

УДК 621.923.2:519.673

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МКЭ НАГРЕВА ВНУТРЕННЕГО КОЛЬЦА ПОДШИПНИКА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДОРОЖКИ КАЧЕНИЯ

© 2016 В.Г. Фокин, В.А. Дмитриев

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 20.09.2016

В статье представлены результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов в трехмерной постановке процесса нагрева внутреннего кольца роликового подшипника при круглом наружном шлифовании. С этой целью решается соответствующая задача нестационарной теплопроводности. Учитывается зависимость теплофизических свойств от температуры. Составлена компьютерная программа, которая позволяет исследовать нагрев колец разных типоразмеров при различных режимах шлифования.

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

При шлифовании в зоне резания происходит значительное выделение тепла [1]. Температурное поле вблизи контакта имеет большие градиенты. В этих условиях в поверхностном слое дорожки качения формируются остаточные напряжения, а также происходят фазовые превращения материала. Поэтому при разработке технологии абразивной обработки необходима оценка температурного поля для прогнозирования остаточных напряжений и структуры поверхностного слоя.

Работа посвящена компьютерному моделированию методом конечных элементов (МКЭ) в трехмерной постановке процесса нагрева внутреннего кольца роликового подшипника при круглом наружном врезном шлифовании дорожки качения. Создана компьютерная программа, позволяющая исследовать нагрев колец разных типоразмеров при различных режимах шлифования.

На рис. 1 показана схема шлифования и геометрия кольца подшипника. На рис. 2 приведена конечно-элементная модель кольца. Она представляет собой сектор шириной 5° . До глубины 0,5 мм модель имеет регулярную мелкую разбивку шестигранными элементами, в остальной части сделана свободная укрупнённая разбивка. В поверхностном слое размеры шестигранных конечных элементов: $0,1817 \times 0,0345 \times 0,1090$ мм.

Решается нестационарная задача теплопроводности модели кольца, показанной на рис. 2, при следующих граничных условиях: радиальные сечения теплоизолированы в силу близости к осевой симметрии общего теплового поля; наруж-

Фокин Владимир Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика».

E-mail: vladsmr@gmail.com

Дмитриев Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». E-mail: tms@samgtu.ru

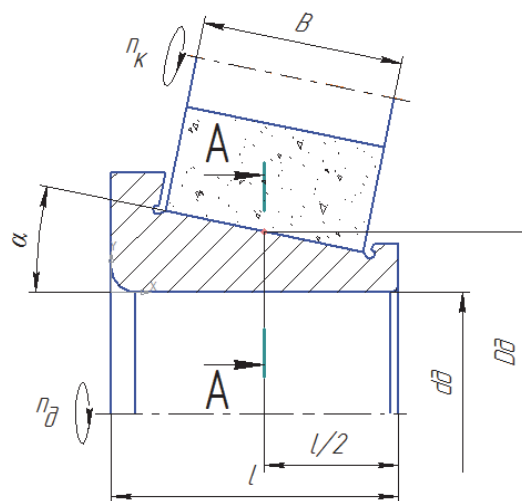


Рис. 1. Схема шлифования кольца

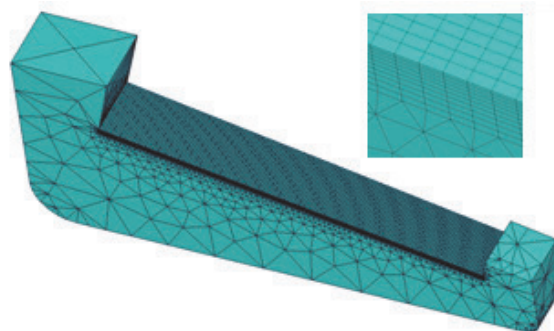


Рис. 2. Конечно-элементная модель

ные поверхности кольца имеют конвективную теплоотдачу в СОЖ, а внутренние поверхности - в воздух; широкий плоский торец кольца имеет постоянную температуру 20°C , так как контактирует с плоскостью магнитного патрона.

Теплоисточник – контакт шлифовального круга перемещается по окружности дорожки качения со скоростью вращающейся детали. После прохождения поверхности сектора источник тепла исчезает на время шлифования оставшейся

Таблица 1. Зависимость теплофизических свойств стали ШХ15 от температуры

Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/град м	Удельная теплоёмкость, Дж/кг град
0	7812.0	43.000	469.00
100	7790.0		
200	7750.0	40.000	503.00
300	7720.0		519.00
400	7680.0	37.000	536.00
500	7640.0	32.000	553.00
1000	7460.0	20.000	699.00

части кольца, затем снова повторяется цикл нагрева сектора. Тепловой поток от теплоисточника определяется через затрачиваемую на шлифование мощность. Принимается во внимание зависимость теплопроводности и теплоёмкости материала детали от температуры.

