

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МКЭ НАГРЕВА КОЛЬЦА РОЛИКОВОГО ПОДШИПНИКА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДОРОЖКИ КАЧЕНИЯ

**В.Г. Фокин, В.А. Дмитриев**

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Представлены результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов в двухмерной постановке процесса нагрева внутреннего кольца роликового подшипника при круглом наружном шлифовании. Составлены программы, которые позволяют исследовать нагрев колец разных типоразмеров при разных режимах шлифования.*

**Ключевые слова:** кольцо подшипника, врезное шлифование, процесс нагрева, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

Шлифование дорожки качения – важнейшая технологическая операция при изготовлении колец подшипников. Во время этой операции происходит нагрев поверхности кольца в зоне контакта со шлифовальным кругом на несколько сотен градусов [1, 2]. Локальное температурное поле вблизи контакта имеет большие градиенты. При таких условиях в поверхностном слое дорожки качения формируются остаточные напряжения, нередко растягивающие, а также могут происходить фазовые превращения материала. Эти процессы существенно влияют на долговечность детали и, следовательно, всего подшипника.

Данная работа посвящена компьютерному моделированию методом конечных элементов (МКЭ) в двухмерной постановке процесса нагрева внутреннего кольца роликового подшипника при круглом наружном шлифовании дорожки качения. Рассматриваются два типа плоских конечно-элементных моделей нагрева кольца при шлифовании дорожки качения. Принципиально МКЭ позволяет решать задачу нагрева кольца в 3D постановке с точным соблюдением всех геометрических и физических условий, но для такой объемной задачи требуются на несколько порядков большие компьютерные ресурсы.

На рис. 1 показаны фрагменты кольца подшипника и шлифовального круга во время контакта. На рис. 2 показана геометрия модели первого типа в виде плоской задачи теплопроводности для сектора. Толщина сектора равна ширине дорожки  $B$ , наружный диаметр  $D_0$  равен среднему наружному диаметру дорожки качения (сечение А–А на рис.1). Торцы сектора считаются теплоизолированными, на внутренней и внешней поверхностях сектора происходит конвективный теплообмен, кроме небольшого участка внешней поверхности, где имеется контакт со шлифовальным кругом и подводится тепло. Этот участок перемещается по наружной окружности сектора в среднем со скоростью вращающейся детали на внешнем среднем диаметре. После прохождения поверхности сектора (см. рис. 2) источник тепла исчезает на время шлифования оставшейся части кольца, затем снова повторяется цикл нагрева сектора подвижным локальным источником тепла.

---

*Владимир Григорьевич Фокин (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Механика».*

*Владимир Александрович Дмитриев (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Технология машиностроения».*

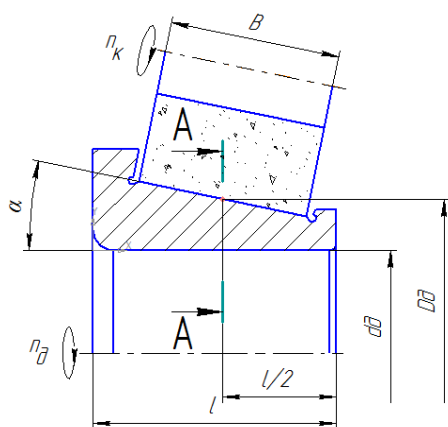


Рис. 1. Схема шлифования кольца

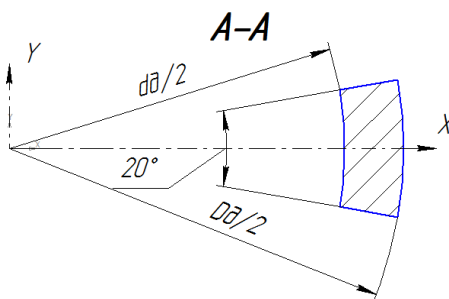


Рис. 2. Геометрия модели кольца

Допустимость представленной плоской модели нагрева кольца при шлифовании дорожки качения оправдана следующими факторами:

- конусность дорожки качения небольшая ( $11^{\circ}38'$ );
- толщина ( $0,5(D_{\delta}-d_{\delta})$ ) значительно меньше ширины  $B$  и диаметра  $D_{\delta}$ ;
- локальный источник тепла в контакте кольца и круга почти линейный, имеет вид прямоугольника длиной  $B$  и шириной, равной ширине зоны контакта  $l_k \ll B$ , поэтому можно полагать, что продольный поток тепла в середине контактной зоны кольца ( $B/2$ ) в момент контакта невелик;
- температурное поле кольца вне зоны шлифования почти осесимметричное из-за цикличности быстрого кругового движения источника тепла, что позволяет приближенно полагать отсутствие потока тепла в окружном направлении и принять условие теплоизоляции торцов сектора (см. рис. 2).

