

УДК 539.3:621.9.048

DOI: 10.31429/vestnik-16-1-51-58

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОУПРУГОГО КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Нгуен Ван Тхо, Соловьев А. Н., Тамаркин М. А.

FINITE ELEMENT MODELING OF THERMOELASTIC CONTACT INTERACTION
IN THE ABRASIVE SURFACE TREATMENT OF MACHINE COMPONENTS

Van Tho Nguyen^{1,2}, A. N. Soloviev¹, M. A. Tamarkin¹

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

² Hai Phong University, Hai Phong City, Vietnam
e-mail: solovievarc@gmail.com

Abstract. The method of centrifugal-rotary machining of metal components in the abrasive medium, which is one of the effective methods of final surface processing, is considered. The interaction of abrasive particle with surface of workpiece studying within through a dynamic task of the theory of thermoelasticity, based on friction and surface heating in the contact area. The objective of work is research the stress-strain state and temperature field in accordance with process parameters (penetration depth, sliding speed and friction coefficient). The action of abrasive particle is being replaced by the introduction of a round hard stamp that slides at a constant speed along of component surfaces. The task is done by a three-dimensional formulation in moving coordinate system associated with a stamp. The component is a rectangular parallelepiped, the dimensions that are considerably larger than the diameter of a stamp. In the contact area, the Coulomb friction model is used. The coherence of mechanical and temperature fields is due to the presence of the temperature term in the mechanical defining relations and the dependence on the friction forces of the heat source in the temperature boundary condition in the region of a stamp. The task is done numerically using the finite element method. The dependences of the force contact interaction, the stress fields and temperature in vicinity of the punch are found when the penetration depth, punch sliding speed and friction coefficient change. The results are presented in the form tables and graphs that allow you to select rational parameters of the process, such as rotational speed, volume of abrasive medium.

Keywords: centrifugal-rotary processing, abrasive processing, thermoelasticity, contact problem, FEM.

Введение

Метод центробежно-ротационной обработки занимает особое место среди известных методов обработки деталей поверхностным пластическим деформированием, т.к. обеспечивает наибольшую производительность процесса обработки, многократно превышающую производительность многих других методов [1, 2]. Широкие технологические возможности метода определяют его как один из наиболее перспективных методов окончательной обработки. Оптимизация процесса требует разра-

ботки усовершенствованных моделей фрикционного взаимодействия между абразивными частицами и поверхностью металлической детали. В этой модели необходимо учитывать нагрев и износ поверхности при ударе и дальнейшем скольжении абразивной частицы.

В данной работе в трехмерной постановке рассматривается процесс взаимодействия абразивной частицы с поверхностью детали в рамках стационарной задачи термоупругости с учетом разогрева в области контакта. Действие абразивной частицы моделируется внед-

Нгуен Ван Тхо, аспирант Донского государственного технического университета, научный сотрудник кафедры машиностроения, Хайфонский университет, Хайфонг, Вьетнам; e-mail: thonguyen239@gmail.com.

Соловьев Аркадий Николаевич, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, профессор заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики Донского государственного технического университета; e-mail: solovievarc@gmail.com.

Тамаркин Михаил Аркадьевич, д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, заведующий кафедрой технологий машиностроения Донского государственного технического университета; e-mail: tehn_rostov@mail.ru.

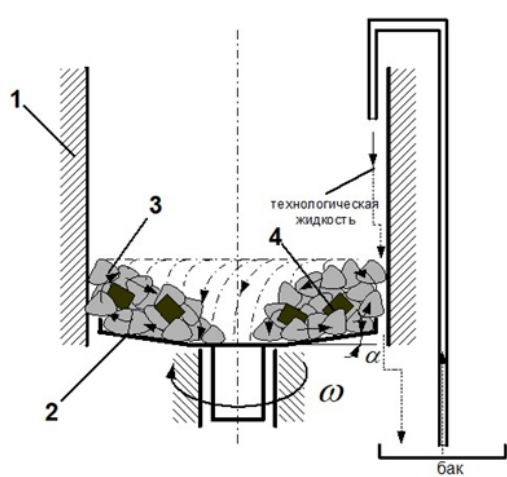


Рис. 1. Схема центробежно-ротационной установки: 1 — неподвижная цилиндрическая обечайка; 2 — ротор; 3 — абразивное зерно; 4 — обрабатываемые детали

рением круглого жесткого штампа и его движением с постоянной скоростью вдоль поверхности детали. Контакт штампа рассматривается с трением и пропорциональным интенсивности сил трения тепловыделением. Исследуется распределение характеристик напряженно деформированного состояния и температуры в окрестности области контакта в зависимости от технологических параметров процесса обработки.

