УДК 621.9: 658.5

Т. Г. Ивченко, канд. техн. наук, доцент, **И. А. Петряева,** ассистент
Донецкий национальный технический университет
Тел./Факс: +38 (062) 3050104;E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧИСТОВОГО ТОЧЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНСТРУМЕНТОВ С ПОКРЫТИЯМИ

Представлены результаты оценки эффективности чистового точения при использовании твердосплавных режущих инструментов с износостойкими покрытиями по критериям производительности и себестоимости. Выполнен сравнительный анализ возможностей повышения производительности и снижения себестоимости за счет повышения стойкости режущего инструмента, снижения температуры резания и шероховатости обработанной поверхности при использовании инструментов с различными износостойкими покрытиями.

Ключевые слова: *износостойкое покрытие, шероховатость, температура резания, стойкость, производительность, себестоимость.*

T. G. Ivchenko, I. A. Petryaeva

ANALYSIS OF POSSIBILITIES OF EFFICIENCY INCREASE OF FINISH TURNING AT THE USE OF THE TOOLS WITH COVERAGES

There are presented the results of the efficiency estimation of the finish turning at the use of the hard-alloy cutting tool with wearproof coverages on the criteria of the productivity and the prime price. The comparative analysis of the possibilities of the productivity increase and of the prime price decline is executed due to the cutting tool life rise, of cutting temperature and of the work surface roughness lowering at the use of the cutting tool with different wearproof coverages.

Key word: *wearproof coverage, roughness, cutting temperature, cutting tool life, productivity, prime price.*

1. Введение

Использование режущих инструментов с износостойкими покрытиями является перспективным направлением повышения производительности и снижения себестоимости обработки деталей машин в современном машиностроительном производстве. В связи с этим, представленная работа, посвященная анализу возможностей повышения эффективности чистового точения при использовании инструментов с покрытиями, весьма актуальна.

Известны многочисленные исследования работоспособности твердосплавных режущих инструментов с износостойкими покрытиями [1]. Значительное внимание в этих исследованиях уделено экспериментальному изучению влияния покрытий на физические основы процесса резания и стойкость инструмента. Установлено, что высокая эффективность инструментов с покрытиями зависит от правильного выбора рациональных условий их эксплуатации, информация о выборе которых в современной справочной литературе весьма ограничена. Это затрудняет определение области рационального применения и оценку эффективности инструментов с различными покрытиями.

В настоящее время разработаны методы оценки эффективности механообработки на основе оптимизации режимов резания по различным критериям. Ряд работ посвящен анализу возможностей повышения производительности точения при использовании смазочно-охлаждающих технологических сред, в том числе при обработке труднообрабатываемых материалов [2, 3].

Методика оценки повышения производительности и снижения себестоимости на основе многокритериальной оптимизации режимов резания, предложенная в работе [4],

успешно реализована для оценки эффективности использования СОТС при тонком точении инструментами из сверхтвердых материалов [5], а так же инструментов с покрытиями при чистовом точении фасонных поверхностей [6].

Однако, задача оценки эффективности применения инструментов с покрытиями решена только для частного случая обработки на основании экспериментальных исследований влияния покрытий на параметры процесса резания и стойкость инструмента.

Цель работы – усовершенствование методики оценки эффективности в различных условиях обработки и анализ возможностей повышения производительности и снижения себестоимости чистового точения при использовании инструментов с износостойкими покрытиями.

