

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОТС ПРИ ТОНКОМ ТОЧЕНИИ ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Представлены результаты расчета температур резания при тонком точении инструментами из сверхтвердых материалов с учетом действия смазочно – охлаждающих технологических сред (СОТС). Установлены коэффициенты снижения температуры резания при использовании различных СОТС. Определены оптимальные режимы резания по различным критериям оптимизации: максимальной производительности и минимальной себестоимости. Выполнен сравнительный анализ возможностей повышения производительности и снижения себестоимости при снятии температурных ограничений за счет применения СОТС.*

**Ключевые слова:** *сверхтвердые материалы, тонкое точение, температура резания, производительность, себестоимость, оптимизация.*

**T.G. Ivchenko**

### **ESTIMATION OF EFFICIENCY OF THE TCF APPLICATION AT FINE TURNING BY TOOLS FROM SUPER HARD MATERIALS**

The results of calculation of the cutting temperatures at finish turning by tools from super hard materials taking into account an action of technological cutting fluid (TCF) are expected. The coefficients of cutting temperature decline at the application of the different TCF are set. The optimum cutting modes on the different criteria of optimization: maximum productivity and minimum prime price are certain. The comparative analysis of possibilities of the productivity increase and prime price decline is executed of the removal of temperature limitations due to the TCF application.

**Key words:** *super hard materials, finish turning, cutting temperature, prime price, productivity, optimization.*

#### **1. Введение**

Использование сверхтвердых инструментальных материалов (СТМ) – важнейшее направление совершенствования современного машиностроительного производства. Возможности широкого применения СТМ при лезвийной обработке деталей машин в значительной мере ограничиваются высокими температурами в зоне резания, для снижения которых может быть целесообразным применение смазочно - охлаждающих технологических сред (СОТС) [1]. В связи с этим, представленная работа, посвященная оценке эффективности использования СОТС при тонком точении инструментами из СТМ, весьма актуальна.

В настоящее время достаточно хорошо разработана методика учета действия СОТС в расчетах тепловых потоков и температур в зоне резания [2, 3], позволяющая для любых условий обработки оценивать возможности различных СОТС по снижению температуры резания. Однако изменение температуры резания не является определяющим критерием выбора СОТС.

Методика оценки эффективности использования СОТС по критериям повышения производительности и снижения себестоимости [4, 5] основана на расчетах оптимальных режимов резания с учетом температурных ограничений. Снятие температурных ограничений за счет применения СОТС позволяет существенно повысить режимы резания, а, следовательно, повысить производительность и снизить себестоимость обработки.

Результаты оценки эффективности использования СОТС, выполненные в соответствии с указанной методикой, достаточно широко представлены для различных условий обработки твердосплавными инструментами [6]. Однако наиболее распространенные в этих случаях способы подачи СОТС в зону резания – свободным поливом и высоконапорной струей неприемлемы для СТМ в силу их хрупкости и высокой чувствительности к тепловым ударам. Возможным вариантом использования СОТС при тонком точении инструментами из СТМ является ее подача в зону резания в распыленном состоянии [2]. Представляет интерес дальнейшее развитие методики оценки эффективности СОТС применительно к тонкому точению инструментами из СТМ.

Цель работы – исследование возможностей повышения производительности и снижения себестоимости при тонком точении закаленных сталей инструментами из СТМ с использованием СОТС.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Наиболее эффективным с точки зрения использования СОТС при тонком точении инструментами из СТМ является распыление небольшого количества жидкости сжатым воздухом при давлении 0,2Мпа со скоростью до 300м/с.

Преимуществом способа является весьма малый расход СОТС: до 10 г/мин водной и 0,1 г/мин масляной, что исключает необходимость сбора, очистки и разложения отработанной СОТС в отличие от других способов.

При подаче СОТС в зону резания в распыленном состоянии имеет место сложный теплообмен поверхности лезвия инструмента с двухфазной воздушно-жидкостной средой. Во-первых, происходит конвективный теплообмен с распыленной жидкостью, капли которой при соприкосновении с поверхностью тела нагреваются до температуры насыщения, а затем испаряются. Во-вторых, происходит вынужденный конвективный теплообмен с воздухом, содержащимся в двухфазной струе.

