

УДК 621.9: 658.5

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

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И ТЕМПЕРАТУР В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОНКОМ ТОЧЕНИИ РЕЗЦАМИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Представлены результаты расчета тепловых потоков и температур в зоне резания при тонком точении инструментами из сверхтвердых материалов. Установлены общие закономерности изменения тепловых потоков в зависимости от режимов резания для тонкого точения закаленных сталей и чугунов резцами из сверхтвердых материалов. Определены основные закономерности распределения температур на передней и задней поверхностях лезвия инструмента из сверхтвердых материалов. Выполнен сравнительный анализ температур резания при тонком точении различных закаленных сталей и чугунов резцами из различных сверхтвердых материалов.

Ключевые слова: сверхтвердые материалы, тонкое точение, тепловой поток, температура резания

T. G. Ivchenko, A. A. Andreeva, M. A. Episheva

ANALYSIS OF THE THERMAL STREAMS AND TEMPERATURES IN THE CUTTING AREA AT FINISH TURNING BY THE TOOLS FROM SUPER HARD MATERIALS

The results of calculation of the thermal stream and temperatures in the cutting area at the finish turning by cutting tools from super hard materials are expected. General conformities to the law of thermal stream change depending on the cutting regimes for finish turning of hard-tempered steel and cast irons by chisels from the super hard materials are set. Basic conformities to the law of the temperatures distributing on the front and back surfaces of the cutting tools from the super hard materials are certain. The comparative analysis of the cutting temperatures at the finish turning of the different hard-tempered steel and cast-irons by the chisels from the different super hard materials is executed.

Keywords: super hard materials, finish turning, thermal stream, cutting temperature.

1. Введение

Современное инструментальное производство располагает широкой гаммой сверхтвердых инструментальных материалов (СТМ), обеспечивающих возможность существенного повышения производительности при окончательной обработке деталей машин. Наибольшее распространение при обработке сталей и чугунов имеют СТМ на основе кубического нитрида бора, так как, обладая высокой твердостью, они химически инертны к черным металлам [1].

Основное ограничение роста режимов резания при использовании СТМ – высокие температуры в зоне резания, исследование которых весьма актуально для повышения эффективности механической обработки [2].

Имеющиеся в настоящее время экспериментальные исследования теплового состояния режущего инструмента, оснащенного СТМ, не охватывают всего существующих их многообразия [3]. В связи с чем, существенно возрастает роль теоретических методов анализа тепловых потоков и температур в зоне резания инструментами из СТМ, успешно используемых применительно к твердосплавным инструментам [4].

Известная методика аналитического расчета трехмерных температурных полей в лезвии режущего инструмента, учитывающая одновременное действие источников

теплоты на передней и задней поверхностях, апробирована и экспериментально подтверждена для твердосплавного инструмента [5].

Для разнообразных условий эксплуатации этого же инструмента достаточно хорошо теоретически исследованы и закономерности формирования тепловых потоков в зоне резания [6]. Интерес представляет дальнейшее развитие методики исследования теплового состояния зоны резания для инструментов, оснащенных СТМ.

Целью работы является исследование тепловых потоков и температур в зоне резания для различных условий тонкого точения резцами, оснащенными СТМ.

2. Основное содержание и результаты работы

При резании на лезвие режущего инструмента одновременно действуют источники теплоты на передней и задней поверхностях, возникающие вследствие взаимодействия со стружкой и деталью (рис. 1).

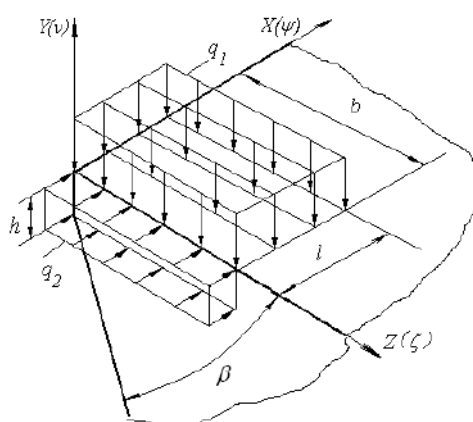


Рисунок 1. К определению тепловых потоков на передней и задней поверхностях лезвия инструмента

При исследовании теплового состояния зоны резания, прежде всего, определяются тепловые потоки на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента. Ось Z в рассматриваемой системе координат ориентируется в направлении главной режущей кромки; размеры источника: b – ширина среза; l – длина контактной площадки в направлении схода стружки; h – износ по задней поверхности; β – угол заострения.

Плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента в зависимости от основных параметров процесса резания могут быть определены на основании зависимостей [4]:

$$q_1 = \frac{K_1 K_3 \lambda_u - K_2 N_2 h + K_1 M_2 h}{K_3 K_4 \lambda_u + M_2 K_4 h - N_1 N_2 l h / \lambda_u}; \quad q_2 = \frac{(K_1 - K_4 q_1) \lambda_u}{N_2 h}, \quad (1)$$

$$\text{где } K_1 = \frac{(1+c)\omega_{\bar{a}} k b' q_{\bar{a}}}{\lambda_{\bar{a}} V} + \frac{K_{c1} q_{1T}}{\lambda_{\bar{a}}} \sqrt{\frac{\omega_{\bar{a}} k l}{V}}; \quad K_2 = \frac{(1+c)\omega_{\bar{a}} k b' q_{\bar{a}} T_u}{\lambda_{\bar{a}} V} + \frac{K_{c2} q_{2T}}{\lambda_{\bar{a}}} \sqrt{\frac{\omega_{\bar{a}} h}{V}};$$

$$K_3 = 1,82 K_{c2} \sqrt{\omega_{\bar{a}} h / V} / \lambda_{\bar{a}}; \quad K_4 = 1,3 K_{c1} \sqrt{\omega_{\bar{a}} k l / V} / \lambda_{\bar{a}} + M_1 l / \lambda_u;$$

$\lambda_{\bar{a}}, \lambda_u, \omega_{\bar{a}}, \omega_u$ – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материалов детали и инструмента; M_1, M_2, N_1, N_2 – безразмерные функции, определяющие нагрев контактных площадок на передней и задней поверхностях лезвия инструмента $M_{1,2} = (4,88 + 2,64 \eta_{1,2}^{0,5} \lg \eta_{1,2}) \beta^{-0,85}$; $N_{1,2} = (0,04 + 0,02 \eta_{1,2}^{0,6} \lg \eta_{1,2}) B_{1,2}(h/l)$, ($\eta_1 = b/l$, $\eta_2 = b/h$ ($\eta_{1,2} > 1$); $B_{1,2}(h/l)$ – специальные функции); c – коэффициент, учитывающий подогрев слоев металла стружки за один оборот детали; b' – коэффициент относительного количества теплоты, уходящего в стружку; T_o – безразмерная функция распределения температур в детали, вызванных теплотой деформации; k – коэффициент усадки стружки; q_{1T}, q_{2T} – плотности тепловых потоков от сил трения на площадках контакта между стружкой и передней поверхностью лезвия, между задней поверхностью лезвия и дета-

лю; длина $l = 2S \sin \varphi [k(1 - \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma]$ γ - передний угол резца; φ - главный угол в плане.

Примеры расчета тепловых потоков и температур резания выполнены для различных условий тонкого точения. Обрабатываемые материалы: различные закаленные стали и высокопрочные чугуны. Инструментальные материалы: различные СТМ - эльбор-Р, киборит и гексанит. Геометрические параметры резцов: передний угол $\gamma = -7^\circ$, задний угол $\alpha = 7^\circ$, углы в плане $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$. Износ по задней поверхности $h = 0,1$ мм. Режимы резания: глубина резания $t = 0,8$ мм; подача $S = 0,1$ мм/об; скорость резания $V = 100$ м/мин.

Графики зависимостей плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента от скорости резания V и подачи S при обработке стали 45 HRC35 резцами из эльбора-Р, высокопрочного чугуна HB600 резцами из киборита представлены на рис. 2.

