

Научная статья

УДК 621.7

doi: 10.30987/2223-4608-2024-19-26

Моделирование процессов теплопередачи при термофрикционном резании в заготовках из конструкционных сталей

Чингиз Февзиевич Якубов¹, к.т.н.

Николай Иванович Покинтелица², д.т.н.

Сергей Михайлович Братан³, д.т.н.

Анастасия Сергеевна Часовитина⁴, аспирант

¹ Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова,
Симферополь, Россия,

^{2, 3, 4} Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

¹ yakubov_chingiz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9483-8677>

² nik.pokintelitsa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0277-9252>

³ serg.bratan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9033-1174>

⁴ nastya.chasovitina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6800-9392>

Аннотация. Рассмотрено влияние анизотропных свойств конструкционных сталей, на изменение теплопроводности в различных областях зоны контакта в процессе термофрикционного резания. Получены математические модели, которые позволяют построить векторные уравнения теплопроводности для среды с неодинаковыми свойствами в различных направлениях. Разработанные математические зависимости позволили получить модель скалярного температурного поля, приведены результаты расчета температурного поля по плоскости заготовки с учетом анизотропии теплофизических свойств обрабатываемого материала. Решение уравнений позволило построить поля температур в системе относительных и физических координат. Результаты измерений изотерм совпадают с экспериментальными данными можно сделать вывод об их соответствии. В результате выполненных исследований было доказано, что в анизотропной среде изменяются направления и ориентация тепловых потоков в сторону более холодных частей заготовки и инструмента из-за разницы коэффициентов теплопроводности холодного и разогретого материалов. Вышеуказанный процесс способствует выравниванию температуры в зоне контакта инструмента с заготовкой.

Ключевые слова: термофрикционное резание, зона контакта, тепловой поток, поля температур, анизотропная среда

Для цитирования: Якубов Ч.Ф., Покинтелица Н.И., Братан С.М., Часовитина А.С. Моделирование процессов теплопередачи при термофрикционном резании в заготовках из конструкционных сталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 10 (160). С. 19–26. doi: 10.30987/2223-4608-2024-19-26

Modeling of heat transfer operation within thermal friction cutting for constructional steel workpieces

Chingiz F. Yakubov¹, PhD. Eng.

Nikolay I. Pokintelitsa², D. Eng.

Sergey M. Bratan³, D. Eng.

Anastasia S. Chasovitina⁴, PhD student

¹ Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov,
Simferopol, Russia,

^{2, 3, 4} Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

¹ yakubov_chingiz@mail.ru

² nik.pokintelitsa@mail.ru

³ serg.bratan@gmail.com

⁴ nastya.chasovitina@mail.ru

***Abstract.** The influence of anisotropic properties of structural steels on the change in thermal conductivity in various areas of the contact zone under thermal friction cutting is viewed. Obtained mathematical models afford to construct vector equations of thermal conductivity for a medium with different properties in various directions. The developed mathematical dependences made it possible to obtain a model of a scalar temperature field, the results of calculating the temperature field along the workpiece plate are given, taking into account the anisotropy of the thermal properties of the work material. The solution of the equations made it possible to construct temperature fields in a system of relative and physical coordinate systems. The measurement results of the isotherms coincide with the experimental data, so it can be concluded on their interrelationship. As a result of the performed studies, it was proved that in an anisotropic medium, the directions and orientation order of heat flows change towards colder zones of the workpiece and tool due to the difference in the heat transfer coefficients for cold and heated materials. The above process helps to equalize the temperature in the contact area of the tool and the workpiece.*

Keywords: thermal friction cutting, contact zone, heat flow, temperature fields, anisotropic medium

For citation: Yakubov C.F., Pokintelitsa N.I., Bratan S.M., Chasovotona A.S. Modeling of heat transfer operation within thermal friction cutting for constructional steel workpieces / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 10 (160). P. 19–26. doi: 10.30987/2223-4608-2024-19-26

Введение

В настоящее время для обработки заготовок с плоскими поверхностями используется метод термофрикционного резания, позволяющий осуществлять высокопроизводительную обработку поверхностей, за счет снятия стружки с разогретой поверхности металла вследствие теплоты, выделяющейся при трении поверхностей инструмента о материал заготовки. Для реализации данного способа используются инструменты, изготовленные из легированных сталей, что позволяет существенно экономить дорогостоящие инструментальные материалы. Кроме того, металлические диски проще в изготовлении и имеют более высокую стойкость по сравнению с абразивными кругами и фрезами. Применение металлических дисков эффективно при черновой обработке плоских поверхностей с неравномерным припуском и заготовок, содержащих в своем составе различные включения.

