

Спирин В.А., Макаров В.Ф., Халтурин О.А. Определение температурных показателей моделированием процесса глобоидного зубохонингования в зависимости от параметров установки хона // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 56–62. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.07

Spirin V.A., Makarov V.F., Khalturin O.A. Definition of temperature indicators by modeling the process of globoid tooth-honing depending on the parameters of the hone installation // *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 56–62. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.07

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 21, № 2, 2019**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.07  
УДК 621.9

**В.А. Спирин, В.Ф. Макаров, О.А. Халтурин**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕМ ПРОЦЕССА ГЛОБОИДНОГО ЗУБОХОНИГОВАНИЯ**  
**В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ХОНА**

Определение теплодинамических показателей является частью общей методики расчета оптимальных условий глобоидного абразивного зубохонингования и выбора параметров режима обработки и характеристик абразивного слоя на этапе проектирования технологического процесса. Качество поверхностного слоя сложнопрофильных зубчатых поверхностей определяется множеством параметров, влияющих на напряженно-деформированное состояние в зоне контакта глобоидного червяка и профиля ротора винтового зубчатого двигателя. Значительная длина линии контакта и профильный контакт по нескольким зубьям одновременно приводят к значительным колебаниям показателей напряженно-деформированного состояния на различных участках профилей зубьев. Это приводит к необходимости дополнительных исследований протекания тепловых процессов в зоне обработки в зависимости от точности установки глобоидного хона относительно детали.

Нами разработана математическая модель расчета теплодинамических показателей процесса глобоидного зубохонингования в зависимости от параметров установки глобоидного абразивного хона относительно детали. В качестве обрабатываемой детали выбран ротор винтового зубчатого двигателя с рабочим профилем зубьев в виде эквидистанты укороченной эпициклоиды. Рабочая программа позволяет получать расчетные результаты, используя перебор исходных данных, что, в свою очередь, позволяет выполнять числовой эксперимент при различных вариантах сочетания параметров установок глобоидного хона.

Результаты числового эксперимента представлены графически в виде диаграмм изменения температурных показателей (полей) в различных точках линии контакта инструмента и детали. Эти результаты используются в комплексной задаче оптимизации условий обработки и выбора характеристик абразивного слоя глобоидного инструмента с целью повышения качества изготовления сложнопрофильных зубчатых поверхностей.

**Ключевые слова:** тепловой источник, температурное поле, плотность тепловыделения, теплопроводность, метод конечных разностей, числовой эксперимент, математическая модель теплообмена, глобоидный червяк, условия зубохонингования, характеристика абразивного слоя.

**V.A. Spirin, V.F. Makarov, O.A. Khalturin**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**DEFINITION OF TEMPERATURE INDICATORS BY MODELING THE PROCESS OF GLOBOID**  
**TOOTHONING DEPENDING ON THE PARAMETERS OF THE HONE INSTALLATION**

Definition of thermodynamic parameters is part of the general methodology for calculating the optimal conditions for globoid abrasive tooth-honing and selection of parameters of the processing mode and characteristics of the abrasive layer at the design stage of the process. The quality of the surface layer of complex-shaped toothed surfaces is determined by a variety of parameters affecting the stress-strain state in the contact zone of the globoid worm and the rotor profile of the positive displacement motor. The significant length of the contact line and the profile contact over several teeth simultaneously leads to significant fluctuations in the stress-strain state in different parts of the tooth profiles. This leads to the need for additional studies of the flow of thermal processes in the treatment area, depending on the accuracy of the installation of the globoid hone relative to the part.

We have developed a mathematical model for calculating the thermodynamic parameters of the globoid tooth-honing process, depending on the globoid abrasive hone installation parameters of relative to the part. A rotor of a positive displacement motor with a working tooth profile in the form of equidistant of shortened epicycloids is chosen as a workpiece. The work program allows you to get the calculated results using the enumeration of the source data, which in turn allows you to perform a numerical experiment with various options for the combination of parameters of the globoid hone installation.

The results of a numerical experiment are presented graphically in the form of diagrams of changes in temperature fields at different points of contact line of the tool and part. These results are used by the complex task of optimizing the conditions of processing and selecting the characteristics of the abrasive layer of a globoid tool with the aim of improving the quality of manufacturing complex profile surfaces

**Keywords:** heat source, temperature field, heat generation density, thermal conductivity, finite difference method, numerical experiment, mathematical model of heat transfer, globoid wormgearing, tooth-honing conditions, characteristic of abrasive layer.

