

УДК 621.9: 658.5

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

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ С ПОКРЫТИЯМИ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Представлены результаты оценки эффективности использования режущих инструментов с покрытиями при чистовом точении фасонных поверхностей на базе многокритериальной оптимизации режимов резания в условиях переменности действующих ограничений. Определены оптимальные по различным критериям оптимизации режимы резания. Выполнен сравнительный анализ возможностей повышения производительности и снижения себестоимости за счет применения инструментов с износостойкими покрытиями.

Ключевые слова: фасонная поверхность, износостойкое покрытие, шероховатость, температура резания, производительность, себестоимость, оптимизация

I. A. Petryaeva, T. G. Ivchenko

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF THE TOOLS WITH COVERAGES APPLICATION AT FINISH TURNING OF THE SHAPED SURFACES

The results of estimation of efficiency of the cutting tools with coverage's application at finish turning of the shaped surfaces on basic multicriterion optimization of the cutting regimes in the conditions of changeability of the operating limitations are expected. The optimum cutting regimes on the different criteria of optimization: are certain. The comparative analysis of possibilities of the productivity increase and prime price decline is executed due to the cutting tools with coverage's application.

Key word: shaped surface, wearproof coverage, roughness, cutting temperature, productivity, prime price, optimization

Введение

Высокая эффективность использования современных инструментов с износостойкими покрытиями зависит от правильного выбора рациональных условий их эксплуатации. В связи с этим, представленная работа, посвященная оценке эффективности использования инструментов с покрытиями при чистовом точении фасонных поверхностей на базе многокритериальной оптимизации режимов резания, весьма актуальна.

В настоящее время достаточно хорошо изучены вопросы работоспособности твердосплавных режущих инструментов с износостойкими покрытиями [1]. Значительное внимание в этих исследованиях уделено экспериментальному изучению влияния покрытий на физические основы процесса резания. Однако, информация о выборе рациональных режимов резания для инструментов с различными покрытиями, представленная в современной справочной литературе, весьма ограничена и противоречива. Практически отсутствуют сведения о взаимосвязи температуры резания, шероховатости обработанной поверхности, стойкости инструмента с режимами обработки.

Это затрудняет использование современных методов оптимизации режимов резания при обработке инструментами с покрытиями, широко применяемых для эффективного решения различных задач механообработки [2]. Весьма перспективным направлением является многокритериальная оптимизация режимов резания, позволяющая определять оптимальные режимы резания, обеспечивающие не только отдельные критерии - максимальную производительность, минимальную себестоимость, но и их наилучшее сочетание на основе мультипликативной свертки этих критериев [3]. На основе много-

критериальной оптимизация успешно решаются задачи количественной оценки эффективности различных мероприятий по интенсификации процесса резания, например, за счет использования смазочно – охлаждающих технологических сред [4].

Одним из направлений оптимизации также является поиск оптимальных режимов резания в условиях переменности действующих ограничений, что имеет место, например, при обработке фасонных поверхностей, когда все параметры процесса резания закономерно изменяются вдоль образующей криволинейной поверхности [5, 6].

Представляет интерес дальнейшее развитие методики многокритериальной оптимизации режимов резания применительно к обработке инструментами с покрытиями фасонных поверхностей.

Цель работы – исследование возможностей повышения производительности и снижения себестоимости при чистовом точении фасонных поверхностей твердосплавными инструментами с износостойкими покрытиями.

2. Основное содержание и результаты работы

Возможности повышения эффективности (повышения производительности, снижения себестоимости при заданном уровне качества обработки) чистового точения твердосплавными инструментами с износостойкими покрытиями исследуются на основе многокритериальной оптимизации режимов резания [3].

При решении задач многокритериальной оптимизации в качестве основных критериев оптимизации принимаются переменные части производительности P , себестоимости C и мультипликативная свертка этих критериев, определяемая их отношением $C_M = C/P$, зависящие от режимов резания.

