

УДК 621.923.2:519.673

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОЛЬЦЕ РОЛИКОВОГО ПОДШИПНИКА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДОРОЖКИ КАЧЕНИЯ

В.Г. Фокин, В.А. Дмитриев

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

Разработана методика расчета методом конечных элементов остаточных напряжений в кольце роликового подшипника, образующихся при круглом врезном наружном шлифовании дорожки качения. Предполагается, что основное влияние имеют температурные деформации. Вначале решается соответствующая плоская задача нестационарной теплопроводности с подвижным источником тепла в зоне резания. На втором этапе последовательно решаются плоские нелинейные деформационные задачи для каждого шага рассмотренного выше нестационарного теплового анализа. Учитывается зависимость физических свойств от температуры. Составлены компьютерные программы, позволяющие определять температурные поля и остаточные напряжения в кольцах разных размеров при разных режимах шлифования. Приведены результаты расчета остаточных напряжений в типовом кольце.

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

При шлифовании дорожки качения кольца подшипника происходит кратковременный местный нагрев поверхности в зоне резания на несколько сотен градусов [1, 2, 4]. Локальное температурное поле вблизи контакта имеет очень большие градиенты, в результате чего возникают значительные неоднородные температурные пластические деформации. Из-за этих деформаций при остывании в поверхностном слое создаются растягивающие остаточные напряжения. Деформациями от сил резания в условиях высокотемпературного нагрева пренебрегаем. Не учитываем также влияние фазовых превращений. Такой подход дает результаты, согласующиеся с типичными результатами экспериментального определения остаточных напряжений в поверхностных слоях шлифованных образцов методом травления [1, 3].

Остаточные напряжения в поверхностных слоях дорожки качения существенно влияют на долговечность подшипника. Компьютерный расчет этих напряжений позволяет анализировать различные режимы шлифования и оптимизировать операцию шлифования с целью повышения долговечности подшипника.

Данная работа посвящена компьютерному моделированию методом конечных элементов (МКЭ) процесса образования остаточных напряжений во внутреннем кольце роликового подшипника при круглом наружном шлифовании дорожки качения. Трехмерный анализ температурного поля при шлифовании до-

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

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

рожки качения показал, что зона высоких температур и высоких температурных градиентов имеет вид узкой полоски (рис. 1) [5]. Такой характер распределения температуры позволяет заменить трехмерные конечно-элементные модели теплового и деформационного анализов на двухмерные модели при сохранении достаточной точности расчета температур и остаточных напряжений. При этом значительно сокращаются объем требуемой компьютерной памяти и время расчета. Схема шлифования показана на рис. 2. Геометрия плоской модели (сектор) дана на рис. 3. Толщина сектора равна ширине дорожки B , наружный диаметр D_0 равен среднему наружному диаметру дорожки качения (сечение А-А на рис. 1), конусностью дорожки качения пренебрегаем.

Поставленная задача решается в два этапа: сначала выполняется тепловой анализ, затем производится расчет остаточных напряжений.

На первом этапе решается плоская нестационарная задача теплопроводности с подвижным источником тепла для сектора, показанного на рис. 3. 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.