Приведенный коэффициент теплоотдачи, учитывающий все процессы, происходящие на поверхности контакта струи жидкости с нагретой поверхностью равен:

$$\alpha_{np} = 1,2K^{2/3}m^2(\alpha_P - \alpha_B) + \alpha_B, \quad (1)$$

где  $K$  – концентрация жидкости в воздушно-жидкостной среде;  $m$  – коэффициент, характеризующий деформацию капель жидкости при соударении с поверхностью;  $\alpha_P$  – средний по времени коэффициент теплоотдачи жидкости в распыленном состоянии в процессе нагревания и испарения капли;  $\alpha_B$  – коэффициент теплоотдачи в воздухе:

$$\alpha_P = \frac{\alpha_H \alpha_K [c(\Theta_S - \Theta_H) + r]}{r\alpha_H + c\alpha_K (\Theta_S - \Theta_H)}; \quad \alpha_B = 3.4w^{0.8}/l^{0.2}; \quad (2)$$

где  $\Theta_S$ ,  $\Theta_H$ ,  $\Theta_O$  – температуры нагретой поверхности инструмента, насыщения и окружающей среды соответственно;  $c$  – теплоемкость жидкости;  $r$  – теплота парообразования;  $w$  – скорость потока СОТС;  $l$  – характерный размер;  $\alpha_H$  – коэффициент теплоотдачи при нагревании;  $\alpha_K$  – коэффициент теплоотдачи при кипении и испарении:

$$(\alpha_H = 447,6(\Theta_f - \Theta_0)^{0,33} / l^{0,01}; \alpha_K \approx 3 \cdot 10^3, \text{ (при } \Theta_S \geq 235 \text{ }^\circ\text{C).} \quad (3)$$

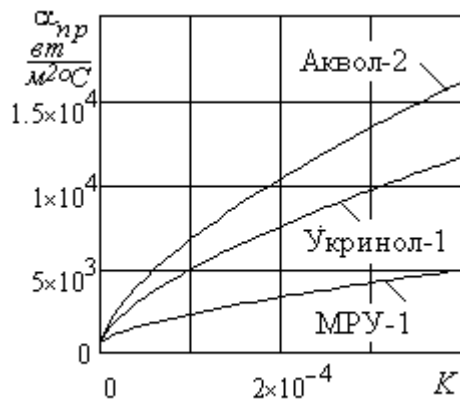


Рис. 1. Графики зависимости приведенного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{np}$  от концентрации жидкости  $K$  для различных СОТС

Графики зависимости приведенного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{np}$  от концентрации жидкости  $K$  для различных СОТС приведены на рис. 1. Расчеты выполнены для следующих условий:  $w = 220 \text{ м/с}$ ;  $l = 25 \text{ мм}$ ;  $\alpha_B = 0,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ , расход жидкости –  $0,6 \text{ кг/час}$  ( $10 \text{ г/мин}$ ), расход воздуха –  $2 \text{ м}^3 \text{/час}$ . Наиболее выраженными охлаждающими свойствами обладает 5% раствор эмульсола Аквол-2. Несколько уступает по охлаждающим свойствам 5% раствор эмульсола Укринол-1, который, однако, частично обладает смазочными свойствами. СОТС на основе минерального масла МРУ-1 обладает наиболее выраженными смазочными свойствами, и только частично охлаждающими, о чем свидетельствует

наименьший приведенный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{np}$ .

Расчеты тепловых потоков и температур резания с учетом действия СОТС выполнены в соответствии с методикой, изложенной в [3]. Примеры расчетов температур резания представлены для следующих условий: обрабатываемый материал – закаленная сталь  $HRC 60-62$ ; инструментальный материал – эльбор –  $P$ ; режимы резания – глубина резания  $t = 0,5 \text{ мм}$ , подача  $S = 0,1 \text{ мм/об}$ .