2. Основное содержание и результаты работы

Эффективность чистового точения при использовании твердосплавных режущих инструментов с износостойкими покрытиями достигается за счет повышения стойкости режущего инструмента T_n, снижения температуры резания Θ_n и шероховатости обработанной поверхности R_{an} в сравнении с соответствующими показателями T, Θ и R_a для инструментов без покрытий:

$$\begin{aligned} T_n &= K_T T = K_T \left(C_V K_V \Big/ V S^{y_v} t^{x_v} \right)^{1/m}; \\ \Theta_n &= K_\Theta \Theta = K_\Theta C_\Theta V_o^{n_t} S_o^{y_t} t^{x_t}; \qquad ; \\ R_{an} &= K_R R_a = K_R C_R S^{y_r}, \end{aligned} \tag{1}$$

где K_T, K_Θ, K_R – коэффициенты повышения стойкости режущего инструмента T, снижения температуры резания Θ и шероховатости обработанной поверхности R_a; 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; C_Θ, - коэффициент и n_t, y_t, x_t – показатели степени, учитывающие влияние скорости резания V, подачи S и глубины резания t на температуру резания Θ; C_R - коэффициент и y_r – показатель степени, учитывающий влияние подачи S на шероховатость обработанной поверхности R_a.

В представляемой работе эффективность чистового точения при использовании инструментов с покрытиями оценивается на базе оптимизации режимов резания по критериям повышения производительности и снижения себестоимости при заданном уровне качества обработки.

Целевые функции, выражающие зависимость критериев оптимизации (максимальной производительности P и минимальной себестоимости C) от скорости резания V и подачи S, при обработке инструментами с покрытиями представляются в виде:

$$P(V,S) = VS;\ C(V,S) = V^{-1}S^{-1} + MK_T^{-1}K_\Theta^{-1/mn_t}V^{k_V}S^{k_S}, \tag{2}$$

где $M = (t_c + A_u/A)\left(t^{x_v}/C_V K_V\right)^{1/m}$; $k_V = 1/m - 1$; $k_S = y_v/m - 1$; A - стоимость станко - минуты, A_u – стоимость одного периода стойкости инструмента; t_c - время смены инструмента.

С использованием методов линейного и геометрического программирования установлены аналитические зависимости оптимальных по различным критериям подач S_o и скоростей резания V_o от параметров процесса чистового точения [3].

Оптимальная подача при чистовом точении S_o независимо от критерия оптимизации определяется, исходя из требуемой шероховатости обработанной поверхности R_a:

$$S_o = \left(R_a / K_R C_R\right)^{1/y_r}; \tag{3}$$

Оптимальные скорости резания V_o определяются с учетом температурных ограничений. Необходимость учета температурных ограничений определяется на основании граничного значения коэффициента снижения температуры резания Θ при превышении ею допустимого уровня Θ_o: $K_{\Theta o} = \Theta_o / \Theta(V_o, S_o)$. При отсутствии температурных ограничений оптимальные скорости резания определяются с учетом критерия оптимизации: V_{oP} – для критерия максимальной производительности, V_{oC} – для критерия минимальной себестоимости:

$$V_{oP} = \begin{cases} \left(\Theta / K_\Theta C_\Theta t^{x_t} S_o^{y_t}\right)^{1/n_t}, & при \;\; K_{\Theta oP} \le 1; \\ C_V K_V K_T^m / T^m t^{x_v} S_o^{y_v}, & при \;\; K_{\Theta oP} \ge 1, \end{cases} \tag{4}$$

где $K_{\Theta oP} = \Theta \Big/ C_\Theta K_\Theta t^{x_t} \left(C_V K_V K_T^m / T^m t^{x_v}\right)^{n_t} \left(R_a / C_R K_R\right)^{(y_v n_t - y_t)/y_r}$ - граничное значение коэффициента снижения температуры резания Θ, определяющее необходимость учета температурных ограничений при расчете оптимальной по производительности скорости резания V_{oP}.

$$V_{oC} = \begin{cases} \left(\Theta / K_\Theta C_\Theta t^{x_t} S_o^{y_t}\right)^{1/n_t}, & при \;\; K_{\Theta oC} \le 1; \\ \left(m / (1-m) M K_T^{-1}\right)^m S_o^{y_v}, & при \;\; K_{\Theta oC} \ge 1,. \end{cases} \tag{5}$$

где $K_{\Theta oC} = \Theta_o \Big/ C_\Theta K_\Theta t^{x_t} \left(m / (1-m) M K_T^{-1}\right)^{m n_t} \left(C_R K_R / R_a\right)^{(y_v n_t - yt)/y_r}$ - граничное значение коэффициента снижения температуры резания Θ, определяющее необходимость учета температурных ограничений при расчете оптимальной по себестоимости скорости резания V_{oC}.

