

УДК 621.9: 658.5

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И ТЕМПЕРАТУР РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИНСТРУМЕНТАМИ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Выполнен анализ тепловых потоков и температур в зоне резания при точении инструментами с износостойкими покрытиями. На основании экспериментальных исследований установлены закономерности изменения коэффициента усадки стружки, силы и температуры в зоне резания. Теоретически рассчитаны и экспериментально подтверждены коэффициенты снижения температуры резания для инструментов с различными покрытиями.

Ключевые слова: *точение, тепловой поток, температура резания, покрытие.*

T.G. Ivchenko, I.A. Petryaeva

RESEARCH OF THERMAL STREAMS AND CUTTING TEMPERATURES AT TREATMENT BY TOOLS WITH WEARPROOF COVERAGES

The analysis of thermal streams and temperatures in the cutting area at turning by tools with wear proof coverage is executed. Based on experimental researches conformities to law of change of the chip contraction coefficient, forces and temperatures in the cutting area at the use of wear proof coverage's are set. The coefficients of decline of cutting temperature are theory calculated and experimentally confirmed for tools with different coverage's.

Key words: *turning, thermal stream, cutting temperatures, coverage.*

1. Введение

Высокая эффективность использования современных инструментов с износостойкими покрытиями зависит от правильного выбора рациональных условий их эксплуатации и, прежде всего, от условий их теплового нагружения. В связи с этим, представленная работа, посвященная анализу температур в зоне резания при точении инструментами с износостойкими покрытиями, весьма актуальна.

В настоящее время достаточно хорошо изучены вопросы работоспособности твердосплавных режущих инструментов с износостойкими покрытиями [1, 2]. Значительное внимание в исследованиях уделено экспериментальному изучению влияния покрытий на физические основы процесса резания. Наиболее исследованы закономерности стружкообразования, контактные явления в зоне резания, особенности изнашивания инструмента с покрытиями [1]. Достаточно много исследований посвящено сравнительному анализу стойкости инструментов с различными покрытиями [2].

Однако, необходимо отметить существенный недостаток исследований теплового состояния зоны резания при обработке инструментами с покрытиями. Имеющиеся сведения о причинах снижения температуры резания при их использовании весьма противоречивы. В ряде случаев причиной уменьшения температуры считается более низкая теплопроводность покрытий в сравнении с твердосплавной основой. Большинство исследований объясняют причину снижения температуры уменьшением сил резания и общей тепловой нагрузки на инструмент с покрытием [2, 3]. Теоретические расчеты тепловых потоков и температурных полей в лезвии инструментов с покрытием практически отсутствуют, несмотря на то, что методика таких расчетов достаточно хорошо известна [4, 5, 6].

Теоретические расчеты тепловых потоков и температурных полей в лезвии инструментов с покрытием практически отсутствуют, несмотря на то, что методика таких расчетов достаточно хорошо известна [4, 5, 6]. Весьма целесообразно дальнейшее развитие указанной методики для инструментов с покрытиями, что существенно расширит возможности количественной оценки причин и эффективности снижения температур резания при использовании различных покрытий.

Цель работы – сравнительный анализ закономерностей формирования тепловых потоков и температур в зоне резания при точении инструментами с различными износостойкими покрытиями.

2. Основное содержание и результаты работы

Для анализа возможностей снижения температуры при обработке инструментами с покрытием Резниковым А.Н. предложен следующий коэффициент υ [3]:

$$\upsilon = 1 - m\lambda_p \sqrt{\pi} / 20\lambda_c \sqrt{\omega_p \tau}, \quad (1)$$

где m – толщина покрытия, λ_p , ω_p – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности инструментального материала; λ_c – коэффициент теплопроводности покрытия; τ – время функционирования источника.

Формула получена при следующей схематизации теплофизической системы:

плоский неподвижный непрерывно действующий равномерно распределенный источник интенсивностью q функционирует в стержне или неограниченном теле.

В результате анализа установлено, что после $\tau = 10c$ функционирования источника теплоты температура снижается всего на 0,7%.

При теплофизическом анализе закономерностей формирования тепловых потоков и температур в лезвии режущего инструмента общепринята следующая схематизация элементов теплофизической системы [3, 4]:

плоский (размеры – длина и ширина bxl) непрерывно действующий равномерно распределенный источник интенсивностью q функционирует в неограниченном клине с углом заострения β в условиях установившегося теплообмена.

Рассматривая условия обработки острозаточенным инструментом (износ по задней поверхности $h = 0$), в которых учитывается действие источника теплоты только на передней поверхности, формулу (1) можно преобразовать следующим образом:

$$K_{\Theta} = 1 - m\lambda_p / \lambda_c M l, \quad (2)$$

где M – коэффициент, учитывающий распределение температур на передней поверхности лезвия инструмента, зависящий от соотношения длины b и ширины l источника теплоты $\eta = b/l$: $M = (4,88 + 2,64\eta^{0,5} \lg \eta) \beta^{-0,85}$.