Интенсивное выделение теплоты приводит к повышению температуры в зоне контакта поверхностей инструмента с материалом заготовки. Под действием высоких температур и приложенных сил поверхности трения деформируются, и материал в зоне трения переходит в пластическое состояние. Глубина пластических деформаций, зависит, в основном, от величины удельного давления, скорости относительного движения, продолжительности процесса трения и физико-механических свойств, трущихся тел. Теплота в зоне трения выделяется неравномерно. Анализ

современных исследований в области термофрикционного резания показывает, что в зоне обработки наблюдается анизотропия теплофизических свойств [1 – 7]. В исследованиях, проведенных авторами установлено, что в непосредственной близости от зоны обработки имеют место значительные градиенты температур [8]. Экспериментальные исследования, полученные в работах [9, 10] позволили дать количественную оценку изменения теплопроводности обрабатываемого материала от температуры, так, например, при термофрикционном резании заготовок из стали 45 при нагреве металла от 100 °С до 800 °С коэффициенты теплопроводности изменяются в 2,3 – 3,5 раза (рис. 1).

Таким образом, в результате изменения температур в зоне термофрикционного резания изменяется теплопроводность участков зоны контакта в разных направлениях. Например, аналитический расчет коэффициентов теплопроводности показал, что для зон, расположенных вдоль касательной поверхности диска, численные значения коэффициентов меньше, чем значения коэффициентов теплопроводности для зон, изменяющихся в радиальном направлении, что убедительно доказывает анизотропию теплофизических свойств материалов инструмента и заготовки.

Для прогнозирования величины дефектного слоя, возникающего в поверхностном слое заготовки после термофрикционного резания необходимо наличие адекватного описания тепловых процессов, происходящих в зоне контакта, учитывающего изменение

направлений основных тепловых потоков с их ориентацией, что является целью данной статьи.

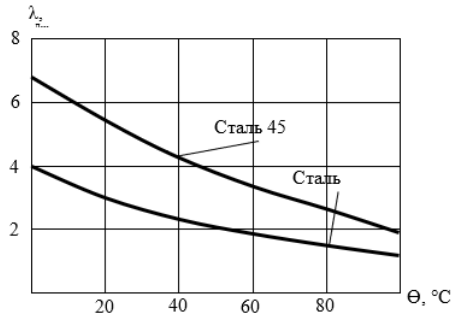


Рис. 1. Зависимости коэффициента теплопроводности стали 45 от температуры

Fig. 1. Dependences of the thermal conductivity coefficient of steel 45 on temperature

Материалы и методы

Для моделирования тепловых процессов и явлений при термофрикционном резании, например, процессов теплопроводности, вектора переноса тепла удобно использовать аппарат тензорного исчисления.

Для построения математической модели рассмотрим схему процесса термофрикционного резания рис. 2. На схеме указаны отклонения вектора теплового потока от вектора-градиента температуры, имеющего место на грани режущего диска вследствие разности коэффициентов теплопроводности металла.

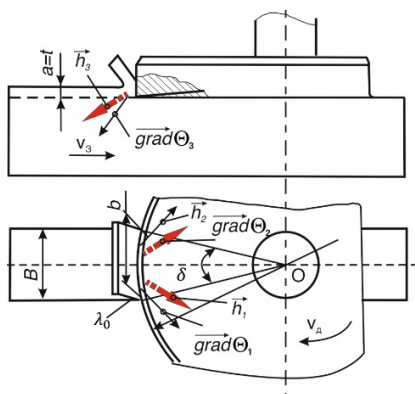


Рис. 2. Схема отклонения вектора теплового потока от вектора-градиента температуры, имеющего место на грани режущего диска вследствие разности коэффициентов теплопроводности металла

Fig. 2. Diagram of the deviation of the heat flow vector from the temperature gradient vector occurring on the edge of the cutting disc due to the difference in the thermal conductivity coefficients of the metal

На схеме, представленной на рис. 2 видно, что между вектором теплового потока \vec{h}_i и градиентом температуры $\overrightarrow{grad}\Theta$ образован угол, значения которого определяются соотношением теплопроводностей холодного и нагретого металла (рис. 3).

