

А.Н. Михайлов, д.т.н.,
Т.Г. Ивченко, к.т.н.,
И.А. Петряева, аспирант
(Донецкий национальный технический университет, Украина)
E-mail: irina_petryaeva@mail.ru

Многокритериальная оптимизация режимов резания при чистовом точении фасонных поверхностей в условиях переменности действующих ограничений

Приведены результаты исследований переменности параметров процесса резания при точении фасонных поверхностей деталей. Представлена методика многокритериальной оптимизации режимов точения фасонных поверхностей с учетом переменности действующих ограничений. Даны рекомендации по выбору оптимальных режимов резания по критериям производительности, себестоимости и их свертке.

Ключевые слова: оптимизация; производительность; себестоимость; режимы резания; ограничение; фасонная поверхность.

A.N. Mikhailov, D. Eng.,
T.G. Ivchenko, Can. Eng.,
I.A. Petryaeva, Post graduate student
(Donetsk National Technical University, the Ukraine)

Multi-criterion optimization of cutting modes at profiled surface finish turning under conditions of variability in limitations in force

The paper reports the results in investigations of cutting parameter variability at profiled surfaces turning. The procedure of the multi-criterion optimization of profiled surfaces turning modes taking into account of variability in the limitations in force is presented. The recommendations on choice of optimum cutting modes based on the criteria of productivity, cost price and their compression are shown.

Keywords: optimization; productivity; cost price; cutting modes; limitation; profiled surface.

Задачи повышения эффективности производства успешно решаются на основе оптимизации параметров механической обработки. Современные тенденции в оптимизации – решение многокритериальных задач, обеспечивающих одновременное улучшение параметров обработки по различным критериям. Одним из направлений многокритериальной оптимизации является использование мульти-

ликативной свертки критериев, позволяющих различные критерии оптимизации привести к единому показателю, обеспечивающему наилучшее сочетание каждого из них [1, 2].

Особенностью существующих методик оптимизации является постоянство, как самой целевой функции, так и действующих ограничений. Однако в ряде случаев параметры процесса резания закономерно изменяются, на-

пример, при обработке фасонных поверхностей, в связи с чем, и действующие ограничения становятся переменными.

Методика определения с использованием метода линейного программирования оптимальных по критерию максимальной производительности режимов точения с учетом переменности параметров обработки фасонных поверхностей представлена в работе [3].

В работе [4] с использованием метода геометрического программирования выполнена оптимизация режимов точения фасонных поверхностей по критерию минимальной себестоимости с учетом переменности действующих температурных ограничений и ограничений по прочности режущей пластины. В указанных работах решаются задачи однокритериальной оптимизации режимов резания.

Цель представляемой работы – совершенствование методики многокритериальной оптимизации режимов резания при чистовом точении фасонных поверхностей с учетом переменности действующих ограничений.

Обработка фасонных поверхностей требует сложной кинематики относительного движения заготовки и режущего инструмента и характеризуется переменными значениями технологических параметров, определяющих условия обработки.

Схема для определения переменных вдоль криволинейной образующей вогнутой фасонной поверхности с постоянным радиусом кривизны ρ (начало принятой системы координат является центром кривизны) геометрических

параметров инструмента и параметров среза представлена на рис. 1. Положение вершины лезвия определяется мгновенным углом поворота $\psi_i = \arcsin(\xi_i)$ ($\xi_i = x_i / \rho$ – безразмерная координата).

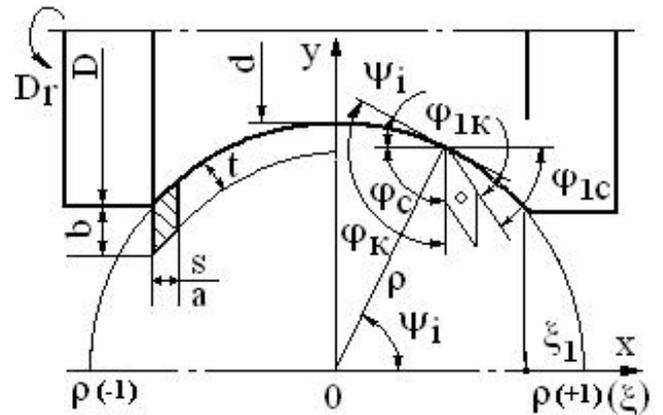


Рис. 1. Схема определения параметров обработки при точении вогнутых фасонных поверхностей

Безразмерная координата ξ_1 , определяющая область возможной обработки вогнутой поверхности, определяется из условия $\xi_1 = \cos(\varphi_{1C})$, что соответствует значению вспомогательного угла в плане $\varphi_{1K} = 0$.