Графики зависимости температур резания  $\Theta$  от скорости резания  $V$  (для

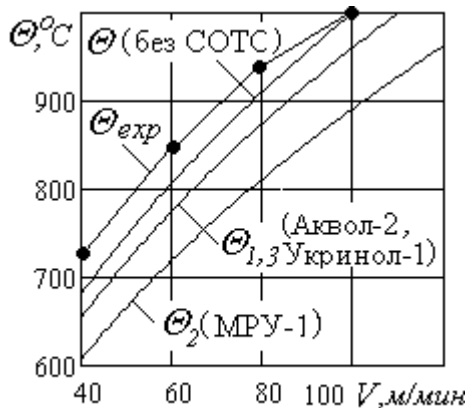


Рис. 2 Графики зависимости температур резания от скорости резания для различных СОТС

указанных ранее условий) с применением различных СОТС представлены на рис. 2. С увеличением скорости температуры резания существенно возрастают и могут превышать допустимый уровень  $\Theta = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ , определяемый возможными необратимыми структурно – фазовыми превращениями в поверхностном слое детали. Это свидетельствует о целесообразности использования СОТС для снижения температуры резания.

В результате расчетов получены следующие аналитические зависимости температуры резания от скорости резания и подачи:

- при обработке без СОТС (в сравнении с известными результатами экспериментальных

исследований  $\Theta_{exp}$  [1] которые с погрешностью, не превышающей 7%, подтверждают адекватность разработанных теоретических моделей и возможность их использования на практике):

$$\Theta = 246S^{0,23}V^{0,42}; \Theta_{exp} = 263S^{0,23}V^{0,42}. \quad (4)$$

- при обработке с различными СОТС ( $\Theta_1$  –Аквол-2;  $\Theta_2$  –МРУ-1;  $\Theta_3$  – Укринол - 1):

$$\Theta_1 = 236S^{0,23}V^{0,42}; \Theta_2 = 219S^{0,23}V^{0,42}. \Theta_3 = 233S^{0,23}V^{0,42}. \quad (5)$$

Наибольшее снижение температуры наблюдается при использовании СОТС на основе минерального масла МРУ-1, что объясняется снижением сил и температур резания вследствие проявления преимущественно смазочных свойств, несмотря на то, что эта СОТС имеет наименьший коэффициент теплоотдачи.

5% раствор эмульсола Аквол-2, обладающий преимущественно охлаждающими свойствами и имеющий наибольший коэффициент теплоотдачи обеспечивает наименьшее снижение температуры резания. 5% раствор эмульсола Укринол-1, обладающий как охлаждающими, так и частично смазочными свойствами, практически не отличается от эмульсола Аквол-2 по уровню снижения температуры резания.

Для количественной оценки степени возможного уменьшения температуры предлагаются коэффициенты снижения температуры резания  $K_{\Theta} = \Theta_{СОТС}/\Theta_{без СОТС}$ .

Установленные коэффициенты снижения температуры резания: для эмульсолов Аквол-2 (Укринол-1)  $K_{\Theta} = 0,95$ ; для МР-1У -  $K_{\Theta} = 0,9$ .

Возможности повышения производительности и снижения себестоимости при тонком точении инструментами из СТМ с использованием СОТС исследуются на основе многокритериальной оптимизации режимов резания [4, 5].

Оптимальная подача при тонком точении не зависит от критерия оптимизации и определяется, исходя из требуемой шероховатости обработанной поверхности  $R_a$ :

$$S_o = (R_a / C_R K_R t^{x_r})^{1/y_r}, \quad (6)$$

где  $C_R, K_R$  – коэффициенты и  $y_r, x_r$  - показатели степени, учитывающие влияние подачи и глубины резания на шероховатость обработанной поверхности.

