УДК 621.9.

А.С. Манохин, канд. техн. наук,
С.А. Клименко, д-р техн. наук

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИНСТРУМЕНТОМ С ПКНБ

Определение температуры резания и связанной с ней тепловой напряженности процесса резания является необходимым условием для разработки высокоэффективных технологий механической обработки.

Ввиду низкой электропроводности поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) с высоким содержанием кубического нитрида бора (КНБ) измерение электродвижущей силы, возникающей в цепи естественной термопары «ПКНБ-заготовка», весьма затруднительно. В этой связи необходимо либо применять специальные корректирующие устройства [1], либо использовать искусственную термопару. В работе [2] с помощью хромель-алюмелевой термопары, встроенной в режущую пластину из ПКНБ «эльбора-Р», при последовательных переточках по передней и задней поверхностям был установлен градиент температур (200 С°/мм) при обработке стали ШХ-15 62–64 HRC, что позволило рассчитать температурное поле в инструменте, полагая, что в вершине резца действует точечный источник тепла. Термопара устанавливалась в отверстие диаметром 0,5 мм, выполненное в режущей пластине лазером, с последующим его ультразвуковым рассверливанием с использованием алмазной пасты. В [3] температура резания определялась методом экстраполяции ее значений в зону вершины резца по результатам измерений температуры в двух точках на опорной поверхности режущего инструмента, что существенно упрощает проведение исследований, однако снижает точность полученных результатов.

Повысить точность экспериментально-расчетного способа определения температуры резания можно путем применения программного обеспечения, позволяющего решать задачи теплофизики с использованием метода конечных элементов [4, 5].

Целью настоящей работы была разработка методики экспериментального исследования тепловых процессов при обработке инструментом, оснащенным ПКНБ, с использованием конечно-элементного моделирования.

Неизвестный входной параметр T_r (температуру резания) можно определить в ходе решения обратной задачи теплопроводности на основании данных экспериментальных измерений. Решение сводится к поиску таких значений входного параметра, для которых расчетные и экспериментальные значения контролируемых параметров становятся наиболее близкими [6].

Блок-схема экспериментально-расчетного подхода показана на рис. 1.

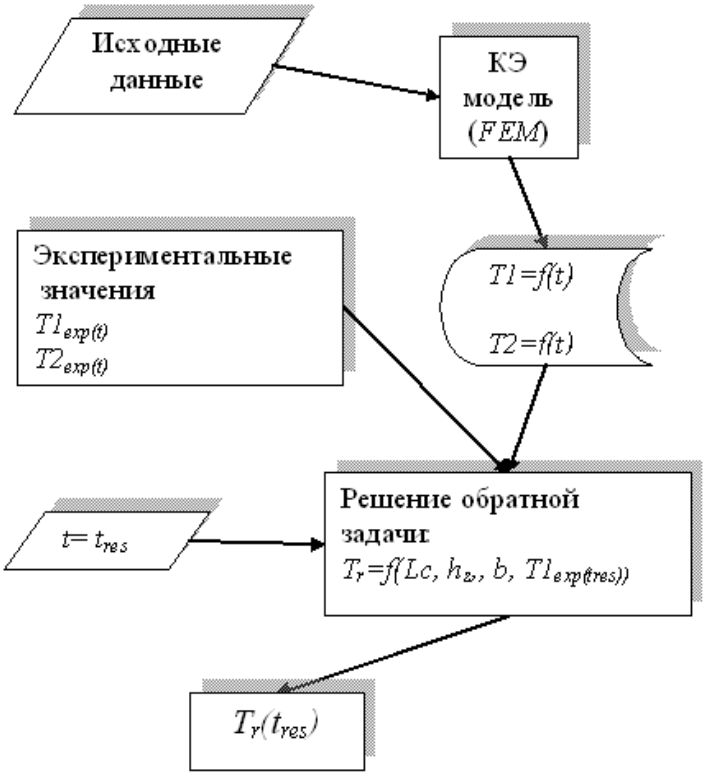


Рисунок 1 – Блок-схема расчетно-экспериментального метода определения температуры резания