## Введение

Повышение качества выпускаемой продукции – решающее условие повышения ее конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках. Это обуславливается постоянно возрастающими требованиями к надежности эксплуатации.

Требования по точности и качеству поверхностного слоя особенно большое значение приобретают при изготовлении сложнопрофильных винтовых деталей, например рабочей пары винтового забойного двигателя [1, 2].

Технология изготовления винтового забойного двигателя реализуется двумя способами:

- 1) нарезание зубьев дисковыми фрезами с последующей зубошлифовкой абразивными лентами;
- 2) нарезание зубьев червячными фрезами с последующим зубохонингованием глобоидными абразивными червяками (для рабочей пары винтовых забойных двигателей малых типоразмеров) [3, 4].

На кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» ПНИПУ разработан метод определения характеристик абразивного слоя глобоидного хона и условий обработки при глобоидном зубохонинговании моделированием напряженно-деформированного состояния рабочих поверхностей ротора и глобоидного хона в зоне контакта [5–15]. Это позволяет перейти к исследованиям теплофизических показателей глобоидного зубохонингования в зависимости от параметров установки глобоидного хона [16–24].

Для проведения этих исследований была поставлена задача разработать математическую модель, описывающую процесс теплообмена при глобоидном зубохонинговании при обработке ротора винтового забойного двигателя.

Модель должна позволять вычислить значения температуры в точках области ротора, прилегающего к зоне контакта глобоидного хона с обрабатываемой поверхностью.

Исходные данные для моделирования следующие:

- теплофизические характеристики материала ротора;
- температура в точках ротора до момента начала зубохонингования;
- длина зоны контакта глобоидного хона с обрабатываемой поверхностью.

## Концептуальная модель

1. Объектом моделирования является температурное поле, возникающее в роторе при его зубохонинговании. Ротор рассматриваем как твердое тело в торцовом сечении (рис. 1).

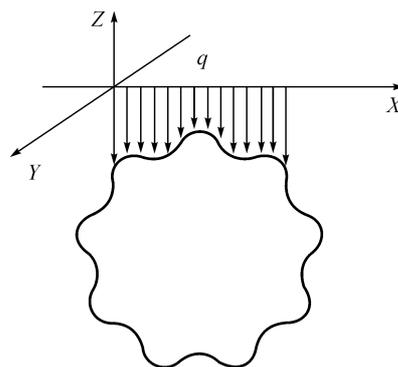


Рис. 1. Торцовый профиль ротора

2. Материал твердого тела однороден и изотропен. Его теплофизические характеристики (массовая теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности) не зависят от температуры.

3. В процессе теплообмена в материале тела не происходят фазовые превращения; деформация, вызванная изменением температуры, пренебрежимо мала по сравнению с размерами тела; в теле отсутствуют внутренние источники теплоты.

4. Зону резанья рассматриваем как бесконечно длинный в направлении оси  $X$  полосовой источник теплоты, имеющий неравномерно распределенную плотность тепловыделения  $q$  вдоль осей  $X, Y$ ; рассматриваем стационарный режим зубохонингования.

5. На шлифуемой поверхности вне зоны резания имеет место теплообмен тела с окружающей средой с плотностью теплового потока, соответствующей закону Ньютона – Рихмана. На поверхности  $Y = 0$  теплообмен с окружающей средой отсутствует.

6. Температурное поле в поверхностном слое пластины считаем двумерным, так как источник теплоты имеет постоянную плотность тепловыделения вдоль оси  $Z$  (первоначально принимаем в работе), а также вследствие допущения об однородности и изотропности материала ротора.

7. До момента соприкосновения глобоидного хона с обрабатываемой поверхностью ротора имеет место равномерное распределение температуры, равной температуре окружающей среды.

Исходя из перечисленных гипотез концептуальная постановка задачи может быть сформулирована следующим образом:

*определить температурное поле, возникающее в точках поверхностного слоя ротора в результате действия источника теплоты с неравномерно распределенной плотностью тепловыделения.*

Плотность тепловыделения источника теплоты задается следующим законом, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = k\sigma,$$

где  $\sigma$  – напряжение в зоне контакта, Па;  $k$  – приведенная скорость, м/с.