Целевые функции, выражающая зависимость критериев оптимизации от скорости резания V и подачи S , представляются в виде:

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

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 станка - 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 ; $K_{\Theta} = \Theta_o/\Theta$ - коэффициент необходимого снижения температуры резания Θ при превышении ею допустимого уровня Θ_o .

Основные ограничения при чистовой обработке - ограничения по температуре резания Θ и шероховатости обработанной поверхности R_a :

$$C_{\Theta} V^{n_t} S^{y_t} t^{x_t} \leq \Theta_o; C_R S^{y_r} \leq R_a, \quad (2)$$

где 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; C_R - коэффициент и y_r – показатель степени, учитывающий влияние подачи S на шероховатость обработанной поверхности.

С использованием методов линейного и геометрического программирования установлены аналитические зависимости оптимальных 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 . Независимо от критерия оптимизации так же определяется и скорость резания при наличии температурных ограничений $V_{o\Theta}$. Необходимость учета температурных ограничений определяется на основании граничного значения коэффициента снижения температуры резания $K_{\Theta o} = \Theta_o / \Theta(V_o, S_o)$.

$$S_o = (R_a / C_R)^{1/y_r}; V_{o\Theta} = \left(\Theta / C_{\Theta} t^{x_t} S_o^{y_t} \right)^{1/n_t} \quad \text{при} \quad K_{\Theta o} = \Theta_o / V_o^{n_t} S_o^{y_t} t^{x_t} \leq 1. \quad (3)$$

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_{oM} – для мультипликативной свертки этих критериев:

$$V_{oP} = C_V K_V / T^m t^{x_v} S_o^{y_v}; V_{oC} = (m / (1 - m) M)^m S_o^{-y_v}; V_{oM} = (2m / (1 - 2m) M)^m S_o^{-y_v} \quad (4)$$

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

$$K_P = \frac{S_{on} V_{on}}{S_o V_o}; K_C = \frac{1 + MK_{\Theta}^{-1/mn_t} V_{on}^{k_V} S_{on}^{k_S}}{1 + MK_{\Theta}^{-1/mn_t} V_o^{k_V} S_o^{k_S}}; K_M = \frac{1 + MK_{\Theta}^{-1/mn_t} V_{on}^{k_V - 1} S_{on}^{k_S - 1}}{1 + MK_{\Theta}^{-1/mn_t} V_o^{k_V - 1} S_o^{k_S - 1}}, \quad (5)$$

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

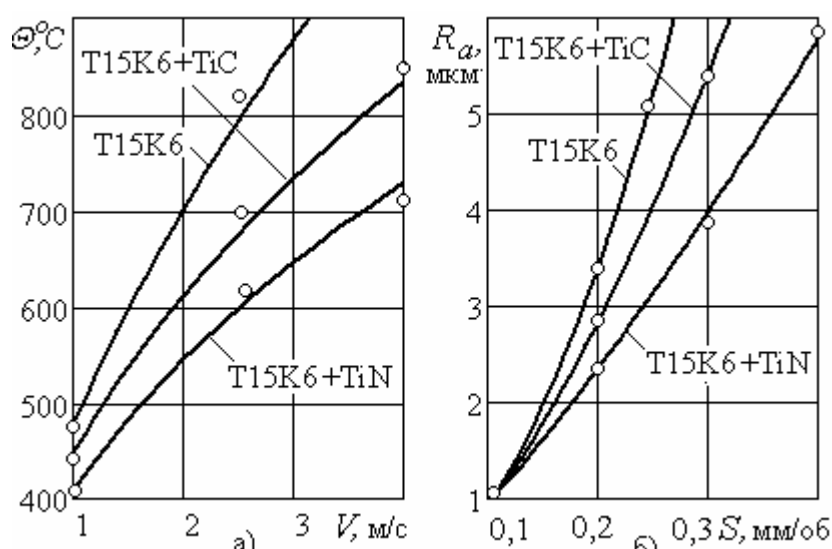


Рис. 1. Графики зависимости температуры резания Θ от скорости резания – а) и шероховатости поверхности R_a от подачи – б) для инструментов с различными покрытиями

Закономерности изменения температуры резания, шероховатости поверхности и стойкости инструмента в зависимости от режимов резания при точении инструментами с износостойкими покрытиями устанавливаются экспериментально.

