

АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ивченко Т.Г. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

On the basis of the developed method of calculation of thermal streams in the area of cutting with the use of the created software conformities to the law of the temperature change on the front and back surfaces of cutting tools are set from the wear on the back surface of blade in the conditions of clean lathe treatment of steel of constructions by hard alloy chisels.

Введение

Повышение производительности обработки резанием и качества обработанной поверхности деталей машин в значительной мере зависит от теплового состояния режущего инструмента, в связи с чем актуальность задач по его изучению весьма велика.

Известные ранее методы определения температуры резания, как аналитические, так и экспериментальные [1, 2], весьма затруднительны для практического использования. В настоящее время методы теоретических исследований теплового состояния режущего инструмента достаточно хорошо разработаны. Предложенная в работе [3] методика аналитического расчета трехмерных температурных полей учитывает одновременное действие источников теплоты на передней и задней поверхностях лезвия режущего инструмента, что существенно повышает точность расчетов. Указанная методика основана на методе источников теплоты [1], который характеризуется достаточной простотой и наглядностью в сравнении с другими аналитическими и численными методами и достаточно хорошо совпадает с результатами проведенных ранее многочисленных экспериментальных исследований [2].

В современной литературе большое внимание уделяется первому этапу теплофизического анализа – изучению источников теплоты и основных закономерностей формирования тепловых потоков в зоне резания. Методика, представленная в работах [4, 5], позволяет значительно упростить известную ранее методику [1], что значительно упрощает и возможности аналитического расчета температур в зоне резания. На основании разработанной методики расчета тепловых потоков установлены взаимосвязи плотностей тепловых потоков на передней и задней поверхностях лезвия режущего инструмента с износом по задней поверхности лезвия [4] в различных условиях черновой и чистовой токарной обработки. В работе [5] исследовано влияние условий обработки на закономерности формирования тепловых потоков в зоне резания, обоснованы и предложены для практического применения коэффициенты относительного изменения тепловых потоков в зависимости от прочности и коэффициента усадки стружки обрабатываемого материала; теплопроводности инструментального материала.

Однако сведения, представленные в этих работах, охватывают лишь вопросы формирования тепловых потоков в зоне резания. Представляет интерес дальнейшее развитие методики аналитического определения температурных полей в лезвии инструмента и исследование общих закономерностей их формирования в различных условиях механической обработки.

Целью представленной работы является дальнейшее развитие методики расчета температур в зоне резания с учетом источников теплоты, действующих на передней и задней поверхностях лезвия инструмента, а также установление закономерностей изменения температур лезвия с учетом износа инструмента в процессе его эксплуатации.

Основное содержание и результаты работы

Трехмерное температурное поле, возникающее в лезвии инструмента под дейст-

вию источников, действующих на его передней и задней поверхностях, с использованием перехода к безразмерным координатам описывается следующим образом [3]:

$$\Theta(x, y, z) = P_1 T_1(\psi, \zeta, \nu) + P_2 T_2(\psi, \zeta, \nu), \quad (1)$$

где $P_1 = K_\beta q_1 l / 4 \pi \lambda$, $P_2 = K_\beta q_2 l / 4 \pi \lambda$ - размерные коэффициенты; λ - коэффициент теплопроводности инструментального материала; K_β - коэффициент перехода от неограниченного пространства к неограниченному клину: $K_\beta = 4$ для $\beta = 90^\circ$.

$T_1(\psi, \zeta, \nu)$, $T_2(\psi, \zeta, \nu)$ - законы распределения температур в безразмерном виде:

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

$$T_2(\psi, \zeta, \nu) = \int_0^\chi d\nu_u \int_{-\eta}^{\eta} \frac{d\zeta_u}{\sqrt{(\zeta - \zeta_u)^2 + \psi^2 + (\nu - \nu_u)^2}}, \quad (3)$$

где $\psi = x/l$, $\psi_u = x_u/l$, $\zeta = z/l$, $\zeta_u = z_u/l$, $\nu = y/l$ - безразмерные координаты (x, y, z - координаты любой точки тела; x_u, y_u, z_u - координаты любой точки источника); $\eta = b/l$ - безразмерная ширина среза; $\chi = h/l$ - безразмерный износ (b - ширина среза, l - длина контактной площадки в направлении схода стружки; h - износ по задней поверхности).