### Математическая постановка задачи

В соответствии с принятыми гипотезами 1–4 и 6 процесс распространения теплоты в точках поверхностного слоя ротора в направлении оси  $X$  описывается дифференциальным уравнением вида

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0, \quad x \geq 0. \quad (1)$$

Начальными условиями для решения этого уравнения являются

$$\theta(x, y) = \theta_0. \quad (2)$$

Граничные условия при  $y = 0$ :

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} &= q \quad \text{при } 0 < x < l; \\ -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} &= 0 \quad \text{при } x < 0 \cup x > l. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения (1)–(3) представляют собой математическую модель теплового процесса, возникающего при глобидном зубохонинговании ротора.

Математическая задача моделирования теплового процесса с помощью этой модели сводится к следующей краевой задаче: *найти решение дифференциального уравнения (1), удовлетворяющее начальным и краевым условиям (2) и (3).*

### Постановка вычислительной задачи

Решение поставленной краевой задачи осуществим методом конечных разностей. Определение температурного поля в точках поверхностного слоя ротора выполним в прямоугольной области (рис. 2).

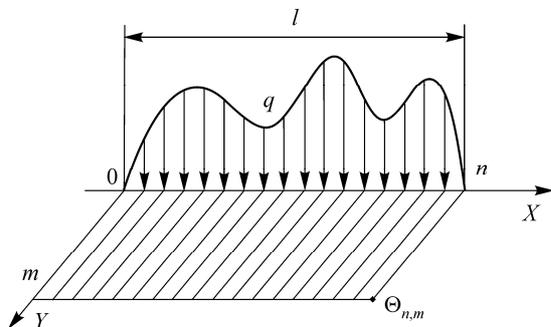


Рис. 2. Распределение плотности тепловыделения источника теплоты

**Дискретизация задачи.** Построим прямоугольную сетку по пространству с шагом  $h_y$  по оси

$Y$  и шагом  $h_{x_i}$  по оси  $X$  с помощью координатных линий  $Y_j = jh_y$  ( $j = 0, 1, 2 \dots m$ ) и  $X_i = ih_{x_i}$  ( $i = 0, 1, 2 \dots n$ ).

### Алгебраизация задачи

Начальные условия:

$$\theta_{i,j} = \theta_0 \quad \text{для } i = 0, 1, 2 \dots n \text{ и } j = 0, 1, 2 \dots m.$$

Изменение температуры прежде всего происходит в точках контакта источника теплоты с поверхностью ротора ( $Y = 0$ ) и в точках этой поверхности, расположенных позади и перед источником. Изменение температуры в этих точках по координате  $Y$  составит

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{(i,0)} = \frac{\theta_{i,1} - \theta_{i,0}}{h_y}, \quad i = 0, 1, 2 \dots n.$$

Используя эту формулу, заменим граничные условия (3) разностными:

$$\begin{aligned} -\lambda \cdot \frac{\theta_{i,1} - \theta_{i,0}}{h_y} &= q, \quad 0 < x < l; \\ -\lambda \cdot \frac{\theta_{i,1} - \theta_{i,0}}{h_y} &= 0, \quad x < 0 \cup x > l. \end{aligned}$$

После преобразования получим

$$\theta_{i,0} = \frac{qh_y}{\lambda} + \theta_{i,1}, \quad 0 < x < l, \quad i = 0, 1, 2 \dots n;$$

$$\theta_{i,0} = \theta_{i,1}, \quad x < 0 \cup x > l, \quad i = 0, 1, 2 \dots n.$$

Для производных воспользуемся формулами

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \Big|_{(i,j)} = \frac{\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i-1,j}}{h_{x_i}^2};$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \Big|_{(i,j)} = \frac{\theta_{i,j+1} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i,j-1}}{h_y^2}.$$