1. Модель абразивной частицы

Метод центробежно-ротационной обработки (ЦРО) в абразивной среде характеризуется высокой производительностью и низкой стоимостью. Высокое качество обработки на ее окончательных этапах [2] обеспечивает использование метода ЦРО.

Сущность метода ЦРО состоит в том, что дискретная обрабатывающая среда 3 (абразивные частицы различной конфигурации, фарфоровые шарики, стальные полированные шарики и т.д.) и обрабатываемые детали 4 (рис. 1) [3] загружаются в рабочую камеру и приводятся во вращательное движение вокруг вертикальной оси таким образом, что вся масса загрузки приобретает форму тора. Торoidalно-винтовой поток обеспечивается конструкцией рабочей камеры, состоящей из неподвижной цилиндрической вертикально расположенной обечайки 1 и примыкающего к ней вращающегося дна 2.

Схема к построению модели внедрения индентора в виде усеченного конуса предполагает сферическую форму абразивной грану-

лы с набором усеченных конусов, примерное представление о геометрии теоретической абразивной частицы представлено на рис. 2 [4].

При абразивной обработке поверхностей деталей происходит контактное взаимодействие, приводящее с износу и разогреву поверхности обрабатываемой детали. Процессы трения и износа изучаются давно и их основы представлены в [5]. Процесс обработки в ротационной камере описан в работах М. А. Тамаркина и его учеников, исследованию особенностей этого процесса посвящены работы [6–8]. В настоящей работе изучается аспект контактного взаимодействия абразивной частицы и поверхности детали.

2. Постановка задачи о движении штампа с учетом трения и тепловыделения

Рассматривается задача (рис. 3) о движении штампа с постоянной скоростью $v > 0$ в положительном направлении оси x_1 , с учетом сил трения, возникающих под ним. За счет этого взаимодействия происходит разогрев полосы, который моделируется действующем поверхностным источником, мощность которого пропорциональна скорости движения и касательным напряжениям под штампом, которые связаны с нормальными напряжениями законом Кулона с коэффициентом трения f . Предполагается, что коэффициент трения может зависеть от температуры T поверхности в точках контакта $f = f(T)$. В предположении слабой связности и квазистатической постановки при отсутствии массовых сил

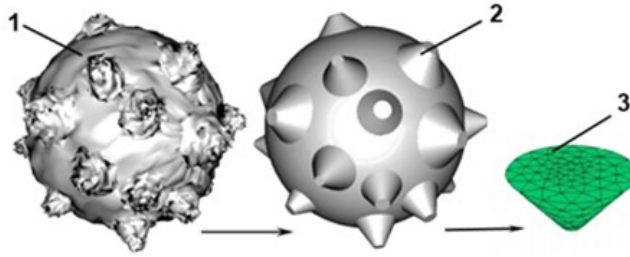


Рис. 2. Геометрия сферической абразивной гранулы: 1 — приближенная к реальной; 2 — моделируемая; 3 — абразивная частица сетки

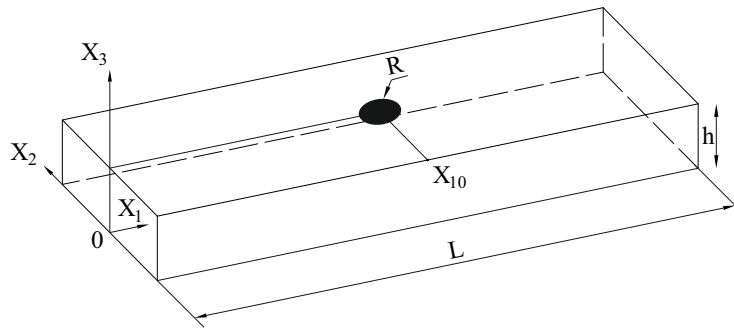


Рис. 3. Схема обрабатываемой детали и плоский круглый штамп

и объемных источников тепла в подвижной системе координат, в которой $x_1 \rightarrow x_1 - vt$, $x_i \rightarrow x_i$, $i = 2, 3$, полная система уравнений примет вид

$$\mu u_{i,kk} + (\lambda + \mu) u_{k,ki} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \theta_{,i} - \nu^2 \rho u_i = 0, \quad (2.1)$$

$$\lambda_q T_{,u} + c_\varepsilon \theta = 0, \quad (2.2)$$

где $\Theta = T - T_0$, $T_0 = 273^\circ\text{C}$, λ, μ — коэффициенты Ламе, α_T — коэффициент линейного расширения, λ_q — коэффициент теплопроводности, c_ε — удельная теплоемкость.