Контролируемыми параметрами являются экспериментально установленные значения температур в двух точках на опорной поверхности режущей пластины ($T_{1exp(t)}$ и $T_{2exp(t)}$) (рис. 2). При известных величинах длины контакта инструмента с обрабатываемым материалом по передней и задней поверхностям (L_c, h_z), а также ширины среза b вычисляются значения $T_1 = f(t)$ и $T_2 = f(t)$. При этом температура резания T_r, являющаяся искомым параметром и определяющая граничные условия на контактных участках инструмента, подбирается таким образом, чтобы обеспечивалось совпадение расчетного и экспериментального значений температур $T_{1exp(t)}$ и $T_1 = f(t)$ в контрольной точке для заданного момента времени $t = t_{res}$. Результаты измерений температуры в точках T_1 и T_2 фиксируются с помощью ЭВМ, оснащенной АЦП. Очевидно, что для решения задачи с одной неизвестной T_r достаточно знать только одно значение температуры $T_{1exp(t)}$. Данные от второй термопары используются для проверки адекватности модели путем сопоставления расчетных и экспериментальных величин температуры в контрольных точках в моменты времени $t_0, t_1, \ldots t_i$.

В процессе решения поставленной задачи целесообразно использовать метод планирования эксперимента. Это позволяет

получить математическую модель, описывающую зависимость температуры в контрольных точках от условий обработки, которая используется для определения искомой величины T_r и позволяет существенно снизить время, необходимое для расчета, так как итерационная процедура выбора граничных условий заменяется решением алгебраического уравнения относительно неизвестной величины – температуры резания.

В качестве примера на рис. 3 представлена твердотельная модель резца, включающая режущую пластину из ПКНБ, подкладку из твердого сплава и поворотную державку.

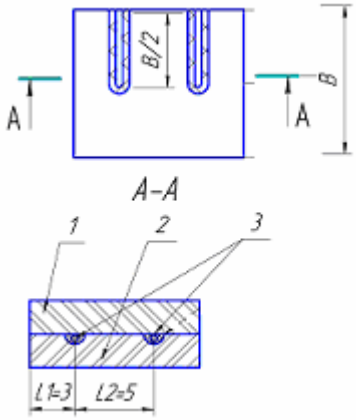


Рисунок 2 – Схема установки термопар:
1 – пластина ПКНБ; 2 – подложка; 3 – термопары

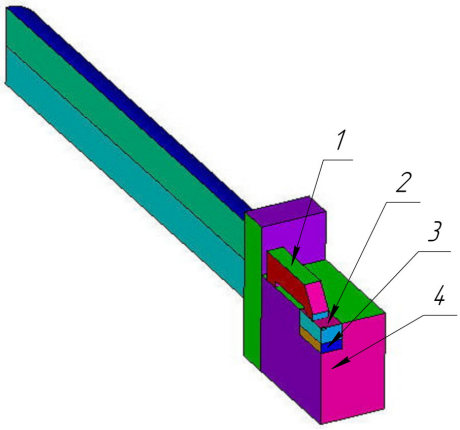


Рисунок 3 – Пример твердотельной модели державки однокромочного резца для косоугольного точения (осевое сечение): 1 – прихват; 2 – пластина ПКНБ; 3 – подложка; 4 – державка

При моделировании решалась линейная нестационарная задача теплопроводности, определяемая в общем случае уравнением

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \alpha\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}\right). \qquad (1)$$

