

УДК 621.922:621.923

DOI: 10.12737/17146

М.М. Яхутлов, У.Д. Батыров, М.Р. Карданова,
З.Н. Деунежев, А.А. Гутов

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА В АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕМ КОМПОЗИТЕ

Проведено численное моделирование нестационарных полей температур в системе «алмаз - полимерная матрица». Определены зависимости установившейся температуры и времени переход-

ного теплового процесса от теплопроводности и теплоёмкости матрицы.

Ключевые слова: алмаз, полимерная матрица, математическая модель, нестационарное температурное поле.

M.M. Yakhutlov, U.D. Batyrov, M.R. Kardanova, Z.N. Deunezhev, A.A. Gutov

RESEARCH OF NON-STATIONARY THERMAL PROCESS IN DIAMOND-CONTAINING COMPOSITE

The computational modeling of temperature non-stationary fields in the system “diamond-polymer matrix” is carried out. The dependences of a steady-state temperature and time of transitional thermal pro-

cess upon matrix thermal conductivity and heat capacity are defined.

Key words: diamond, polymer matrix, simulator, temperature non-stationary field.

Известно, что уникальные физико-механические свойства алмаза в алмазно-абразивных инструментах используются крайне неэффективно, так как большая часть алмазов выпадает из матрицы, не достигая значительного износа [1;2]. Для алмазных инструментов на полимерной матрице проблема осложняется ещё и низкой теплостойкостью полимера, так как прочность алмазодержания в значительной мере определяется его термовязкоупругими свойствами.

Исходя из изложенного, в структуре инструментальных алмазосодержащих композитов можно выделить систему «алмаз – матрица», процессы в которой в значительной степени определяют эксплуатационные свойства этих материалов.

Прерывистый характер процесса резания алмазным зерном при шлифовании приводит к соответствующему характеру тепловых воздействий на систему «зерно - матрица». Поэтому представляет интерес моделирование нестационарного температурного поля в системе «алмаз – матрица».

Данная статья посвящена исследованию нестационарного теплового процесса в системе «зерно - полимерная матрица» алмазного инструмента.

В работах [3;4] приведены результаты исследований стационарного теплового режима в алмазосодержащем композите на полимерном связующем. В настоящей работе применена аналогичная методика исследований. Так, исследования проводятся численным моделированием, как наиболее эффективным методом изучения данной системы. Это связано со сложностью экспериментальных исследований из-за малых размеров зерен и неоднородности свойств матрицы как композита. В качестве расчетной схемы принято единичное зерно эллипсоидной формы, помещенное в матрицу (рис. 2), так как даже в инструментах с высокой концентрацией алмазов поля температур около зерен перекрываются незначительно. Эллипсоид вращения является наиболее приближенной к реальной формой зерна. Кроме того, вариацией размеров полуосей эллипсоида можно моделировать различные его пропорции [5].

Решается двухмерная задача. Тепловая нагрузка на систему определяется тепловыделением в зоне резания алмазным зерном и выражается удельным тепловым потоком Q , приложенным к части свободного контура зерна, непосредственно контактирующей с обрабатываемым материа-

лом. Учитываются конвективные потери тепла в окружающую среду с соответствующим коэффициентом теплоотдачи h .

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right) - \rho \cdot c(T) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где $T(x, y, t)$ - температура; $\lambda(T)$ - коэффициент теплопроводности; ρ - плотность; $c(T)$ - удельная теплоёмкость; t - время.

• На участке контура, где задан поток тепла Q ,

$$\lambda \left(\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} l_x + \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} l_y \right) + Q = 0.$$

• На участках, где происходит конвективный теплообмен с коэффициентом теплоотдачи h ,

$$\lambda \left(\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} l_x + \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} l_y \right) + h [T(x, y, t) - T_\infty] = 0,$$

где T_∞ - температура окружающей среды; $l_x = \sin \alpha$, $l_y = \cos \alpha$ - направляющие косинусы.

• На остальной части контура $T(x, y, t) = 0$.

Предполагается, что конвективный теплообмен, а также поток тепла могут реализовываться только на контуре пластинки. Также предполагается, что начальные условия при решении уравнения нестационарной теплопроводности имеют вид

$$T(x, y, 0) = 0.$$

Как видно из приведенных зависимостей, задача решается в нелинейной постановке, т.е. с учетом зависимости удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности элементов исследуемой системы от температуры. Такая постановка задачи необходима прежде всего в связи с известной существенной зависимостью теплофизических свойств алмаза от температуры (рис. 1) [5].