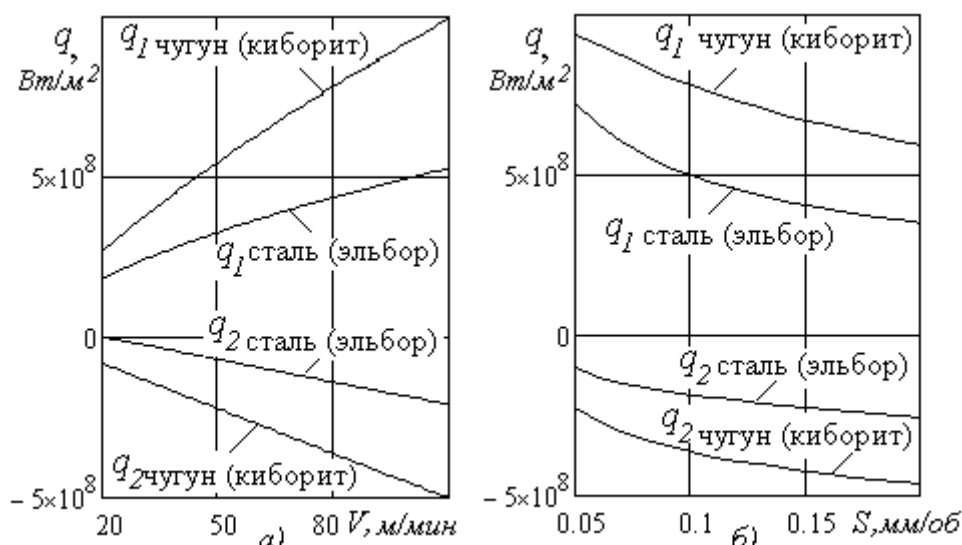


Рисунок 2. Графики зависимостей плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента от скорости резания V – а) и подачи S – б) для различных обрабатываемых и инструментальных материалов.

Для заданных условий обработки плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента при обработке чугуна значительно превышают плотности тепловых потоков при обработке стали, что объясняется снижением площади контакта стружки с передней поверхностью лезвия вследствие меньшей усадки стружки для чугуна. Плотности тепловых потоков возрастают с ростом скорости резания V , что закономерно связано с увеличением общей мощности тепловыделения при резании. Однако с увеличением подачи S и соответствующим увеличением площади контакта стружки с передней поверхностью лезвия плотности тепловых потоков уменьшаются. Отрицательные значения плотности тепловых потоков на задней поверхности лезвия q_2 свидетельствует о направлении теплового потока из инструмента в деталь, что способствует охлаждению инструмента.

На основании установленных тепловых потоков q_1 и q_2 могут быть рассчитаны средние температуры на передней Θ_1 и задней Θ_2 поверхностях лезвия инструмента, а так же температура резания Θ_p , представляющая собой среднюю температуру на передней и задней поверхностях [4]:

$$\Theta_1 = \frac{q_1 l}{\lambda_u} M_1 + \frac{q_2 h}{\lambda_u} N_2; \quad \Theta_2 = \frac{q_2 h}{\lambda_u} M_2 + \frac{q_1 l}{\lambda_u} N_1; \quad \Theta_P = \frac{\Theta_1 l + \Theta_2 h}{l + h}. \quad (2)$$

Графики зависимости температуры резания Θ_P от скорости резания V при обработке стали 45 HRC35 и чугуна HB600 резцами из различных СТМ - эльбора-Р, киборита и гексаниита представлены на рис. 3.