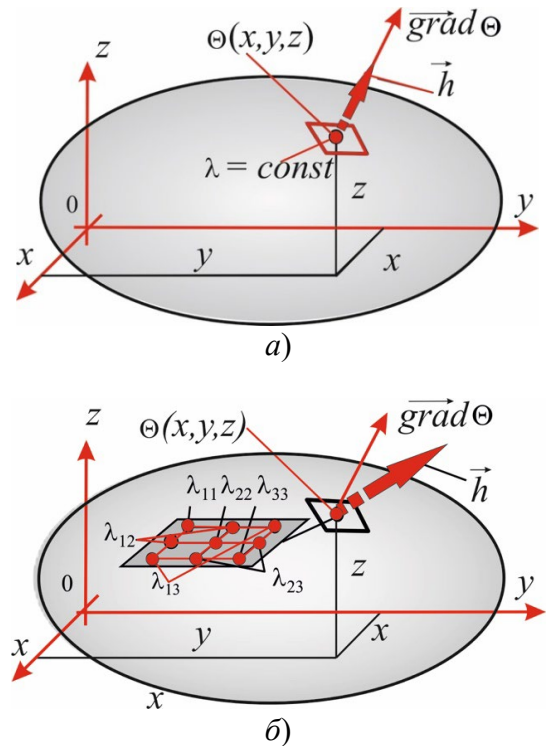


Рис. 3. Схема связи вектора теплового потока с градиентом температуры для изотропной теплопроводной (а) и анизотропной (б) сред

Fig. 3. Diagram of the connection of the heat flux vector with the temperature gradient for an isotropic heat-conducting (a) and anisotropic (b) media

Известно, что вектор переноса тепла моделируется зависимостью вида:

$$\vec{h} = -\lambda \cdot \overrightarrow{grad}\Theta, \quad (1)$$

$$h_i = -\left[\lambda_{i1} \frac{\partial\Theta}{\partial x} + \lambda_{i2} \frac{\partial\Theta}{\partial y} + \lambda_{i3} \frac{\partial\Theta}{\partial z}\right], \quad (2)$$

где $i = 1, 2, 3$.

Выражение (2) может быть представлено в индексном виде:

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

где λ_{ij} – тензор теплопроводности анизотропной среды:

$$(\lambda_{ij}) = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Экспериментальные исследования показывают, что тензор теплопроводности обладает свойством симметричности:

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

Такой вектор, путем ортогональных преобразований, может быть представлен в виде диагональной матрицы

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

где $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – главные коэффициенты или собственные значения тензора теплопроводности анизотропной среды.

Направления, соответствующие собственным значениям тензора теплопроводности анизотропной среды

$$\vec{e}_i^0, \quad i = 1, 2, 3,$$

являются собственными направлениями тензора теплопроводности.

Для дальнейшего описания введем обозначение r_{ij} – тензора второго ранга, и обратного ему λ_{ij} – тензора теплового сопротивления.

После решения уравнения (3) с учетом вышеизложенного получим:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x_j} = - \sum_{i=1}^3 r_{ij} h_i, \quad j = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где r_{ij} – тензор теплового сопротивления который характеризуется матрицей вида:

$$(r_{ij}) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

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

Процедура приведения к диагональному виду, матрицы вектора теплопроводности осуществляется аналогично для матрицы вектора теплового сопротивления:

$$r_i = \frac{1}{\lambda_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (7)$$

где r_i – собственные значения вектора теплового сопротивления.

С учетом вышеизложенного уравнение характеристической поверхности вектора теплопроводности λ_{ij} моделируется выражением:

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

которое после приведения к главным осям примет вид:

$$\lambda_x x_0^2 + \lambda_y y_0^2 + \lambda_z z_0^2 = 1 \quad (8)$$

или

$$\frac{x_0^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_x}}\right)^2} + \frac{y_0^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_y}}\right)^2} + \frac{z_0^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_z}}\right)^2} = 1, \quad (9)$$

где $a = \frac{1}{\sqrt{\lambda_x}}$; $b = \frac{1}{\sqrt{\lambda_y}}$; $c = \frac{1}{\sqrt{\lambda_z}}$ – полуоси эллипсоида теплопроводности (рис. 4).