Двухмерную нелинейную задачу нестационарной теплопроводности решали с использованием метода конечных элементов, для чего разработаны специальные программы на алгоритмическом языке Turbo-C. Достоверность разработанных алгоритмов обоснована с помощью комплексных численных экспериментов и логического анализа получаемых результа-

Уравнение нестационарной теплопроводности в плоской изотропной среде имеет вид

Это уравнение должно подчиняться следующим граничным условиям на контуре плоской пластины:

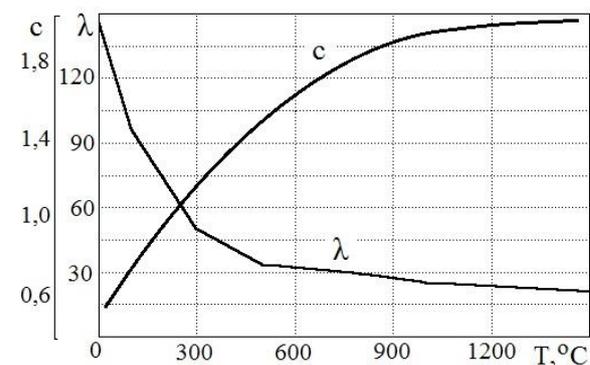


Рис. 1. Зависимости коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·град), и удельной теплоёмкости c , Дж/(кг·град), алмаза от температуры

тов. В частности, проведена оценка точности получаемого решения с использованием свойств симметрии исследуемой конструкции и на основе анализа реакций на неподвижных узлах, а также сравнением результатов расчётов при решении задач стационарной и нестационарной теплопроводности.

В качестве базовых исходных данных в численных экспериментах были приняты параметры системы, характерные для условий работы алмазных шлифовальных кругов на бакелитовом связующем [1;2]. Размеры осей эллипса (зерна) были приняты равными 0,5 и 0,4 мм. Плотность ρ , коэффициент теплопроводности λ и удельная теплоёмкость c элементов конструкции при 20 °С приведены в таблице.

Таблица
Физические свойства элементов [6;7]

Материал	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·град)	c , Дж/(кг·град)
Алмаз	3520	146,5	502
Бакелит	1300	0,18	1600

Тепловая нагрузка на систему задавалась из условия соответствия температур в системе известным экспериментальным данным [8;9]: $Q = 3 \cdot 10^6 \text{ Вт}/(\text{м}^2)$ и $h = 5 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Переходные тепловые процессы в

зоне А матрицы (рис. 2) при различных значениях коэффициента теплопроводности λ и удельной теплоёмкости матрицы c , полученные решением уравнения (1) в нестационарной постановке, представлены на рис. 2 и 3.

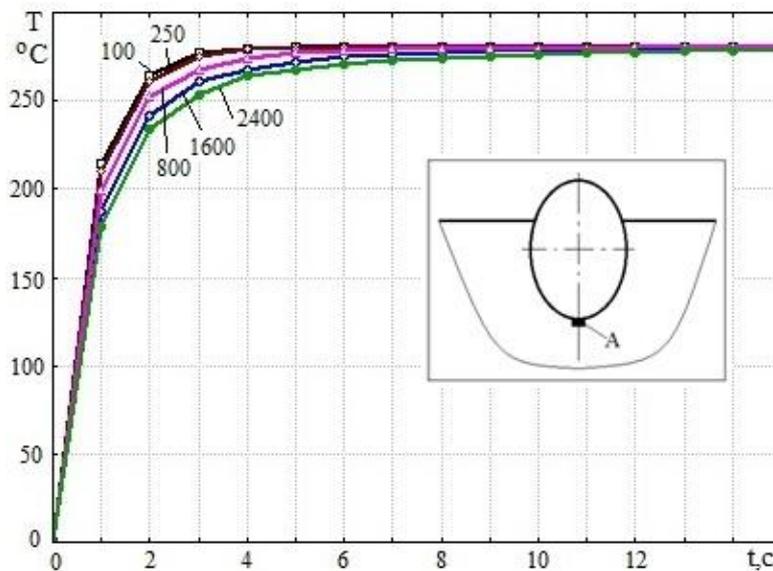


Рис. 2. Нестационарный тепловой процесс в системе при различных значениях удельной теплоёмкости матрицы c , Дж/(кг·град)

Как видно из рис. 2, удельная теплоёмкость матрицы не влияет на уровень установившейся температуры в системе, но влияет на время переходного теплового процесса. При заданных в численных экспериментах значениях удельной теплоёмкости матрицы от 100 до 2400 стационарная температура устанавливается за время от 4 до 16 секунд. При использовании бакелитового связующего ($c = 1600$) время переходного процесса составляет порядка 11 секунд.