Примеры расчетов представлены для двух вариантов обработки различных сталей – сталь 45 и сталь 95Х18. Условия обработки: резцы твердосплавные Т15К6 (передний угол γ = 0°; главный угол резца в плане φ = 45°, радиус при вершине r = 1 мм); износостойкие покрытия - карбид титана TiC и нитрид титана TiN; способ нанесения – осаждение из газовой среды; глубина резания t = 1 мм; стойкость режущего инструмента T = 30 мин; стоимость станкоминуты A = 5 коп/мин; стоимость 1 периода стойкости инструмента A_u = 50 коп/период; время смены инструмента t_c = 5 мин; требуемая шероховатость обработанной поверхности R_a.= 2,5 мкм.

В расчетах приняты следующие значения коэффициентов повышения стойкости режущего инструмента K_T , снижения температуры резания K_Θ и шероховатости обработанной поверхности K_R: для резцов Т15К6 без покрытий - $K_T = K_\Theta = K_R$ =1; для резцов

с покрытием из карбида титана Т15К6 + TiC - K_T = 2; K_Θ = 0,9;K_R = 0,9; для резцов с покрытием из нитрида титана Т15К6 + TiN - K_T = 4; K_Θ = 0,8;K_R = 0,85 [1].

Зависимость шероховатости обработанной поверхности R_{an}, стойкости режущего инструмента T_n и температуры резания Θ_n от режимов резания [4] для стали 45:

$$R_{an} = K_R 17{,}5 S^{1{,}62};\ T_n = K_T \left(420 / V S^{0{,}2} t^{0{,}15}\right)^{1/0{,}2};\ \Theta_n = K_\Theta 54 V_o^{0{,}55} S_o^{0.42} t^{0{,}2};$$

для стали 95Х18: $T_n = K_T \left(165 / V S^{0{,}15} t^{0{,}15}\right)^{1/0{,}25}$; $\Theta_n = K_\Theta 84 V_o^{0{,}7} S_o^{0.5} t^{0{,}2}$.

Для заданных условий установлены следующие значения оптимальных подач: S_{oT15K6} = 0,30мм/об; $S_{oT15K6\ +\ TiC}$ = 0,32мм/об; $S_{oT15K6\ +\ TiN}$ = 0,34мм/об.

Закономерности изменения целевых функций себестоимости *C* и производительности *P* при обработке стали 45 и стали 95Х18 в зависимости от скорости резания *V* для инструментов с различными покрытиями представлены на рис. 1.