Подставляя эти формулы в дифференциальные уравнения теплопроводности, получим

$$\theta_{i,j} = \frac{h_y^2 (\theta_{i+1,j} + \theta_{i-1,j}) + h_{x_i}^2 (\theta_{i,j+1} + \theta_{i,j-1})}{2(h_y^2 + h_{x_i}^2)},$$

$$i = 0, 1, 2 \dots n; \quad j = 0, 1, 2 \dots m.$$

### Решение задачи

Решение полученной системы уравнений

$$\theta_{i,0} = \frac{qh_y}{\lambda} + \theta_{i,1}, \quad 0 < x < l, \quad i = 0, 1, 2 \dots n;$$

$$\theta_{i,0} = \theta_{i,1}, \quad x < 0 \cup x > l, \quad i = 0, 1, 2 \dots n;$$

$$\theta_{i,j} = \frac{h^2 (\theta_{i+1,j} + \theta_{i-1,j}) + h_i^2 (\theta_{i,j+1} + \theta_{i,j-1})}{2(h^2 + h_i^2)},$$

$$i = 0, 1, 2 \dots n; \quad j = 0, 1, 2 \dots m$$

представим в виде блок-схемы (рис. 3).

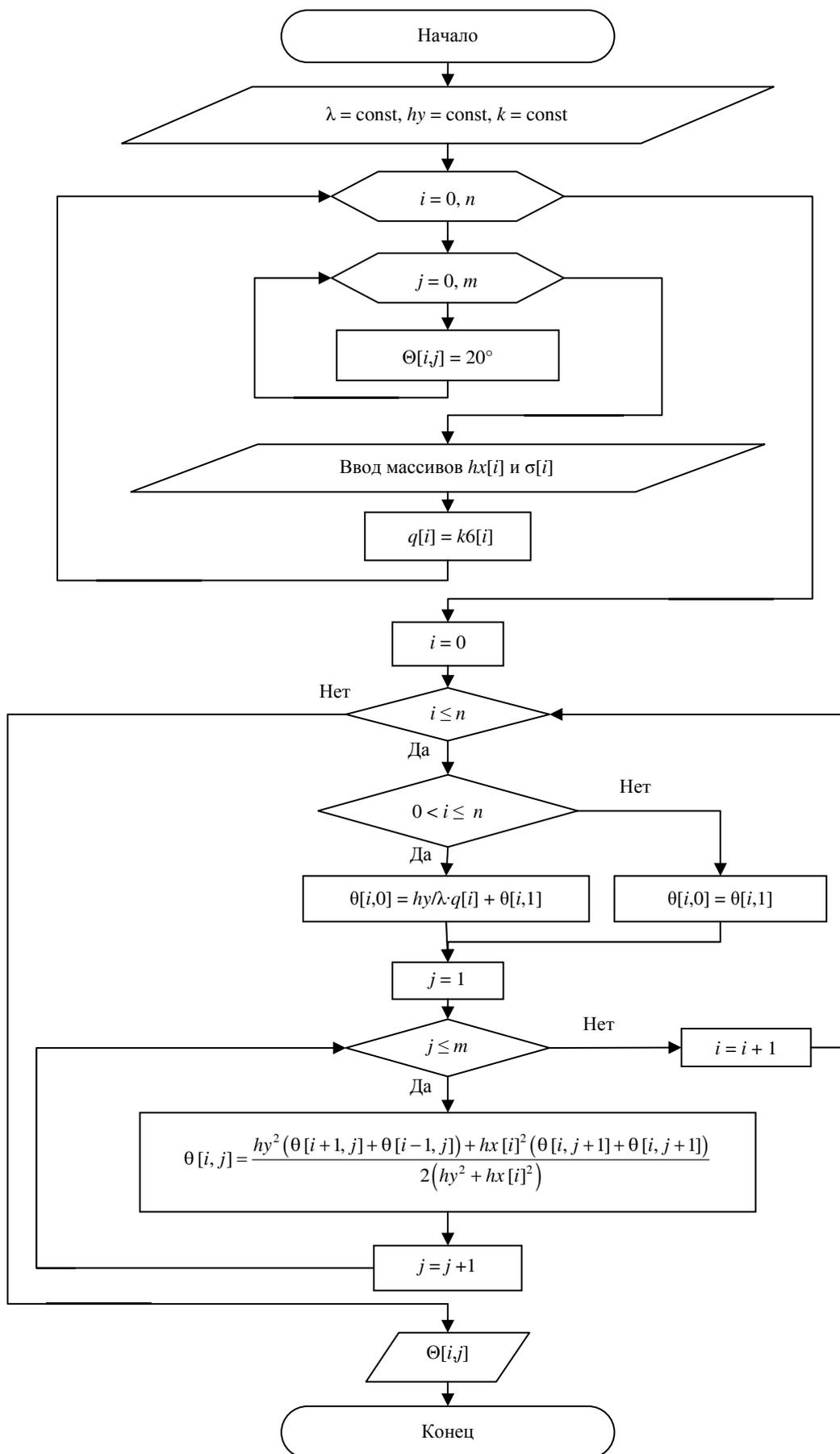


Рис. 3. Блок-схема численного эксперимента

**Проведение числового эксперимента**

Рассмотрим температуру в окрестностях зоны резания при различных отклонениях от принятых параметров установки глобоидного инструмента.

Для проведения числового эксперимента выбираем следующие варианты установки глобоидного хона относительно заготовки:

- $DA = -0,3; DZ = 0; DG = 0;$
- $DA = 0; DZ = 0; DG = -0,3;$
- $DA = -0,3; DZ = 0; DG = -0,3;$
- $DA = 0; DZ = -0,3; DG = 0;$

–  $DA = -0,3; DZ = -0,3; DG = -0,3.$

Из выведенных формул получаем значения температуры для каждой из 71 точки на профиле и внутри металла на глубину 12 рядов по 0,05 мм каждый в зависимости от величины смещения глобоидного хона относительно заготовки. Изучение значений температуры показало, что характер распределения температуры вдоль профиля и внутри металла зависит от величин отклонения параметров установки.

Распределение значений температуры представлено на рис. 4–8.

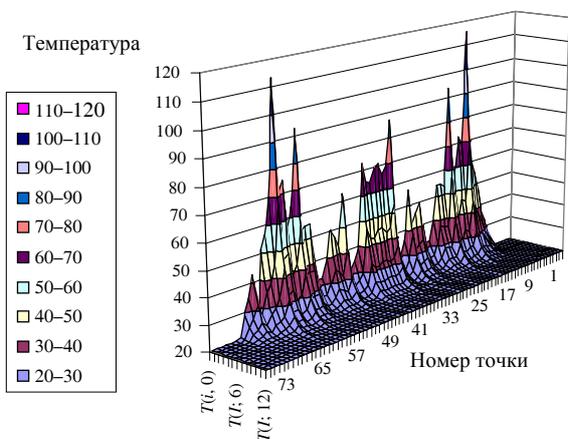


Рис. 4. Распределение значений температуры при расчетных условиях  $DA = -0,3; DZ = 0; DG = 0$

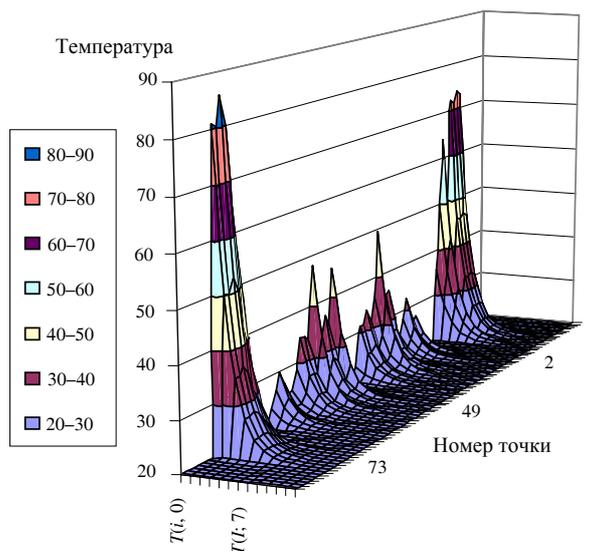


Рис. 5. Распределение значений температуры при расчетных условиях  $DA = 0; DZ = 0; DG = -0,3$

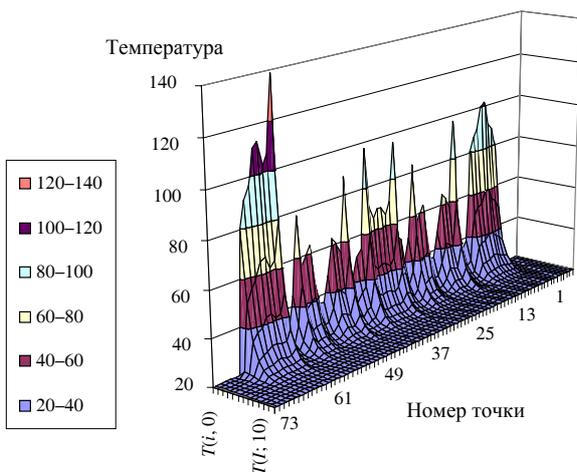


Рис. 6. Распределение значений температуры при расчетных условиях  $DA = -0,3; DZ = 0; DG = -0,3$