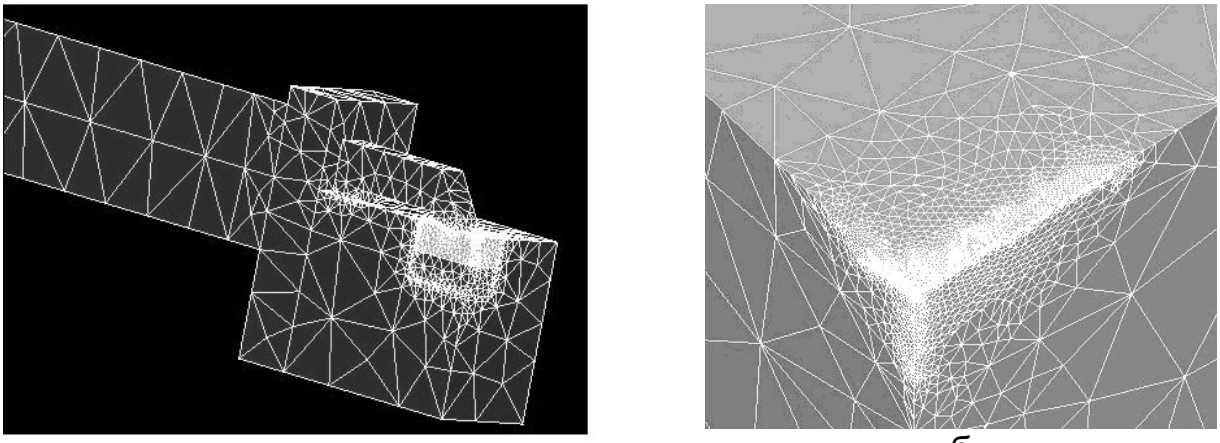
Необходимость решения нестационарной задачи обусловлена такими факторами:

– нестационарная задача дает возможность проследить динамику роста температуры в контрольных точках (точках установки термопар), что позволяет, сопоставляя расчетные и экспериментальные данные, оценить адекватность модели и, при необходимости, скорректировать установленные ранее в соответствии с [7] величины тепловой проводимости контакта на стыках между режущей пластиной и твердосплавной подложкой, режущей пластиной и державкой, державкой и подкладкой;

– при косоугольном резании заготовок малой (200–300 мм) длины за время одного прохода температурный режим в контрольных точках не успевает установиться, что при использовании стационарной модели приводит к значительным погрешностям при расчете температуры резания.

При КЭ моделировании использовались элементы с параболической аппроксимацией, содержащие 10 узлов, каждый из которых имеет одну степень свободы. Такой тип элементов предназначен для решения теплофизических задач и обеспечивает достаточно точное решение при свободной разбивке твердотельной модели. Модель содержала 83322 узла и 58876 элементов.

Пример разбивки на элементы твердотельной модели резца и его контактных участков приведен на рис 4. Известно, что корректность решения задачи с помощью МКЭ определяется в первую очередь правильной постановкой граничных условий [8].



а б

Рисунок 4 – Пример разбивки твердотельной модели (а) и контактных поверхностей модели (б) однокромочного резца для косоугольного точения (осевое сечение)

При точении массивными резцами период нестационарного теплообмена невелик. Тепловые потоки, проходящие через поверхности контакта "резец-заготовка-стружка", быстро стабилизируются и температура контактных поверхностей в дальнейшем изменяется незначительно [9]. В этой связи, полагая, что температура резания не зависит от времени, на контактных поверхностях инструмента устанавливаются граничные условия первого рода: $\theta(x,y,z)=T_r$, где T_r – средняя температура на передней и задней поверхностях инструмента. Характер распределения температуры вдоль контактных площадок инструмента можно не учитывать, так как это не оказывает влияния на результат решения задачи в точках, достаточно удаленных от источника тепловой нагрузки.

