

УДК 621.9: 658.5

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

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СОТС

*Представлены результаты оценки возможностей повышения производительности и снижения себестоимости обработки за счет повышения стойкости режущего инструмента, снижения температуры резания и шероховатости обработанной поверхности при использовании различных смазочно-охлаждающих технологических сред.*

**Ключевые слова:** смазочно-охлаждающая среда, шероховатость, температура резания, стойкость, производительность, себестоимость.

**T. G. Ivchenko**

## ESTIMATION OF POSSIBILITIES OF TREATMENT EFFICIENCY INCREASE AT THE USE OF THE CUTTING FLUIDS

*There are presented the results of the estimation 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 different technological cutting fluids.*

**Keywords:** cutting fluids, roughness, cutting temperature, cutting tool life, productivity, prime price.

### 1. Введение

Использование смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) – важнейшее направление совершенствования современного машиностроительного производства. В связи с этим, представленная работа, посвященная оценке эффективности использования СОТС при различных видах обработки, весьма актуальна.

В настоящее время накоплен достаточный опыт применения СОТС при обработке резанием [1]. Однако, рациональный выбор СОТС, вследствие большого разнообразия самих СОТС и способов их подачи в зону резания, весьма затруднен.

При анализе эффективности СОТС наиболее распространены критерии повышения стойкости, снижения сил и температур резания, уменьшения шероховатости обработанной поверхности, определяемые, как правило, экспериментальным путем [2]. Достаточно хорошо разработана методика учета действия СОТС в расчетах тепловых потоков и температур в зоне резания [3], позволяющая теоретически для любых условий обработки оценивать возможности различных СОТС по снижению температуры резания. Однако изменение указанных параметров процесса резания не является достаточным для обоснования эффективности СОТС.

Весьма важна оценка возможности интенсификации процесса резания при использовании СОТС, выполняемая на основании оптимизации режимов резания по различным критериям [4]. Наиболее объективной является количественная оценка эффективности использования СОТС по критериям повышения производительности и снижения себестоимости в различных условиях обработки [5, 6]. Представляет интерес дальнейшее развитие этой методики.

Цель работы – усовершенствование методики оценки эффективности использования СОТС для различных условий обработки и анализ возможностей повышения производительности и снижения себестоимости точения при использовании СОТС.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Эффективность механической обработки с использованием СОТС достигается за счет повышения стойкости режущего инструмента  $T$ , снижения температуры  $\Theta$  и силы резания  $P_z$ , а так же шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  в сравнении с соответствующими показателями для обработки без СОТС.

В представляемой работе эффективность 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 с использованием СОТС представляются в виде [4]:

$$P(V, S) = VS ; C(V, S) = V^{-1}S^{-1} + MK_T^{-1}K_\Theta^{-1/mn_t}V^{k_v}S^{k_s} , \quad (1)$$

где  $M = (t_c + A_u/A)(t^{x_v}/C_VK_V)^{1/m}$ ;  $k_v = 1/m - 1$ ;  $k_s = y_v/m - 1$ ;  $A$  - стоимость станка - минуты,  $A_u$  - стоимость одного периода стойкости инструмента;  $t_c$  - время смены инструмента;  $K_T, K_\Theta$  - коэффициенты повышения стойкости режущего инструмента  $T$  и снижения температуры резания  $\Theta$ .

На основании установленных с использованием методов линейного и геометрического программирования аналитических зависимостей оптимальных по различным критериям подач  $S_o$  и скоростей резания  $V_o$  от параметров черновой и чистовой обработки [4] определены коэффициенты интенсификации режимов резания при использовании СОТС.

Коэффициенты изменения подач при черновой обработке  $K_{S1}$ , при чистовой обработке  $K_{S2}$ :

$$K_{S1} = K_{Pz}^{-1/y_p} ; K_{S2} = K_R^{-1/y_r} ; \quad (2)$$

где  $K_{Pz}; K_R$  - коэффициенты снижения силы резания  $P_z$  и шероховатости обработанной поверхности  $R_a$ ;  $y_p$  - показатель степени, учитывающий влияние подачи  $S$  на силу резания  $P_z$ ;  $y_r$  - показатель степени, учитывающий влияние подачи  $S$  на шероховатость обработанной поверхности  $R_a$ .

