

УДК 621.914.02

**Н.И. Покинтелица, профессор, д-р техн. наук**

*Севастопольский национальный технический университет,*

*ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 99053*

*tm@sevntu.com.ua*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ПРОЦЕСС ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ТЕРМОФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ**

*Приведены результаты исследований способа термофрикционной обработки с учетом анизотропии теплофизических свойств инструмента и заготовки в процессах теплопередачи. Доказано, что изменения коэффициента теплопроводности вследствие различных значений температуры в зоне обработки приводят к изменению свойств теплопроводности в разных направлениях.*

**Ключевые слова:** *термофрикционная обработка, режущий диск, коэффициент теплопроводности, градиент, температура, анизотропия, тензор.*

**Введение.** Термофрикционная обработка (ТФО) плоских поверхностей заготовок сопровождается большим выделением теплоты, оказывает существенное влияние, как на производительность процесса, так и на качество обработанной поверхности. Важное значение это имеет при обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов, для которых этот способ в ряде случаев является единственно возможным.

При проведении анализа результатов предыдущих исследований и публикаций установлено, что в последнее время рассмотрены различные методы ТФО заготовок инструментом, выполненным в виде режущего диска [1]. Приведенные результаты исследований особенностей комплексной термофрикционной и механической обработки деталей [2]. Доказано, что нагрев зоны резания зависит от физико-механических свойств материала заготовки и инструмента, а также режимов резания [3]. Ссылок на результаты исследований тепловых явлений процесса ТФО с учетом изменения коэффициента теплопроводности вследствие изменения температуры в зоне обработки в литературных источниках не обнаружено.

Одной из важных задач, подлежащих решению в общем комплексе исследований процесса ТФО, было изучение тепловых явлений, поскольку температура, развиваемая в ходе пластической деформации и высокоскоростного трения, имеет важное влияние на процесс резания.

**Целью данной статьи** является исследование особенностей образа ТФО с учетом анизотропии теплофизических свойств инструмента и заготовки в процессах теплопередачи.

**Основное содержание работы.** В результате расчетов температурного поля в инструменте и заготовке установлено, что в непосредственной близости от зоны обработки имеют место значительные градиенты температуры, значение которых достигают 200 К/мм и более. Коэффициенты теплопроводности материала заготовки и инструмента зависят от температуры [4]. С повышением температуры металла от 100 °С до 800 °С коэффициенты теплопроводности уменьшаются в 2...3 раза.

Изменения коэффициента теплопроводности вследствие изменения температуры приводят к изменению свойств теплопроводности в различных направлениях. Эквивалентные коэффициенты теплопроводности по касательной к поверхности диска (в тангенциальном направлении) будет меньше, чем коэффициент теплопроводности в радиальном направлении. Это приведет к анизотропии тепловых свойств инструмента и заготовки.

Если система является однородной и имеет изотропные теплофизические свойства, то процессы теплопроводности определяются константами: коэффициентом теплопроводности или коэффициентом температуропроводности.

Для неоднородных и анизотропных в отношении теплопередачи систем процессы теплопроводности определяются тензором теплопроводности анизотропной среды.

Процессы теплопроводности описываются с использованием векторных величин, в частности, вектора переноса тепла.

Этот вектор представляет собой поток тепла, соответствует количеству тепла, которое переносится через участок поверхности единичной площади, перпендикулярной к тепловому потоку (рисунок 1).

Коэффициент теплопроводности холодного металла гораздо больше, чем коэффициент теплопроводности нагретого металла. Поэтому между вектором теплового потока  $\vec{q}$  и градиентом температуры  $\overline{grad\Theta}$  имеет место определенный угол, который зависит от соотношения теплопроводностей.

Для изотропной среды вектор переноса тепла:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \overline{\text{grad}}\Theta,$$

где  $\lambda$  – постоянный коэффициент теплопроводности среды;  $\Theta$  – текущая температура, определенная в каждой точке среды.

Для декартовой прямоугольной системы координат  $Oxyz$  с единичными ортами  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  вектор градиента температуры определяем как:

$$\overline{\text{grad}}\Theta = \vec{i} \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \Theta}{\partial z}.$$

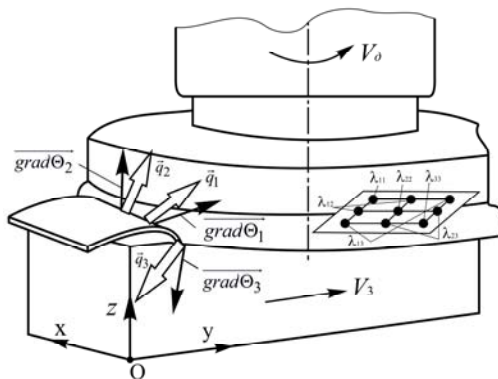


Рисунок 1 – Схема отклонения вектора теплового потока от вектора-градиента температуры

В правую часть этой формулы входят значения частных производных скалярного поля температуры  $\Theta(x, y, z)$  в объеме изотропной среды.