Решена задача нагрева внутреннего кольца подшипника 7517А-02 при врезном шлифовании. Геометрия радиального сечения кольца дана на рис. 1. Размеры: внутренний диаметр $d_d = 85$ мм, наружный диаметр в среднем сечении АА (рис.1) $D_d = 100$ мм, ширина дорожки качения $B = 27,26$ мм, угол конусности $\alpha = 11,64^\circ$. Материал: сталь ШХ15 HRC 62...66, учитывалась температурная зависимость физических свойств материала, представленная ниже в таблице [4]. Коэффициент конвективной теплоотдачи при охлаждении СОЖ (содовый раствор) 3000 Вт/м²·град, температура внешней среды 20 °С. Коэффициент конвективной теплоотдачи при охлаждении внутренней поверхности кольца воздухом 10 Вт/м²·град, температура внешней среды 20 °С. Режим предварительного шлифования: круг 25А16СМ27К5, диаметр круга $D_k = 600$ мм, скорость круга $V_k = 56,55$ м/с, частота вращения кольца подшипника $n_d = 180$ об/мин, поперечная подача круга на врезание $S = 0,48$ мм/мин, снимаемый припуск 0,42 мм.

Для указанного режима рассчитываются следующие параметры. Скорость детали на наружном диаметре в сечении А-А (рис. 1):

$$V_o = \frac{\pi D_o n_o}{1000} = 56,55 \text{ м/мин} .$$

Время одного оборота детали:

$$t_{об} = \frac{60}{n_o} = 0,33333 \text{ с} .$$

Глубина резания на один оборот

$$a = \frac{S \cdot t_{об}}{60} = 0,00267 \text{ мм} .$$

Число оборотов детали до снятия заданного припуска ~20. Теоретическая ширина контакта круга и детали [5]:

$$l_k = \sqrt{\frac{a \cdot D_k \cdot D_o}{(D_k + D_o)}} = 0,4784 \text{ мм} .$$

Эффективная ширина контакта, учитывающая неравномерность теплового потока в контактной зоне и геометрию поверхностных элементов, принята $l_o = 0,21806$ мм [1]. Время экспозиции теплового потока на эффективной ширине контакта:

$$t_o = \frac{l_o}{V_o} = 2,3136 \cdot 10^{-4} \text{ с} .$$

По результатам моделирования, выполненного в работе [3], мощность шлифования принята $N = 4,4$ Вт. В деталь поступает примерно 0,7 выделяемого тепла [1], поэтому тепловой поток на эффективной поверхности контакта можно определить как:

$$q = \frac{0,7 \cdot N}{l_o \cdot B} = 518,15 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2 .$$

Результаты решения представлены на рис. 3-7 для момента, когда снимается припуск 0,053 мм (на 20 обороте кольца). Температурное поле контактной зоны шлифования показано для момента времени 6,336 с.

Из рис. 4, 5 видно, что температурное поле около контактной области шлифования имеет большие градиенты в тангенциальном направлении и по нормали к поверхности. Такие градиенты температуры ведут к появлению пласти-

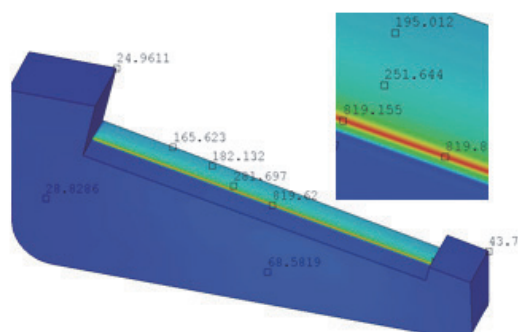


Рис. 3. Температурное поле при шлифовании в момент времени 6,336 с

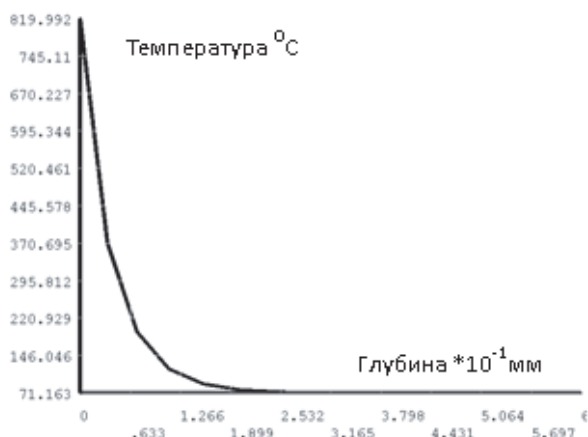


Рис. 4. Распределение температуры в зоне шлифования в момент 6,336 с



Рис. 5. Распределение температуры в зоне шлифования по окружности в момент времени 6,336 с