Граничные условия разделяются на механические и температурные.

При $x_3 = 0$:

– жесткое сцепление

$$u_k = 0; \quad (2.3)$$

– гладкое основание

$$u_3 = 0, \quad t_i = \sigma_{ij} n_j = 0, \quad i = 1, 2; \quad (2.4)$$

– теплоизолированная поверхность

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0; \quad (2.5)$$

– теплообмен

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{h_1}{\lambda_q} (T_1 - T); \quad (2.6)$$

– заданная температура

$$T = T_1. \quad (2.7)$$

При $x_3 = h$:

– штамп с учетом предельной силы трения

$$u_3 = -\delta, \quad t_1 = -ft_3, \quad (x_1 - x_{10})^2 + x_2^2 \leq R^2; \quad (2.8)$$

– тепловыделение под штампом

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{Q}{\lambda_q}, \quad Q = vt_1, \quad (x_1 - x_{10})^2 + x_2^2 \leq R^2; \quad (2.9)$$

– свободная поверхность

$$t_i = \sigma_{ij} n_j = 0, \quad (x_1 - x_{10})^2 + x_2^2 > R^2; \quad (2.10)$$

– теплообмен

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{h_2}{\lambda_q} (T_2 - T), \quad (x_1 - x_{10})^2 + x_2^2 > R^2; \quad (2.11)$$

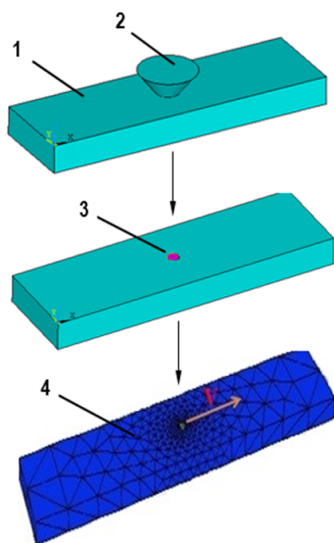


Рис. 4. Схема контактного взаимодействия: 1 — обрабатываемая деталь; 2 — абразивная частица; 3 — плоский круглый штамп (абразивная частица); 4 — конечно элементная сетка

– заданная температура

$$T = T_2, \quad (x_1 - x_{10})^2 + x_2^2 > R^2. \quad (2.12)$$

Здесь h_1 , T_1 и h_2 , T_2 — коэффициент теплопередачи и температура среды под и над полосой соответственно.

При численном решении, например, методом конечных элементов, краевой задачи (2.1), (2.2) с выбранном набором граничных условий из (2.3)–(2.10), введем фиктивные границы $x_1 = 0$ и $x_1 = L$ при $L \gg \max(2R, h)$, на которых поставим следующие граничные условия

При $x_1 = 0, L$:

$$u_1 = 0, \quad t_k = 0, \quad k = 2, 3, \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{h_3}{\lambda_q}(T_3 - T) \quad (2.14)$$

или

$$T = T_3, \quad (2.15)$$

где h_3 , T_3 — коэффициент теплопередачи и начальная температура полосы.

3. Конечно-элементное моделирование

Решение описанной выше краевой задачи проводится с помощью метода конечных элементов в пакете FlexPDE. Упрощение конечно-элементной модели представлено на рис. 4. Т.к. модуль упругости и твердость абразивных частиц значительно больше, чем у