Графики зависимости коэффициента снижения температуры в зоне резания K_{Θ} от толщины покрытия m для различных условий представлены на рис. 1 ($\eta = 5$; $l = 1,5$). Для

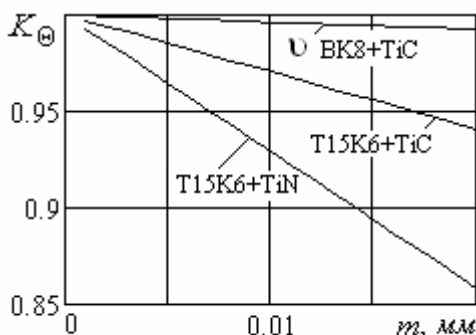


Рис. 1. Зависимость коэффициентов снижения температуры в зоне резания от толщины покрытия

сравнения на графике представлен коэффициент снижения температуры υ , рассчитанный по формуле (1). Представленная зависимость (2) позволяет уточнить степень влияния покрытий на температуру в лезвии инструмента.

График свидетельствует о том, что в области малых толщин среза изменение температуры весьма незначительно. Однако с увеличением толщины покрытия и снижением коэффициента его теплопроводности коэффициент снижения температуры существенно уменьшается. При расчетах температурных полей в лезвиях инструментов с покрытиями возникает необходимость учета снижения температуры в соответствии с представленной зависимостью (2).

Однако указанные зависимости (1) и (2) отражают изменение тепловых потоков и температур за счет покрытия внутри лезвия инструмента. Тепловые потоки на поверхности лезвия остаются неизменными, а, следовательно, и температуры на передних и задних поверхностях инструмента не должны изменяться.

Наличие износостойкого покрытия со значительно меньшим коэффициентом теплопроводности в сравнении с твердосплавной основой изменяет термическое сопротивление лезвия инструмента в целом. Эквивалентный коэффициент теплопроводности может быть рассчитан следующим образом:

$$\lambda = \Delta / \left(\frac{m}{\lambda_c} + \frac{\Delta - m}{\lambda_p} \right), \quad (2)$$

где Δ - высота твердосплавной пластинки.

Расчеты свидетельствуют о том, что при традиционных соотношениях толщин пластин и покрытий (более 250), изменение эквивалентного коэффициента теплопроводности весьма незначительно (в сравнении с коэффициентом теплопроводности твердых сплавов не превышает 0,5%). Этот анализ позволяет пренебречь влиянием теплопроводности покрытия на суммарную теплопроводность лезвия инструмента.

Изменение параметров процесса резания при обработке инструментами с покрытиями изучено на основании экспериментальных исследований. Эксперименты выполнялись в следующих условиях: обрабатываемый материал – сталь 45; инструментальный материал – твердый сплав T15K6; износостойкие покрытия - карбида титана TiC и нитрид титана TiN. Геометрические параметры инструмента: главный угол в плане $\varphi = 92^\circ$, вспомогательный $\varphi_1 = 8^\circ$, задний $\alpha = 5^\circ$, передний $\gamma = 15^\circ$, главный на фаске $\gamma_\phi = 5^\circ$. Режимы резания: глубина резания $t = 3$ мм, подача $s = 0.3$ мм/об, диапазон изменения скоростей резания $V = 2 - 4$ м/с.

В результате экспериментальных исследований установлено, что во всем диапазоне изменения скоростей резания коэффициент усадки стружки для инструментов с покрытием ниже, чем для инструментов без покрытия. Однако с увеличением скорости эта разница нивелируется и существенным остается только для инструментов с покрытием нитридом титана TiN. В дальнейших расчетах принимается: коэффициент усадки стружки для инструментов без покрытия и с покрытием карбидом титана TiC $k = 2$, с покрытием нитридом титана TiN $k = 1,9$.

Результаты экспериментальных исследований коэффициентов трения при обработке инструментами с покрытиями подтверждают известные представления о закономерностях трения в зоне резания. Коэффициенты трения в исследованном диапазоне скоростей резания снижаются при увеличении скорости резания. Коэффициенты тре-

ния также снижаются при использовании инструментов с покрытиями. Установлено в результате экспериментов и принято для дальнейших расчетов: коэффициент трения для инструментов без покрытия равен 0,7, с покрытием карбидом титана TiC - 0,6; с покрытием нитридом титана TiN - 0,4.

Вследствие снижения степени пластических деформаций, а также уменьшения коэффициентов трения в зоне резания силы резания также снижаются. Экспериментально установлена зависимость силы резания от глубины резания t и подачи s :

$$P_z = K_n 1940 s^{0,85} t, \quad (3)$$

где K_n – коэффициент снижения силы резания при использовании инструментов с покрытием: для инструментов с покрытием карбидом титана TiC $K_n = 0,95$; с покрытием нитридом титана TiN $K_n = 0,9$.