Коэффициенты изменения скорости резания  $K_V$  для критерия максимальной производительности  $K_{VP}$ , для критерия минимальной себестоимости  $K_{VC}$  :

- при черновой обработке

$$K_{VP1} = \begin{cases} K_\Theta^{-1/n_t} K_{Pz}^{y_t/y_p n_t}, \text{ при } K_{\Theta o P1} \leq 1; \\ K_T^m K_{Pz}^{y_v/y_p}, \text{ при } K_{\Theta o P1} \geq 1; \end{cases} \quad K_{VC1} = \begin{cases} K_\Theta^{1/n_t} K_{Pz}^{-y_t/y_p n_t}, \text{ при } K_{\Theta o C1} \leq 1; \\ K_T^{-m} K_{Pz}^{-y_v/y_p}, \text{ при } K_{\Theta o C1} \geq 1; \end{cases}$$

$$K_{\Theta o P1} = \Theta / N_\Theta K_\Theta t^{x_t} (C_V K_V K_T^m / T^m t^{x_v})^{n_t} (34c^{1,3} K_\phi / C_P K_{Pz} t^{(x_p - 0,77)})^{(y_v n_t - y_t)/y_p} \quad (3)$$

$$K_{\Theta o C1} = \Theta / C_\Theta K_\Theta t^{x_t} (m / (1 - m) M K_T^{-1})^{m n_t} (34c^{1,3} K_\phi / C_P K_{Pz} t^{(x_p - 0,77)})^{(y_v n_t - y_t)/y_r} ;$$

- при чистовой обработке

$$K_{VP2} = \begin{cases} K_{\Theta}^{-1/n_t} K_R^{y_t/y_r n_t}, \text{ при } K_{\Theta oP2} \leq 1; \\ K_T^m K_R^{y_v/y_r}, \text{ при } K_{\Theta oP2} \geq 1; \end{cases} \quad K_{VC2} = \begin{cases} K_{\Theta}^{1/n_t} K_R^{-y_t/y_r n_t}, \text{ при } K_{\Theta oC2} \leq 1; \\ K_T^{-m} K_R^{-y_v/y_r}, \text{ при } K_{\Theta oC2} \geq 1; \end{cases}$$

$$K_{\Theta oP2} = \Theta / N_{\Theta} K_{\Theta} t^{x_t} (C_V K_V K_T^m / T^m t^{x_v})^{n_t} (R_a / C_R K_R)^{(y_v n_t - y_t) / y_r}; \quad (4)$$

$$K_{\Theta oC2} = \Theta / C_{\Theta} K_{\Theta} t^{x_t} (m / (1 - m) M K_T^{-1})^{m n_t} (C_R K_R / R_a)^{(y_v n_t - y_t) / y_r}$$

где  $K_{\Theta oP}$ ,  $K_{\Theta oC}$  - граничные значения коэффициентов снижения температуры резания  $\Theta$ , определяющие необходимость учета температурных ограничений при расчете оптимальной скорости резания  $V_o$  по критериям производительности и себестоимости;  $\Theta = 800^{\circ}C$  - допустимая температура резания;  $C_V$ ,  $K_V$  - коэффициенты и  $x_v$ ,  $y_v$ ,  $m$  - показатели, характеризующие степень влияния глубины  $t$ , подачи  $S$  и стойкости  $T$  на скорость резания  $V$ ;  $C_P$ ,  $K_{Pz}$  - коэффициенты и  $x_p$ ,  $y_p$  - показатели, характеризующие степень влияния глубины  $t$  и подачи  $S$  на силу резания резания  $P_z$ ;  $c$  - толщина пластины;  $K_{\varphi} = (\sin 60^{\circ} / \sin \varphi)^{0,8}$  - коэффициент, учитывающий влияние главного угла в плане  $\varphi$  на силу резания  $P_z$ ;  $C_{\Theta}$  - коэффициент и  $n_b$ ,  $y_b$ ,  $x_t$  - показатели степени, учитывающие влияние скорости резания  $V$ , подачи  $S$  и глубины резания  $t$  на температуру резания  $\Theta$ ;  $C_R$  - коэффициент и  $y_r$  - показатель степени, учитывающий влияние подачи  $S$  на шероховатость обработанной поверхности  $R_a$ .