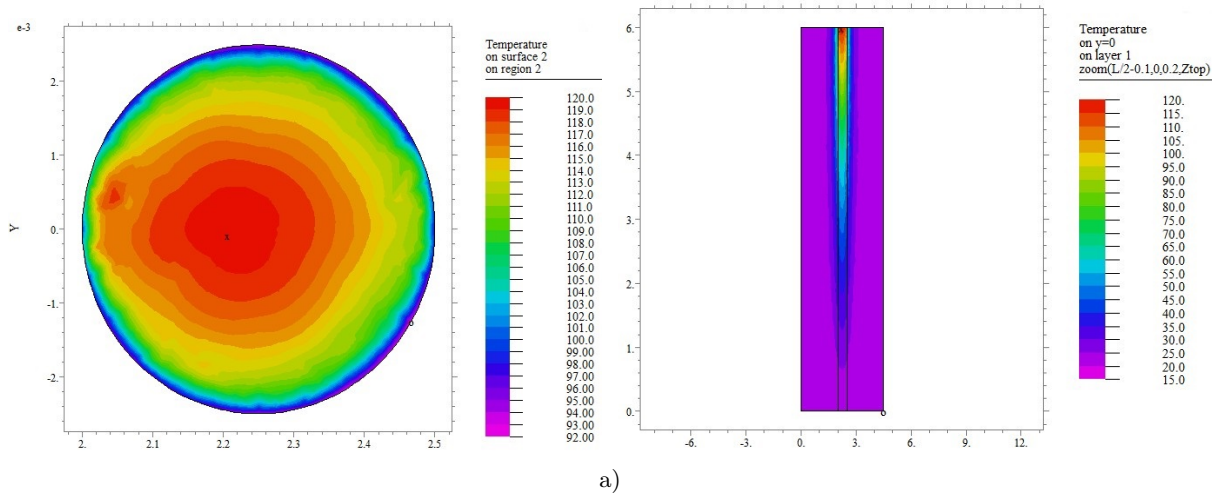
обрабатываемой детали, то ее действие заменяется жестким штампом (схема 3 на рис. 4). Конечно-элементная сетка представлена на схеме 4 на рис. 4 и имеет сгущение в окрестности области контакта.

4. Результаты расчетов

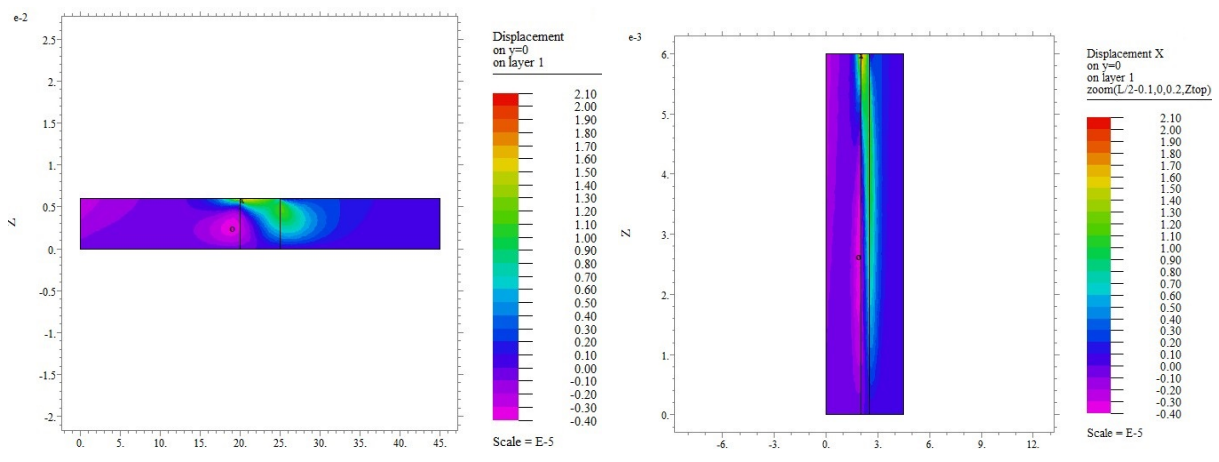
Для решения описанной задачи был применен метод конечных элементов [10]. В задаче были использованы следующие механические и температурные характеристики, заданные в системе СИ: модуль Юнга $E = 2 \times 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, коэффициент теплового расширения $\alpha_T = 11,9 \times 10^{-6}$ K^{-1} , плотность $\rho = 7,8 \times 10^3$ кг/м^3 , теплопроводность $\lambda_q = 52$ $\text{Вт/(м} \cdot \text{C)}$, теплоемкость $c_\epsilon = 462$ $\text{Дж/(кг} \cdot \text{C)}$, коэффициенты теплопередачи $h_1 = 1791,3$ $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$, $h_2 = 1791,3$ $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$, начальная и внешняя температуры $T_1 = T_2 = T_3 = 20$ $^\circ\text{C}$, длина полосы $b = 25h$ м, скорость скольжения $v = 0,2$ м/с, высота полосы $h = 0,04$ м, ширина штампа $2a = 0,02$ м, коэффициент трения $f = 0,2$, глубина внедрения $\delta = 1,0 \times 10^{-4}$ м.