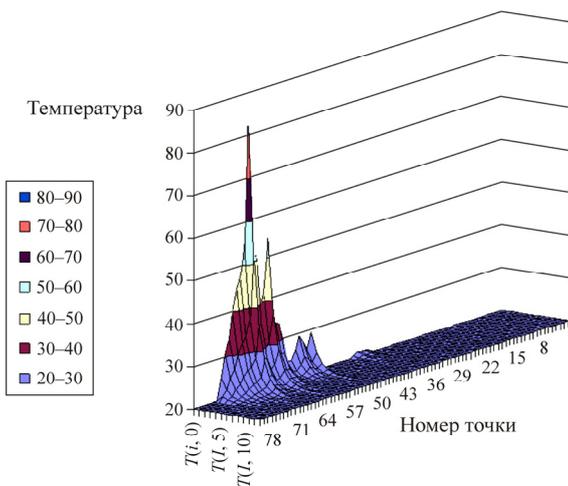


Рис. 7. Распределение значений температуры при расчетных условиях  $DA = 0; DZ = -0,3; DG = 0$

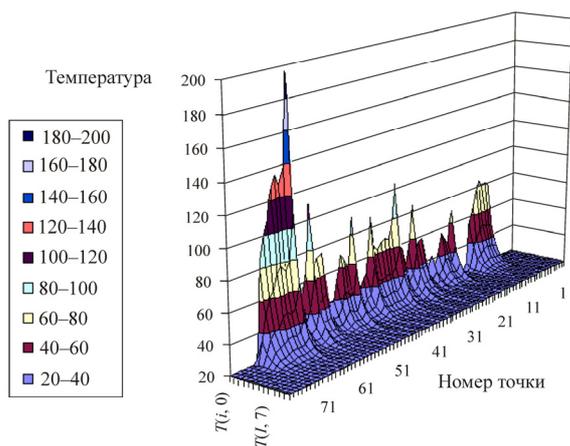


Рис. 8. Распределение значений температуры при расчетных условиях  $DA = -0,3$ ;  $DZ = -0,3$ ;  $DG = -0,3$

Пользуясь приведенными графиками, можно сделать следующий вывод:

*следует учитывать определенные отклонения параметров установки и разумное их сочетание, чтобы не произошел перегрев в зоне резания, так как процесс глобидного зубохонингования не допустим при очень высоких значениях температуры.*