С учетом соотношения (7), получим уравнение вектора теплового сопротивления:

$$\frac{x_1^2}{(\sqrt{r_1})^2} + \frac{x_2^2}{(\sqrt{r_2})^2} + \frac{x_3^2}{(\sqrt{r_3})^2} = 1. \quad (10)$$

Полученное выражение позволяет построить векторные уравнения теплопроводности для среды с неодинаковыми свойствами в различных направлениях.

Рассмотрим процесс распространения тепла в среде с плотностью ρ и удельной теплоемкостью c . Такой процесс моделируется выражением вида [4]:

$$\rho c \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \text{div} \quad (11)$$

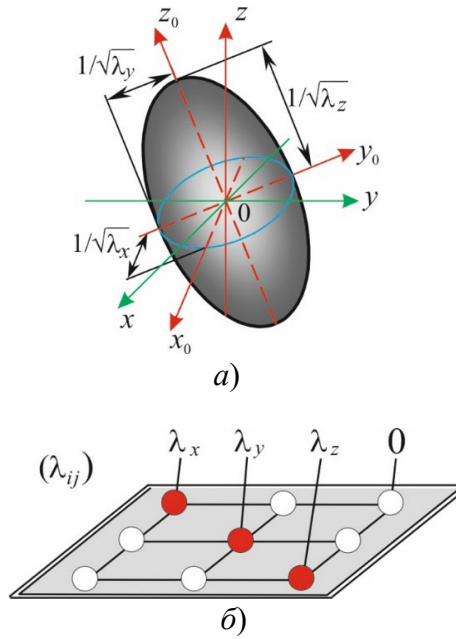


Рис. 4. Эллипсоид теплопроводности анизотропной среды (а) и графическая интерпретация тензора теплопроводности (б)

Fig. 4. Ellipsoid of thermal conductivity of anisotropic medium (a) and graphical interpretation of the thermal conductivity tensor (b)

Для описания установившегося процесса приравняем правую часть уравнения (11) к нулю:

$$\frac{\partial h_1}{\partial x_1} + \frac{\partial h_2}{\partial x_2} + \frac{\partial h_3}{\partial x_3} = 0.$$

Известно, что координаты тензора теплового потока связаны вектором тензор теплопроводности:

$$h_i = - \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} \frac{\partial \Theta}{\partial x_j}. \quad (12)$$

Соответственно получим:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_i \partial x_j} = 0. \quad (13)$$

Чтобы решить уравнение (13) необходимо осуществить переход вектора λ_{ij} , к системе главных координат:

$$\lambda_1 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_1^2} + \lambda_2 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_2^2} + \lambda_3 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_3^2} = 0 \quad (14)$$

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

После замены переменных в уравнении (14) получим:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x_i} = \frac{\partial \Theta}{\partial \xi_i} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \Theta}{\partial \xi_i} \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}}; \quad \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi_i^2} \lambda_i, \quad (15)$$

где $\xi_1 = \frac{x_1}{\sqrt{\lambda_1}}; \xi_2 = \frac{x_2}{\sqrt{\lambda_2}}; \xi_3 = \frac{x_3}{\sqrt{\lambda_3}}; i = 1, 2, 3.$

С учетом вышерассмотренных преобразований уравнение (16) приводится к виду уравнения Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi_1^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi_2^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi_3^2} = 0. \quad (16)$$

Аналитическое решение уравнения (16) возможно лишь для некоторых частных случаев. Например, для условий термофрикционного резания, при которых источник тепла в неограниченной анизотропной среде может рассматриваться, как точечный, расположенный на границе расплавленного металла и главной режущей кромки инструмента в точке с координатами $(x_T; y_T; z_T)$.

Пусть источник тепла расположен в начале координат, тогда после решения уравнения (16) получим результат:

$$\Theta = \Theta_\infty + \frac{Q}{\sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2}}, \quad (17)$$

где Θ_∞, Q – постоянные температуры среды и производительности источника тепла соответственно.