Предложенная выше плоская модель первого типа в лучшей степени определяет максимальные температуры при шлифовании и их градиент в локальных зонах контакта кольца с кругом и менее точно характеризует общий нагрев кольца, т. к. не учитываются буртики кольца.

С помощью модели первого типа решена задача нагрева при шлифовании внутреннего кольца подшипника 7517A-02. Геометрия радиального сечения кольца дана на представленных выше рис. 1, 2. Размеры: внутренний диаметр  $d_{\delta} = 85$  мм, наружный диаметр в среднем сечении AA (см. рис. 1)  $D_{\delta} = 100$  мм, ширина дорожки качения (толщина сектора – модели)  $B = 27,26$  мм, угол конусности  $\alpha = 11,64^{\circ}$ . Материал: сталь ШХ15 HRC62 – 66; физические свойства материала при  $20^{\circ}\text{C}$ : плотность  $7812 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $43 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ , теплоемкость  $830 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$ ; коэффициент конвективной теплоотдачи при охлаждении СОЖ (содовый раствор) принят как у воды  $3000 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}$ , температура внешней среды  $20^{\circ}\text{C}$ . Режим предварительного шлифования: круг 25A16CM27K5, диаметр круга  $D_{\kappa} = 600$  мм, частота вращения круга  $n_{\kappa} = 1800$  об/мин, частота вращения детали – кольца подшипника  $n_{\delta} = 180$  об/мин, поперечная подача круга на врезание  $S = 0,48$  мм/мин, снимаемый припуск  $0,42$  мм.

Для указанного режима рассчитываются следующие параметры.

Скорость периферии шлифовального круга:

$$V_{\kappa} = \frac{\pi D_{\kappa} n_{\kappa}}{60} = \frac{3,1415 \cdot 0,6 \cdot 1800}{60} = 56,55 \text{ м/с}. \quad (1)$$

Скорость детали на наружном диаметре в среднем сечении AA (см. рис. 1)

$$V_{\partial} = \frac{\pi D_{\partial} n_{\partial}}{60} = \frac{3,1415 \cdot 0,1 \cdot 180}{60} = 0,9425 \text{ м/с} = 56,55 \text{ м/мин} . \quad (2)$$

Время одного оборота детали

$$t_{об} = \frac{60}{n_{\partial}} = \frac{60}{180} = 0,33333 \text{ с}. \quad (3)$$

Глубина резания на один оборот

$$a = \frac{S \cdot t_{об}}{60} = \frac{0,48 \cdot 0,33333}{60} = 0,00267 \text{ мм/с}. \quad (4)$$

Теоретическая ширина контакта круга и детали [3]

$$l_k = \sqrt{\frac{a \cdot D_k \cdot D_{\partial}}{(D_k + D_{\partial})}} = \sqrt{\frac{0,00267 \cdot 600 \cdot 100}{(600 + 100)}} = 0,4784 \text{ мм}. \quad (5)$$

Эффективная ширина контакта

$$l_{\partial} = l_k \cdot K_1 \cdot K_2 = 0,4784 \cdot 0,48 \cdot 0,45 = 0,1033 \text{ мм}, \quad (6)$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий, что поверхность круга состоит из зерен и пор, зерна составляют 48 % в структуре № 7 круга [2];

$K_2$  – коэффициент, учитывающий неравномерность выделения тепла в контакте, принят равным 0,45 согласно рекомендациям авторов работы [1].