Значение температуры резания T_r задается на первом по времени шаге решения. Начальная температура модели соответствует температуре окружающей среды. На свободных поверхностях режущей пластины (1), подкладки (2) и державки (3) приняты граничные условия 3-го рода $\alpha_e \cdot (\theta n - \theta c) = \lambda \cdot \left(\frac{\partial \theta}{\partial n}\right)$. Усредненные величины эффективного коэффициента теплоотдачи принимаются для элементов модели рассматриваемой модели в соответствии с рекомендациями [10] α_{e1} = $=\alpha_{e2}$ = 50 Вт/(м^2·К) и α_{e3} = 20 Вт/(м^2·К).

С учетом теории контактного теплообмена тепловую проводимость контакта на границе между различными элементами модели можно представить зависимостью [7]

$$\alpha_T = \frac{2\lambda_m A_r}{\pi \rho \varphi_c A_c} + \frac{\lambda_c}{h_e}, \qquad (2)$$

где $\lambda_m = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ – приведенный коэффициент теплопроводности материалов контактирующей пары; λ_c – коэффициент теплопроводности межконтактной среды; A_r, A_c – фактическая и контурная площади контакта; ρ – усредненный радиус пятна контакта; φ_c – коэффициент, учитывающий сужение переходного сечения теплового потока у контактной поверхности; h_e – эквивалентная толщина межконтактного зазора.

Величины тепловой проводимости на границах контакта между режущей пластиной (2) и подкладкой из твердого сплава (3), подкладкой и корпусом резца (4), а также прихватом (1) и пластиной (2), определенные по выражению (2) в соответствии с методикой [7], а также их скорректированные в соответствии с экспериментальными данными значения, представлены в табл.1.

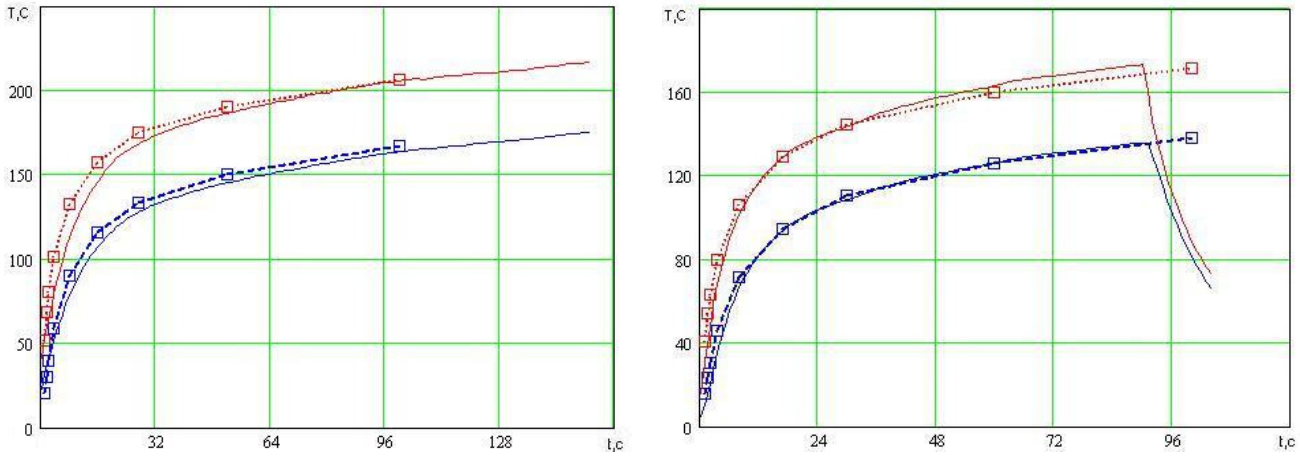
Таблица 1

Тепловая проводимость контактных поверхностей

Контактные поверхности		1-2	2-3	3-4
Тепловая проводимость контакта α_T, Вт/м^{2}К	расчетные значения	42300	12560	2700
	принятые при моделировании	30000	15000	2000

Правильное определение такого параметра, как контактное термическое сопротивление, определяемое величиной тепловой проводимости α_T на границах контакта между элементами модели, позволяет обеспечить с необходимой точностью совпадение расчетной

и экспериментальной температур в контрольных точках на подложке режущей пластины (рис.5).