Результаты и их обсуждение

Полученное выражение позволяет получить модель скалярного температурного поля, путем перехода от системы координат $\xi_1 \xi_2 \xi_3$ согласно (12) к системе координат $x_1 x_2 x_3$:

$$\Theta = \Theta_\infty + \frac{Q}{\sqrt{\frac{x_1^2}{\lambda_1} + \frac{x_2^2}{\lambda_2} + \frac{x_3^2}{\lambda_3}}}. \quad (18)$$

Определим изотермические поверхности, возникающие вокруг из источника тепла. Они соответствуют уравнению (16).

Для графического представления изотермических поверхностей обозначим разность температур:

$$\Theta - \Theta_\infty = \text{const} = C. \quad (19)$$

После подстановки (20) в (19) и несложных преобразований получим уравнение изотермических поверхностей:

$$\frac{x_1^2}{\lambda_1} + \frac{x_2^2}{\lambda_2} + \frac{x_3^2}{\lambda_3} = \frac{Q^2}{(\Theta - \Theta_\infty)^2} = \frac{Q^2}{c^2} = \text{const.} \quad (20)$$

Изотермические поверхности представляют собой эллипсоиды с соответствующими полуосями (рис. 5)

$$a = \sqrt{\lambda_1 \frac{(\Theta - \Theta_\infty)}{Q}}; b = \sqrt{\lambda_2 \frac{(\Theta - \Theta_\infty)}{Q}}; c = \sqrt{\lambda_3 \frac{(\Theta - \Theta_\infty)}{Q}}. \quad (21)$$

Графические интерпретации процесса теплопередачи, построенные путем аналитического решения уравнения теплопроводности для малоподвижного и подвижного источников тепла приведены на рис. 6.

Результаты расчета температурного поля по плоскости заготовки с учетом анизотропии теплофизических свойств по уравнению (20) приведены на рис. 7. Расчет выполнен численными методами, при решении назначена область интегрирования *ABCD*.

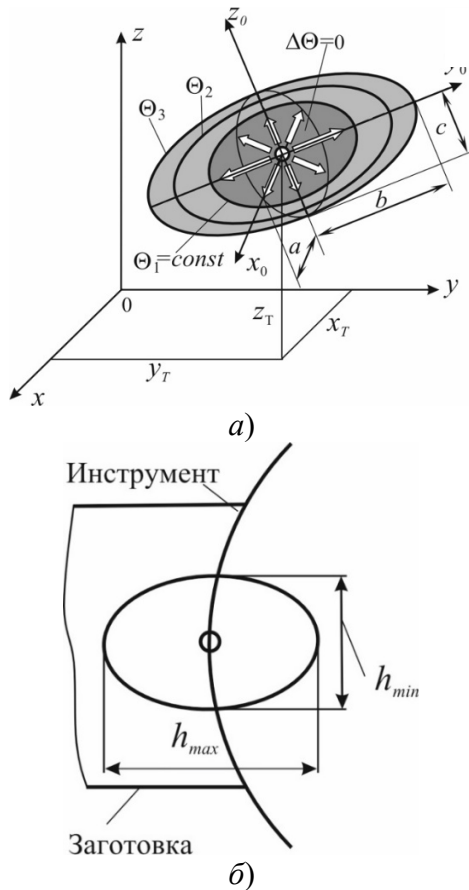
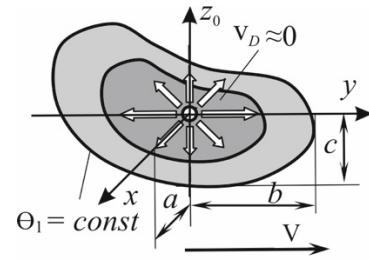


Рис. 5. Распространение тепла из точечного источника, расположенного на периферии инструмента:

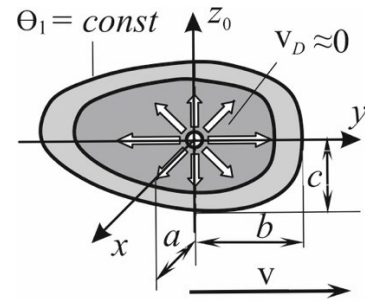
a – принципиальная схема распространения тепла; *б* – ориентация осей эллипса

Fig. 5. Heat propagation starting from a point source located on the periphery of the tool:

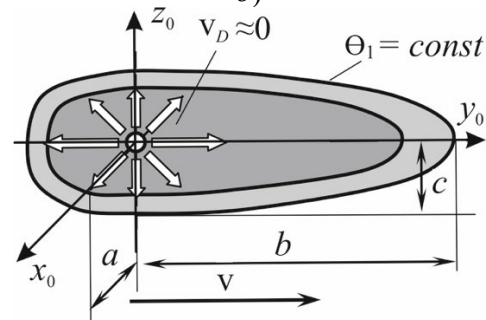
a – schematic diagram of heat propagation; *b* – orientation of the axes of the ellipse



a)



б)



в)

Рис. 6. Распространение тепла от точечного источника, находящегося в слое жидкого металла: *a* – для малоподвижного источника теплоты; *б* – для движущегося источника теплоты; *в* – для источника, движущегося с большой скоростью

Fig. 6. Heat propagation starting from a point source located in a layer of liquid metal: *a* – for inactive (slow) heat source; *b* – for a moving heat source; *c* – for a source moving at high speed

На участке *AB* распределение температуры принято в виде параболической зависимости с максимумом $\Theta = 150^\circ\text{C}$ на расстоянии $AB/3$ от точки *A*. Для участка *BC* и *AD* приняты краевые условия Неймана в виде $\text{grad } \Theta = 0$. На участке *CD* принято условие $\Theta = \Theta_0 = \text{const} = 30^\circ\text{C}$.

Решение уравнения (20) позволило построить поля температур в системе относительных ζ_1 , ζ_2 и физических координат $x = \sqrt{\Lambda_1} \zeta_1$, $y = \sqrt{\Lambda_2} \zeta_2$.

В результате расчетов определено температурное поле в заготовке. Расчет температурного поля сравнивался с результатами экспериментальных измерений (см. рис. 6 и 7). Результаты измерений изотерм показаны на рис. 7 знаками (Δ , 0, +, \square). Из сравнения расчетов с экспериментальными данными можно сделать вывод об их соответствии. Из сравнения расчетных значений с результатами экспериментальных исследований следует, что точность расчета поля температур по предложенной методике составляет 2...4 %. Это подтверждает необходимость учета анизотропии теплофизических свойств инструмента и металла. Таким образом, установлено, что в центральной части заготовки формируется тепловой поток h_1 , который приводит к разогреву центральной части заготовки и локализует нагрев металла в центральной части заготовки. Тепловые потоки h_2 , h_3 , которые распространяются перпендикулярно направлению подачи, менее интенсивны. Это уменьшает теплоотдачу от зоны контакта в окружающее пространство.

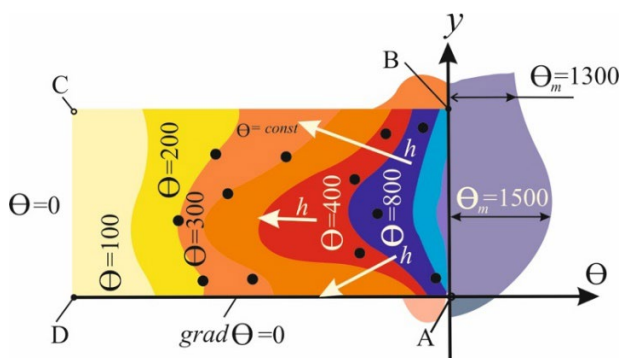


Рис. 7. Результаты расчета температурного поля по плоскости заготовки с учетом анизотропии теплофизических свойств и результатов экспериментальных измерений

Fig. 7. Calculating results for the temperature field along the plane of the workpiece, taking into account the anisotropy of thermal physical properties and experimental results measurements

Заключение

Анализ полученных результатов позволяет сделать заключение, что нагрев зоны контакта зависит от физико-механических свойств материала заготовки и инструмента, а также режимов резания.