На рис. 5 представлены распределение характеристик напряженно-деформированного состояния полосы и температурных полей.

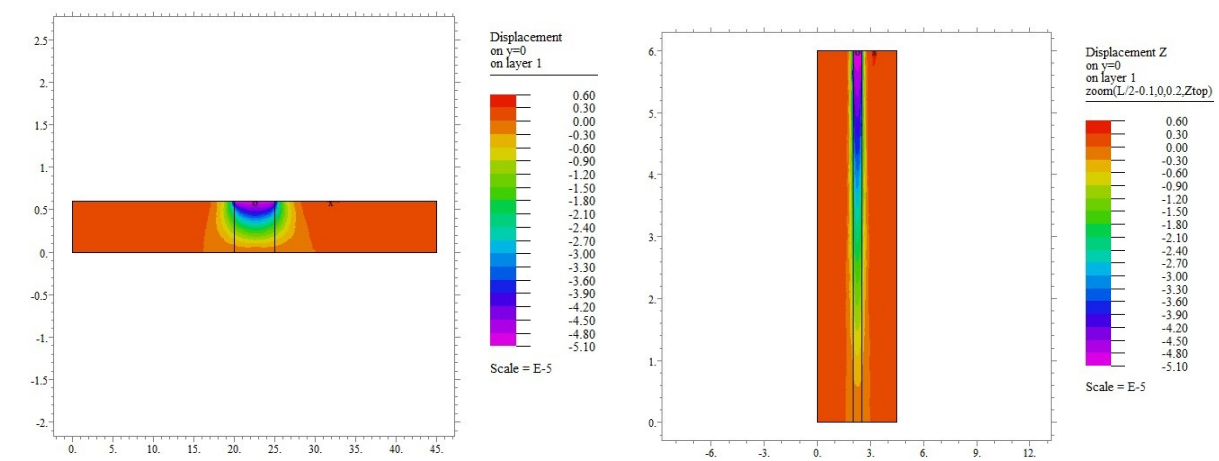
В табл. 1 представлена взаимосвязь между глубиной внедрения штампа и F — вертикальной составляющей силы контактного взаимодействия.



a)

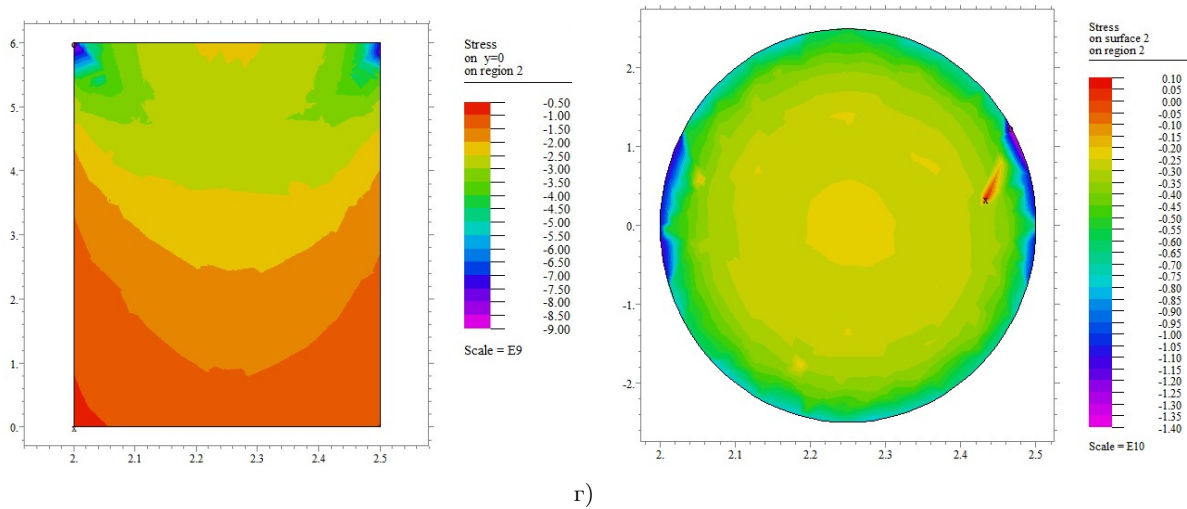


б)