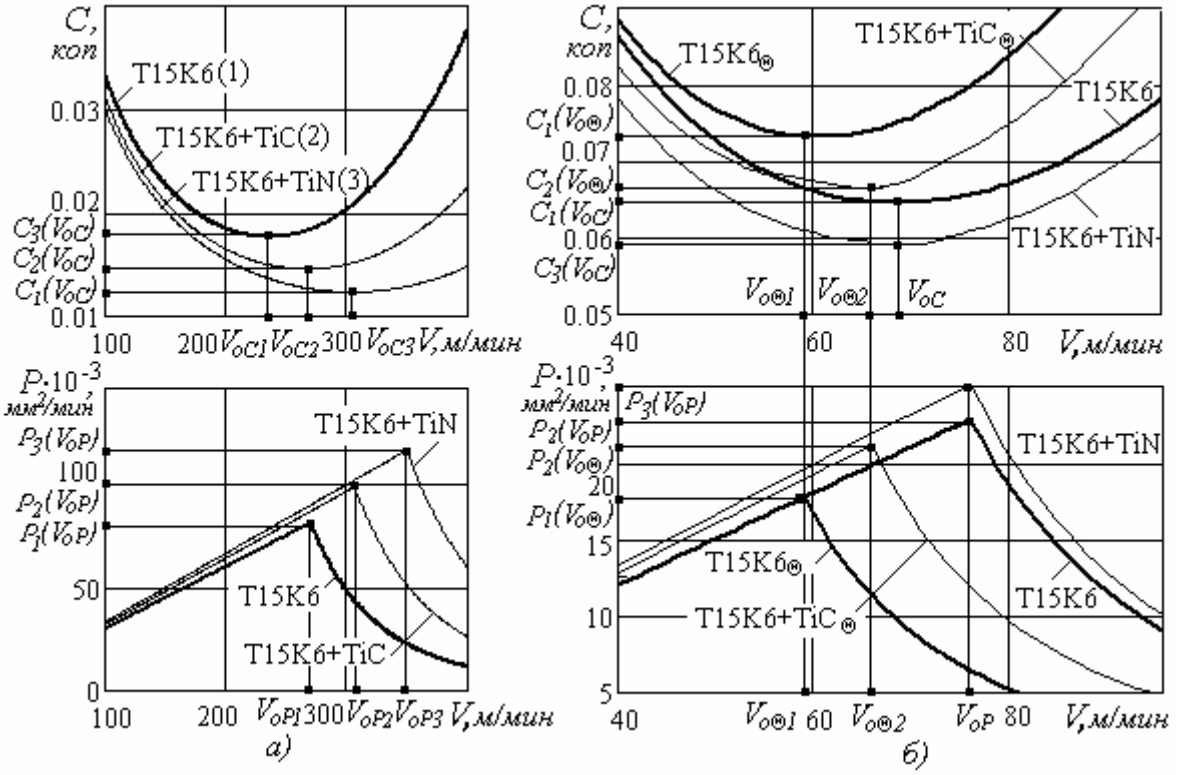

Рисунок 1 - Графики изменения целевых функций себестоимости *C* и производительности *P* в зависимости от скорости резания *V* для стали 45 – *а)* и стали 95Х18 -

Граничные значения коэффициентов снижения температуры резания при обработке стали 45 $K_{\Theta oT15K6}$ = 1,39; $K_{\Theta o\ T15K6\ +\ TiC}$ = 1,32; $K_{\Theta o\ T15K6\ +\ TiN}$ = 1,31 свидетельствуют о том, что для всех трех типов резцов – как без покрытия, так и с различными покрытиями, оптимальные скорости резания определяются без учета температурного ограничения, но с учетом критерия оптимизации. Оптимальные по производительности скорости резания: $V_{oP\ T15K}$ = 270м/мин; $V_{oP\ T15K\ +\ TiC}$ = 307м/мин; $V_{oP\ T15K6\ +\ TiN}$ = 350м/мин. Оптимальные по себестоимости скорости резания: $V_{oC\ T15K}$ = 235м/мин; $V_{oC\ T15K\ +\ TiC}$ = 267м/мин; $V_{oC\ T15K6\ +\ TiN}$ = 305м/мин.

Граничные значения коэффициентов снижения температуры резания при обра-

ботке стали 95Х18 $K_{\Theta oT15K6} = 0{,}95$; $K_{\Theta o\ T15K6\ +\ TiC} = 0{,}87$; $K_{\Theta o\ T15K6\ +\ TiN} = 1{,}002$ свидетельствуют о том, что для резцов Т15К6 без покрытий и с покрытием из карбида титана TiC скорости резания определяется с учетом температурного ограничения, причем они одинаковы для двух различных критериев оптимизации производительности P и себестоимости C: $V_{oT15K} = V_{o\Theta 1} = 59$м/мин; $V_{oT15K\ +\ TiC} = V_{o\Theta 2} = 65$м/мин.