Учет температурных ограничений весьма важен для правильного расчета оптимальных режимов резания. На рис. 1 в виде линий уровня представлены графики двухпараметрических зависимостей граничных коэффициентов снижения температуры резания от глубины резания и толщины твердосплавной пластины при черновой обработке  $K_{\Theta oPl}(t, c)$  и  $K_{\Theta oCl}(t, c)$ , рассчитанные по формуле (3). Рассматриваются примеры чернового точения стали 45 и нержавеющей стали X18H9T.

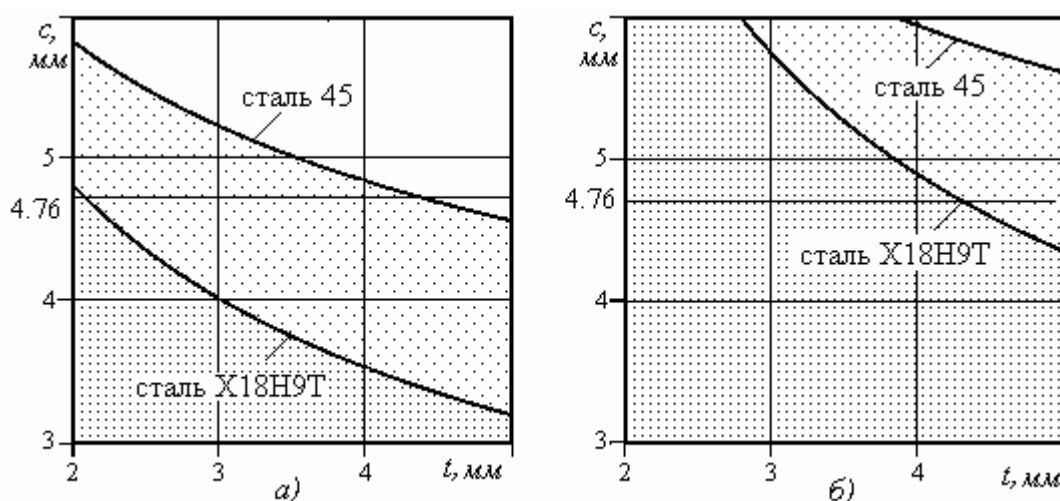


Рисунок 1. Граничные значения коэффициентов снижения температуры резания, определяющие необходимость учета температурных ограничений при расчете черновой оптимальной скорости резания по критериям производительности  $K_{\Theta oPl}$  - а) и себестоимости  $K_{\Theta oCl}$  - б) в зависимости от глубины резания  $t$  и толщины пластины  $c$ .

На рис.1 значения коэффициентов снижения температуры резания на указанных

линиях (сталь 18ХН9Т и сталь 45) соответствуют уровню  $K_{\theta P1} = 1$ ,  $K_{\theta C1} = 1$ . Заштрихованные области слева от этих линий характеризуют сочетания глубин резания и толщин пластин, при которых  $K_{\theta P1} \leq 1$ ,  $K_{\theta C1} \leq 1$  и температурные ограничения отсутствуют. Справа от этих линий располагаются области, в которых  $K_{\theta P1} \geq 1$  и  $K_{\theta C1} \geq 1$ , что свидетельствует о необходимости учета температурных ограничений.

Для стандартной толщины пластины  $s = 4,76$  мм практически во всем диапазоне значений глубин резания при черновой обработке стали 45 температурные ограничения отсутствуют. При черновой обработке стали 18ХН9Т существуют области изменения глубин резания и толщин пластин, где температурные ограничения необходимо учитывать.

На рис. 2 в виде линий уровня представлены двухпараметрические графики зависимости граничных коэффициентов снижения температуры резания от глубины резания и шероховатости обработанной поверхности  $K_{\theta P2}(t, R_a)$  и  $K_{\theta C2}(t, R_a)$ , рассчитанные по формуле (4). Рассматривается пример чистового точения конструкционной стали 45 и нержавеющей стали 18ХН9Т, а также тонкого точения эльбором закаленной стали HRC 60.