Расчет плотностей тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента в зависимости от основных параметров процесса резания выполняется следующим образом [2]:

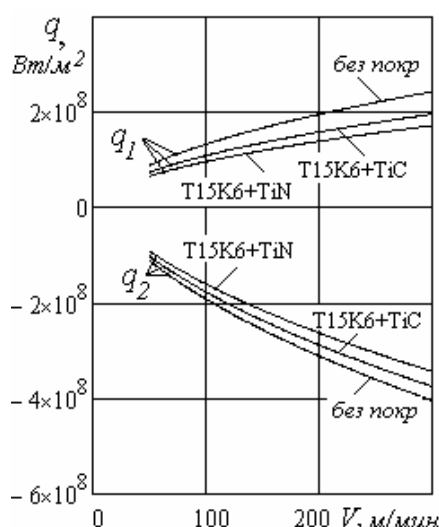


Рис. 2. Графики зависимости плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента от скорости резания V для инструментов с различными покрытиями

носительного количества теплоты, уходящего в стружку; l – длина контактной площадки в направлении схода стружки $l = 2s \sin \varphi [k(1 - \operatorname{tg} \gamma) + \operatorname{sec} \gamma]$ (γ – передний угол; φ – главный угол в плане); $b = t / \sin \varphi$ – ширина среза; M_1, M_2, N_1, N_2 – безразмерные функции, определяющие нагрев площадок на передней и задней поверхностях лезвия инструмента: $M_{1,2} = (4,88 + 2,64 \eta_{1,2}^{0,5} \lg \eta_{1,2}) \beta^{0,85}$; $N_{1,2} = (0,04 + 0,02 \eta_{1,2}^{0,6} \lg \eta_{1,2}) B_{1,2}(h/l)$: ($\eta_1 = b/l$, $\eta_2 =$

$$q_1 = \frac{K_1 K_3 \lambda_u - K_2 N_2 h + K_1 M_2 h}{K_3 K_4 \lambda_u + M_2 K_4 h - N_1 N_2 l h / \lambda_u};$$

$$q_2 = \frac{(K_1 - K_4 q_1) \lambda_u}{N_2 h}, \quad (4)$$

где

$$K_1 = \frac{(1+c) \omega_\delta k b' q_\delta}{\lambda_\delta V} + \frac{K_{c1} q_{1T}}{\lambda_\delta} \sqrt{\frac{\omega_\delta k l}{V}};$$

$$K_2 = \frac{(1+c) \omega_\delta k b' q_\delta T_u}{\lambda_\delta V} + \frac{K_{c2} q_{2T}}{\lambda_\delta} \sqrt{\frac{\omega_\delta h}{V}};$$

$$K_3 = 1,82 K_{c2} \sqrt{\omega_\delta h / V} / \lambda_\delta;$$

$$K_4 = 1,3 K_{c1} \sqrt{\omega_\delta k l / V} / \lambda_\delta + M_1 l / \lambda_u;$$

$\lambda_\delta, \lambda_u, \omega_\delta, \omega_u$ – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материалов детали и инструмента соответственно; c – коэффициент, учитывающий подогрев слоев металла стружки за один оборот детали; T_δ – безразмерная функция распределения температур в детали, вызванных теплотой деформации; b' – коэффициент относительного количества теплоты, уходящего в стружку; l – длина контактной площадки в направлении схода стружки; $l = 2s \sin \varphi [k(1 - \operatorname{tg} \gamma) + \operatorname{sec} \gamma]$ (γ – передний угол; φ – главный угол в плане); $b = t / \sin \varphi$ – ширина среза; M_1, M_2, N_1, N_2 – безразмерные функции, определяющие нагрев 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 ($\eta_{1,2} > 1$); β - угол заострения; $B_{1,2}(h/l)$ - специальные функции; q_{1T} , q_{2T} - плотности тепловых потоков от сил трения на площадках контакта между стружкой и передней поверхностью лезвия, между задней поверхностью лезвия и деталью:

$$q_{1T} = 10^6 V (P_{z0} \sin \gamma + P_{N0} \cos \gamma) / 60kbl; \quad q_{2T} = 10^6 \sqrt{3} FV / 6\sqrt{\pi} bh,$$

где $P_{z0} = P_z - F_{mp}$ - разность тангенциальной силы резания и силы трения по задней поверхности лезвия; $P_{N0} = P_y - N$ - разность нормальной составляющей силы резания и нормальной силы на задней поверхности лезвия.