Закономерности изменения основных параметров процесса резания при точении фасонных поверхностей: геометрических параметров инструмента, параметров среза, скорости резания и подачи представлены в таблице.

Результаты анализа переменности параметров процесса резания

Переменные параметры процесса резания	Коэффициенты изменения параметров вдоль криволинейной образующей
Главный угол в плане $\varphi_K(\xi) = \varphi_C - \arcsin\xi = k_\varphi(\xi) \varphi_C$	$k_\varphi(\xi) = 1 - (\arcsin\xi)/\varphi_C$
Вспомогательный угол $\varphi_{1K}(\xi) = \varphi_{1C} + \arcsin\xi = k_{\varphi_1}(\xi) \varphi_{1C}$	$k_{\varphi_1}(\xi) = 1 + (\arcsin\xi)/\varphi_{1C}$
Толщина среза $a(\xi) = S \cdot \sin(\varphi_C - \arcsin\xi) = k_a(\xi) a$	$k_a(\xi) = (\sin(\varphi_C - \arcsin\xi))/\sin\varphi_C$
Ширина среза $b(\xi) = t/\sin(\varphi_C - \arcsin\xi) = k_b(\xi) b$	$k_b(\xi) = \sin\varphi_C/\sin(\varphi_C - \arcsin\xi)$
Скорость резания $v(\xi) = v_d k_v(\xi)$	$K_v(\xi) = 1 \pm (1 - \cos(\arcsin(\xi)))/2\delta$
Кинематическая подача $S_K(\xi) = S k_s(\xi)$	$k_s(\xi) = 1/\sin(\varphi_C - \arcsin\xi)$

Вследствие переменности указанных параметров процесса резания основные ограничения при чистовой обработке фасонных поверхностей – ограничения по температуре резания Θ и параметр шероховатости обработанной поверхности Ra так же становятся переменными вдоль криволинейной образующей:

$$\begin{aligned} R_a(\xi) &= C_R k_R(\xi) S^{y_r}; \\ \Theta(\xi) &= \tilde{N}_\Theta k_\Theta(\xi) V^{n_t} S^{y_t} t^{x_t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где C_R – коэффициент и y_r – показатель степени, учитывающий влияние подачи на шероховатость обработанной поверхности; C_Θ – коэффициент и n_t, y_t, x_t – показатели степени, учитывающие влияние скорости резания, подачи и глубины резания на температуру резания; $k_R(\xi), k_\Theta(\xi)$ – безразмерные коэффициенты, характеризующие относительное изменение шероховатости обработанной поверхности Ra и температуры резания Θ вдоль безразмерной координаты ξ , в сравнении со значениями этих параметров в точке, соответствующей началу принятой системы координат

$$\begin{aligned} k_R(\xi) &= Ra(\xi)/Ra(0), \quad k_\Theta(\xi) = \Theta(\xi)/\Theta(0); \\ k_R(\xi) &= k_S(\xi)^{y_r}; \\ k_\Theta(\xi) &= k_S(\xi)^{y_t} k_V(\xi)^{n_t}. \end{aligned}$$

При решении задач оптимизации в качестве основных критериев оптимизации принимаются переменные части производительности P и себестоимости C , зависящие от режимов резания. В качестве дополнительного критерия оптимизации предлагается мультипликативная свертка этих критериев, представляющая собой отношение переменных частей себестоимости и производительности, зависящих от режимов резания $C_M = P/C$ [1, 2].

Целевые функции, выражающие зависимость критериев от скорости резания v и подачи S представляются в виде:

$$\begin{aligned} P &= vS \rightarrow \max; \\ C &= v^{-1} S^{-1} + MK_\Theta^{-1/mn_t} v^{k_v} S^{k_S}; \\ C_M &= v^{-2} S^{-2} + MK_\Theta^{-1/mn_t} v^{k_v-1} S^{k_S-1}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $M = (t_c + A_u/A)(t^{x_v}/C_v K_v)^{1/m}$; $k_v = 1/m - 1$; $k_S = y_v/m - 1$; A – стоимость станко-минуты; A_u – стоимость одного периода стойкости инструмента; t_c – время смены инструмента; C_v, K_v – коэффициенты и x_v, y_v, m – показатели, характеризующие степень влияния глубины t , подачи S и стойкости T на скорость резания v ; $K_\Theta = \Theta_0/\Theta$ – коэффициент снижения температуры резания Θ при превышении ею допустимого уровня Θ_0 .