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

Закономерности двумерного распределения безразмерных температур на передней и задней поверхностях лезвия для каждого из двух рассматриваемых источников могут быть получены из формул (2) и (3).

Безразмерная температура на передней поверхности лезвия, возникающая под воздействием источника теплоты на передней поверхности:

$$T_{1l}(\psi, \zeta) = \int_0^1 \left[\ln \left(\left| \zeta + \eta + \sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + (\zeta + \eta)^2} \right| \right) - \ln \left(\left| \zeta - \eta + \sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + (\zeta - \eta)^2} \right| \right) \right] d\psi_u.$$

Безразмерная температура на передней поверхности лезвия, возникающая под воздействием источника теплоты на задней поверхности:

$$T_{1h}(\psi, \zeta) = \int_0^\chi \left[\ln \left(\left| \zeta + \eta + \sqrt{\psi^2 + \nu_u^2 + (\zeta + \eta)^2} \right| \right) - \ln \left(\left| \zeta - \eta + \sqrt{\psi^2 + \nu_u^2 + (\zeta - \eta)^2} \right| \right) \right] d\nu_u.$$

Безразмерная температура на задней поверхности лезвия, возникающая под воздействием источника теплоты на задней поверхности:

$$T_{2h}(\nu, \zeta) = \int_0^\chi \left[\ln \left(\left| \zeta + \eta + \sqrt{(\nu - \nu_u)^2 + (\zeta + \eta)^2} \right| \right) - \ln \left(\left| \zeta - \eta + \sqrt{(\nu - \nu_u)^2 + (\zeta - \eta)^2} \right| \right) \right] d\nu_u.$$

Безразмерная температура на задней поверхности лезвия, возникающая под воздействием источника теплоты на передней поверхности:

$$T_{2l}(v, \zeta) = \int_0^1 \left[\ln \left(\left| \zeta + \eta + \sqrt{v^2 + \psi_u^2 + (\zeta + \eta)^2} \right| \right) - \ln \left(\left| \zeta - \eta + \sqrt{v^2 + \psi_u^2 + (\zeta - \eta)^2} \right| \right) \right] d\psi_u.$$

Температурные поля на передней $\Theta_1(x, z)$ и задней $\Theta_2(y, z)$ поверхностях лезвия, возникающие при одновременном действии двух рассматриваемых источников:

$$\Theta_1(x, z) = P[T_{1l}(\psi, \zeta) + \mu T_{1h}(\psi, \zeta)], \quad (4)$$

$$\Theta_2(y, z) = P[T_{2l}(v, \zeta) + \mu T_{2h}(v, \zeta)], \quad (5)$$

где $P = K_\beta q_1 l / 4\pi\lambda_u$ - общий размерный коэффициент; $\mu = q_2/q_1$ - безразмерный коэффициент соотношения плотностей тепловых потоков на передней и задней поверхностях лезвия.

В качестве примера исследованы условия обработки стали 30ХНЗ резцами с механическим креплением квадратных пластин Т15К6 (главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$, передний угол $\gamma = -7^\circ$); режимы резания - глубина $t = 1$ мм, подача $s = 0,3$ мм/об, скорость $V = 150$ м/мин.

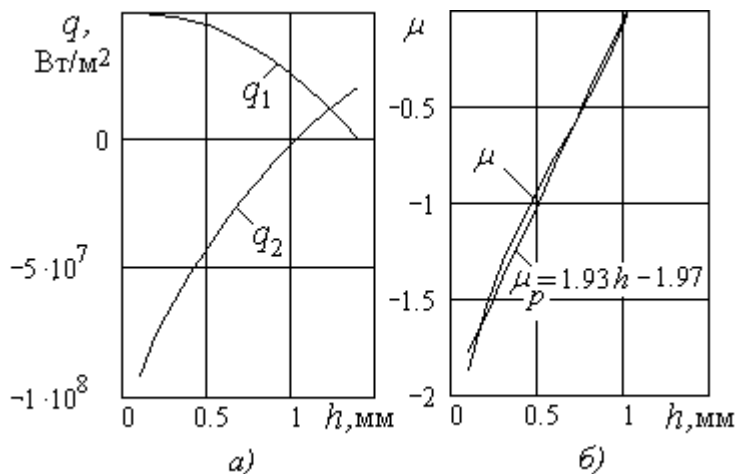


Рис. 1. Графики зависимости плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия – а) и безразмерного коэффициента μ – б) от износа по задней поверхности h

