{0\text{экстр}} = \frac{N}{n_{\text{экстр}}} = N \cdot \vartheta \cdot \left[\frac{S_{\text{час}} \cdot k}{(t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + \Pi) \cdot (m_1 - 1)} \right]^{1-\frac{1}{m_1}} \cdot \left(\frac{1}{C_4 \cdot S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q}} \right)^{\frac{1}{m_1}}; \quad (11)$$

$$C_{\min} = \frac{N \cdot \vartheta \cdot S_{\text{час}} \cdot k}{Q_{\text{экстр}}} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right]. \quad (12)$$

На рис. 1 в обобщенном виде показаны условия уменьшения себестоимости и повышения производительности механической обработки.



Рис. 1 – Структурная схема условий уменьшения себестоимости и повышения производительности механической обработки

Произведем количественную оценку зависимости (5). Для этого представим производительность обработки в виде $Q = z \cdot Q_{\text{экстр}}$, где $z > 0$ – некоторая положительная величина. Тогда зависимость (5) выразится

$$C = \frac{1}{S^{\frac{1-p}{m_1}} \cdot t^{\frac{1-q}{m_1}}} \cdot \left[\frac{\alpha_2 \cdot (m_1 - 1)}{\alpha_1} \right]^{\frac{1}{m_1}} \cdot \alpha_1 \cdot \left[\frac{1}{z} + \frac{z^{m_1-1}}{(m_1 - 1)} \right]. \quad (13)$$

Относительная себестоимость обработки \bar{C} описывается

$$\bar{C} = \bar{C}_1 + \bar{C}_2 = \frac{1}{z} + \frac{z^{m_1-1}}{(m_1-1)} \quad (14)$$

В работе [1] показано, что при точении углеродистой конструкционной стали твердосплавным резцом параметры $m_1 = 5$; $p = 1,75$; $q = 0,75$. Принимая $m_1 = 5$, по зависимости (14) определим первое и второе слагаемые, а также \bar{C} (таблица, рис. 2). Как следует из таблицы, с увеличением z себестоимость обработки \bar{C} изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума (при $z=1$). Первое слагаемое в точке минимума себестоимости в 4 раза больше второго слагаемого.

Таблица

Расчетные значения величин $\bar{C}_1 = 1/z$, $\bar{C}_2 = 0,25 \cdot z^4$, $\bar{C} = 1/z + 0,25 \cdot z^4$ и \bar{C}_1 / \bar{C}_2

z	0,1	0,5	1	2	3
$\bar{C}_1 = 1/z$	10	2	1	0,5	0,33
$\bar{C}_2 = 0,25 \cdot z^4$	$0,25 \cdot 10^{-4}$	0,015	0,25	4	20,25
$\bar{C} = 1/z + 0,25 \cdot z^4$	10	2,015	1,25	4,5	20,58
\bar{C}_1 / \bar{C}_2	$40 \cdot 10^4$	133,3	4	0,0625	0,016

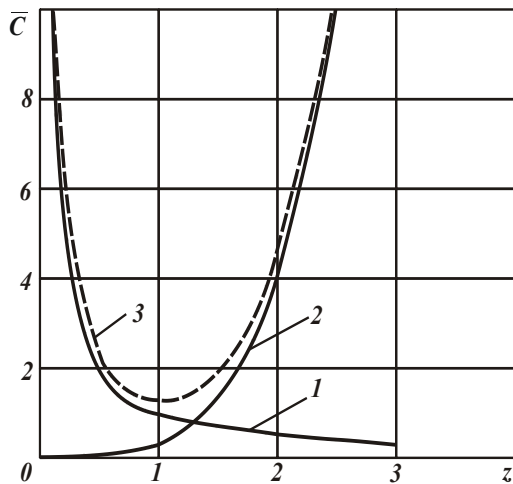


Рис. 2 – Характер изменения функций: 1 – $1/z$; 2 – $0,25 \cdot z^4$; 3 – $1/z + 0,25 \cdot z^4$ для $m_1 = 5$

С целью оценки достоверности теоретических решений были проведены экспериментальные исследования операции фрезерования труднообрабатываемого материала Х2ГСНВМ-ВД. Сравнивались два варианта фрезерования: монолитной фрезой $\varnothing 40$ мм (изготовленной из быстрорежущей стали P18) и сборной фрезой $\varnothing 42$ мм (оснащенной пластинами из ТТ9030) производства фирмы TaeguTec. Количество зубьев у фрез – 5; глубина резания – 2,5 мм; ширина резания – 6 мм; количество проходов – 12. Экспериментально установлено, что оптимальная стойкость сборной фрезы составляет $T = 256$ мин (4,26 час), обработка ведется со скоростью резания 99 м/мин и подачей 0,75 мм/об. Оптимальная стойкость монолитной фрезы – $T = 384$ мин (6,4 час), обработка ведется со скоростью резания 16 м/мин и подачей 0,3 мм/об.