Установлено, что в анизотропной среде изменяются направления и ориентация тепловых потоков в сторону более холодных частей заготовки и инструмента из-за разницы коэффициентов теплопроводности холодного и разогретого материалов. Вышеуказанный процесс способствует выравниванию температуры в зоне контакта инструмента с заготовкой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зарубицкий Е.У., Плахотник В.А., Покинтелица Н.И. и др. Оптимизация режимов термофрикционного резания // Вестник машиностроения. 1998. № 9. С. 54–56.
2. Покинтелица Н.И., Стреляная Ю.О., Братан М.И. Пластическое деформирование при термофрикционной обработке материалов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. № 3(77). С. 188–191. DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.036. EDN XHTITS.
3. Зарубицкий Е.У. Температура снимаемого припуска при термофрикционном резании // Оптимизация процессов резания жаропрочных и особо прочных материалов. Уфа: Изд-во УАИ, 1986. С. 106–110.
4. Волков О.А. Исследование теплодеформационного влияния при поверхностном упрочнении сталей термофрикционной обработкой // ВЕЖПТ. 2016. № 5 (80). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-teplodeformatsionnogo-vliyaniya-pri-poverhnostnom-uprochnenii-staley-termofriktsionnoy-obrabotkoj>.
5. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение, 1992. 240 с.
6. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механико-химические процессы при граничном трении. М.: Наука, 1972. 170 с.
7. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. М.: Машиностроение, 1980. - 136 с.
8. Покинтелица Н.И., Братан М.И. Особенности контактного взаимодействия инструмента и заготовки в зоне термофрикционного резания сталей // Вестник современных технологий. 2022. № 3(27). С. 37–43. EDN TOVBFE.
9. Покинтелица Н.И., Братан М.И., Якубов Ч.Ф. Методология обеспечения повышения эффективности фрикционного формообразования поверхностей // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2023. № 1 (79). С. 252–260. DOI 10.34771/UZCEPU.2023.79.1.050. EDN FOCKNK.
10. Покинтелица Н.И., Братан М.И. Исследование влияния параметров режима резания на температуру в зоне контактного взаимодействия инструмента и заготовки при термофрикционной обработке сталей // Вестник современных технологий. 2022. № 1 (25). С. 10–15. EDN IKCQUE.

REFERENCES

1. Zarubitsky E.U., Plakhotnik V.A., Pokintelitsa N.I. et.al. Optimization of thermal friction cutting modes. Bulletin of Mechanical Engineering, 1998, no. 9. pp. 54–56.
2. Pokintelitsa N.I., Strelyanaya Yu.O., Bratan M.I. Plastic deformation during thermofriction processing of materials. Scientific notes of the Crimean Engineering Pedagogical University. 2022, no. 3(77), pp. 188–191. DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.036. ED.
3. Zarubitsky E.U. The temperature of the removable allowance during thermofriction cutting // Optimization of cutting processes of heat-resistant and especially durable materials. Ufa: UAI Publishing House, 1986, pp. 106–110.
4. Volkov O.A. Investigation of the thermal deformation effect under surface hardening of steels by thermal friction treatment // VEZHPT, 2016, no. 5 (80). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-teplodeformatsionnogo-vliyaniya-pri-poverhnostnom-uprochnenii-staley-termofriktsionnoy-obrabotkoy>.
5. Talantov N.V. The physical foundations of the process of cutting, wear and destruction of the tool. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 240 p.
6. Kostetsky B.I., Natanson M.E., Bershadsky L.I. Mechanical and chemical processes under boundary friction. Moscow: Nauka, 1972, 170 p.
7. Balakin V.A. Friction and wear at high sliding speeds. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 136 p.
8. Pokintelitsa N.I., Bratan M.I. Features of the contact interaction of the tool and the workpiece in the zone of thermal friction cutting of steels. Bulletin of modern technologies, 2022, no. 3(27), pp. 37–43. EDN TOVBFE.
9. Pokintelitsa N.I., Bratan M.I., Yakubov Ch.F. Methodology for ensuring the effectiveness of frictional shaping of rotations. Scientific notes of the Crimean Engineering Pedagogical University, 2023, no. 1 (79), pp. 252–260. DOI 10.34771/UZCEPU.2023.79.1.050. SOURCE: EDN FOCKNK.
10. Pokintelitsa N.I., Bratan M.I. Investigation of the influence of cutting mode parameters on the temperature in the zone of contact interaction between the tool and the workpiece under thermofrictional treatment of steels. Bulletin of modern technologies, 2022, no. 1 (25), pp. 10–15. EDNIKC QUE.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.06.2024; одобрена после рецензирования 26.06.2024; принята к публикации 09.07.2024.

The article was submitted 17.06.2024; approved after reviewing 26.06.2024; assepted for publication 09.07.2024.