обработке значений износа (до $h \leq 0,4 \dots 0,6$ мм) имеют отрицательные значения. Отрицательное значение плотности теплового потока на задней поверхности лезвия свидетельствует о направлении потока в сторону детали, что способствует охлаждению инструмента.

При анализе графиков безразмерного коэффициента соотношения плотностей тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия $\mu = q_2/q_1$, представленных на рис. 1 б), установлен линейный характер зависимости коэффициента μ от износа по задней поверхности h : $\mu_P(h) = -1,93 + 1,97h$. Для расчета температурных полей принимается значение $\mu = 1,2$, соответствующее величине износа $h = 0,4$ мм. Значение плотности теплового потока на передней q_1 поверхности лезвия инструмента $q_1 = 4,7 \cdot 10^7$ Вт/м², размерный коэффициент $P = 187$.

Результаты расчета плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия в зависимости от износа по задней поверхности h , выполненные в соответствии с методикой [4], представлены на рис. 1 а). Плотности тепловых потоков на передней поверхности лезвия инструмента с увеличением износа по задней поверхности убывают, а на задней – возрастают. Плотности тепловых потоков на задней поверхности лезвия инструмента в области допустимых при чистовой

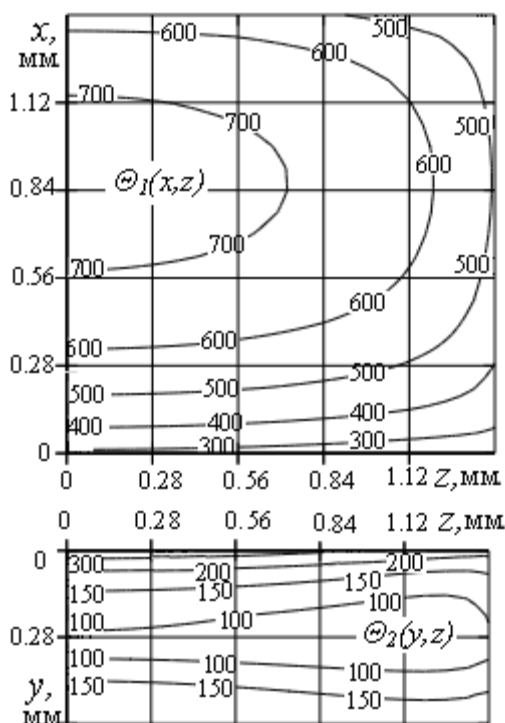


Рис. 2. Температурные поля на передней $\Theta_1(x, z)$ и задней $\Theta_2(y, z)$ поверхностях лезвия

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

$$T_1(\psi) = \left[\int_0^1 \left[\ln \left(\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \eta^2} - \eta \right) \right] d\psi_u \right] + \mu \int_0^{\chi} \left[\ln \left(\sqrt{\psi^2 + v_u^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{\psi^2 + v_u^2 + \eta^2} - \eta \right) \right] dv_u \quad ; \quad (6)$$

$$T_2(v) = \int_0^{\chi} \left[\ln \left(\sqrt{(v - v_u)^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{(v - v_u)^2 + \eta^2} - \eta \right) \right] dv_u + \mu \int_0^1 \left[\ln \left(\sqrt{v^2 + \psi_u^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{v^2 + \psi_u^2 + \eta^2} - \eta \right) \right] d\psi_u \quad . \quad (7)$$

На рис. 3 представлены графики безразмерных распределений температур на передней и задней поверхностях лезвия инструмента для различных значений износа по задней поверхности ($h = 0,4\text{мм}$, $h = 0,7\text{мм}$, $h = 1\text{мм}$ и $h = 1,2\text{мм}$) определяемых соответствующими безразмерными значениями $\chi = h/l$ ($\chi = 0,3$; $\chi = 0,5$; $\chi = 0,7$; $\chi = 0,9$) для $\eta = 1$. Ось ψ направлена по передней поверхности лезвия перпендикулярно главной режущей кромке, ось v – по задней поверхности. Температуры в вершине лезвия – $T(0,0)$, как со стороны передней, так и со стороны задних поверхностей, равны.