в)

Рис. 5. Характеристик напряженно деформированного состояния полосы и температурных полей: а) распределение температуры под штампом; б) распределение горизонтального смещения в полосе; в) распределение вертикального смещения в полосе



г)

Рис. 5. Характеристик напряженно-деформированного состояния полосы и температурных полей:
 г) распределение напряжения σ_{33} в области под штампом

Таблица 1. Связь между контактной силой и глубиной внедрение

Глубина внедрения, м	$1,0 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-5}$	$3,0 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-5}$
F , Н	55	96	138	180	221

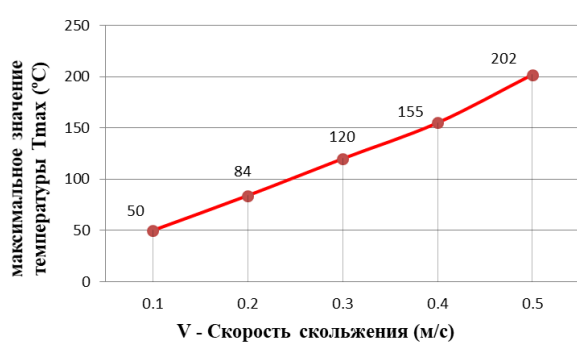


Рис. 6. Зависимость температуры от скорости скольжения

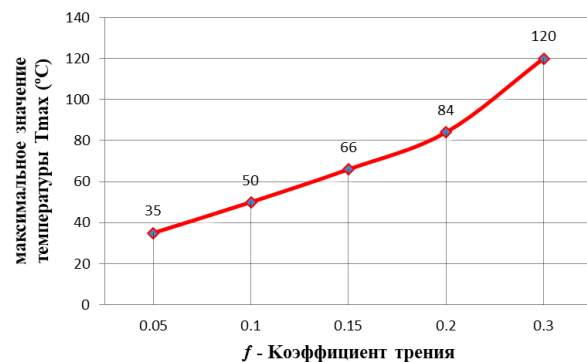


Рис. 7. Зависимость температуры от коэффициента трения

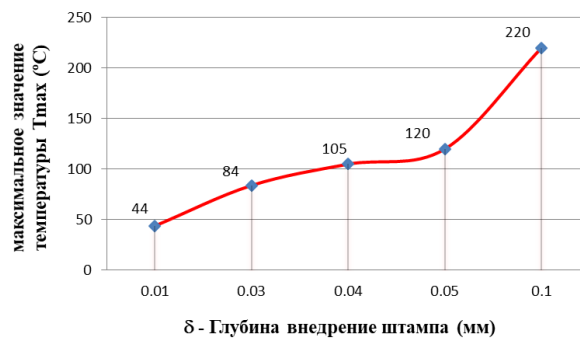


Рис. 8. Зависимость температуры от глубина внедрение штампа

Зависимости максимального значения температуры от скорости движения штампа, коэффициента трения и глубины внедрения штампа представлены на рис. 6–8 в трех случаях:

1) коэффициент трения $f = 0,2$; $\delta = 0,03$ мм и скорость скольжения изменяется от $v = 0,1$ м/с до $v = 0,5$ м/с;

2) $\delta = 0,03$ мм, скорость скольжения $v = 0,2$ м/с и коэффициент трения f изменяется от $f = 0,05$ до $f = 0,3$

3) скорость скольжения $v = 0,2$ м/с коэффициент трения $f = 0,2$ и глубина внедрения штампа изменяется от $\delta = 0,01$ мм до $\delta = 0,1$ мм

Выводы

В настоящей работе на основе трехмерной модели линейной термоупругости и задачи контактного взаимодействия рассмотрен процесс взаимодействия абразивной частицы с поверхностью обрабатываемой детали. Исследование напряженно-деформированное состояние на поверхности и в объеме детали исследовано численно с помощью метода конечных элементов.

Построены зависимости температуры и силы контактного взаимодействия от глубины внедрения штампа, от коэффициента трения и скорости скольжения абразивной частицы. В рассматриваемом технологическом процессе сила взаимодействия зависит от его параметров, таких как скорость вращения, тип абразивных частиц, их общий объем и др. Построенные в работе зависимости позволяют определить рациональное значение параметров процесса центробежно-ротационной обработки металлических деталей.