Произведен расчет оптимальной (экономичной)

стойкости инструмента $T_{экстр}$ по зависимости (8) с учетом следующих исходных данных Сборная фреза состоит из корпуса стоимостью 1200 грн и 5 режущих пластин стоимостью 40 грн за каждую, количество режущих кромок у пластины – 4. Ресурс работы корпуса фрезы (количество циклов замены кромок) равен 400. В связи с этим, расчетную цену сборной фрезы можно рассматривать без учета стоимости его корпуса, тогда $C = 50$ грн. Как установлено экспериментально, время на смену инструмента равно $t_c = 5$ мин. Тарифная ставка рабочего составляет $S_{час} = 12$ грн/час, а коэффициент $k = 2$. Безразмерный параметр $m_1 = 3$. Подставляя эти данные в зависимость (8), получено: $T_{экстр} = 4,3$ час = 260 мин. Как видно, расхождение расчетного и экспериментального значений $T_{экстр}$ незначительно (находится в пределах 10%, рис. 3).

При расчете оптимальной стойкости монолитной фрезы $\varnothing 40$ мм (изготовленной из быстрорежущей стали P18) исходили из следующего. Стоимость фрезы составляет 138 грн. Однако она допускает 20 перезаточек (ресурс работы фрезы после перезаточки равен 100 %). Затраты на 1 перезаточку составляют

20 грн. Исходя из этого, в качестве расчетной цены инструмента следует рассматривать $C = 20$ грн. Время на замену инструмента составляет $t_c = 15$ мин. Экспериментально установлено, что безразмерный параметр $m_1 = 6$. Подставляя эти данные в зависимость (8) с учетом $S_{\text{час}} = 12$ грн/час и $k = 2$, получено: $T_{\text{экспр}} = 5,42$ час = 325 мин. Как видно, отличие расчетного и экспериментального значений $T_{\text{экспр}}$ не превышает 15 %, что вполне допустимо для практического использования зависимости (8).

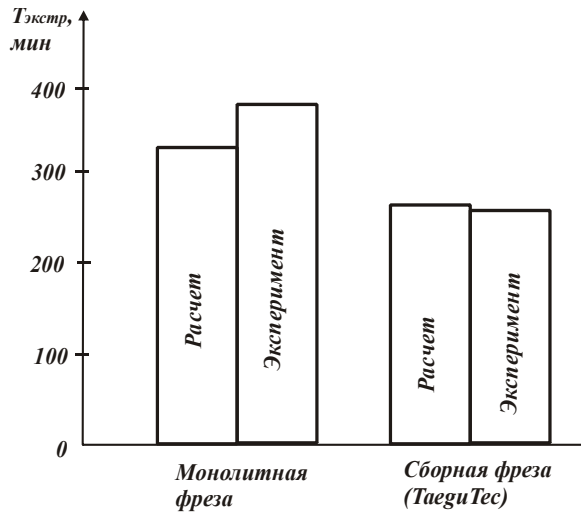


Рис. 3 – Диаграмма распределения значений $T_{\text{экспр}}$ при фрезеровании

Таким образом показано, что экспериментально установленные значения оптимальной (экономичной) стойкости сборной и монолитной фрез примерно соответствуют минимуму себестоимости обработки (установленного теоретически), т. е. обработка ведется на оптимальных режимах резания. В связи с этим, определим соотношение двух статей затрат, связанных с заработной платой рабочего и расходом инструментов за период их стойкости. При обработке сборной фрезой затраты на заработную плату рабочего составляют $Z_{z/n} = T \cdot Z_{\text{час}} \cdot k = 4,26 \cdot 12 \cdot 2 = 102,24$ грн, а затраты на инструмент – $Z_{\text{инстр}} = C = 50$ грн (рис. 4).

Отношение затрат равно $Z_{z/n} / Z_{\text{инстр}} = 2$ (рис. 5).

Исходя из зависимости (12), отношение двух рассматриваемых затрат для $m_1 = 3$ равно 2, т.е. расчетное и экспериментальное значения совпадают.

Это свидетельствует о достоверности полученного теоретического решения, а также о том, что минимум себестоимости обработки реализуется при условии 2-х кратного превышения затрат по заработной плате над затратами на инструмент.