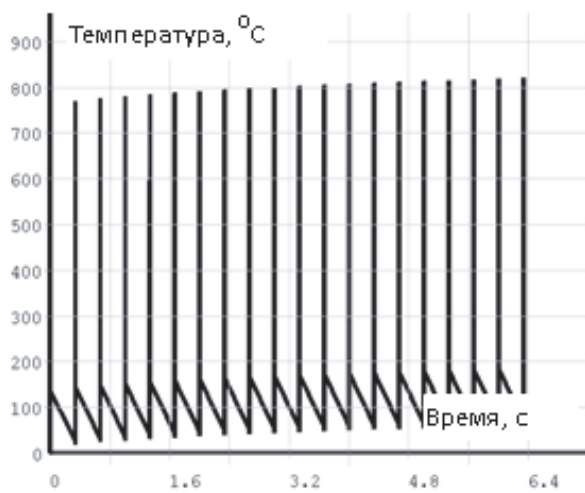


Рис. 6. Изменение температуры в узле 3443 на шлифуемой поверхности

ческих деформаций и образованию остаточных напряжений.

График на рис. 6 показывает большую скорость изменения температурного поля в процессе шлифования вблизи зоны контакта круга с деталью. Это объясняется высокой теплопроводностью

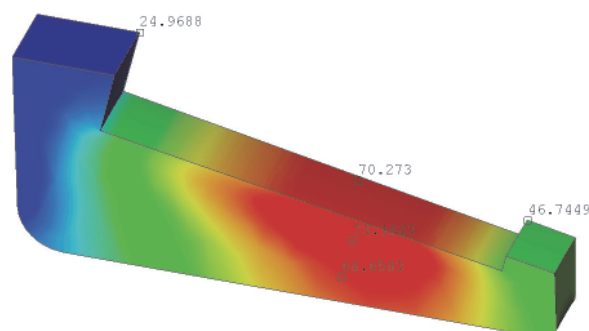


Рис. 7. Температурное поле вне зоны шлифования после 19 оборотов детали

стали, большой конвективной теплоотдачей в СОЖ и высокими градиентами температуры в зоне шлифования.

На рис. 8-10 представлены результаты расчёта температуры на 10 обороте детали (снимается припуск 0,0267 мм). Температурное поле контактной зоны шлифования показано для момента времени 3,1636 с.

Сравнивая рис. 3, 5 с рис. 8, 9, можно заметить, что максимальные температуры в контактных зонах шлифования для моментов контакта круга с деталью изменяются в процессе обработки медленно. Это изменение связано с общим

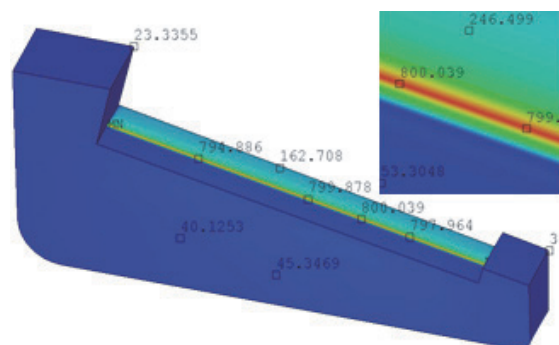


Рис. 8. Температурное поле при шлифовании в момент времени 3,1636 с

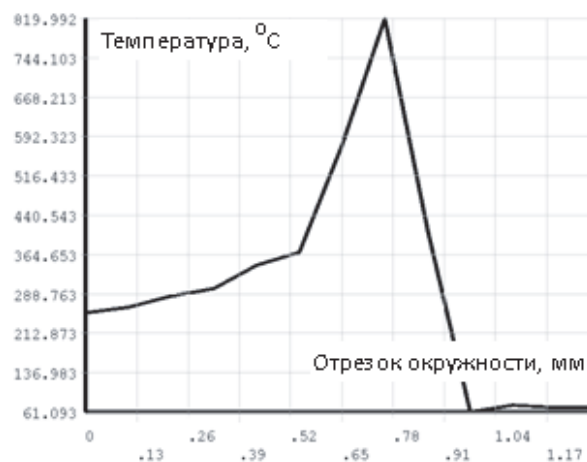


Рис. 9. Распределение температуры по окружности в зоне шлифования в момент 3,1636 с