Для обеспечения возможности сравнительного анализа указанные целевые функции (1) целесообразно представить в относительном виде, где в качестве базы для сравнения приняты их значения при оптимальных режимах резания – подачах S_0 и скоростях v_0 :

$$\begin{aligned} K_P &= P(v,S)/P(v_0,S_0); \quad K_C = C(v,S)/C(v_0,S_0); \\ K_M &= C_M(v)/C_M(v_0,S_0). \end{aligned}$$

Графики двухпараметрической зависимости относительных целевых функций производительности K_P , себестоимости K_C и их свертки K_M от скорости резания v и подачи S представлены на рис. 2.

Графики изменения относительных целевых функций производительности K_P , себестоимости K_C и их свертки K_M в зависимости от скорости резания v приведены на рис. 3.

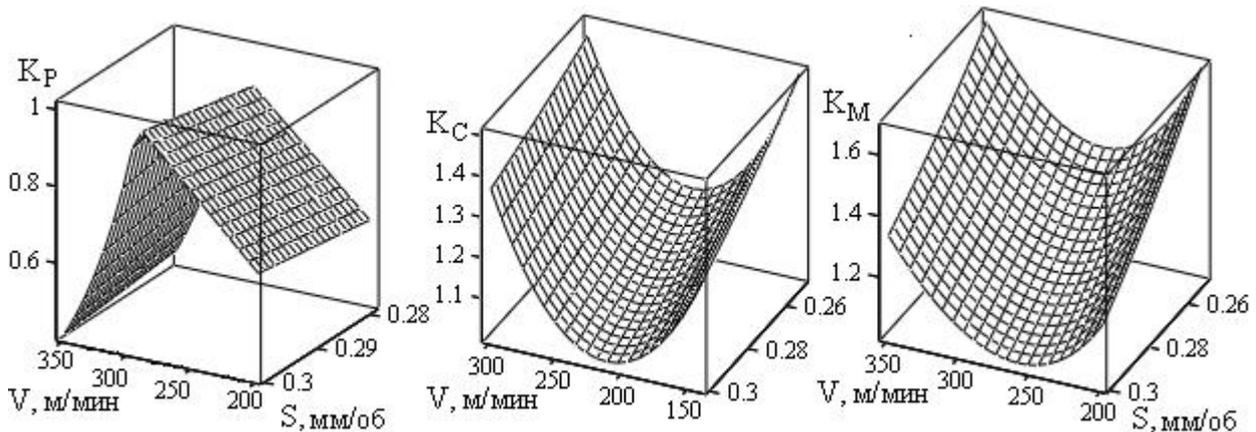


Рис. 2. Графики изменения целевых функций производительности K_P , себестоимости K_C и их свертки критериев K_M в зависимости от скорости резания v и подачи S

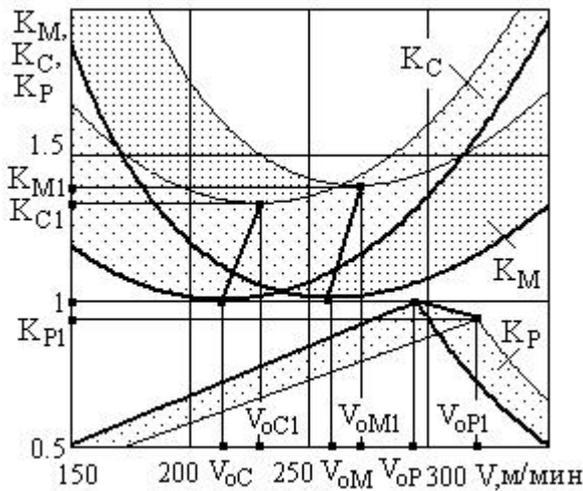


Рис. 3. Графики зависимости целевых функций производительности K_P , себестоимости K_C и их свертки K_M от скорости резания v

Условия обработки: чистовое точение стали 45 резцами Т15К6 (передний угол $\gamma = 0^\circ$; главный угол в плане $\phi = 90^\circ$, вспомогательный $\phi_1 = 35^\circ$; радиус при вершине $r = 1$ мм); глубина резания $t = 1$ мм; параметр шероховатости обработанной поверхности $Ra = 2,5$ мкм. Температура резания Θ для указанных условий не превышает допустимого уровня, коэффициент $K_\Theta = 1$.