Графики зависимости плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента от скорости резания V для инструментов с различными покрытиями представлены на рис. 2. С увеличением скорости резания тепловые потоки на передней поверхности возрастают. На задней поверхности тепловые потоки убывают, находясь в области отрицательных значений, что свидетельствует о направлении тепловых потоков из инструмента в деталь. Плотности тепловых потоков при наличии износостойкого покрытия уменьшаются. Наименьшее значение они имеют для инструментов с покрытием нитридом титана TiN, которое обеспечивает наименьшие пластические деформации, коэффициенты трения и силы резания.

Температура резания рассчитывается как средняя температура на передней Θ_1 и задней Θ_2 поверхностях лезвия инструмента [3]:

$$\Theta = (\Theta_1 l + \Theta_2 h) / (l + h) = [q_1 l (M_1 l + N_1 h) + q_2 h (M_2 h + N_1 l)] / (l + h) \lambda_u. \quad (5)$$

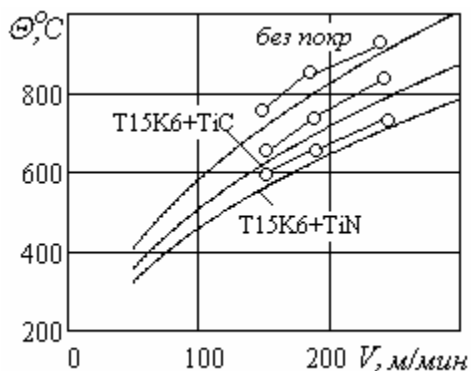


Рис. 3. Графики зависимости температуры Θ на передней поверхности лезвия инструмента от скорости резания V для инструментов с различными покрытиями (—о— - экспериментальные исследования)

Экспериментальные исследования температуры в зоне резания осуществлялись с использованием системы AGA «Termovision 680», предназначенной для фиксации инфракрасного излучения в спектральном диапазоне 2 – 5,6 мкм. Температура определялась бесконтактным способом. Измеряемая температура соответствовала максимальной на прирезцовой стороне стружки вблизи границы прекращения ее контакта с передней поверхностью пластины. В связи с этим, теоретический расчет выполнялся не для температуры резания, а для температуры на передней поверхности лезвия инструмента. Для теоретического расчета температуры использовалась формула:

$$\Theta_1 = (q_1 M_1 + q_2 N_1) / \lambda_u. \quad (5)$$

Графики зависимости температуры на передней поверхности лезвия инструмента от скорости резания V для инструментов с различными покрытиями представлены на рис. 3. С увеличением скорости резания температура на передней поверхности возрастает. При наличии износостойкого покрытия температуры уменьшаются. Наименьшее значение они имеют для инструментов с покрытием нитридом титана TiN, которое обеспечивает наименьшие тепловые потоки в зоне резания. Коэффициенты снижения

температуры в зоне резания составляют для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC – 0,95; с покрытиями из нитрида титана TiN – на 0,85, что соответствует установленным закономерностям изменения сил резания и тепловых потоков.

Результаты экспериментальных исследований, как по уровню температур, так и по соотношениям между температурами для инструментов с различными покрытиями, достаточно хорошо подтверждают теоретические расчеты. Следовательно, представленная методика теоретического расчета тепловых потоков и температур в зоне резания может быть использована и для инструментов с износостойкими покрытиями.

Выводы. Предложен уточненный коэффициент снижения температуры в зоне резания, учитывающий свойства и толщину покрытия. С использованием этого коэффициента проведен анализ возможностей снижения температуры при обработке инструментами с различными покрытиями.

Выполнен сравнительный анализ тепловых потоков и температур в зоне резания при точении инструментами с износостойкими покрытиями. Экспериментально установлены закономерности изменения коэффициента усадки стружки, силы и температуры в зоне резания инструментами с износостойкими покрытиями. Теоретически рассчитаны и экспериментально подтверждены коэффициенты снижения температуры резания для инструментов с различными покрытиями: из карбида титана TiC – на 5%, из нитрида титана TiN – на 15%. Разработанная методика может быть использована для любых видов инструментов с износостойкими покрытиями.

Список литературы:

1. Верещака А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. – М.; Машиностроение, 1989. – С.193.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойким покрытием / А.С. Верещака. – М.; Машиностроение, 1993. – С.368.
3. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288с.
4. 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. Вип. 6. - Донецьк, ДонНТУ, 2009.- С.49 -55.
5. Ивченко Т.Г. Анализ закономерностей изменения температурного поля режущего инструмента в процессе его эксплуатации / Т.Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Вып. 37. – Донецк: ДонНТУ, 2009.– С.84 - 89.
6. Ивченко Т.Г. Визначення температури різання з урахуванням змінності параметрів стружкоутворення в залежності від умов обробки / Т.Г. Ивченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 1(10). - Донецьк, ДонНТУ, 2013.- С.21-27.

Поступила в редколлегию 14.04.2015 г.