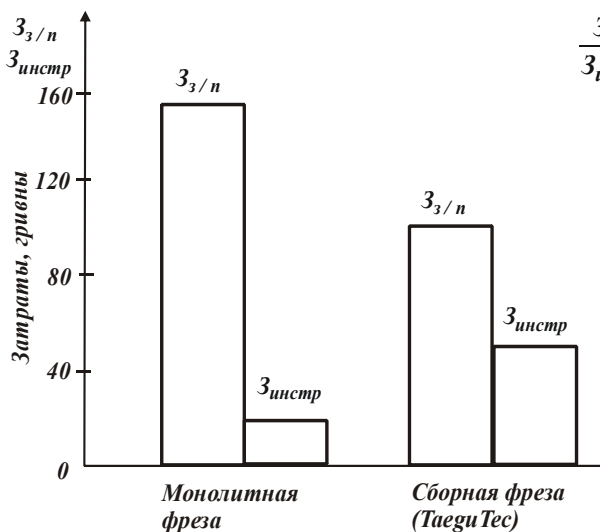


Рис. 4 – Диаграмма распределения значений затрат $Z_{z/n}$ и $Z_{\text{инстр}}$

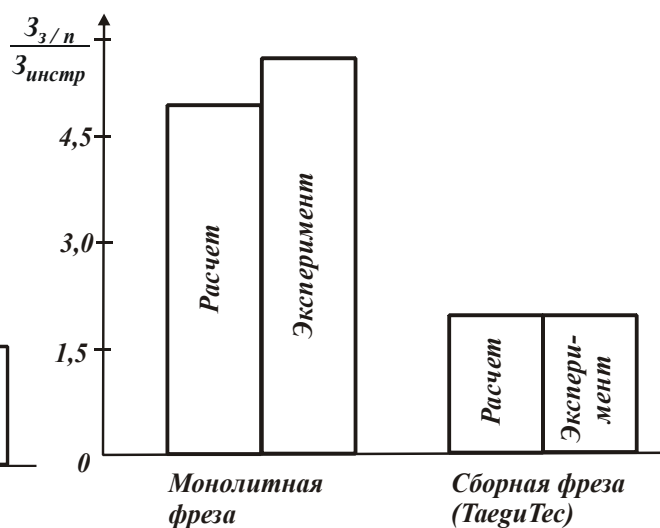


Рис. 5 – Диаграмма распределения значений отношения $Z_{z/n} / Z_{\text{инстр}}$

Такая же закономерность имеет место и при фрезеровании монолитной фрезой. Затраты на заработную плату рабочего составляют $Z_{z/n} = T \cdot Z_{\text{час}} \cdot k = 6,4 \cdot 12 \cdot 2 = 153,60$ грн, а затраты на

инструмент – $Z_{инстр} = C = 20$ грн (рис. 4). Отношение затрат равно $Z_{з/n} / Z_{инстр} = 5,69$ (рис. 5). Согласно зависимости (12), отношение этих двух рассматриваемых затрат для $m_1 = 6$ равно 5. Следовательно, расчетное и экспериментальное значения данного отношения отличаются незначительно (в пределах 15 %).

Выводы

1. Получена аналитическая зависимость для определения себестоимости обработки с учетом основных изменяющихся статей затрат и установлены условия ее уменьшения.
2. Доказано существование экстремума (минимума) себестоимости обработки от скорости резания и определены экстремальные значения основных параметров обработки, включая производительность, стойкость инструмента, количество инструментов, необходимых для обработки заданной партии деталей и т.д.
3. Показана эффективность (с точки зрения уменьшения себестоимости и повышения производительности обработки) применения высокоскоростного резания. Установлена высокая степень сходимости теоретических и экспериментальных результатов.

Список использованных источников:

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343с.
2. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
3. Жовтобрюх В.А. Теоретический анализ условий уменьшения себестоимости механической обработки / В.А. Жовтобрюх // Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2011. – Вип. 115. – С. 68-73.
4. Новиков Ф.В. Расчет параметров режимов резания по критериям наименьшей себестоимости и наибольшей производительности обработки / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы научн.-техн. конф., 19-22 сентября 2011 г., г. Одесса. – Киев: АТМ України, 2011. – 148-151.

Bibliography:

1. Bobrov V.F. Bases of theory of cutting of metals / V.F. Bobrov. – M.: Engineer, 1975. – 343c. (Rus.)
2. Matalin A.A. Technology of engineer: textbook / A.A. Matalin. – L.: Engineer, 1985. – 496 p. (Rus.)
3. Zhovtobryukh V.A. Theoretical analysis of terms of diminishing of prime price of tooling / V.A. Zhovtobryukh // Announcer of the Kharkov national technical university of agriculture Petra Vasilenka. – Kharkiv: KHNTUSG, 2011. is Vip. 115. – P. 68-73. (Rus.)
4. Novikov f.V. Calculation of parameters of the modes of cutting on the criteria of the least prime price and most productivity of treatment / F.V. Novikov, V.A. Zhovtobryukh // New and untraditional technologies in pecypco- and energy-savings : materials of science. conf., on Septembers, 19-22, 2011, Odessa. – Kiev: ATM of Ukraine, 2011. – 148-151. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самогугин
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 12.04.2012