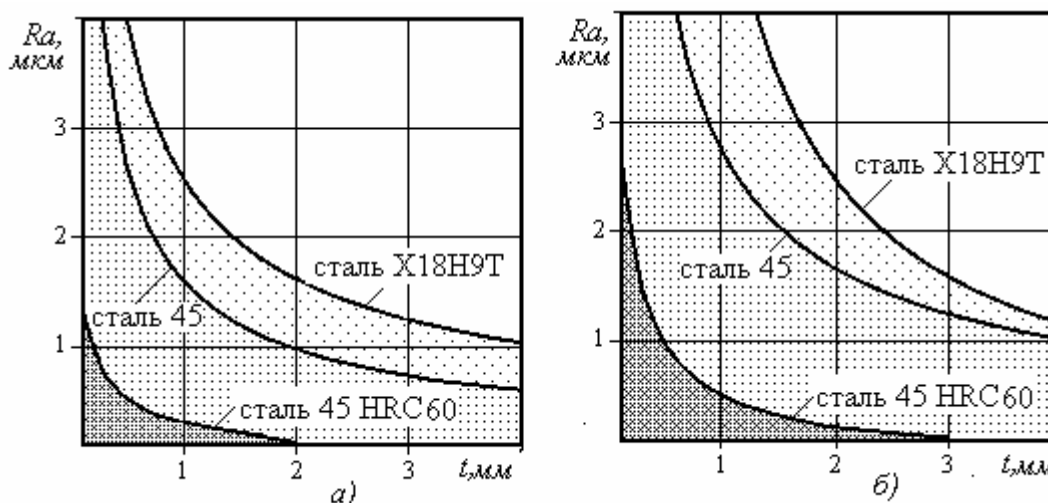


Рисунок 2. Граничные значения коэффициентов снижения температуры резания, определяющие необходимость учета температурных ограничений при расчете чистовой оптимальной скорости резания по критериям производительности  $K_{\theta P2}$  – а) и себестоимости  $K_{\theta C2}$  – б) в зависимости от глубины резания  $t$  и шероховатости поверхности  $R_a$ .

На рис. 2 значения коэффициентов снижения температуры резания на указанных линиях (сталь 18ХН9Т и сталь 45) соответствуют уровню  $K_{\theta P2} = 1$ ,  $K_{\theta C2} = 1$ . Заштрихованные области слева от этих линий характеризуют сочетания глубин резания и толщин пластин, при которых  $K_{\theta P2} \leq 1$ ,  $K_{\theta C2} \leq 1$  и температурные ограничения отсутствуют. Справа от этих линий располагаются области, в которых  $K_{\theta P2} \geq 1$  и  $K_{\theta C2} \geq 1$ , что свидетельствует о необходимости учета температурных ограничений, что особенно актуально при тонком точении закаленных сталей.

На основании установленных коэффициентов интенсификации режимов резания – подачи и скорости (3), (4) могут быть определены коэффициенты повышения производительности  $K_P = P(V,S) / P(V,S)_{\text{сотс}}$ ; снижения себестоимости  $K_C = C(V,S) / C(V,S)_{\text{сотс}}$ :

- при черновой обработке

$$K_{P1} = \begin{cases} \frac{-1}{K_{\Theta}^{n_t} K_T^m K_{Pz}^{y_p n_t}}, & \text{при } K_{\Theta o P1} \leq 1; \\ \frac{(y_v - 1)}{K_T^m K_{Pz}^{y_p}}, & \text{при } K_{\Theta o P1} \geq 1; \end{cases} \quad K_{C1} = \begin{cases} \frac{1}{K_{\Theta}^{n_t} K_T^m K_{Pz}^{y_p n_t}}, & \text{при } K_{\Theta o C1} \leq 1; \\ \frac{(1 - y_v)}{K_T^{-m} K_{Pz}^{y_p}}, & \text{при } K_{\Theta o C1} \geq 1; \end{cases} \quad (5)$$