При использовании резцов Т15К6 с покрытием из нитрида титана TiN температурное ограничение снимается, так как граничное значение коэффициентов снижения температуры резания $K_{\Theta o}$ превышает 1. В этом случае скорости резания определяются с учетом критерия оптимизации, причем оптимальная по критерию производительности скорость резания $V_{oP} = 76$м/мин превышает скорость резания, оптимальную по себестоимости $V_{oC} = 73$м/мин.

Количественная оценка возможностей интенсификации режимов резания за счет использования инструмента с покрытиями может быть выполнена на основании коэффициентов изменения подачи K_S и скорости резания K_V:

$$K_S = K_R^{-1/y_r};\ K_V = \begin{cases} K_\Theta^{-1/n_t} K_R^{y_t/y_r n_t}, & при\ \ K_{\Theta o} \le 1; \\ K_T^m K_R^{y_v/y_r}, & при\ \ K_{\Theta o} \ge 1. \end{cases} \qquad (6)$$

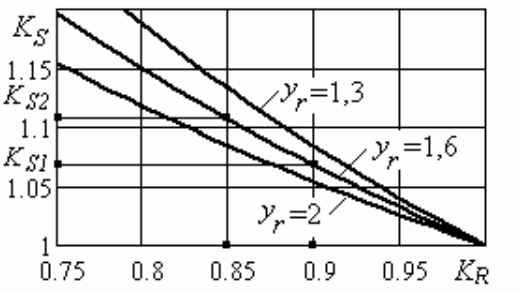

Рисунок 2 - Графики зависимости коэффициентов изменения оптимальных подач K_S от коэффициента снижения шероховатости обработанной поверхности K_R

Закономерности изменения коэффициентов K_S и K_V в зависимости от коэффициентов K_R, K_T и K_Θ представлены на рис. 2, рис. 3. Оптимальная подача возрастает с уменьшением коэффициента снижения шероховатости K_R и степени влияния подачи (показатель y_r) на шероховатость. Для заданных условий коэффициенты повышения оптимальных подач $K_{S1\ T15K6\ +\ TiC} = 1{,}07$; $K_{S2\ T15K6\ +\ TiN} = 1{,}11$.

Оптимальная скорость резания возрастает при увеличении коэффициентов повышения стойкости инструмента K_T и снижения температуры резания K_Θ тем сильнее, чем больше коэффициент снижения шероховатости K_R.

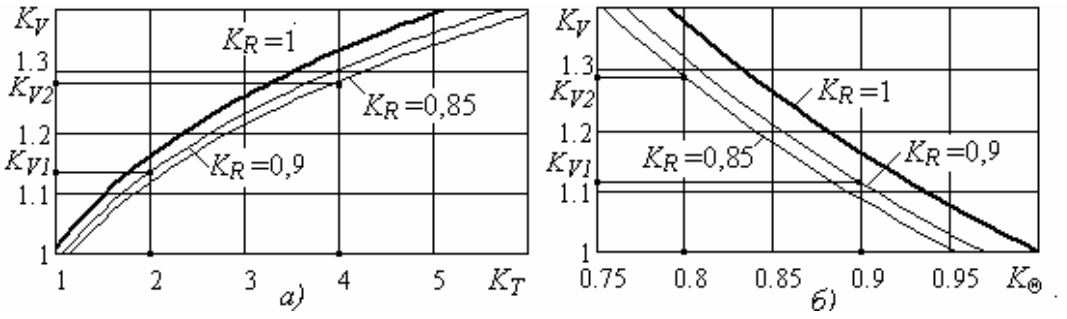

Рисунок 3 - Графики зависимости коэффициентов изменения оптимальных скоростей резания K_V от коэффициентов повышения стойкости режущего инструмента K_T – *а)* и снижения температуры резания K_Θ – *б)*

Коэффициенты повышения оптимальных скоростей резания $K_{V1\ T15K6\ +\ TiC}$ = 1,13; $K_{V2\ T15K6\ +\ TiN}$ = 1,29 (сталь 45); $K_{V1\ T15K6\ +\ TiC}$ = 1,11; $K_{V2\ T15K6\ +\ TiN}$ = 1,28 (сталь95Х18).