Температурные поля на передней $\Theta_1(x, z)$ и задней $\Theta_2(y, z)$ поверхностях лезвия квадратной пластины, возникающие при одновременном действии двух рассматриваемых источников, представлены на рис.2. Ось z направлена по главной режущей кромке, ось x – по вспомогательной режущей кромке, ось y – перпендикулярно передней поверхности лезвия.

Представленные температурные поля иллюстрируют распределение температур в пределах контактных площадок стружки с передней поверхностью лезвия и детали с его задней поверхностью, так как за их пределами температура быстро убывает. Размеры контактных площадок $b \times l = 1,4 \times 1,4\text{мм}$, $b \times h = 1,4 \times 0,4\text{мм}$. Наибольшая температура наблюдается в середине площадки контакта стружки с передней поверхностью на вспомогательной режущей кромке. Охлаждающее действие теплового потока на задней поверхности лезвия объясняет ее более низкие температуры в сравнении с передней поверхностью.

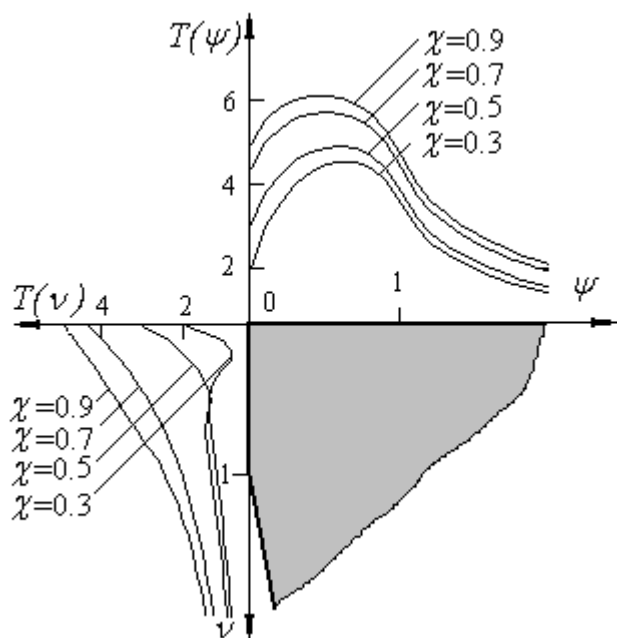


Рис.3. Графики распределений безразмерных температур на передней $T(\psi)$ и задней $T(\nu)$ поверхностях лезвия режущего инструмента для различных χ .

С увеличением износа по задней поверхности h и соответствующим увеличением безразмерных значений χ безразмерные температуры на передней $T(\psi)$ и на задней $T(\nu)$ поверхностях увеличиваются. Для указанных условий обработки уже при $\chi > 0,7$ ($h > 1$ мм) температура на передней поверхности во всем диапазоне изменения в пределах зоны контакта ($\psi < 1$) превышает 1000°C . Следовательно, допустимый критерий затупления не должен превышать указанных значений χ .

Из представленных расчетных зависимостей (6) и (7) следует, что безразмерные температуры на передней и задней поверхностях лезвия зависят только от безразмерного износа $\chi = h/l$ и безразмерной ширины среза $\eta = b/l$.

Рассмотрим закономерности влияния безразмерного износа по задней поверхности χ на безразмерную

температуру в характерной точке – вершине лезвия:

$$T(\chi) = \left[\int_0^1 \left(\ln \left(\sqrt{\psi_u^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{\psi_u^2 + \eta^2} - \eta \right) \right) d\psi_u \right] + \mu(\chi) \left[\int_0^\chi \left(\ln \left(\sqrt{\nu_u^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{\nu_u^2 + \eta^2} - \eta \right) \right) d\nu_u \right]. \quad (8)$$

На рис.4 представлены графики, иллюстрирующие это влияние.