С учетом переменности ограничений по шероховатости обработанной поверхности целевые функции находятся в некоторой области, ограниченной кривыми $K_P(v_{oP}, S_0)$, $K_C(v_{oC}, S_0)$, $K_M(v_{oM}, S_0)$ с одной стороны и $K_P(v_{oP1}, S_{o1})$, $K_C(v_{oC1}, S_{o1})$, $K_M(v_{oM1}, S_{o1})$ – с другой. Принято значение подачи $S_{o1} = 0,7S_0$. Для указанных условий установлены диапазоны изменения оптимальных скоростей резания (при $S_0 = 0,3$ мм/об):

$$\begin{aligned} v_{oP} &= 293 \text{ м/мин}, v_{oP1} = 315 \text{ м/мин}; \\ v_{oC} &= 212 \text{ м/мин}, v_{oC1} = 228 \text{ м/мин}; \\ v_{oM} &= 258 \text{ м/мин}, v_{oM1} = 270 \text{ м/мин}. \end{aligned}$$

Графики свидетельствуют о наличии экстремумов: максимума у функции производительности K_P и минимума у функций себестоимости K_C и их свертки K_M , причем $K_P(v_{oP}, S_0) = K_C(v_{oC}, S_0) = K_M(v_{oM}, S_0) = 1$; $K_{P1}(v_{oP1}, S_{o1}) = 0,9$; $K_{C1}(v_{oC1}, S_{o1}) = 1,34$; $K_{M1}(v_{oM1}, S_{o1}) = 1,40$. Следовательно, при обработке вогнутых поверхностей учет переменности ограничений приводит к снижению производительности и повышению себестоимости.

Обеспечивая за счет выбора оптимальной по себестоимости скорости резания v_{oC} минимум себестоимости ($K_C(v_{oC}) = 1$), получаем

снижение производительности в 1,4 раза ($K_P(v_{oC}) = 0,72$). Выбирая скорость резания v_{oP} оптимальную по производительности, обеспечиваем максимум производительности ($K_P(v_{oP}) = 1$), но получаем повышение себестоимости в 1,3 раза ($K_C(v_{oP}) = 1,3$). Таким образом, обеспечивая экстремальный уровень одного из критериев, мы существенно ухудшаем другой. Минимальные потери каждой из целевых функций – производительности ($K_P(v_{oM}) = 0,88$) и себестоимости ($K_C(v_{oM}) = 1,1$) достигаются при выборе оптимальной по свертке критериев себестоимости и производительности скорости резания v_{oM} .

При чистовом точении стали 95Х18 в указанных ранее условиях обработки температура резания Θ превышает допустимый уровень, коэффициент $K_\Theta < 1$.

Графики изменения относительных целевых функций производительности K_P , себестоимости K_C и их свертки K_M , учитывающие температурные ограничения, в зависимости от скорости резания v приведены на рис. 4, а. В этом случае, независимо от критерия оптимизации, оптимальная скорость $v_{o\Theta} = 58$ м/мин.

С учетом переменности ограничений по температуре резания и шероховатости обработанной поверхности оптимальная скорость резания $v_{o\Theta1} = 62$ м/мин. Графики свидетельствуют о наличии экстремумов: максимума у функции производительности K_P и минимума у функций себестоимости K_C и их свертки K_M , причем

$$\begin{aligned} K_P(v_{oP}, S_0) &= K_C(v_{oC}, S_0) = K_M(v_{oM}, S_0) = 1; \\ K_{P1}(v_{oP1}, S_{o1}) &= 0,95; K_{C1}(v_{oC1}, S_{o1}) = 1,35; \\ K_{M1}(v_{oM1}, S_{o1}) &= 1,40. \end{aligned}$$

Учет температурных ограничений существенно уменьшает оптимальные скорости резания и производительность обработки. Снятие температурных ограничений за счет использования смазочно-охлаждающих технологических сред, использования инструментов с покрытиями [5], позволяет повысить оптимальные скорости резания.

Графики изменения относительных целевых функций производительности K_P , себестоимости K_C и их свертки K_M при снятии температурных ограничений в зависимости от скорости резания v , представленные на рис. 4, б, аналогичны графикам на рис. 3. Диапазоны изменения оптимальных скоростей резания в связи с переменностью ограничений: $v_{oP} = 93$ м/мин, $v_{oP1} = 105$ м/мин; $v_{oC} = 67$ м/мин, $v_{oC1} = 78$ м/мин; $v_{oM} = 88$ м/мин, $v_{oM1} = 97$ м/мин.