Результаты экспериментальных исследований температуры резания и шероховатости обработанной поверх-

ности представлены на рис. 1, результаты стойкостных испытаний - на рис. 2.

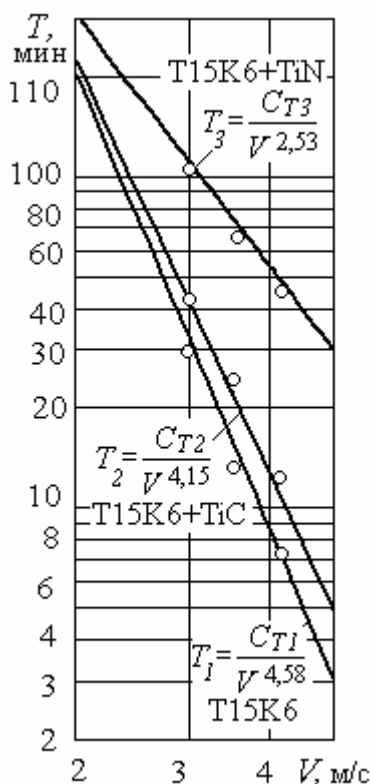


Рис. 2. Графики зависимости стойкости инструмента с различными покрытиями от скорости резания

Эксперименты выполнялись в следующих условиях: обрабатываемый материал – сталь 45; резцы сборные проходные с механическим креплением многогранных пластин; инструментальный материал – твердый сплав T15K6; износостойкие покрытия - карбид титана TiC и нитрид титана TiN; способ нанесения – осаждение из газовой среды методом КВТК (карбидизация – вакуумтитанирование – вторичная карбидизация). Геометрические параметры инструмента: главный и вспомогательный углы в плане $\varphi = 92^\circ$, $\varphi_1 = 8^\circ$; задний - $\alpha = 5^\circ$; передний - $\gamma = 15^\circ$; главный угол на фаске - $\gamma_\phi = -5^\circ$. Диапазон изменения скоростей резания $V = 2 - 4$ м/с, подачи $S = 0,1 - 0,3$ мм/об, глубин резания $t = 1 - 3$ мм. Базовые значения параметров, для которых выполнялось построение графиков: $V = 3$ м/с, $S = 0,2$ мм/об, $t = 2$ мм.

На основании экспериментальных исследований в результате статистической обработки с погрешностью, не превышающей 5%, установлены следующие зависимости температуры резания Θ , шероховатости обработанной поверхности R_a от скорости резания V от условий обработки при использовании инструментов с различными покрытиями:

- Θ_1, R_{a1}, V_1 – резец T15K6;
- Θ_2, R_{a2}, V_2 – резец T15K6+TiC;
- Θ_3, R_{a3}, V_3 – резец T15K6+TiN.

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= 795V^{0,55} S^{0,4} t^{0,2}; R_{a1} = 72S^{1,9}; V_1 = 2,73/T^{0,22} S^{0,61} t^{0,18}; \\ \Theta_2 &= 745V^{0,45} S^{0,4} t^{0,2}; R_{a2} = 37S^{1,6}; V_2 = 3,35/T^{0,24} S^{0,65} t^{0,22}; \\ \Theta_3 &= 680V^{0,4} S^{0,4} t^{0,2}; R_{a3} = 19S^{1,3}; V_3 = 7,34/T^{0,40} S^{0,66} t^{0,21}. \end{aligned} \quad (6)$$

В результате исследований установлено, что при использовании инструментов с покрытиями изменяются не только постоянные коэффициенты C_Θ, C_V, C_R , но и показатели степени, характеризующие степень влияния условий обработки на температуру резания Θ , шероховатость обработанной поверхности R_a и скорость резания V . Характерно снижение степени влияния скорости на температуру резания и стойкость режущего инструмента, а также подачи на шероховатость обработанной поверхности при использовании инструментов с покрытиями, причем для покрытия из нитрида титана TiN снижение более существенно, чем для покрытия из карбида титана TiC.