- при чистовой обработке

$$K_{P2} = \begin{cases} \frac{-1}{K_{\Theta}^{n_t} K_T^m K_R^{y_r n_t}}, & \text{при } K_{\Theta o P2} \leq 1; \\ \frac{(y_v - 1)}{K_T^m K_R^{y_r}}, & \text{при } K_{\Theta o P2} \geq 1; \end{cases} \quad K_{C2} = \begin{cases} \frac{1}{K_{\Theta}^{n_t} K_T^m K_R^{y_r n_t}}, & \text{при } K_{\Theta o C2} \leq 1; \\ \frac{(1 - y_v)}{K_T^{-m} K_R^{y_r}}, & \text{при } K_{\Theta o C2} \geq 1. \end{cases} \quad (6)$$

Установленные коэффициенты повышения производительности  $K_P$  и снижения себестоимости  $K_C$  могут быть использованы для любых видов обработки, так как рассчитываются только на основании показателей степени влияния глубины, подачи и скорости резания в стойкостных, силовых и температурных зависимостях, идентичных для всех видов обработки и представляемых в справочно-нормативной литературе.

Графики двухпараметрических зависимостей коэффициентов повышения производительности  $K_P$  и снижения себестоимости  $K_C$  от коэффициентов снижения температуры резания  $K_{\Theta}$  и повышения стойкости режущего инструмента  $K_T$  при значениях коэффициентов снижения силы резания и шероховатости обработанной поверхности  $K_{Pz} = K_R = 1$  представлены на рис. 3. Рассмотрен пример чистовой обработки стали 45.

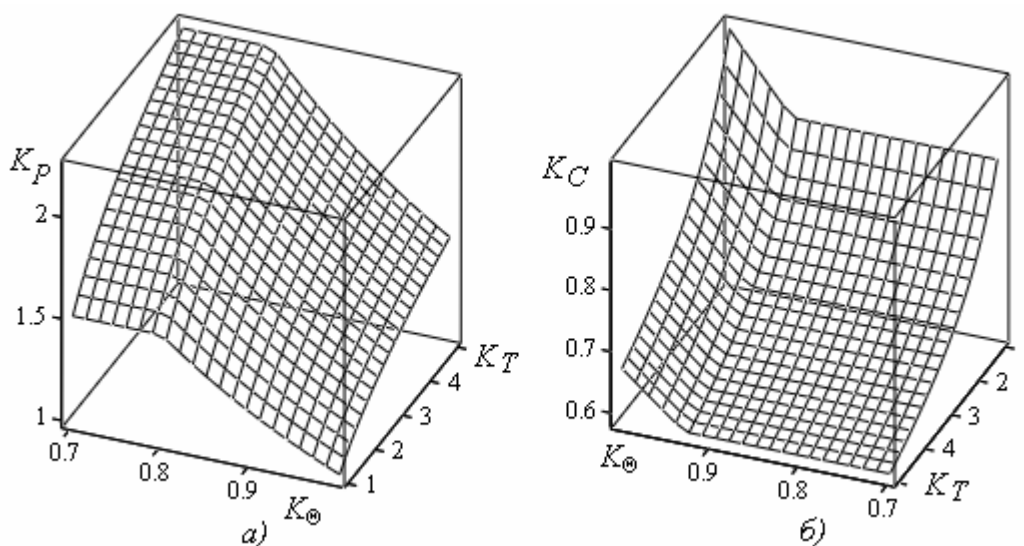


Рисунок 3. Графики зависимости коэффициентов повышения производительности  $K_P$  – а) и снижения себестоимости  $K_C$  – б) от коэффициентов снижения температуры резания  $K_{\Theta}$  и повышения стойкости режущего инструмента  $K_T$ .

Коэффициенты повышения стойкости режущего инструмента  $K_T$ , снижения температуры резания  $K_{\Theta}$ , силы резания  $K_{Pz}$  и шероховатости обработанной поверхности  $K_R$  при использовании СОТС определяются расчетным или экспериментальным пу-

тем.

Возможности различных СОТС по снижению температуры резания представлены в табл. 1 [5, 6].

Таблица 1. – Коэффициенты снижения температуры резания для различных условий обработки при использовании СОТС.