Вектор переноса тепла  $\vec{q}$  имеет одинаковый вид во всех точках изотропной среды и всегда параллелен вектору градиента температуры. Если среда является анизотропной, то вектор переноса тепла не будет параллельным вектору градиента температуры. Обозначив компоненты вектора переноса тепла в системе координат  $Oxyz$  как  $q_x, q_y, q_z$ , или в общем виде  $q_i$  (где  $i = 1, 2, 3$ ), получим зависимость между компонентами вектора переноса тепла и компонентами вектора градиента температуры в виде:

$$q_i = - \left[ \lambda_{i1} \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \lambda_{i2} \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \lambda_{i3} \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right], \quad i = 1, 2, 3.$$

Эту формулу запишем в индексном виде:

$$q_i = - \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} \frac{\partial \Theta}{\partial x_j}, \quad (1)$$

где введен набор величин  $\lambda_{ij}$ , которые образуют тензор теплопроводности анизотропной среды:

$$(\lambda_{ij}) = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Экспериментальные исследования показывают, что тензор теплопроводности является симметричным, т.е.

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ji}.$$

Из физических соображений следует, что тензор теплопроводности, определяемый матрицей (2), является неособенным (невырожденным). Случай вырожденного тензора теплопроводности означает, что по некоторому направлению вовсе отсутствует передача тепла, а это физически нереально.

Тензор теплопроводности  $(\lambda_{ij})$  как всякий симметричный тензор может быть приведен ортогональным преобразованием к диагональному виду с матрицей:

$$(\lambda)_{ij} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{pmatrix},$$

где  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – собственные значения тензора, которые называются главными коэффициентами теплопроводности анизотропной среды.

Тензор второго ранга  $(r_{ij})$ , обратный тензору  $(\lambda_{ij})$ , называется тензором теплового сопротивления. Решив уравнение (1) относительно компонент вектора градиента температуры, получим:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x_j} = - \sum_{i=1}^3 r_{ij} h_i, \quad j = 1, 2, 3.$$

Тензор  $(\lambda_{ij})$  является симметричным, поэтому и тензор теплового сопротивления  $(r_{ij})$  также является симметричным [4]. Он определяется матрицей:

$$(r_{ij}) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix},$$

где  $r_{12} = r_{21}$ ,  $r_{13} = r_{31}$ ,  $r_{23} = r_{32}$ .

Одновременно с тензором теплопроводности к диагональному виду приводится и тензор теплового сопротивления. Собственные значения тензора теплового сопротивления:

$$r_i = \frac{1}{\lambda_i}, \quad i = 1, 2, 3. \tag{3}$$

Для геометрической интерпретации тензора теплопроводности применяют его тензорную поверхность (эллипсоид теплопроводности).

Уравнение характеристической поверхности тензора теплопроводности  $(\lambda_{ij})$  в произвольной системе координат записывается в виде:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} x_i x_j = 1.$$

После приведения тензора теплопроводности к главным осям получим:

$$\lambda_x x_0^2 + \lambda_y y_0^2 + \lambda_z z_0^2 = 1. \tag{4}$$

Эта поверхность представляет собой трехосный эллипсоид, который называется эллипсоидом теплопроводности (рисунок 2).

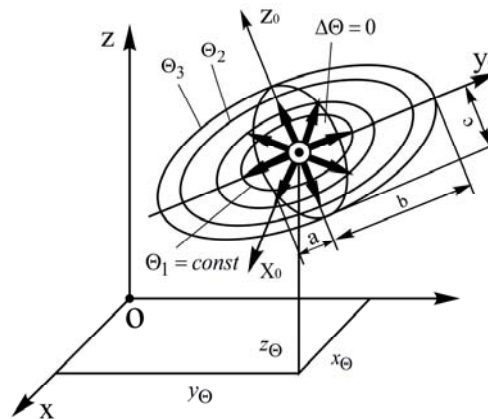


Рисунок 2 – Распределение тепла из точечного источника

Учитывая соотношение (3), получим уравнение эллипсоида, которое соответствует тензору теплового сопротивления, в виде:

$$\frac{x_1^2}{(\sqrt{r_1})^2} + \frac{x_2^2}{(\sqrt{r_2})^2} + \frac{x_3^2}{(\sqrt{r_3})^2} = 1,$$

где полуоси эллипсоида являются собственными значениями тензора теплового сопротивления.

Введенный тензор теплопроводности дает возможность вывести тензорные уравнения теплопроводности анизотропной среды.