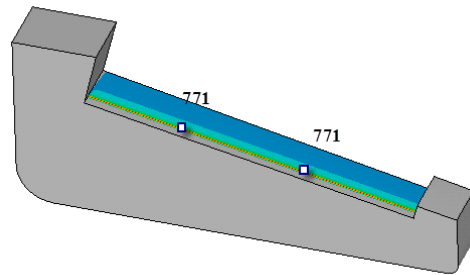


Рис. 1. Температурное поле ($^{\circ}\text{C}$) при шлифовании

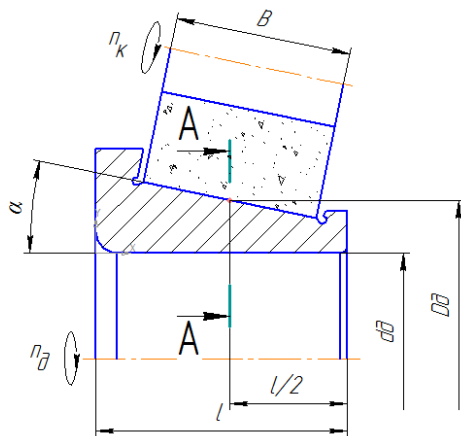


Рис. 2. Схема шлифования кольца

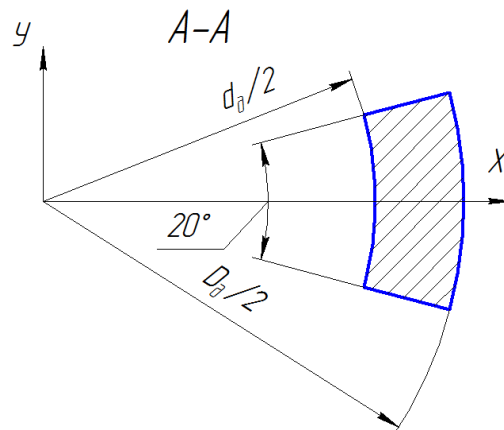


Рис. 3. Геометрия модели кольца

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.

С помощью плоской модели решена задача нагрева внутреннего кольца подшипника 7517А-02 при врезном шлифовании дорожки качения. Геометрия радиального сечения кольца дана на рис. 2, 3. Размеры: внутренний диаметр

$d_o = 85$ мм, наружный диаметр в среднем сечении А–А (см. рис. 1) $D_o = 100$ 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 разных температурах даны в табл. 1. Свойства при температуре 1000°C определены путем экстраполяции справочных данных. Коэффициент конвективной теплоотдачи при охлаждении СОЖ (содовый раствор) принят как у воды $3000 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}$, коэффициент конвективной теплоотдачи при охлаждении воздухом принят $48 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}$, температура внешней среды 20°C . Режим предварительного шлифования: круг 25A16CM27K5, диаметр круга $D_k = 600$ мм, частота вращения круга $n_k = 1800$ об/мин, частота вращения детали – кольца подшипника $n_o = 180$ об/мин, поперечная подача круга на врезание $S = 0,48$ мм/мин, снимаемый припуск $0,16$ мм.

Таблица 1

Зависимость физических свойств от температуры

Температура Т, °С	Плотность ρ , кг/м ³	Теплопроводность λ , Вт/м*град	Теплоемкость С, Дж/кг*град
20	7812	43	469
200	7750	40	503
400	7680	37	
500	7640	32	553
1000	7460	20	699

Для указанного режима рассчитываются следующие параметры. Скорость периферии шлифовального круга:

$$V_k = \frac{\pi D_k n_k}{60} = \frac{3,1415 \cdot 0,6 \cdot 1800}{60} = 56,55 \text{ м/с}.$$

Скорость детали на наружном диаметре в среднем сечении А–А (см. рис. 1):

$$V_o = \frac{\pi D_o n_o}{60} = \frac{3,1415 \cdot 0,1 \cdot 180}{60} = 0,94245 \text{ м/с} = 56,55 \text{ м/мин}.$$

Время одного оборота детали: $t_{об} = \frac{60}{n_o} = \frac{60}{180} = 0,33333 \text{ с}.$

Глубина резания на один оборот: $a = \frac{S \cdot t_{об}}{60} = \frac{0,48 \cdot 0,33333}{60} = 0,00267 \text{ мм}.$

Теоретическая ширина контакта круга и детали:

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

Эффективная ширина контакта, учитывающая неравномерность выделения тепла в контакте, принята равной $l_3 = 0,109$ мм согласно рекомендациям авторов работы [2] и с учетом размера конечных элементов.

Время экспозиции теплового потока на эффективной ширине контакта:

$$t_3 = \frac{l_3}{V_o} = \frac{0,109}{942,45} = 1,1566 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

В работе [4] для рассматриваемого кольца при таких же режимах шлифова-

ния была сделана оценка мощности шлифования: $N \approx 4,4$ кВт.