Литература

1. Gillespie Laroux. *Deburring and Edge Finishing*. Handbook. SME. ASMEPRESS. New York, Michigan, 1999. 404 p.
2. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Корольков Ю.В., Рожненко О.А. Повышение эффективности центробежно-ротационной обработки в среде абразива // СТИН. 2009. №2. С. 26–30.
3. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Друппов В.В. Исследование удаления металла при центробежно-ротационной обработке в абразивной среде // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2007. №1 (11). С. 169–186.

4. Тамаркин М.А., Рожненко О.А., Тищенко Э.Э., Корольков Ю.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов обработки фасонных поверхностей деталей свободным абразивом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. №11. С. 27–31.
5. Крагельский И.В. Трение и износ. Машиностроение, 1968. 480 с.
6. Шведова А. С. Обеспечение надежности технологического процесса центробежно-ротационной отделочно-упрочняющей обработки // Вестник ДГТУ. 2014. №4. С. 69–83.
7. Grützmacher Ph.G. The influence of centrifugal forces on friction and wear in rotational sliding // Tribology International. 2017. Vol. 116. P. 256–263. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.07.021
8. Wenhui Li. Theoretical and simulation analysis of abrasive particles in centrifugal barrel finishing: kinematics mechanism and distribution characteristics // Powder Technology. 2017. Vol. 318. P. 518–527. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.06.033
9. Morton K.W., Mayers D.F. Numerical solution of partial differential equations. Cambridge University Press, New York, 2005.
10. PDE Solution Inc. Available at: <https://www.pdesolutions.com>

References

1. Gillespie Laroux. *Deburring and Edge Finishing*. Handbook. SME. ASMEPRESS. New York, Michigan, 1999.
2. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Korol'kov, Yu.V., Rozhnenko, O.A. Povysheniye effektivnosti tsentrobezhno-rotatsionnoy obrabotki v srede abraziva [Improving the efficiency of centrifugal-rotary treatment in an abrasive medium]. *STIN*, 2009, no. 2, pp. 26–30. (In Russian)
3. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Drupov, V.V. Issledovaniye udaleniya metalla pri tsentrobezhno-rotornoy obrabotke v abrazivnoy srede. [The study of metal removal during centrifugal-rotary processing in an abrasive medium]. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviacionnoy tehnologicheskoy akademii im P.A. Solov'ev*. [Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy], 2007, no. 1 (11), pp. 169–186. (In Russian)
4. Tamarkin, M.A., Rozhnenko, O.A., Tishchenko, E.E., Korolkov, Yu.V. *Teoreticheskiye i eksperimental'nyye issledovaniya protsessov obrabotki fasonnykh poverkhnostey detaley svobodnym abrazivom*. [Theoretical and experimental studies of the processing of shaped parts surfaces with free abrasive]. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening technologies and coatings], 2011, no. 11, pp. 27–31. (In Russian)

-
5. Kragel'skiy, I.V. *Treniye i iznos* [Friction and wear]. *Mashinostroyeniye* [Mechanical engineering], 1968. (In Russian)
 6. Shvedova, A.S. Obespecheniye nadezhnosti tekhnologicheskogo protsessa tsentrobezhno-rotatsionnoy otdelochno-uprochnyayushchey obrabotki [Maintenance of reliability of technological process of centrifugal-rotational finishing-hardening processing]. *Vestnik DGTU* [Bulletin of the DSTU], 2014, no. 4, pp. 69–83. (In Russian)
 7. Grützmacher, Ph.G. The influence of centrifugal forces on friction and wear in rotational sliding. *Tribology International*, 2017, no. 116, pp. 256–263. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.07.021
 8. Wenhui, Li, Zhang, Li, Xiuhong, Li, Shengqiang, Yang, Fengfeng, Wu. Theoretical and simulation analysis of abrasive particles in centrifugal barrel finishing: kinematics mechanism and distribution characteristics. *Powder Technology*, 2017, no. 318, pp. 518–527. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.06.033
 9. Morton K.W., Mayers D.F. *Numerical solution of partial differential equations*. Cambridge University Press, New York, 2005.
 10. PDE Solution Inc. Available at: <https://www.pdesolutions.com>

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2019

© Нгуен Ван Тхо, Соловьев А. Н., Тамаркин М. А., 2019

Статья поступила 16 января 2019 г.