Время переходного теплового процесса практически не зависит от теплопроводности матрицы (рис. 3). Последняя существенно влияет на установившуюся температуру в системе. Для указанной зоны А (рис. 2) максимальная установившаяся температура, равная примерно 280°C, наблюдается при использовании бакелитового связующего ($\lambda = 0,18$). С увеличением теплопроводности матрицы стационарная температура уменьшается.

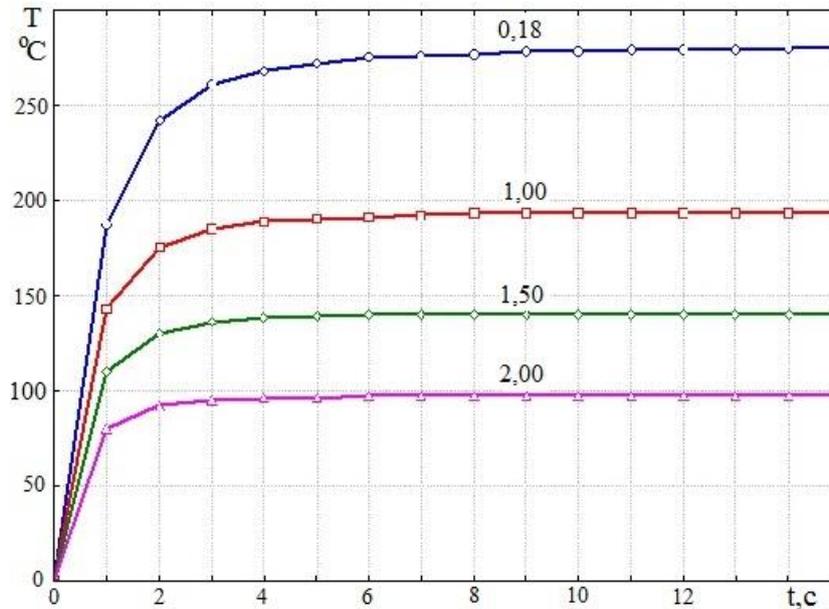


Рис. 3. Нестационарный тепловой процесс в системе при различных коэффициентах теплопроводности матрицы λ , Вт/(м · град)

Разработанная модель нестационарного теплового процесса в системе и приведенные результаты исследований могут

быть использованы для оптимизации конструкции и режимов эксплуатации шлифовальных кругов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструменты из сверхтвёрдых материалов / под ред. Н.В. Новикова. – М.: Машиностроение, 2005. – 555 с.
2. Попов, С.А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
3. Яхутлов, М.М. Исследование тепловой нагрузки на алмазные шлифовальные круги на полимерной матрице / М.М. Яхутлов, М.Х. Лигидов, У.Д. Батыров, М.Р. Карданова, З.Н. Деунежев // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2013. – Т. III. – №6. – С. 50-53.
4. Яхутлов, М.М. Исследование температурных напряжений в инструментальном алмазосодержащем композите / М.М. Яхутлов, У.Д. Батыров, М.Р. Карданова, З.Н. Деунежев, А.А. Гутов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – №3. – С. 99-103.
5. Яхутлов, М.М. Особенности математического моделирования алмазных инструментов / М.М. Яхутлов, Б.С. Карамурзов, У.Д. Батыров, М.Р. Карданова // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2012. – Т. II. – №4. – С. 32-35.
6. Физические величины: справочник / под ред. Н.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
7. Физические свойства алмазов: справочник / под ред. Н.В. Новикова. – Киев: Наукова думка, 1987. – 190 с.
8. Химач, О.В. Контактная температура при микрорезании твёрдого сплава ВК8 / О.В. Химач, Г.И. Ковыженко, П.В. Колмогоров // Сверхтвёрдые материалы. – 1981. – №2. – С. 59-61.
9. Тхагапсоев, Х.Г. Определение контактной температуры при правке абразивных кругов алмазным инструментом / Х.Г. Тхагапсоев, М.Х. Шхануков, Б.С. Хапачев, М.Х. Абрегов // Сверхтвёрдые материалы. – 1983. – №4. – С. 44-48.
1. Ultra-Hard Tooling / under the editorship N.V. Novikov. - M.: Mechanical Engineering, 2005. - pp. 555.
2. Popov, S.A., Metal and Hard Metal Diamond-Abrasive Working / S.A. Popov, N.P. Malevsky, L.M. Tereshchenko. - M.: Mechanical Engineering, 1977. - pp. 263.
3. Yakhutlov, M.M., Investigation of thermal load upon diamond abrasive discs with polymeric matrix / M.M. Yakhutlov, M.Kh. Ligidov, U.D. Batyrov, M.R. Kardanova, Z.N. Deunezhev // Bulletin of Kabardino-Balkaria State University. - 2013. - Vol. III. - No 6. - pp. 50-53.