Время экспозиции теплового потока на эффективной ширине контакта

$$t_{\partial} = \frac{l_{\partial}}{V_{\partial}} = \frac{0,1033}{942,48} = 1,096 \cdot 10^{-4} \text{ с}. \quad (7)$$

Для определения теплового потока в контакте необходимо знать или силы резания, или затрачиваемую на шлифование мощность. С этой целью выполнена симуляция нагрева кольца по разработанной модели для ряда мощностей и найдена зависимость максимальной температуры  $T_{max}$  от потребляемой мощности. На основании этой зависимости для известной  $T_{max}$  можно определить мощность.

Температура  $T_{max}$  найдена по эмпирической формуле из работы [2], учитывающей и тип материала (ШХ15), и указанный выше режим шлифования  $\alpha = V_k/V_{\partial} = 60$ :

$$T_{max} = 500 \cdot V_k^{0,16} \cdot K_M \cdot K_0 = 500 \cdot 56,55^{0,16} \cdot 1,08 \cdot 0,853 = 879,8^{\circ} \text{ С}, \quad (8)$$

где  $K_M = 1,08$  – коэффициент, учитывающий тип материала (ШХ15) при  $\alpha = 60$ ;

$K_0$  – коэффициент, учитывающий давление СОЖ: для принятого давления  $p = 3 \text{ кгс/см}^2$  коэффициент  $K_0 = 0,93 \cdot p^{-0,08} = 0,93 \cdot 3^{-0,08} = 0,853$ .

Предварительные расчеты нагрева детали по предлагаемой модели показали, что для достижения  $T_{max} = 879,8^{\circ} \text{ С}$  нужна мощность  $N \approx 4,45 \text{ кВт}$ .

В деталь поступает примерно 0,7 выделяемого тепла [1], поэтому тепловой поток на эффективной поверхности контакта можно определить как

$$q = \frac{0,7 \cdot N}{l_{\partial} \cdot B} = \frac{0,7 \cdot 4450}{0,1033 \cdot 27,26 \cdot 10^{-6}} = 1106,2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2. \quad (9)$$

В модели первого типа тепловой источник шириной  $l_{\partial}$  с тепловым потоком  $q$  перемещается дискретно шагами величиной  $l_{\partial}$  по наружной поверхности сектора (см. рис. 2) со средней скоростью  $V_{\partial}$ , задерживаясь на каждом шаге на время  $t_{\partial}$ . Движение источника тепла по сектору кольца циклически повторяется с периодом  $t_{об}$ . Так имитируется движение контактной зоны шлифования относительно детали – кольца. На каждом шаге решается МКЭ нестационарная задача теплопроводности.

Результаты расчета нагрева кольца при шлифовании с помощью плоской конечно-элементной модели первого типа представлены на рис. 3–6.

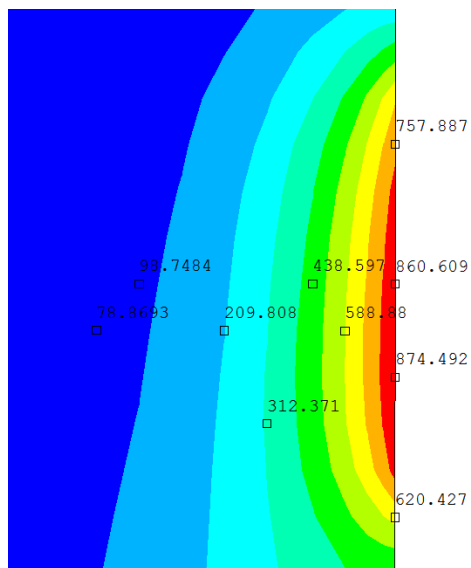


Рис. 3. Модель первого типа. Распределение температуры в зоне шлифования на 1,34 с

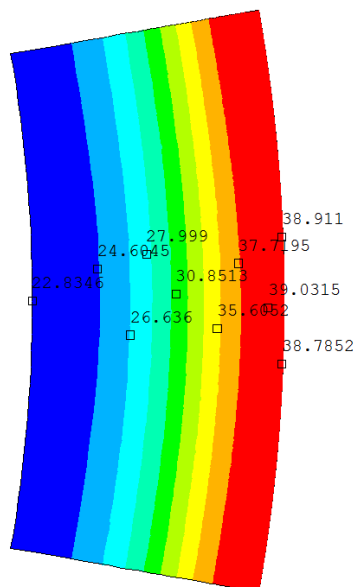


Рис. 4. Модель первого типа. Распределение температуры вне зоны шлифования на 1,67 с