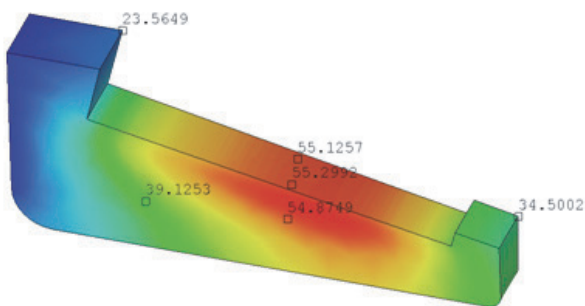


Рис. 10. Температурное поле вне зоны шлифования после 10 оборотов детали

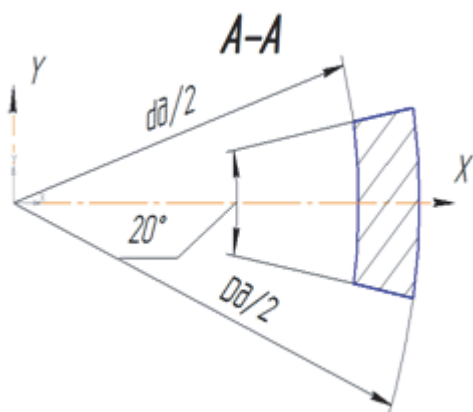


Рис. 11. Геометрия плоской модели

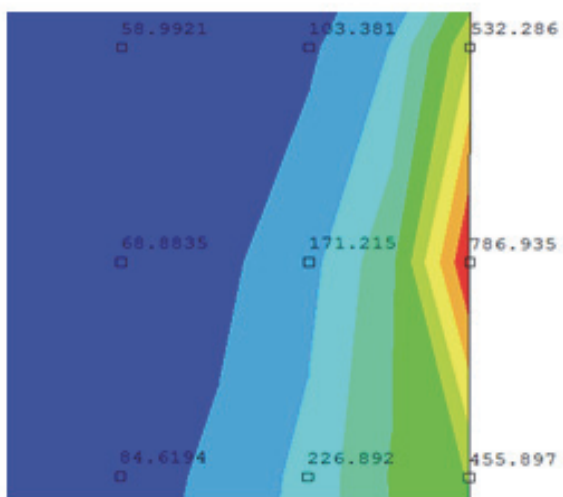


Рис. 12. Температурное поле при шлифовании кольца в момент времени 3,034 с. Плоская модель

прогревом кольца (см. рис.7 и рис.10), который происходит также замедленно по сравнению с темпом нагрева и охлаждения контактных зон.

На рис.3,8 видно, что область высоких температур и высоких температурных градиентов имеет вид узкой полосы. Такой характер распре-

деления температуры позволяет заменить трёхмерную конечно-элементную модель теплового анализа на двухмерную модель при сохранении достаточной точности расчёта температур. При этом значительно сокращаются объём требуемой компьютерной памяти и время расчёта. Геометрия плоской модели показана на рис.11. Толщина сектора равна ширине дорожки B , наружный диаметр D_d равен среднему наружному диаметру дорожки качения (сечение А-А на рис.1), конусностью дорожки качения можно пренебречь. Решается плоская нестационарная задача теплопроводности с подвижным источником тепла для сектора, показанного на рис.11. Торцы сектора считаются теплоизолированными. На внутренней поверхности сектора происходит конвективный теплообмен в воздушную среду, на внешней поверхности сектора происходит конвективный теплообмен в СОЖ 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 источник тепла исчезает на время шлифования оставшейся части кольца, затем снова повторяется цикл нагрева сектора подвижным локальным источником тепла. Подобная плоская задача решалась в работе [6] для того же кольца и тех же режимов шлифования, которые рассматривались выше. Некоторые результаты этого решения плоской задачи для сравнения приведены на рис. 12, 13, 14.