Количественная оценка повышения эффективности обработки при точении инструментами с износостойкими покрытиями может быть выполнена на основании коэффициентов повышения производительности K_P и снижения себестоимости K_C:

$$K_P = \frac{S_{on}V_{oPn}}{S_oV_{oP}};\quad K_P = \begin{cases} K_\Theta^{-1/n_t} K_R^{(y_t - n_t)/y_r n_t}, & при\ \ K_{\Theta oP} \le 1; \\ K_T^m K_R^{(y_v - 1)/y_r}, & при\ \ K_{\Theta oP} \ge 1. \end{cases} \tag{7}$$

$$K_C = \frac{V_{oCn}^{-1}S_{on}^{-1} + MK_T^{-1}K_\Theta^{-1/mn_t}V_{oCn}^{k_V}S_{on}^{k_S}}{V_{oC}^{-1}S_o^{-1} + MV_{oC}^{k_V}S_o^{k_S}};$$

$$K_C = \begin{cases} K_\Theta^{1/n_t} K_R^{(n_t - y_t)/y_r n_t}, & при\ \ K_{\Theta oC} \le 1; \\ K_T^{-m} K_R^{(1 - y_v)/y_r}, & при\ \ K_{\Theta oC} \ge 1. \end{cases} \tag{8}$$

где V_{on}, S_{on} – оптимальные скорость резания и подача для инструментов с покрытиями.

Закономерности изменения указанных коэффициентов K_P и K_C в зависимости от коэффициентов снижения температуры резания K_Θ и повышения стойкости режущего инструмента K_T для различных значений коэффициента снижения шероховатости обработанной поверхности K_R представлены на рис. 4, рис. 5.

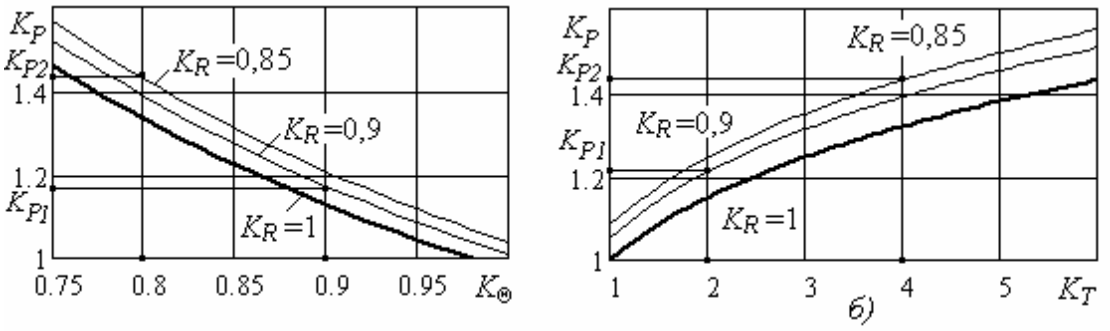

Рисунок 4 - Графики изменения коэффициентов повышения производительности K_P от коэффициентов снижения температуры резания K_Θ – *а)* и повышения стойкости режущего инструмента K_T – *б)*