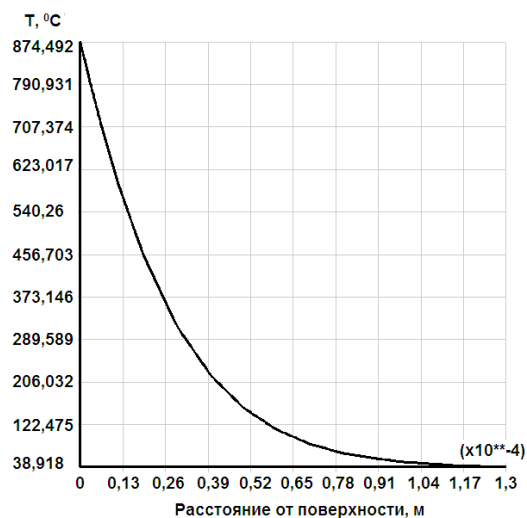


Рис. 5. Модель первого типа. График изменения температуры по глубине кольца в зоне шлифования на 1,34 с

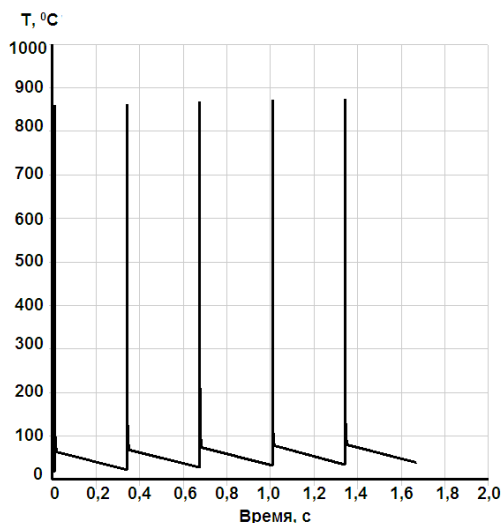


Рис. 6. Модель первого типа. График изменения температуры в точке на поверхности кольца

Плоская конечно-элементная модель второго типа показана на рис. 7. Она представляет собой пластинку толщиной  $l$ , форма которой совпадает с радиальным сечением кольца подшипника. На поверхности дорожки качения периодически под-

водится тепловой поток  $q$  в течение времени  $t_3$  (контактная зона шлифования), затем в течение времени  $t_{об} - t_3$  идет конвективный теплоотвод. По всем другим поверхностям постоянно происходит конвективная теплопередача. Такая модель достаточно адекватна вдали от зоны шлифования, т. к. в этом случае поле температур близко к осесимметричному из-за цикличности процесса.

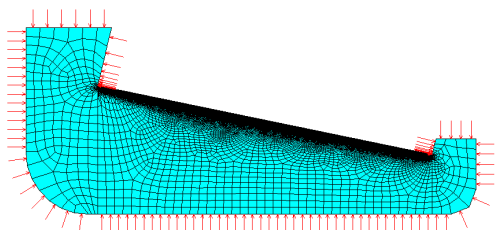


Рис. 7. Конечно-элементная модель второго типа

Результаты расчета по модели второго типа представлены на рис. 8–11.

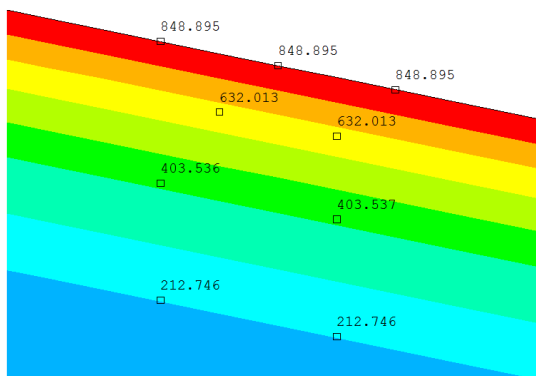


Рис. 8. Модель второго типа. Распределение температуры в зоне шлифования на 19,66 с