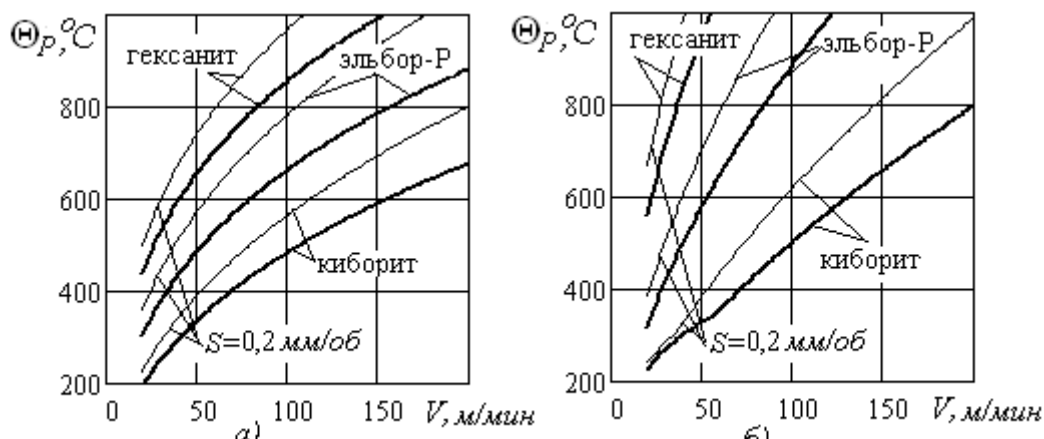


Рисунок 3. Графики зависимостей температуры резания Θ_P от скорости резания V при обработке стали 45 HRC35 – а) и чугуна HB600 – б) резцами, оснащенными различными СТМ

Температуры резания для различных инструментальных материалов различны в соответствие коэффициентами их теплопроводности. Наименьшие значения имеют температуры резания для киборита ($\lambda = 89 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$), средние – для эльбора-Р ($\lambda = 49 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$) и наибольшие – для гексаниита ($\lambda = 25 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$). При обработке чугуна температуры резания, также как и тепловые потоки, выше, чем при обработке стали. Причем, для инструментальных материалов гексаниита и эльбора-Р они весьма высоки и существенно ограничивают скорости резания, а, следовательно, и производительность обработки. Поэтому при обработке высокопрочного чугуна в качестве инструментального материала целесообразно использовать киборит. При обработке закаленных сталей успешно может использоваться и эльбор-Р.

Для исследования работоспособности инструмента весьма важно знать не только температуру резания, но и закономерности распределения температур, как внутри лезвия, так и на его поверхностях.

Трехмерное температурное поле в лезвии режущего инструмента $\Theta(x, y, z)$ представляет собой суперпозицию температурных полей $\Theta_1(x, y, z)$ и $\Theta_2(x, y, z)$, возникающих под влиянием источников теплоты на его передней и задней поверхностях. Плотность тепловых потоков на этих поверхностях q_1 и q_2 соответственно. Такое температурное поле с использованием перехода к безразмерным координатам описывается следующим образом [5]:

$$\Theta(x, y, z) = \Theta_1(x, y, z) + \Theta_2(x, y, z) = P_1 T_1(\psi, \zeta, \nu) + P_2 T_2(\psi, \zeta, \nu), \quad (2)$$

где $P_1 = K_\beta q_1 l / 4\pi\lambda_u$, $P_2 = K_\beta q_2 l / 4\pi\lambda_u$ - размерные коэффициенты: K_β - коэффициент перехода от неограниченного пространства к неограниченному клину (для $\beta = 90^\circ$ $K_\beta = 4$); $T_1(\psi, \zeta, \nu)$, $T_2(\psi, \zeta, \nu)$ - температурные поля, возникающие в лезвии режущего инструмента под влиянием источников, действующих на передней и задней поверхностях, в безразмерном виде: $\chi = h/l$ - безразмерный износ; $\eta = b/l$ - безразмерная ширина среза; $\psi = x/l$, $\psi_u = x_u/l$, $\zeta = z/l$, $\zeta_u = z_u/l$, $\nu = y/l$ - безразмерные координаты (x, y, z - координаты любой точки тела; x_u, y_u, z_u - координаты любой точки источника):

$$T_1(\psi, \nu, \zeta) = P_1 \int_0^1 d\psi_u \int_{-\eta}^{+\eta} \frac{d\zeta_u}{\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \nu^2 + (\zeta - \zeta_u)^2}};$$

$$T_2(\psi, \nu, \zeta) = P_2 \int_0^\chi d\nu_u \int_{-\eta}^{+\eta} \frac{d\zeta_u}{\sqrt{(\nu - \nu_u)^2 + \psi^2 + (\zeta - \zeta_u)^2}}.$$

Описание закона распределения температур в безразмерном виде позволяет устанавливать общие закономерности изменения температур, которые для каждого конкретного варианта обработки корректируются размерными коэффициентами P_1 и P_2 .

Безразмерные температурные поля внутри лезвия режущего инструмента в сечении, перпендикулярном главной режущей кромке ($\zeta = 0$), возникающие при одновременном действии двух рассматриваемых источников, представлено на рис. 4 (для расчетов приняты значения $\chi = 0,5$; $\eta = 2,8$).