4. Yakhutlov, M.M., Investigation of thermal stresses in tool diamond-containing composite / M.M. Yakhutlov, U.D. Batyrov, M.R. Kardanova, Z.N. Deunezhev, A.A. Gutov // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2014. – No3. – pp. 99 -103.
5. Yakhutlov, M.M., Peculiarities of diamond tool mathematical modeling / M.M. Yakhutlov, B.S. Karamurzov, U.D. Batyrov, M.R. Kardanova // Bulletin of Kabardino-Balkaria State University. – 2012. – Vol. II. – No 4. – pp. 32-35.
6. Physical Magnitudes: text-book / under the editorship of N.S. Grigoriev, E.Z. Meilikhova. – M.: Energoatomizdat. 1991. – pp. 1232.
7. Diamond Physical Properties: text-book / under the editorship of N.V. Novikov. – Kiev: Naukova Dumka, 1987. – pp. – 190.
8. Khimach, O.V., Contact temperature at TC8 hard metal micro-cutting / O.V. Khimach, G.I. Kovyzhenko, P.V. Kolmogorov // Extra-hard Materials. – 1981. – No 2. – pp. 59-61.
9. Tkhagapsoyev, Kh.G., Definition of contact temperature at abrasive disk dressing by diamond tool / Kh.G. Tkhagapsoyev, M.Kh. Shkhanukov, B.S. Khapachev, M.Kh. Abregov // Extra-hard Materials. – 1983. – No 4. – pp. 44-48.

*Материал поступил в редколлегию
29.06.15.*

*Рецензент: д.т.н., профессор
С.А. Шептунов*

Сведения об авторах:

Яхутлов Мартин Мухамедович, д. т. н, профессор, зав. кафедрой «Технология автоматизированного производства» Кабардино-Балкарского государственного университета, e-mail: martin_yah@mail.ru.

Батыров Умар Даниялович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Управление качеством» Кабардино-Балкарского государственного университета, тел.: 8662-400017, 8 662-42-52-96.

Карданова Марианна Разиуановна, к. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Математический анализ и

теория функций» Кабардино-Балкарского государственного университета, тел.: 8662-400017.

Деунезhev Залим Николаевич, ассистент кафедры «Технология автоматизированного производства» Кабардино-Балкарского государственного университета, тел.: 8662-400017.

Гутов Астемир Арсенович, аспирант кафедры «Технология автоматизированного производства» Кабардино-Балкарского государственного университета, тел.: 8662-400017.

Yakhutlov Martin Mukhamedovich, D.Eng., Prof., Head of Dep. «Automated Manufacturing Techniques» Kabardino-Balkaria State University, e-mail: martin_yah@mail.ru.

Batyrov UmarDanyalovich, D.Eng., Prof., head of the Dep. «Quality Control», Kabardino-Balkaria State University, Phone: 8662-400017, 8 662-42-52-96.

Kardanova Marianna Raziuanovna, Can.P-M., Assistant Prof. of the Dep. «Mathematical Analysis and Theory of Functions», Kabardino-Balkaria State University, Phone: 8662-400017.

Deunezhev Zalim Nikolaevich, Assistant Prof. of the Dep. «Automated Manufacturing Techniques» Kabardino-Balkaria State University, Phone: 8662-400017.