Установленные зависимости (6) температуры резания, шероховатости обработанной поверхности и стойкости инструмента от режимов резания при чистовом точении используются в качестве ограничений при решении задачи оптимизации.

Результаты расчетов оптимальных режимов резания на основании полученных аналитических зависимостей (6), а также результаты расчетов коэффициентов повыше-

ния эффективности - повышения производительности K_P , снижения себестоимости K_C и отношения себестоимости и производительности K_M приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты оптимизации режимов точения резцами с покрытиями

№ п/п	Инструментальный материал	Оптимальные режимы резания				Коэффициенты повышения эффективности		
		Подача, мм/об	Скорости резания по различным критериям, м/с			K_P	K_C	K_M
			S_o	P	C			
1	T15K6	0,17	3,67	3,35	3,67	1	1	1
2	T15K6+TiC	0,19	7,23	4,00	6,1	1,55	0,8	0,8
3	T15K6+TiN	0,21	6,96	5,92	6,83	2,3	0,6	0,77

При точении фасонных поверхностей параметры процесса резания закономерно изменяются: переменными вдоль криволинейной образующей являются углы в плане и параметры среза (рис. 3а).

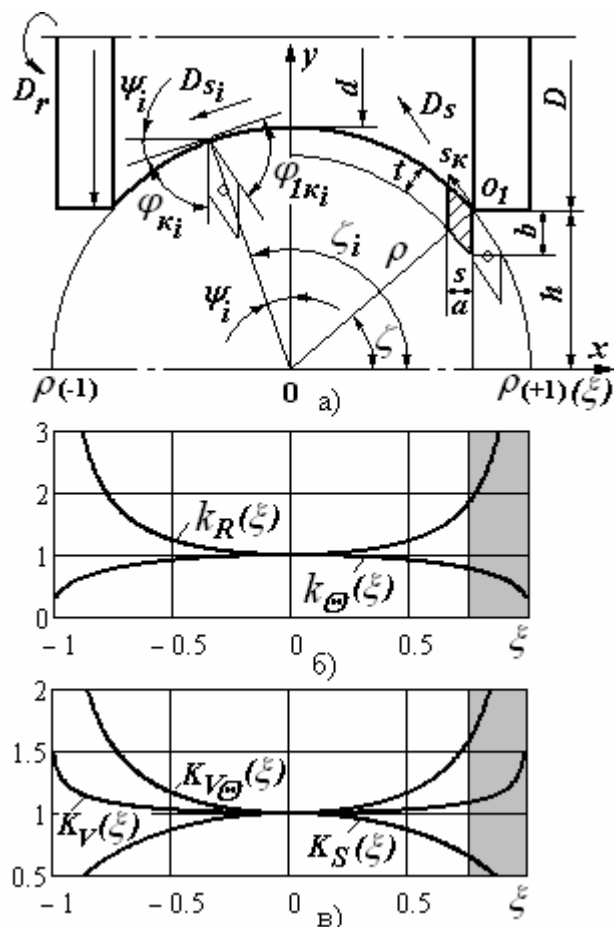


Рис. 3. Схема определения переменных параметров процесса резания при точении фасонных поверхностей.

Пример приведен для вогнутой поверхности с постоянным радиусом кривизны ρ . Обработка выполняется инструментом с ромбической пластиной, для которой статические углы в плане: главный $\phi_C = 90^\circ$ и вспомогательный $\phi_{1C} = 55^\circ$. Положение вершины лезвия на криволинейной поверхности определяется мгновенным углом поворота $\zeta_i = \arccos(\xi_i)$, где $\xi_i = x_i / \rho$ – безразмерная координата. Кинематические углы в плане: главный $\phi_{ki} = \phi_C - \arcsin(\xi_i)$ и вспомогательный $\phi_{1ki} = \phi_{1C} + \arcsin(\xi_i)$. Максимальный возможный для обработки безразмерный размер $h/\rho = \cos(\phi_{1C})$ (на рис. 3 заштрихована зона невозможной обработки).