#### Список литературы

- Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / под. ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
- Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 816 с.
- Спирин В.А. Повышение качества обработки сложнопрофильных зубчатых деталей: дис. ... канд. техн. наук. – 1988. – 216 с.
- Цепков А.В., Спирин В.А., Серебренник Ю.Б. Финишная обработка роторов винтовых забойных двигателей // Пути повышения производительности и качества механообработки деталей на машиностроительных предприятиях Урала: тез. докл. зональной науч.-техн. конф. – Свердловск, 1984. – С. 74–75.
- Козлов Г.В., Сандитов Д.С. Ангармонические эффекты и физико-механические свойства полимеров. – Новосибирск: Наука: Сибирская издательская фирма, 1994. – 261 с.
- Керамика для машиностроения / А.П. Гаршин, В.М. Гропянов, Г.П. Зайцев, С.С. Семенов. – М.: Научтехлитиздат, 2002. – 384 с.
- Кристенсон, Ричард М. Введение в механику композитов / пер. с англ. А.И. Бейля, Н.П. Жнудя; под ред. Ю.М. Гарнопольского. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
- Наерман М.С., Попов С.А. Прецизионная обработка деталей алмазными и абразивными брусками. – М.: Машиностроение, 1971. – 224 с.
- Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
- Паньков А.А., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Новые модели прогнозирования эффективных свойств композитов // Механика микронеоднородных структур / УрО АН СССР. – Свердловск, 1988. – С. 4–22.
- Свистикова Л.А. Физика полимеров: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2003. – 92 с.
- Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. – М.: Наука, 1984. – 115 с.
- Волков С.Д., Ставров В.П. Статическая механика композитных материалов. – Минск: Изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1978. – 207 с.
- Технические свойства полимерных материалов: учеб.-справ. пособие / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паняматченко, Ю.В. Крыжановская. – СПб.: Профессия, 2003. – 240 с.
- Бочкарев С.В. Технология производства полимерных композитных материалов и конструкций на их основе: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1999. – 204 с.
- Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах: учеб. для вузов. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
- Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки. – М.: Машиностроение, 1981. – 280 с.
- Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
- Цаплин А.И. Теплофизика в металлургии: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 230 с.
- Эффективные термоупругие свойства анизотропных композитов: метод. указания для сам. раб. Ч. 1. Теоретические основы и расчетные формулы / сост. А.А. Ташкинов, В.Э. Вильдеман, Р.Я. Газизов, С.Г. Иванов; Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1991. – 41 с.
- The finite element analysis of surface temperature on dry belt grinding for titanium alloys / W.G. Huo [et al.] // Adv. Materials Res. – 2008. – Vol. 53–54. – P. 219–224.
- Real-time simulation of robot controlled belt grinding processes of sculptured surfaces / X. Zhang, M. Cabaravdic, K. Kneupner, B. Kuhlencoetter // Inter. J. of Adv. Robotic Syst. – 2004. – Vol. 1(2). – P. 109–114.
- Modeling and numerical simulation of the grinding temperature field with nanoparticle jet of MQL / C.H. Li, J.Y. Li, S. Wang, Q. Zhang // Adv. in Mech. Eng. – 2013. – Vol. 5. – P. 1–9.
- Study of 3D grinding temperature field based on finite difference method: considering machining parameters and energy partition / Xuezhi Wang, Tianbiao Yu, Xue Sun, Ying Shi, Wanshan Wang // The Inter. J. of Adv. Manuf. Techn. – 2016. – Vol. 1. – P. 915–927.

#### References

- Abrazivnaia i almaznaia obrabotka materialov: spravochnik [Abrasive and Diamond Treatment of Materials: A Reference Manual]. Ed. A.N. Reznikova. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 391 p.
- Anur'ev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelia [Handbook for designers and machine builders]. 7nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 816 p.