Оптимальные скорости резания определяются с учетом критерия оптимизации:  $V_{oP}$  – для критерия максимальной производительности,  $V_{oC}$  – для критерия минимальной себестоимости.

$$V_{oP} = \begin{cases} \left( \Theta / C_{\Theta} K_{\Theta} t^{x_t} S_o^{y_t} \right)^{1/n_t}, & K_{\Theta P o} < 1; \\ C_V K_V / T^m t^{x_v} S_o^{y_v}, & K_{\Theta P o} \geq 1; \end{cases} \quad V_{oC} = \begin{cases} \left( \Theta / C_{\Theta} K_{\Theta} t^{x_t} S_o^{y_t} \right)^{1/n_t}, & K_{\Theta C o} < 1; \\ (m/(1-m)M)^m S_o^{y_v}, & K_{\Theta C o} \geq 1, \end{cases} \quad (7)$$

где  $T$  – период стойкости инструмента;  $C_V, K_V$  – коэффициенты и  $x_v, y_v, m$  – показатели, характеризующие степень влияния глубины, подачи и стойкости на скорость резания;  $C_{\Theta}$  - коэффициент и  $n_t, y_t, x_t$  – показатели степени, характеризующие степень влияния скорости резания, подачи и глубины на температуру резания;  $K_{\Theta}$  - коэффициент, учитывающий влияние СОТС на температуру резания.

$M$  – коэффициент, учитывающий, условия обработки:

$$M = (t_c + A_u / A) \left( t^{x_v} / C_V K_V \right)^{1/m}, \quad (8)$$

где  $A$  - стоимость станко - минуты,  $A_u$  - стоимость одного периода стойкости инструмента;  $t_c$  - время смены инструмента.

$K_{\Theta P_0} = 800/\Theta(V_{oP}, S_o)$ ;  $K_{\Theta C_0} = 800/\Theta(V_{oC}, S_o)$  - граничные значения коэффициентов снижения температуры резания, определяющее необходимость учета температурного ограничения для различных критериев оптимизации:

$$K_{\Theta P_0} = 800/C_{\Theta} (C_V K_V T^{-m})^{n_t} (C_R K_R t^{x_r} / R_a)^{(y_v n_t - y_t)/y_r} t^{x_t - x_v n_t}. \quad (9)$$

$$K_{\Theta C_0} = 800/C_{\Theta} (m/(1-m)M)^{m n_t} (C_R K_R t^{x_r} / R_a)^{(y_v n_t - y_t)/y_r} t^{x_t}. \quad (10)$$

Пример определения оптимальных режимов резания приведен для тонкого точения закаленной стали  $HRC\ 60..62$  резами из эльбора -  $P$  (геометрические параметры: передний угол  $\gamma = 5^\circ$ , радиус при вершине  $r = 0,8\text{мм}$ ; стойкость  $T = 60\text{мин.}$ , глубина резания  $t = 0,5\text{мм}$ ); шероховатость обработанной поверхности  $R_a = 1,25\ \mu\text{м}$ . Основные закономерности протекания процесса резания описываются зависимостями стойкости режущего инструмента  $T$ , температуры резания  $\Theta$  и шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  от скорости резания, подачи и глубины резания [1]:

$$T = \frac{2,46 \cdot 10^4 \cdot 1,1}{V^{1,65} t^{0,3} S^{0,5}}; \Theta = 246 K_{\Theta} S^{0,23} V^{0,42}; R_a = HV^{-0,19} r^{-0,42} S^{1,3}. \quad (4.10)$$

где  $HV = 37$  - твердость инструментального материала.

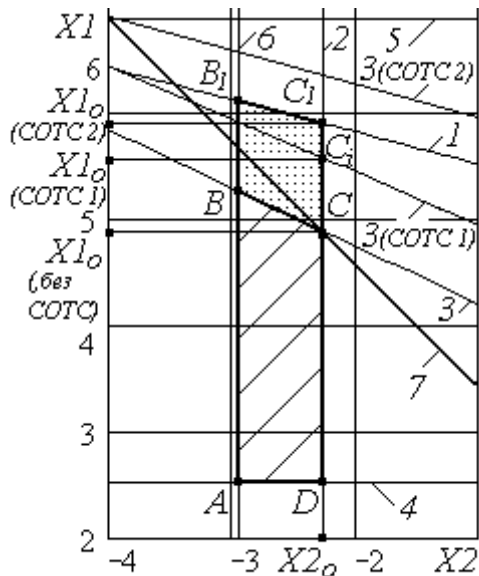


Рис. 3. Схема определения оптимальных режимов резания для тонкого точения закаленной стали ХВГ

Схема определения оптимальных режимов резания для тонкого точения по критерию максимальной производительности методом линейного программирования представлена на рис.3.