В случае обработки с постоянной подачей на оборот S , толщина среза a постоянна, а кинематическая подача $S_K(\xi) = S / \sin(\arccos(\xi))$ совпадает с направлением движения подачи D_S . Ширина среза $b(\xi) = t / (\phi_C - \arcsin(\xi))$. Вследствие переменности указанных параметров процесса резания основные ограничения при чистовой обработке фасонных поверхностей - по шероховатости поверхности R_a и температуре резания Θ так же становятся переменными вдоль криволинейной образующей:

$$R_a(\xi) = C_R k_R(\xi) S^{y_r}; \Theta(\xi) = C_\Theta k_\Theta(\xi) V^{n_t} S^{y_t} t^{x_t}, \quad (7)$$

где $k_R(\xi)$, $k_\Theta(\xi)$ – безразмерные коэффициенты, характеризующие относительное изменение шероховатости поверхности R_a и температуры резания Θ вдоль безразмерной координаты ξ , в сравнении со значениями этих параметров в точке, соответствующей началу принятой системы координат $k_R(\xi) = R_a(\xi)/R_a(0)$, $k_\Theta(\xi) = \Theta(\xi)/\Theta(0)$ (рис. 3б):

$$k_R(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^{-y_r}; k_\Theta(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^{y_t/n_t}. \quad (8)$$

В связи с переменностью ограничений переменными вдоль криволинейной образующей становятся и оптимальные режимы резания:

$$S_o(\xi) = K_S(\xi) S_o; V_{o\Theta}(\xi) = K_{V\Theta}(\xi) V_{o\Theta}; V_o(\xi) = K_V(\xi) V_o, \quad (9)$$

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 координат $K_S(\xi) = S_o(\xi)/S_o(0)$, $K_{V\Theta}(\xi) = V_{o\Theta}(\xi)/V_{o\Theta}(0)$; $K_V(\xi) = V_o(\xi)/V_o(0)$ (рис. 3с):

$$K_S(\xi) = \sin(\arccos(\xi)); K_V(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^{-y_v}; K_{V\Theta}(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^{-y_t}. \quad (10)$$

Установленные коэффициенты позволяют определять оптимальные режимы резания в любой точке фасонной поверхности.

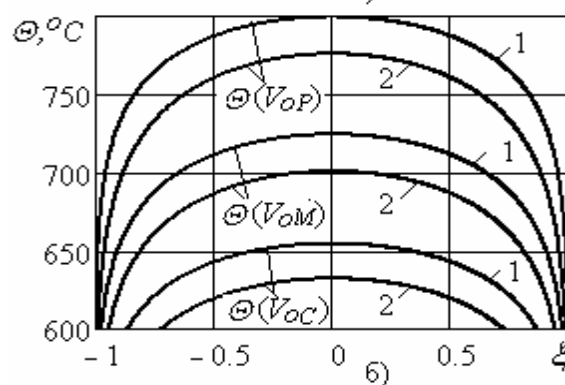
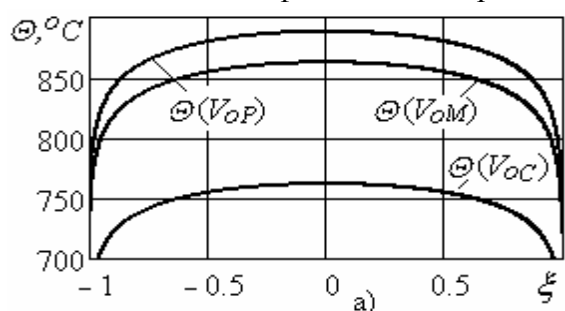


Рис. 4. Распределение температур вдоль криволинейной образующей при точении инструментами без покрытия – а) и с покрытиями: 1- TiC, 2 - TiN – б).

Закономерности изменения температур резания вдоль безразмерной координаты ξ для указанных ранее условий обработки, рассчитанных для оптимальных по различным критериям значениям подач и скоростей резания, приведены на рис. 4.