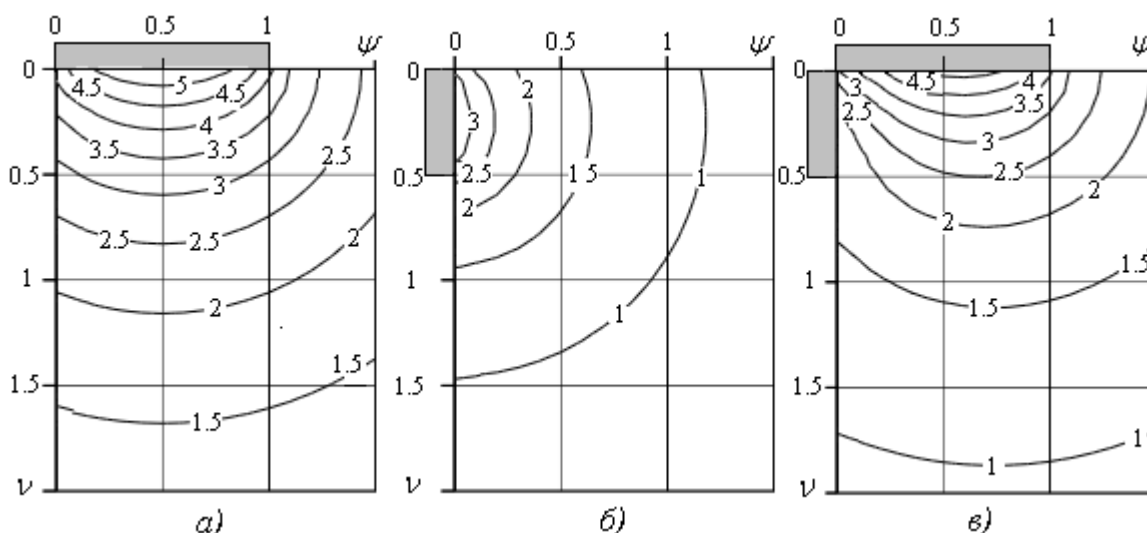


Рисунок 4. Безразмерные температурные поля в лезвии инструмента, возникающие от источника теплоты на передней поверхности – а); на задней поверхности – б); при одновременном действии источников на передней и задней поверхностях – в).

Независимо от условий обработки максимальная температура в лезвии инструмента возникает на передней его поверхности в середине площадки контакта со стружкой ($\psi = 0,5$), на задней поверхности лезвия она значительно ниже, чем на передней, и достаточно быстро убывает по мере удаления от передней и задней поверхностей. Тем-

пература в лезвии при одновременном действии источников теплоты ниже, чем при действии источника только на передней поверхности за счет охлаждающего эффекта отрицательного теплового потока на задней поверхности.

Закономерности одномерного распределения температур на передней и задней поверхностях лезвия в направлении, перпендикулярном к главной режущей кромке, с учетом одновременно действующих источников описываются следующим образом:

$$\Theta_1(x) = P_1 \int_0^1 \left[\ln \left(\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \eta^2} - \eta \right) \right] d\psi_u + \quad ; \quad (3)$$

$$+ P_2 \int_0^{\chi} \left[\ln \left(\sqrt{\psi^2 + \nu_u^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{\psi^2 + \nu_u^2 + \eta^2} - \eta \right) \right] d\nu_u$$

$$\Theta_2(y) = P_1 \int_0^{\chi} \left[\ln \left(\sqrt{(\nu - \nu_u)^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{(\nu - \nu_u)^2 + \eta^2} - \eta \right) \right] d\nu_u + \quad (4)$$

$$+ P_2 \int_0^1 \left[\ln \left(\sqrt{\nu^2 + \psi_u^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{\nu^2 + \psi_u^2 + \eta^2} - \eta \right) \right] d\psi_u$$

На рис. 5 представлены графики распределений температур на передней и задней поверхностях лезвия для различных обрабатываемых и инструментальных материалов в ранее указанных условиях обработки.