а б

Рисунок 5 – Изменение температуры в контрольных точках на подложке режущей пластины с течением времени (*S* = 0,38 мм/об; *v* = 1,24 м/с): —— экспериментальные данные; - - - расчетные значения температуры: *а*) λ = =30°; *t* = 0,085 мм; *б*) λ = 50°; *t* = 0,07 мм

С помощью постановки вычислительного эксперимента на конечно-элементной модели можно получить уравнения регрессии для температур T_1 и T_2 в контрольных точках в зависимости от варьируемых факторов – величин длины и ширины контакта стружки с передней поверхностью, ширины фаски износа по задней поверхности и средней температуры резания *T*. В качестве примера приведем подобные выражения, полученные для случая косоугольного точения однокромочным резцом закаленной стали ШХ15:

$$T_1 = -111{,}83 + 39{,}13 - 12{,}23b^2 + 428{,}75Lc + 418{,}75h_з + 0{,}09T + 0.09bT - 1575Lc \cdot h_з$$
$$T_2 = -98{,}14 + 40{,}35 - 10{,}36b^2 + 267{,}1Lc + 262h_з + 0{,}07T + 0{,}072bT - 675Lc \cdot h_з . \quad (3)$$

Получив в ходе натурного эксперимента данные, выражающие зависимость температуры в контрольных точках от условий обработки, и решая в дальнейшем уравнения (3) относительно T_r, при известном значении $T_{1exp(t)}$ и $T_{2exp(t)}$, легко найти среднюю температуру в области, прилегающей к вершине резца.

Таким образом, разработана методика определения температуры резания при обработке инструментом, оснащенным поликристаллическим сверхтвердым материалом на основе кубического нитрида бора, которая основана на объединении экспериментальных результатов, полученных в процессе резания, с данными, результатов конечно-элементного моделирования режущего инструмента и условий его нагружения.

Список использованных источников

1. Устройство для корректирования температур при выполнении измерений с использованием термопары режущий инструмент-обрабатываемое изделие.: А. Хаара.; Сб. науч. об-ва точной механики. – 1973. – С. 27–35.

2. Коломиец В.В. Экспериментальное определение температурного поля резца из эльбора-Р / В.В. Коломиец, В.П. Зубарь, В.В. Голик, В.В. Колганенко // Синтет. алмазы. – 1977. – № 1. – С. 28–30.

3. Клименко С.А. Точение износостойких защитных покрытий / С.А. Клименко, Ю.А. Муковоз, Л.Г. Полонский, П.П. Мельнийчук. – К. : Техніка, 1997. – 144 с.

4. More efficient cutting processes due to the heat-spreading effect of CVD dimond / E. Uhlmann, E. Wörner, M. Brüher // IDR. – 1997. – № 1. – P. 25–29.

5. Temperature determination at the chip-tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder / S.R. Carvalho, S.M.M. Lima e Silva, A.R. Machado, G. Guimaraes // J. of Mat. Proc. Tech. – 2006.– № 179. – P. 97–104.

6. Коздоба Л.А. Методы решения обратных задач теплопереноса / Л.А. Коздоба, П.Г. Круковский. – К.: Наук. думка, 1982. – 360 с.

7. Демкин Н.Б., Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

8. Наседкин А.В. Конечно-элементное моделирование на основе ANSYS / А.В. Наседкин // Программы решения статических задач сопротивления материалов с вариантами индивидуальных заданий. – Ростов-на-Дону: УПЛ РГУ, 1998. – 44 с.

9. Развитие науки о резании металлов / Н.Н. Зорев, В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.

10. Вейник А.И. Техническая термодинамика и основы теплопередачи / А.И. Вейник. – М: Металлургия, 1965. – 375 с.