При обработке инструментами без покрытий (рис. 4а) температуры резания для режимов, рассчитанных по критериям производительности и мультипликативной свертки, превышают допустимый уровень $\Theta_o = 800^\circ\text{C}$. В этом случае скорость резания $V_{o\Theta}$ определяется с учетом температурного ограничения по формуле (3).

При нанесении износостойких покрытий (рис. 4б) во всем диапазоне изменения температуры резания не превышают допустимого уровня $\Theta_o = 800^\circ\text{C}$. Температуры резания для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC до 15%, а из нитрида титана TiN до 25% ниже, чем для

инструментов без покрытий. Следовательно, оптимальные скорости резания могут определяться без учета температурных ограничений по формулам (4).

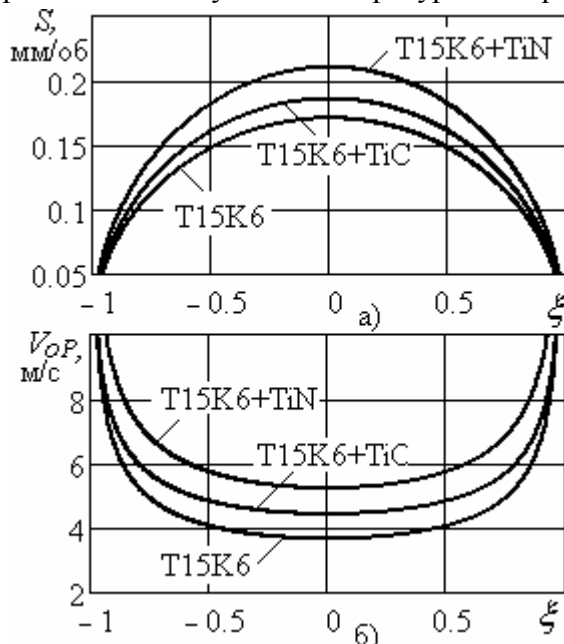


Рис. 5. Распределение подач – а) и скоростей резания – б) вдоль криволинейной образующей при точении инструментами без покрытия и с покрытиями.

бида титана TiC до 20%, а из нитрида титана TiN до 43% выше, чем для инструментов без покрытий.

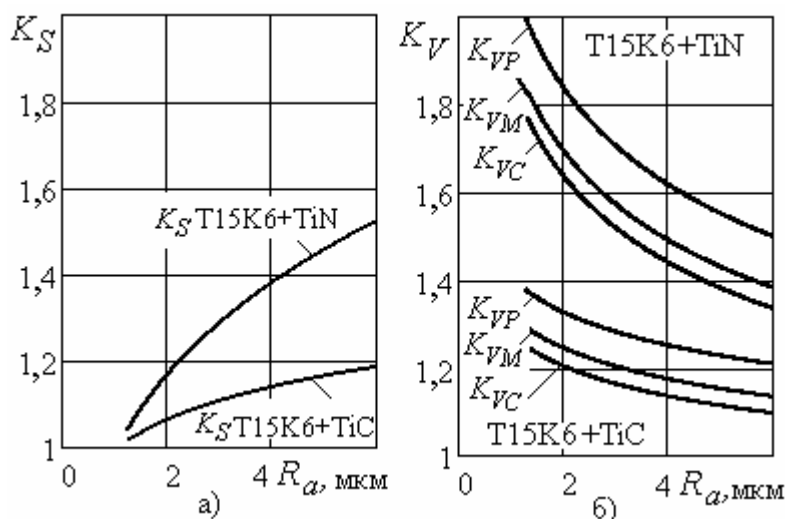


Рис. 6. Зависимость коэффициентов изменения подач – а), скоростей резания – б) от шероховатости поверхности R_a для инструментов с покрытиями

Исследованные резцы с покрытиями обеспечивают более высокий уровень оптимальных подач (рис. 6а) и скоростей резания (рис. 6б) во всем диапазоне изменения шероховатости обработанной поверхности, причем резцы с покрытием карбидом тита-

Закономерности изменения оптимальных подач S_o и оптимальных по производительности скоростей резания V_{oP} вдоль безразмерной координаты ξ представлены на рис. 4. Установлено, что в разных точках криволинейной поверхности оптимальные режимы могут изменяться до 1,5 раз. Это необходимо учитывать при выборе оптимальных режимов резания.