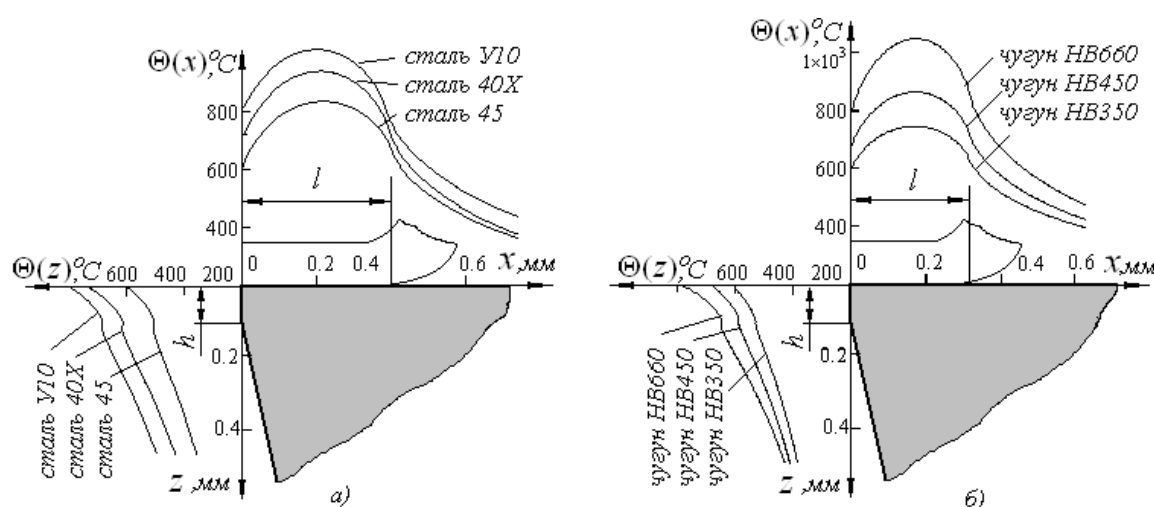


Рисунок 5. Графики распределений температур на передней и задней поверхностях лезвия режущего инструмента для различных сталей резцами из эльбора - а) и различных чугунов резцами из киборита - б).

При сохраняющихся общих закономерностях распределения температур на передней и задней поверхностях лезвия более высокие температуры возникают при обработке сталей с более высокой прочностью и меньшей теплопроводностью (рис. 5а), а также чугунов с более высокой твердостью (рис. 5 б).

Таким образом, с использованием представленной методики может успешно решаться задача определения тепловых потоков и температур в зоне резания для лю-

бых условий тонкого точения инструментами, оснащенными СТМ.

Выводы.

С использованием представленной методики выполнен сравнительный анализ тепловых потоков и температур резания при тонком точении закаленных сталей и высокопрочных чугунов инструментами, оснащенными различными СТМ. Установлены общие закономерности изменения тепловых потоков и температур резания в зависимости от режимов резания.

Исследованы особенности формирования температурного поля в лезвия режущего инструмента с учетом источников теплоты, одновременно действующих на его передней и задней поверхностях. Установлены основные закономерности распределения температур на передней и задней поверхностях лезвия инструмента из СТМ в зависимости от свойств обрабатываемых и инструментальных материалов.

Разработанная методика определения тепловых потоков и температур в зоне резания может быть широко использована для выбора рациональных условий обработки любых видов режущих инструментов, оснащенных СТМ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова и С. А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.
2. 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. – № 1(52). – С. 62-68.
3. Мелещик, В. А. Опыт применения композитов при точении чугунных прокатных валков / В. А. Мелещик, Ю. Г. Кравченко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – С. 81-84.
4. Ивченко, Т. Г. Исследование тепловых потоков и температур резания при обработке инструментами с износостойкими покрытиями / Т. Г. Ивченко, И. А. Петряева // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: – Донецк: ДонНТУ, 2015. – № 1(51). – С. 84-89.
5. Ивченко, Т. Г. Исследование общих закономерностей изменения температуры резания в различных условиях обработки / Т. Г. Ивченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ. – 2009. – № 6. – С. 49-55.
6. Ивченко, Т. Г. Закономерности изменения температур резания в зависимости от износа режущего инструмента для различных условий обработки / Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: – Донецк: ДонНТУ. – 2014. – № 4(50). – С. 102-106.

Поступила в редколлегию 04.02.2020 г.