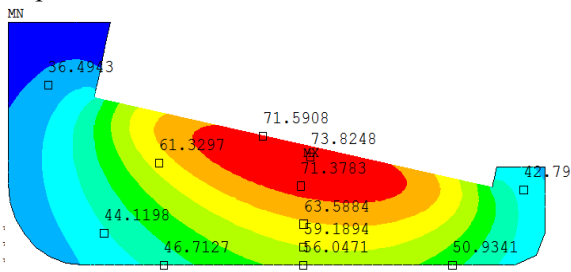


Рис. 9. Модель второго типа. Распределение температуры вне зоны шлифования на 20 с

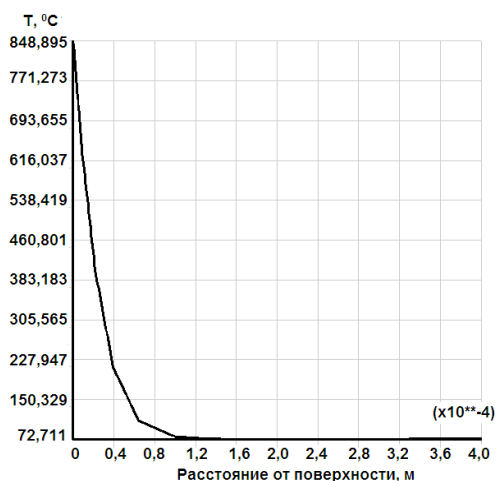


Рис. 10. Модель второго типа. График изменения температуры по глубине кольца в зоне шлифования на 19,66 с

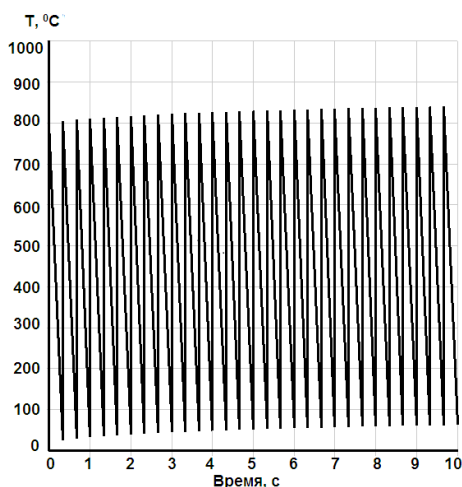


Рис. 11. Модель второго типа. График изменения температуры в точке на поверхности кольца

Сравнивая поля температур на рис. 3, 4, 8, 9 и графики на рис. 5, 10, можно видеть близость результатов расчета нагрева кольца с помощью обеих конечно-элементных моделей. Вторая модель дает решение задачи нагрева значительно быстрее, чем первая.

### **Заключение**

1. Разработаны две различные плоские конечно-элементные модели процесса нагрева кольца роликового подшипника при шлифовании дорожки качения. Составлены программы, позволяющие рассчитывать температуру колец разных типоразмеров при различных режимах шлифования.

2. Обе конечно-элементные плоские модели процесса нагрева кольца при шлифовании дают относительно близкие результаты по распределению температур в зоне шлифования. Для первой модели  $T_{max} = 874,49$  °С, для второй модели  $T_{max} = 848,89$  °С.

3. Как показали расчеты, максимальная температура во время шлифования меняется слабо и ее изменение, видимо, связано с общим нагревом кольца (рис. 6, 11).

4. Вторая модель лучше характеризует общий нагрев кольца, т. к. учитываются буртики, в то время как первая модель лучше характеризует нагрев кольца в зоне шлифования.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Li Y.Y., Chen Y. Моделирование процесса шлифования // Современное машиностроение. Сер. Б. – 1989. – № 8. – С. 36-44.
2. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
3. Наерман М.С., Наерман Я.М. Руководство для подготовки шлифовщиков. – М.: Высш. шк., 1989. – 279 с.

*Статья поступила в редакцию 17 сентября 2013 г.*

## **THE SIMULATION OF THE FINITE-ELEMENT METHOD OF BEARING COLLAR HEATING DURING RACE GRINDING**

**V.G. Fokin, V.A. Dmitriev**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*The results of the computer simulation by means of the finite-element method in 2D for heating a bearing collar during external grinding are presented. Programs are written allowing to investigate heating bearing collars of various standard sizes in a variety of grinding modes.*

**Keywords:** *bearing ring, plunge grinding, heating process, computer modeling, finite element method.*

---

Vladimir G. Fokin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Vladimir A. Dmitriev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.