Оптимальная подача для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC до 10%, а из нитрида титана TiN до 23% выше, чем для инструментов без покрытий. Учет температурных ограничений для инструментов без покрытий значительно снижает оптимальную скорость резания. Снятие температурных ограничений за счет использования инструментов с покрытиями позволяет существенно повысить скорость резания. Оптимальные по производительности скорости резания для инструментов с покрытиями из кар-

Оценку рассчитанных оптимальных режимов резания для различных вариантов инструментов с покрытиями целесообразно выполнить путем сравнения с инструментом без покрытия на основании следующих коэффициентов:

$$K_S = S_{oT15K6+TiC, TiN} / S_{oT15K6};$$

$$K_V = V_{oT15K6+TiC, TiN} / V_{oT15K6}.$$

Результаты сравнительного анализа оптимальных режимов резания для инструментов с покрытиями в зависимости от шероховатости поверхности R_a приведены на рис. 6.

на TiC существенно уступают резцам с покрытием нитридом титана TiN. Для оптимальных скоростей резания, рассчитанных на основании критерия максимальной производительности, характерен более высокий уровень (коэффициент снижения скорости K_{VP}), чем для скоростей, рассчитанных по критерию минимальной себестоимости (коэффициент снижения скорости K_{VC}).

В результате повышения оптимальных подач и скоростей резания за счет использования инструментов с покрытиями производительность обработки для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC повышается в 1,5 раза, из нитрида титана TiN - в 2,3 раза. Себестоимость снижается в 1,2 раза для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC и в 1,7 раза из для инструментов с покрытиями нитрида титана TiN.

3. Заключение

Усовершенствована методика многокритериальной оптимизации режимов резания при чистовом точении фасонных поверхностей инструментами с износостойкими покрытиями. Результаты оптимизации получены в виде аналитических зависимостей оптимальных значений подачи и скорости резания от параметров процесса чистового точения фасонных поверхностей с учетом переменности действующих ограничений по температуре резания и шероховатости обработанной поверхности. Установлено, что в разных точках криволинейной поверхности оптимальные режимы могут изменяться до 1,5 -2 раз и это необходимо учитывать при выборе оптимальных режимов резания.

Полученные результаты позволяют количественно оценить преимущества инструментов с износостойкими покрытиями в сравнении с инструментами без покрытий. На основании разработанной методики выполнена оценка возможностей повышения производительность обработки до 2,3 раз, снижения себестоимости до 1,7 раза при использовании инструментов с покрытиями из нитрида титана TiN.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойким покрытием. – М.: Машиностроение, 1993. – С.368.
2. Ивченко Т. Г. Повышение эффективности тонкого точения закаленных сталей за счет оптимизации режимов резания / Т. Г. Ивченко, Е. О. Лыхманюк // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2014. Вып. (50). – С.107–112.
3. Петряева И. А., Ивченко Т. Г. Оптимизация режимов чистового точения на основании мультипликативной свертки критериев производительности и себестоимости // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – Вып. 1 (52). – С.147–151.
4. Ивченко Т. Г. Оценка эффективности использования СОТС при тонком точении инструментами из сверхтвердых материалов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2016. Вып. 1 (52). – С.62–68.
5. Ивченко Т. Г. Оптимизация режимов резания в условиях переменности действующих ограничений // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць.. – Краматорськ, ДДМА., 2014. – Вип.34 – С.32–37.
6. Петряева И. А., Михайлов А. Н., Ивченко Т. Г. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания // Наукоемкие технологии в машиностроении: ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – М: Машиностроение. – 2014. – Вып. 9. – С 6–13.

Поступила в редколлегию 21.05.2016 г.