Уравнение распространения тепла в среде с плотностью  $\rho$  и удельной теплоемкостью  $c$  имеет вид [4]:

$$\rho c \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \text{div} \vec{h}. \tag{5}$$

Для установившегося процесса распространения тепла из уравнения (5) получим:

$$\operatorname{div} \vec{h} = 0.$$

В координатной форме это уравнение принимает вид:

$$\frac{\partial q_1}{\partial x_1} + \frac{\partial q_2}{\partial x_2} + \frac{\partial q_3}{\partial x_3} = 0.$$

В анизотропной среде координаты вектора потока тепла связаны с градиентом температуры через тензор теплопроводности по формуле:

$$q_i = - \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} \frac{\partial \Theta}{\partial x_j}.$$

Соответственно получим:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_i \partial x_j} = 0. \quad (6)$$

Для решения этого уравнения перейдем к системе главных координат тензора ( $\lambda_{ij}$ ), в которых матрица тензора имеет диагональный вид. В главной системе координат уравнение (6) приводится к виду:

$$\lambda_1 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_1^2} + \lambda_2 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_2^2} + \lambda_3 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_3^2} = 0, \quad (7)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  – главные коэффициенты теплопроводности.

Перейдем в данном уравнении к новым переменным:

$$\xi_1 = \frac{x_1}{\sqrt{\lambda_1}}; \quad \xi_2 = \frac{x_2}{\sqrt{\lambda_2}}; \quad \xi_3 = \frac{x_3}{\sqrt{\lambda_3}}. \quad (8)$$

Тогда получим:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x_i} = \frac{\partial \Theta}{\partial \xi_i} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \Theta}{\partial \xi_i} \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}}; \quad \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi_i^2} \cdot \frac{1}{\lambda_i}, \quad i = 1, 2, 3.$$

Соответственно уравнение (7) примет вид уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi_1^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi_2^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi_3^2} = 0. \quad (9)$$

Это уравнение допускает аналитическое решение в отдельных случаях.

Рассмотрим точечный источник тепла в анизотропной среде на границе расплавленного металла и инструмента в виде диска.

Практически важным является случай распространения тепла в неограниченной анизотропной среде с точечным источником тепла, расположенным в точке с координатами ( $x_\Theta, y_\Theta, z_\Theta$ ).

Если точечный источник тепла расположен в начале координат, то решение уравнения Лапласа (9) имеет вид:

$$\Theta = \Theta_\infty + \frac{Q}{\sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2}},$$

где  $\Theta_\infty$  – постоянная температура среды, определенная на большом расстоянии от источника тепла;  $Q$  – постоянная величина (константа), связанная с производительностью источника тепла.

Перейдем от системы координат  $\xi_1 \xi_2 \xi_3$  согласно с (8) к системе координат  $x_1 x_2 x_3$  и получим скалярное поле температуры в виде:

$$\Theta = \Theta_\infty + \frac{Q}{\sqrt{\frac{x_1^2}{\lambda_1} + \frac{x_2^2}{\lambda_2} + \frac{x_3^2}{\lambda_3}}}. \quad (10)$$

Определим изотермические поверхности, которые возникают вокруг с точечного источника тепла. Они отвечают уравнению:

$$\Theta - \Theta_\infty = \text{const} = C.$$

Подставив данное значение температуры в формулу (10), получим уравнение изотермических поверхностей в виде:

$$\frac{x_1^2}{\lambda_1} + \frac{x_2^2}{\lambda_2} + \frac{x_3^2}{\lambda_3} = \frac{Q^2}{(\Theta - \Theta_\infty)^2} = \frac{Q^2}{C^2} = const. \quad (11)$$

Эти поверхности будут представлять собой эллипсоиды с полуосями:

$$a = \sqrt{\lambda_1} \frac{(\Theta - \Theta_\infty)}{Q}; \quad b = \sqrt{\lambda_2} \frac{(\Theta - \Theta_\infty)}{Q}; \quad c = \sqrt{\lambda_3} \frac{(\Theta - \Theta_\infty)}{Q}.$$

Графическое изображение изотермических поверхностей при распространении тепла от точечного источника в анизотропной среде приведено на рисунке 2.

Уравнение Лапласа (11) решено численным методом с использованием средств математического пакета. Для заготовки определена область интегрирования в виде прямоугольника ABCD с соответствующими краевыми условиями (рисунок 3).

В результате расчетов определено температурное поле в заготовке.

Расчет температурного поля сравнивался с результатами экспериментальных измерений. Точность расчета поля температур по предложенной методике составляет 2...4%. Это подтверждает необходимость учета анизотропии теплофизических свойств инструмента и слоя металла.