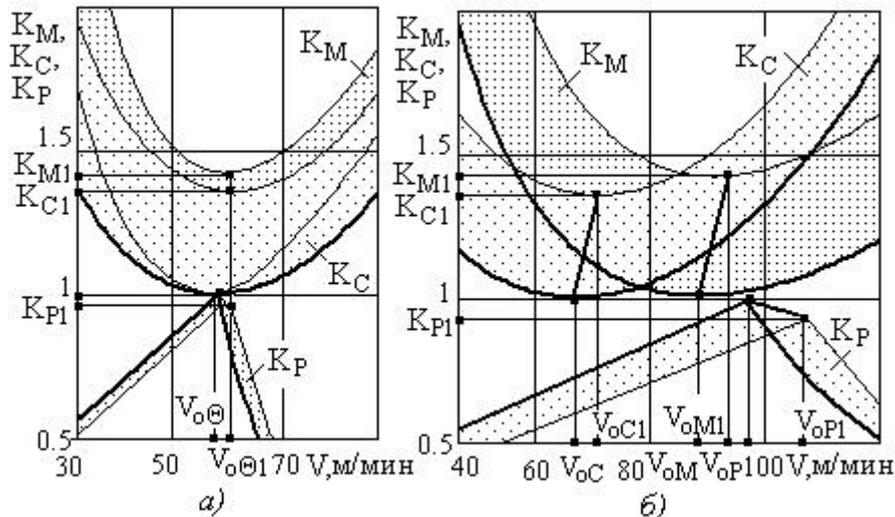


Рис. 4. Графики зависимости целевых функций производительности K_P , себестоимости K_C и их свертки K_M от скорости резания v с учетом температурных ограничений (а), при снятии температурных ограничений (б)

Графики свидетельствуют о наличии экстремумов: максимума у функции производительности K_P и минимума у функций себестоимости K_C и их свертки K_M , причем

$$K_P(v_{oP}, S_o) = K_C(v_{oC}, S_o) = K_M(v_{oM}, S_o) = 1;$$

$$K_{P1}(v_{oP1}, S_{o1}) = 0,9; K_{C1}(v_{oC}, S_o) = 1,3;$$

$$K_{M1}(v_{oM}, S_o) = 1,40.$$

В связи с переменностью действующих ограничений по температуре резания и шероховатости обработанной поверхности переменными вдоль криволинейной образующей становятся и оптимальные режимы резания.

Оптимальная подача при чистовом точении S_o , независимо от критерия оптимизации определяется, исходя из требуемой шероховатости обработанной поверхности Ra . Независимо от критерия оптимизации определяется скорость резания при наличии температурных ограничений $v_{o\Theta}$.

Необходимость учета температурных ограничений определяется на основании граничного значения коэффициента снижения температуры резания $K_{\Theta o} = \Theta_o / \Theta(v_o, S_o)$. При отсутствии температурных ограничений оптимальные скорости резания определяются с учетом критерия оптимизации: для критерия максимальной производительности – v_{oP} ; для критерия минимальной себестоимости – v_{oC} ; для свертки критериев – v_{oM} .

$$S_o(\xi) = K_S(\xi) (Ra / C_R)^{1/y_r};$$

$$v_{o\Theta}(\xi) = K_{V\Theta} (\Theta / C_{\Theta} t^{x_t} S_o^{y_t})^{1/n_t}$$

при $K_{\Theta o} = \Theta_o / v_o^{n_t} S_o^{y_t} t^{x_t} \leq 1;$

$$v_{oP}(\xi) = K_V(\xi) C_V K_V / T^m t^{x_v} S_o^{y_v}; \quad (3)$$

$$v_{oC}(\xi) = K_V(\xi) (m / (1 - m) M)^m S_o^{y_v};$$

$$v_{oM}(\xi) = K_V(\xi) (2m / (1 - 2m) M)^m S_o^{y_v},$$

где $K_S(\xi)$, $K_{V\Theta}(\xi)$, $K_V(\xi)$ – безразмерные коэффициенты, характеризующие относительное изменение оптимальных подач S_o и скоростей резания v_o вдоль безразмерной координаты ξ , в сравнении со значениями этих параметров в точке, соответствующей началу принятой системы координат $K_S(\xi) = S_o(\xi) / S_o(0)$; $K_{V\Theta}(\xi) = v_{o\Theta}(\xi) / v_{o\Theta}(0)$; $K_V(\xi) = v_o(\xi) / v_o(0)$.

$$K_S(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^{y_r};$$

$$K_V(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^{-y_v};$$

$$K_{V\Theta}(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^{-y_v / n_t}. \quad (4)$$

Графики распределения вдоль безразмерной координаты ξ безразмерных коэффициентов, характеризующих относительное изменение шероховатости обработанной поверхности $k_R(\xi)$ и температуры резания $k_{\Theta}(\xi)$, а так же безразмерные коэффициенты, характеризующие относительное изменение оптимальных подач $K_S(\xi)$ и скоростей резания $K_{V\Theta}(\xi)$, $K_V(\xi)$ представлены на рис. 5 (область невозможной обработки вогнутой поверхности заштрихована).