Обраб. материал	Инстр. материал	Смазочно-охлаждающая технологическая среда (СОТС)								
		Аквол-2			Укринол-1			МРУ-1у		
		Коэффициенты снижения температуры $K_{\theta}$ для различных способов подачи СОТС в зону резания (1- свободным поливом, 2 – напорной струей, 3 – распылением)								
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Сталь 45	Твердый сплав	0,85	0,75	0,88	0,82	0,72	0,84	0,78	0,78	0,78
Сталь X18H9T	Твердый сплав	0,80	0,70	0,82	0,76	0,67	0,78	0,73	0,73	0,73
Сталь 45 HRC 60	Эльбор	-	-	0,95	-	-	0,95	-	-	0,9

Рассмотрены следующие СОТС:

5% раствор эмульсола Аквол-2 с преимущественно охлаждающими свойствами; 5% раствор эмульсола Укринол-1с охлаждающими и частично смазочными свойствами; СОТС на основе минерального масла МРУ-1 со смазочными свойствами.

Наименьшее значение имеют коэффициенты снижения температуры  $K_{\theta}$  при подаче СОТС с охлаждающими свойствами напорной струей. Однако, при использовании СОТС со смазочным эффектом за счет снижения сил резания ( $K_{Pz} = 0,8$ ) при достаточно эффективном снижении температуры для любых способов подачи СОТС, наблюдается так же снижение шероховатости обработанной поверхности.

Возможности повышения эффективности обработки при использовании СОТС представлены в табл. 2. Пример расчета приведен для чистового и тонкого точения сталей с применением в качестве смазочно-охлаждающей среды МРУ-1.

Таблица 2. – Результаты оценки повышения эффективности чистовой обработки при использовании СОТС (МРУ-1).

Обраб. материал	Коэффициенты повышения эффективности при использовании СОТС				
	повышения стойкости $K_T$	снижения температуры $K_{\theta}$	снижения шероховатости $K_R$	повышения производительности $K_P$	снижения себестоимости $K_C$
Сталь 45	2	0,78	0,95	1,6	0,8
Сталь X18H9T	3	0,73	0,9	2,2	0,6
Сталь 45 HRC 60	2	0,9	1	2,0	0,5

Наибольшая эффективность использования СОТС наблюдается при обработке труднообрабатываемой нержавеющей стали X18H9T, для которой коэффициент повы-

шения стойкости больше, а коэффициенты снижения температуры резания и шероховатости обработанной поверхности меньше, чем для стали 45.

### 3. Выводы.

На основании выполненных исследований установлены коэффициенты интенсификации режимов резания, а также коэффициенты повышения производительности и снижения себестоимости обработки при использовании СОТС.

Усовершенствована методика оценки возможностей повышения эффективности обработки, позволяющая на основании известных коэффициентов повышения стойкости режущего инструмента, снижения температуры и силы резания, а так же шероховатости обработанной поверхности прогнозировать рост производительности и снижение себестоимости при использовании СОТС для любых заданных условий. На основании разработанной методики выполнена количественная оценка возможностей повышения эффективности обработки при использовании СОТС

Установлено, что применение СОТС повышает производительность и снижает себестоимости до 2 раз при обработке конструкционных сталей и более чем в 2 раза при обработке нержавеющей сталей. Разработанная методика может быть использована для любых видов обработки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л. В. Худобин, А. П. Бабичев, Е. М. Булыжев и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.

2. Богуславский, В. А. Влияние СОТС на себестоимость операций сверления нержавеющей сталей / В. А. Богуславский, Т. Г. Ивченко, В. В. Польченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ, 2014. - № 4 (50). – С. 41-47.

3. Ивченко, Т. Г. Расчет тепловых потоков и температур резания при точении с использованием смазочно-охлаждающих жидкостей / Т. Г. Ивченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА, 2010. - № 26.- С. 90 -96.

4. Михайлов, А. Н. Многокритериальная оптимизация режимов резания при точении инструментами с покрытиями /А. Н. Михайлов, И. А. Петряева, Т. Г. Ивченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - Тула: ТулГУ, 2016. – № 8. - С. 159-166.

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

6. Ивченко, Т. Г. Оценка эффективности использования СОТС при тонком точении инструментами из сверхтвердых материалов / Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: – Донецк: ДонНТУ, 2016. – Вып. 1 (52). – С. 62-68.

Поступила в редколлегию 6.02.18 г.