Сравнивая рис. 8, 9 и рис.12, 14, можно сделать заключение о близости результатов расчёта температурного поля в зоне шлифования на плоской модели с результатом трёхмерного анализа. При этом плоская модель имела 631 четырёхугольный элемент, на моделирование

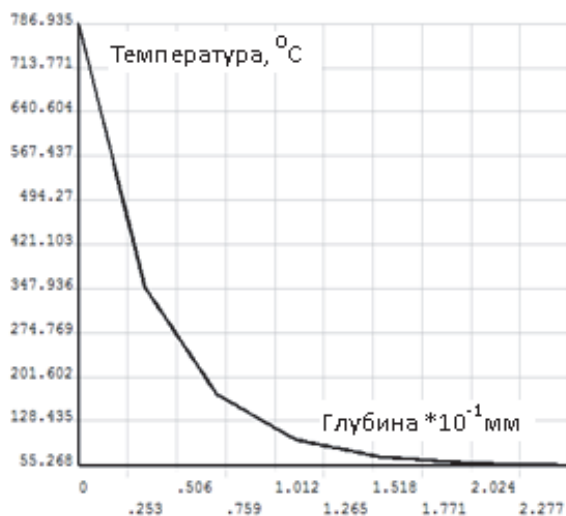


Рис. 13. Изменение температуры по глубине кольца в зоне шлифования на 3,034 с. Плоская модель

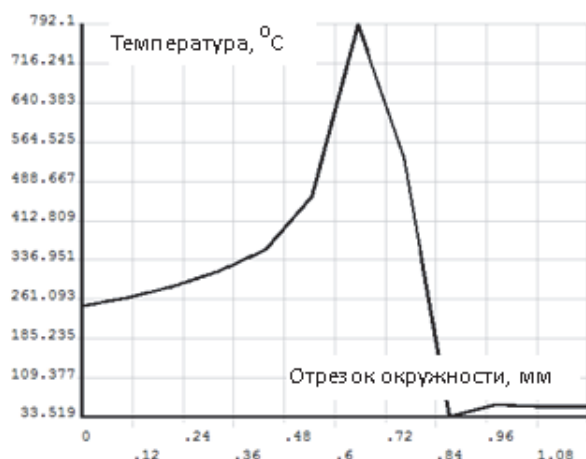


Рис. 14. Распределение температуры по окружности в зоне шлифования на 3,034 с. Плоская модель

10 оборотов детали при шлифовании затрачивалось компьютерное время 11 минут; трёхмерная модель имела 112061 шестигранных элементов, на моделирование 10 оборотов детали затрачивалось компьютерное время 525 минут, то есть почти в 50 раз больше.

Близкие результаты для максимальной температуры шлифования даёт эмпирическая формула, приведенная в справочнике [2] стр. 191.

ВЫВОДЫ

Разработана компьютерная программа, позволяющая исследовать на трёхмерной конечно элементной модели нагрев колец подшипников

разных типоразмеров при различных режимах шлифования.

Выполнен расчёт температурных полей кольца подшипника 7517A-02 при врезном шлифовании на типичном режиме. В момент 3,1636 с максимальная температура шлифования в средней зоне дорожки качения достигала 800 °C, в момент 6,336 с – 820 °C.

Показана возможность расчёта с достаточной точностью температурных полей кольца подшипника при врезном шлифовании путём использования плоской конечно элементной модели. При этом время компьютерного вычисления сокращается в десятки раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Y.Y., Chen Y. Моделирование процесса шлифования // Современное машиностроение. Серия 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. Фокин В.Г., Дмитриев В.А. Моделирование МКЭ нагрева кольца роликового подшипника при шлифовании дорожки качения // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. 2013. № 4(40). С. 126 -131.
4. Сорокин В.Г. и др. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
5. Наерман М.С., Наерман Я.М. Руководство для подготовки шлифовщиков. М.: Высш. шк., 1989. 279 с.
6. Фокин В.Г., Дмитриев В.А. Определении остаточных напряжений методом конечных элементов в кольце роликового подшипника при шлифовании дорожки качения // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. 2015. № 2(46). С. 166 -171.

THREE-DIMENSIONAL MODELING FEM HEATING RACEWAY FOR GRINDING

© 2016 V.G. Fokin, V.A. Dmitriev

Samara State Technical University

The article presents the results of computer simulation using finite element method in three-dimensional formulation of the heating process of the inner ring of the roller bearing at the sub-round external grinding. The dependence of thermophysical properties on temperature are taken into account. Compiled computer programs that allow to explore the heating of rings different sizes at different modes of grinding.

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