Представленные коэффициенты характеризуют общие закономерности изменения оптимальных режимов резания вдоль безразмерной координаты и позволяют рассчитывать оптимальные подачи и скорости резания в любой точке криволинейной образующей фасонной поверхности.

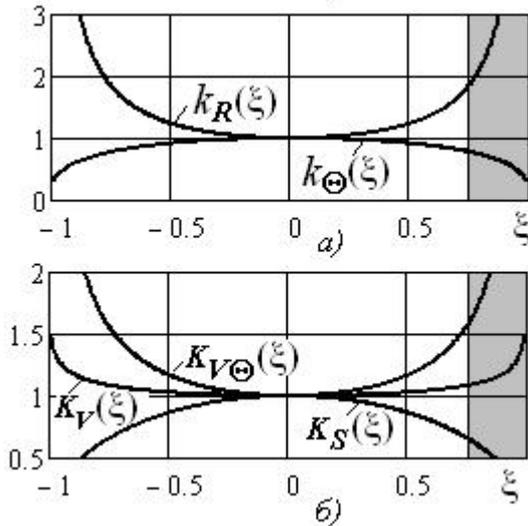


Рис. 5. Графики распределения вдоль безразмерной координаты ξ безразмерных коэффициентов $k_R(\xi)$, $k_\Theta(\xi)$ – (а) и $K_S(\xi)$, $K_{V\Theta}(\xi)$, $K_V(\xi)$ – (б)

Таким образом, разработанная методика многокритериальной оптимизации режимов резания при чистовом точении фасонных поверхностей позволяет учитывать переменность действующих ограничений по шероховатости обработанной поверхности и температуре резания при расчете оптимальных подач и скоростей резания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ивченко, Т.Г. Использование мультипликативных критериев при оптимизации режимов резания // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА. – 2012. – №30. – С. 325–330.
2. Петряева, И. А. Оптимизация режимов чистового точения на основании мультипликативной свертки критериев

производительности и себестоимости / Петряева И.А., Т.Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ. – 2016. – № 1 (52). – С.146–150.

3. Петряева, И.А., Михайлов, А.Н., Ивченко, Т.Г. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – №9(39). – С. 6–13.

4. Ивченко, Т.Г. Оптимизация режимов резания в условиях переменности действующих ограничений // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА. – 2014. – №34. – С.32–37.

5. Петряева, И.А., Ивченко, Т.Г. Оценка эффективности использования инструментов с покрытиями при чистовом точении фасонных поверхностей // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ. – 2016. – №4(55). – С.62–69.

REFERENCES

1. Ivchenko, T.G. Multiplicative criteria application at cutting mode optimization // *Tool Durability and Technological Systems Optimization*. – Kramatorsk: DDMA. – 2012. – №30. – pp. 325–330.
2. Peryaeva, I. A. Finish turning optimization based on multiplicative compression of criteria of productivity and cost price / Peryaeva I.A., T.G. Ivchenko // *Effective Technologies and Systems of Mechanical Engineering*. – Donetsk: DonNTU. – 2016. – № 1 (52). – pp.146–150.
3. Petryaeva, I.A., Mikhailov, A.N., Ivchenko, T.G. Registration of parameter variability in profiled surface turning at definition of optimum cutting modes // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – №9(39). – pp. 6–13.
4. Ivchenko, T.G. Cutting modes optimization under conditions of variability of limitations in force // *Tool Durability and Technological Systems Optimization*. – Kramatorsk: DDMA. – 2014. – №34. – pp.32–37.
5. Petryaeva, I.A., Ivchenko, T.G. Efficiency assessment in use of coated tools at profiled surfaces finish turning // *Efficient Technologies and Systems in Mechanical Engineering*. – Donetsk: DonNTU. – 2016. – №4(55). – pp.62–69.

Рецензент д.т.н. А. С. Янюшкин