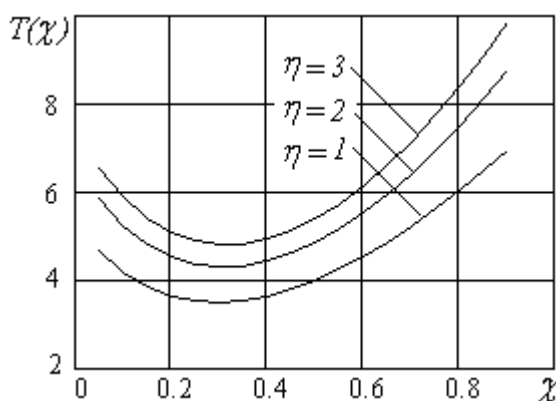


Рис. 4. Графики зависимости безразмерной температуры вершины лезвия от безразмерного износа χ при различных значениях

В начальный период работы инструмента при весьма малых значениях износа охлаждающий эффект от действия теплового потока на задней поверхности сказывается незначительно, уровень температур высок. С увеличением износа температура снижается за счет интенсивного охлаждения тепловым потоком на задней поверхности. При значительном износе охлаждающий эффект вновь снижается, но уже за счет существенного увеличения значений самого теплового потока на задней поверхности. В результате уровень температур резко возрастает.

Следовательно, наиболее целесообразно для любых условий обработки выбирать допустимый безразмерный износ $\chi < 0,4 \dots 0,5$.

Увеличение безразмерной температуры наблюдается и при увеличении безразмерной ширины среза η , что свидетельствует о необходимости выбора рациональных параметров срезаемого слоя ($b \approx l$).

Для указанных условий обработки с учетом размерного коэффициента в соответствии с (8) может быть рассчитана температура вершины лезвия при незначительном износе: $\Theta_{расч} = PT(0.05) = 187 \cdot 4,7 = 879^\circ\text{C}$. Для этих же условий обработки экспериментально установлена температура лезвия $\Theta_{экс} = 885^\circ\text{C}$ [2], что достаточно точно совпадает с результатами расчетов и подтверждает возможность их применения.

Таким образом, установленные закономерности позволяют обосновывать рациональные параметры срезаемого слоя и критерии затупления лезвия инструмента, обеспечивающие снижение уровня его температур. С использованием разработанного программного обеспечения возможно выполнение указанных расчетов для любых условий эксплуатации режущего инструмента.

Заключение

С использованием методики аналитического расчета тепловых потоков и температурного поля лезвия режущего инструмента с учетом источников теплоты, действующих на его передней и задней поверхностях, установлены закономерности изменения температур в зависимости от параметров срезаемого слоя и износа инструмента в процессе его эксплуатации.

На основании представления законов распределения температур в безразмерном виде установлены общие закономерности изменения температур на передней и задней поверхностях лезвия инструмента, позволяющие регламентировать рациональные безразмерные параметры среза и допустимый безразмерный износ, которые для конкретных вариантов обработки корректируются размерными коэффициентами.

Разработанная методика определения тепловых потоков и температур в зоне резания с учетом закономерностей их изменения в процессе эксплуатации инструмента может быть широко использована для выбора рациональных условий обработки и температурных критериев затупления для любых видов режущих инструментов.

Список литературы: 1. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. - М.: Машиностроение, 1990. –288с. 2. Даниэлян А.М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов. – М.: Машгиз, 1964. – 276с. 3. Ивченко Т.Г. Совершенствование методики аналитического определения температуры резания // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2007. Вып. 33. – С.103-110. 4. Ивченко Т.Г., Смирнова М.А. Моделирование тепловых потоков в зоне резания в зависимости от износа режущего инструмента // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2008. Вып. 35. – С.69 - 74. 5. Ивченко Т.Г. Влияние условий обработки на закономерности формирования тепловых потоков в зоне резания при точении // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 5. - Донецьк, ДонНТУ, 2008.- С.23-29.

Сдано в редакцию 13.01.2009