Точка  $C$  в многоугольнике  $ABCD$ , в которой целевая функция принимает максимальное значение, является точкой пересечения ограничений по предельно допустимой шероховатости обработанной поверхности (2) и допустимой температуре резания (3), когда максимальная допустимая из условий структурно-фазовых превращений обрабатываемой поверхности температура  $\Theta_{дон} = 800^\circ\text{C}$ . Оптимальные режимы резания:  $X2_o = -2,4$ ;  $X1_o$  без  $COTC = 4,8$ ;  $S_o = 0,1\text{мм/об}$ ;  $V_o = 64,4\text{м/мин}$ .

При использовании в качестве  $COTC$  5% раствора эмульсола Аквол-2 с коэффициентом снижения температуры резания  $K_{\Theta} = 0,95$  температурное

ограничение полностью не снимается,  $X1_o\ COTC1 = 5,6$ ;  $V_{o1} = 76,4\text{м/мин}$ .

При снятии температурных ограничений за счет использования СОТС на основе минерального масла МРУ-1 с коэффициентом снижения температуры резания  $K_{\Theta} = 0,9$  область допустимых значений определяется из многоугольника  $AB_1C_1D$ . Точка экстремума целевой функции  $C_1$  является точкой пересечения ограничений по предельно допустимой шероховатости обработанной поверхности (2) и режущим свойствам инструмента (3). Оптимальная подача при этом не меняется:  $S_o = 0,1$  мм/об. Оптимальная скорость резания существенно (в 1,37 раза) возрастает:  $XI_{o \text{ СОТС } 2} = 5,8$ ;  $V_o = 88,2$  м/мин.

Расчеты оптимальных режимов резания, обеспечивающих минимальную себестоимость тонкого точения закаленных сталей, выполнены для указанных ранее условий с учетом того, что стоимость станкоминуты  $A = 5$  коп/мин; стоимость 1 периода стойкости инструмента  $A_u = 500$  коп/период; время смены инструмента  $t_c = 5$  мин).

Оптимальная подача не зависит от выбора критерия оптимизации:  $S_o = 0,1$  мм/об. Оптимальная по критерию минимальной себестоимости скорость резания без учета температурных ограничений  $V_{o2} = 81,6$  м/мин. Температура резания для этой скорости  $\Theta(S_o, V_{o2}) = 839^\circ\text{C}$ . Она превышает допустимый уровень  $\Theta = 800^\circ\text{C}$ , что свидетельствует о необходимости учета для заданных условий температурных ограничений. Оптимальная скорость резания с учетом температурных ограничений так же, как и подача, не зависит от выбора критерия оптимизации:  $V_o = 64,4$  м/мин.

Учет температурных ограничений приводит к снижению оптимальных режимов резания, а, следовательно, к снижению производительности и повышению себестоимости обработки. Количественная оценка повышения эффективности обработки при снятии температурных ограничений может быть выполнена на основании коэффициентов повышения производительности  $K_P$  и снижения себестоимости  $K_C$ :

$$K_P = \begin{cases} K_{\Theta}^{-1/n_t}, & K_{\Theta P_o} < K_{\Theta}; \\ \frac{C_V K_V (C_{\Theta} K_{\Theta} t^{x_t} S_o^{y_t})^{1/n_t}}{\Theta^{1/n_t} T^{m_t} x_v S_o^{y_v}}, & K_{\Theta P_o} \geq K_{\Theta}; \end{cases} \quad (11)$$

$$K_C = \begin{cases} \frac{1 + M V_o^{k_V} S_o^{k_S}}{1 + M K_{\Theta}^{-1/m_t} V_o^{k_V} S_o^{k_S}}, & K_{\Theta C_o} < K_{\Theta}; \\ \frac{1 + M V_o^{k_V} S_o^{k_S}}{1 + M K_{\Theta C_o}^{-1/m_t} V_o^{k_V} S_o^{k_S}}, & K_{\Theta C_o} \geq K_{\Theta}. \end{cases} \quad (12)$$