3. Spirin V.A. Povyshenie kachestva obrabotki slozhnoprofil'nykh zubchatykh detalei [Improving the quality of machining of complex shape toothed parts]. Abstrat of Ph.D. thesis, 1988, 216 p.
4. Tsepkov A.V., Spirin V.A., Serebrennik Iu.B. Finishnaia obrabotka rotorov vintovykh zaboinykh dvigatelei [Finishing of downhole motor rotors]. *Puti povysheniia proizvoditel'nosti i kachestva mekhanoobrabotki detalei na mashinostroitel'nykh predpriiatiakh Urala: tezisy dokladov zonal'noi nauchno-tekhn. konf.* Sverdlovsk, 1984, pp. 74–75.
5. Kozlov G.V., Sanditov D.S. Angarmonicheskie efekty i fiziko-mekhanicheskie svoistva polimerov [Angarmonic effects and physical and mechanical properties of polymers]. Novosibirsk: Nauka: Sibirskaia izdatel'skaia firma, 1994, 261 p.
6. Garshin A.P., Gropianov V.M., Zaitsev V.M., Semenov S.S. Keramika dlia mashinostroeniia [Ceramics for mechanical engineering]. Moscow: Nauchtekhizdat, 2002, 384 p.
7. Kristenson, Richard M. Vvedenie v mekhaniku kompozitov [Introduction to composite mechanics]. A.I. Beilia, N.P. Zhnudia; Ed. Iu.M. Tarnopol'skogo. Moscow: Mir, 1982, 334 p.
8. Naerman M.S., Popov S.A. Pretsizionnaia obrabotka detalei almaznymi i abrazivnymi bruskami [Precise machining of parts with diamond and abrasive stones]. Moscow: Mashinostroenie, 1971, 224 p.
9. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia poverkhnostei pri abrazivnoi obrabotke [Dynamics of surface shaping during abrasive machining]. Sevastopol': Izdatel'stvo SevNTU, 2012, 304 p.
10. Pan'kov A.A., Sokolkin Iu.V., Tashkinov A.A. Novye modeli prognozirovaniia effektivnykh svoistv kompozitov [New models for the prediction of the effective properties of composites]. *Mekhanika mikroneodnorodnykh struktur. UrO AN SSSR.* Sverdlovsk, 1988, pp. 4–22.
11. Svistikova L.A. Fizika polimerov: ucheb. Posobie [Polymer physics]. Permskii gosudarstvennii tekhnicheskii universitet, 2003, 92 p.
12. Sokolkin Iu.V., Tashkinov A.A. Mekhanika deformirovaniia i razrusheniia strukturno neodnorodnykh tel [Mechanics of deformation and destruction of structurally non-homogeneous bodies]. Moscow: Nauka, 1984, 115 p.
13. Volkov S.D., Stavrov V.P. Statischekaia mekhanika kompozitnykh materialov [Static mechanics of composite materials]. Minsk: Izdatel'stvo BGU imeni V.I. Lenina, 1978, 207 p.
14. Kryzhanovskii V.K., Burlov V.V., Panimatchenko A.D., Kryzhanovskaia Iu.V. Tekhnicheskie svoistva polimernykh materialov: uchebno-spravochnoe posobie [Technical properties of polymeric materials]. Saint-Petersburg: Professiia, 2003, 240 p.
15. Bochkarev S.V. Tekhnologiia proizvodstva polimernykh kompozitnykh materialov i konstruksii na ikh osnove: ucheb. posobie [Technology of production of polymeric composite materials and structures based on them]. Permskii gosudarstvennii tekhnicheskii universitet, 1999, 204 p.
16. Reznikov A.N., Reznikov L.A. Teplovyie protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh: ucheb. dlia vuzov [Thermal processes in technological systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 288 p.
17. Reznikov A.N. Teplofizika protsessov mekhanicheskoi obrabotki [Thermophysics of machining processes]. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 280 p.
18. Sipailov V.A. Teplovyie protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti [Thermal grinding processes and surface quality management]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 167 p.
19. Tsaplin A.I. Teplofizika v metallurgii: ucheb. Posobie [Thermal physics in metallurgy]. Perm', 2008, 230 p.
20. Tashkinov A.A., Vil'deman V.E., Gazizov R.Ia., Ivanov S.G. Effektivnye termouprugie svoistva anizotropnykh kompozitov [Effective thermoelastic properties of anisotropic composites]. Ch. 1. Teoreticheskie osnovy i raschetnye formuly. Perm', 1991, 41 p.
21. W.G. Huo et al. The finite element analysis of surface temperature on dry belt grinding for titanium alloys. *Advance Materials Research*, 2008, vol. 53–54, pp. 219–224.
22. Zhang X., Cabaravdic M., Kneupner K., Kuhlencoetter B. Real-time simulation of robot controlled belt grinding processes of sculptured surfaces. *International Journal of Adv. Robotic Syst.*, 2004, vol. 1(2), pp. 109–114.
23. Li C.H., Li J.Y., Wang S., Zhang Q. Modeling and numerical simulation of the grinding temperature field with nanoparticle jet of MQL. *Advance in Mechanic Engenering*, 2013, vol. 5, pp. 1–9.
24. Xuezhi Wang, Tianbiao Yu, Xue Sun, Ying Shi, Wanshan Wang. Study of 3D grinding temperature field based on fi-nite difference method: considering machining parameters and energy partition. *The International Journal of Advance Manuf. Techn.*, 2016, vol. 1, pp. 915–927.

Получено 21.12.18

Опубликовано 20.06.19

#### Сведения об авторах

**Спирин Владимир Александрович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук; e-mail: tms@pstu.ru.

**Макаров Владимир Федорович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой инновационных технологий в машиностроении Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: makarov@pstu.ru.

**Халтурин Олег Александрович** (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: oleg-x@pstu.ru.

#### About the authors

**Vladimir A. Spirin** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences; e-mail: tms@pstu.ru.

**Vladimir F. Makarov** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Chair of Department of Innovative Technologies in Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: makarov@pstu.ru.

**Oleg A. Khalturin** (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: oleg-x@pstu.ru.