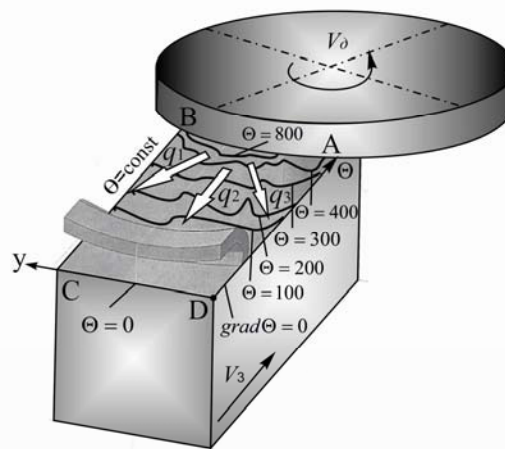


Рисунок 3 – Область интегрирования уравнения Лапласа и температурное поле в сечении заготовки

Для прямоугольной области интегрирования заданы краевые условия для температуры. На участке АВ распределение температуры принято в виде параболической зависимости с максимумом  $\Theta=150^\circ\text{C}$  на расстоянии  $AB/3$  от точки А. Для участков ВС и AD приняты краевые условия Неймана в виде  $grad\Theta=0$ . На участке CD принято условие  $\Theta=\Theta_0=const=30^\circ\text{C}$ .

Результаты решения уравнения Лапласа дают поле температур в зависимости от относительных координат  $\zeta_1\zeta_2$ . Для определения температуры в системе физических координат использованы соотношения  $x = \sqrt{\Lambda_1} \zeta_1$ ,  $y = \sqrt{\Lambda_2} \zeta_2$ .

Таким образом, установлено, что в центральной части заготовки формируется тепловой поток  $q_1$ , который приводит к разогреву центральной части заготовки и локализует нагрев металла в центральной части заготовки. Тепловые потоки  $q_2$ ,  $q_3$ , которые распространяются перпендикулярно направлению подачи, менее интенсивны. Это уменьшает теплоотдачу из зоны резания в окружающую среду.

**Выводы.** Доказано, что дополнительным фактором локализации теплообразования является анизотропия направлений теплопроводности материала заготовки, обусловленная разницей коэффициентов теплопроводности холодного и нагретого металла. Анизотропия проявляется в виде появления различных главных значений тензора теплопроводности и имеет своим следствием изменение направлений основных тепловых потоков с их ориентацией в сторону более холодных частей заготовки и инструмента. Это приводит к повышению равномерности распределения температуры и теплоизоляции и локализации тонкого слоя расплавленного металла между инструментом и заготовкой, в котором и происходит основное тепловыделение и фазовые превращения.

**Перспективы дальнейших исследований в данной области.** Исследование влияния физико-механических свойств обрабатываемых материалов на тепловые процессы в зоне термофрикционного резания.

**Библиографический список использованной литературы**

1. Зарубицкий Е.У. Обработка деталей диском трения / Е.У. Зарубицкий // Физические процессы при резании металлов. — Волгоград: ВолгПИ, 1984. — С. 131 – 134.
2. Струтинський В.Б. Комплексні методи механічної обробки деталей, що реалізують особливості динаміки технологічної системи верстата / В.Б. Струтинський, М.І. Покінтелиця // Вестник НТУУ «КПІ». Сер.: Машиностроение: сб. науч. тр. — Киев: НТУУ «КПІ», 2012. — Вып. 64. — С. 35 – 42.
3. Зарубицкий Е.У. Исследование температурных явлений процесса термофрикционной обработки коррозионно-стойких сталей / Е.У. Зарубицкий Е.У., В.А. Плахотник, Н.И. Покинтелица // Повышение эффективности процесса резания материалов. — Волгоград: ВолгПИ, 1987. — С.67 – 69.
4. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки металлов / А.Н. Резников. — М.: Машиностроение, 1981. — 297 с.

*Поступила в редакцию 23.01.2014 г.*

**Покінтелиця М.І. Дослідження впливу анізотропії теплофізичних властивостей на процес теплопередачі при термофрикційній обробці**

Наведені результати досліджень способу термофрикційної обробки з урахуванням анізотропії теплофізичних властивостей інструменту і заготовки в процесах теплопередачі. Доведено, що зміни коефіцієнта теплопровідності внаслідок різних значень температури в зоні обробки призводять до зміни властивостей теплопровідності в різних напрямках.

**Ключові слова:** термофрикційної обробка, ріжучий диск, коефіцієнт теплопровідності, градієнт, температура, анізотропія, тензор.

**Pokintelitsa N.I. Study of thermal properties anisotropy on the process of heat treatment in termofriktsionnoy**

The results of studies termofriktsionnoy processing method with anisotropic thermal properties of the tool and the workpiece in the process of heat transfer. Proved that changes in the coefficient of thermal conductivity due to the different temperature values in the processing zone lead to changes in the properties of thermal conductivity in different directions.

**Keywords:** termofriktsionnaya processing, cutting disc, the thermal conductivity, gradient, temperature anisotropy tensor.