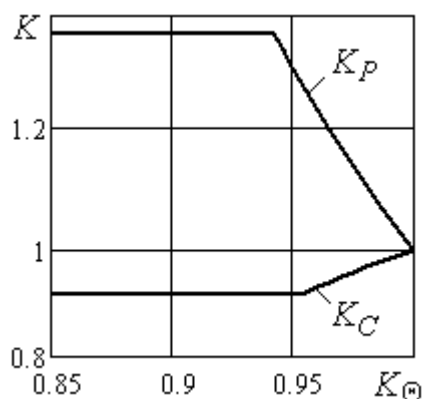


Рис. 4. Влияние коэффициента снижения температуры резания за счет СОТС на коэффициенты повышения эффективности

где  $k_V$  и  $k_S$  - коэффициенты, равные:  $k_V = 1/m - 1$ ;  $k_S = y_v/m - 1$ .

Графики зависимости коэффициентов повышения производительности  $K_P$  и снижения себестоимости  $K_C$  от коэффициента снижения температуры резания  $K_{\Theta}$  (рис. 4) позволяют

оценивать эффективность использования СОТС при тонком точении инструментами из СТМ.

Для приведенных ранее условий установлены граничные значения коэффициентов снижения температуры резания, определяющие необходимость учета температурных ограничений:

- по критерию производительности  $K_{\theta P_0} = 0,939$ ;
- по критерию себестоимости  $K_{\theta C_0} = 0,954$ .

С уменьшением коэффициента  $K_{\theta}$  производительность растет, себестоимость падает. При достижении граничных значений этого коэффициента температурные ограничения снимаются, его дальнейшее уменьшение нецелесообразно.

В результате расчетов установлено, что применение в качестве СОТС 5% раствора эмульсола Аквол-2 (коэффициент снижения температуры резания  $K_{\theta} = 0,95$ ) обеспечит рост производительности в 1,3 раза, снижение себестоимости – в 1,1 раза. Применение СОТС на основе минерального масла МРУ-1 (коэффициент снижения температуры резания  $K_{\theta} = 0,9$ ) обеспечит рост производительности в 1,4 раза, снижение себестоимости – в 1,1 раза.

### **Заключение**

На основании выполненных исследований установлены характер и степень влияния параметров подачи различных СОТС в зону резания в распыленном состоянии на коэффициент теплоотдачи. Представлены результаты расчета температур резания при тонком точении инструментами из эльбора –  $P$  с учетом действия СОТС. Установлены коэффициенты снижения температуры резания при использовании СОТС с различными свойствами.

Приведены теоретические модели и примеры расчетов оптимальных подач и скоростей резания в зависимости от условий обработки, определенных по различным критериям оптимизации - максимальной производительности и минимальной себестоимости с учетом температурных ограничений.

Выполнена оценка возможностей повышения производительности и снижения себестоимости при снятии температурных ограничений за счет применения СОТС. Обоснована возможность повышения производительности тонкого точения инструментами из эльбора –  $P$  в 1,4 раза, снижение себестоимости в 1,1 раза при использовании СОТС.

Разработанная методика может быть использована для любых видов обработки.

### **Список литературы:**

1. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами, и их применение: [Справочник] / В.П. Жедь, Г.В. Боровский, Я.А. Музыкант, Г.М. Ипполитов. — М.: Машиностроение, 1987. - 320с.
2. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев и др.; под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544с.
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. Збірник наукових праць.. – Краматорськ, ДДМА. вип.26, 2010.- С.90 -96.
4. Ивченко Т.Г. Оптимізація параметрів процесу різання з обліком температурних обмежень / Т.Г. Івченко // Научный вестник ДГМА. – Краматорск: ДГМА, 2012. – №1

(9 Е). – С. 72-77.

**5.** Івченко Т.Г. Учет температурных ограничений при оптимизации режимов резания методом геометрического программирования / Т.Г. Івченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ, 2014. Вып. 1(47). – С.144-148.

**6.** Івченко Т.Г. Підвищення продуктивності обробки з використанням мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ / Т.Г. Івченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ, 2013. Вып. 45 . – С.112-117.

Поступила в редколлегию \_\_\_\_\_

ГОСТ Р 7.0.7.7–2009