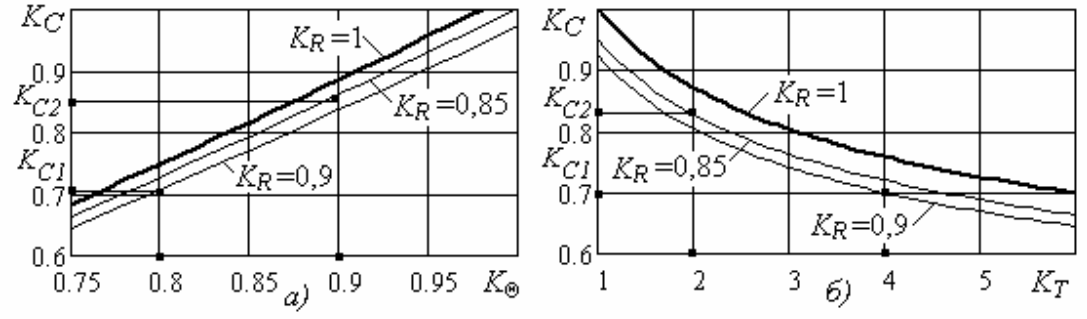

Рисунок 5 - Графики изменения коэффициентов снижения себестоимости K_C от коэффициентов снижения температуры резания K_Θ – *а)*
и повышения стойкости режущего инструмента K_T – *б)*

Производительность существенно возрастает с уменьшением коэффициента снижения температуры резания K_Θ и увеличением коэффициента повышения стойкости режущего инструмента K_T, а себестоимость с уменьшением коэффициента снижения температуры резания K_Θ и увеличением коэффициента повышения стойкости режущего инструмента K_T, тем сильнее, чем меньше коэффициент снижения шероховатости поверхности K_R.

Для заданных условий обработки установлены следующие коэффициенты повышения производительности K_P и снижения себестоимости K_C при обработке стали 95Х18: $K_{P1\ T15K6+TiC} = 1{,}18$; $K_{P2\ T15K6+TiN} = 1{,}41$; $K_{C1\ T15K6+TiC} = 0{,}85$; $K_{C2\ T15K6+TiN} = 0{,}71$; при обработке стали 45: $K_{P1\ T15K6+TiC} = 1{,}21$; $K_{P2\ T15K6+TiN} = 1{,}43$; $K_{C1\ T15K6+TiC} = 0{,}83$; $K_{C2\ T15K6+TiN} = 0{,}70$. Эффективность покрытий из нитрида титана TiN при чистовом точении выше в сравнении с покрытиями из карбида титана TiC.

3. Заключение

Усовершенствована методика оценки возможностей повышения эффективности обработки, позволяющая при использовании инструментов с износостойкими покрытиями прогнозировать рост производительности и снижение себестоимости для любых заданных условий. Оценка выполняется на основании известных коэффициентов повышения стойкости режущего инструмента, снижения температуры резания и шероховатости обработанной поверхности. На основании разработанной методики выполнена количественная оценка возможностей повышения производительность и снижения себестоимости обработки до 1,2 раз при использовании инструментов с покрытиями из карбида титана TiC и более чем в 1,4 раза при использовании инструментов с покрытиями из нитрида титана TiN.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака, А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойким покрытием / А. С. Верещака. – М.: Машиностроение,1993. - С. 368.

2. Івченко Т. Г. Аналіз можливостей підвищення продуктивності точіння сталей з обліком дії мастильно-охолоджуючих середовищ / Т. Г. Івченко // Вестник ДГМА. – Краматорск: ДГМА, 2013. – №2 (31). – С. 160-165.

3. Estimation of Possibilities of the Productivity Rise at Turning of Hard-Processing Materials / Ivchenko Tatiana, Boguslavskiy Vadim, Petryaeva Irina, Mihaylov Dmitriy // Applied Mechanics and Materials. **–** Trans Tech Publications, Switzerland. Doi, 2014. **–** № 657. **–** P. 63-67.

4. Петряева, И. А. Оптимизация режимов чистового точения на основании мультипликативной свертки критериев производительности и себестоимости / И. А Петряева, Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – № 1 (52). – С. 147-151.

5. Ивченко Т. Г. Оценка эффективности использования СОТС при тонком точении инструментами из сверхтвердых материалов / Т. Г. Івченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – № 1 (52). – С. 62-68.

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

Поступила в редколлегию 14.02.2017г.