В деталь поступает примерно 0,7 выделяемого тепла [2], поэтому тепловой поток на эффективной поверхности контакта можно определить как

$$q = \frac{0,7 \cdot N}{l_s \cdot B} = \frac{0,7 \cdot 4400}{0,109 \cdot 27,26 \cdot 10^{-6}} = 10366 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

В модели тепловой источник шириной l_s с тепловым потоком q перемещается дискретно шагами величиной l_s по наружной поверхности сектора (см. рис. 3) со средней скоростью V_0 , задерживаясь на каждом шаге на время t_s . 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. При каждом обороте детали и увеличении снятого припуска картина температурного поля и максимум температуры в зоне шлифования незначительно изменяются, так как влияет общий прогрев кольца, который за один оборот детали небольшой. Результаты расчета нагрева кольца после снятия припуска 0,16 мм (20 с шлифования) представлены на рис. 4–5.

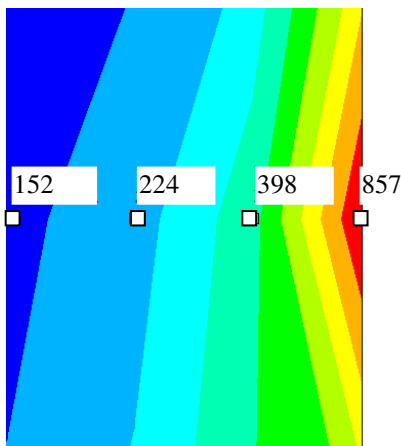


Рис. 4. Распределение температуры, °С, в зоне шлифования на 20 с

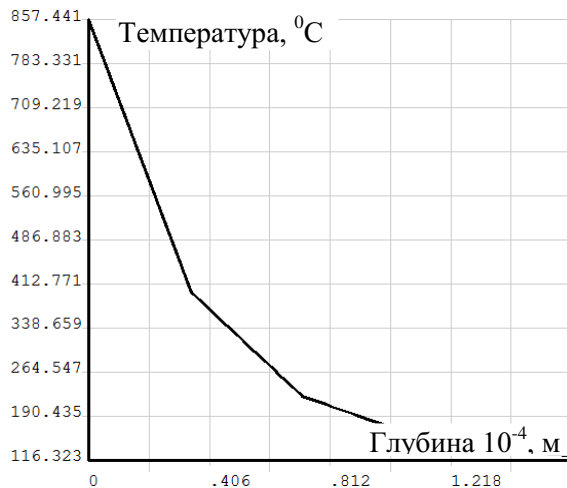


Рис. 5. График изменения температуры по глубине кольца в зоне шлифования на 20 с

На втором этапе последовательно решаются двухмерные нелинейные деформационные задачи для каждого шага рассмотренного выше нестационарного теплового анализа. Предполагается плоское деформированное состояние. Диаграмма деформирования принимается билинейной. Механические свойства закаленной стали ШХ15 в зависимости от температуры даны в табл. 2.

На рис. 6, 7 показана картина распределения напряжений в зоне шлифования на 20-й секунде, что соответствует полю температур, приведенному на рис. 4, 5.

Представленные на рис. 8, 9 остаточные напряжения определены после снятия припуска 0,16 мм, то есть после 60 полных оборотов детали и последующего остывания кольца до 20 °С.

Таблица 2

Зависимость механических свойств от температуры

Температура T, °C	Коэф. линейного расширения α , 1/град	Модуль упругости, $E \cdot 10^{-5}$ МПа	Касательный модуль, E_k МПа	Предел текучести σ_r , МПа
20	12	2,11	6282	1670
400	14	1,80	2564	1500
800	16	0,60	86	70
1000	17	0,05	2	40

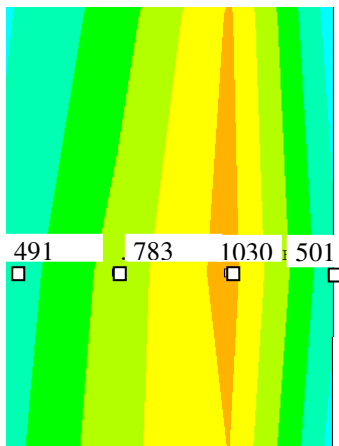


Рис. 6. Интенсивность напряжений, МПа, в зоне шлифования на 20-й с



Рис. 7. Распределение напряжений в зоне шлифования на 20-й с

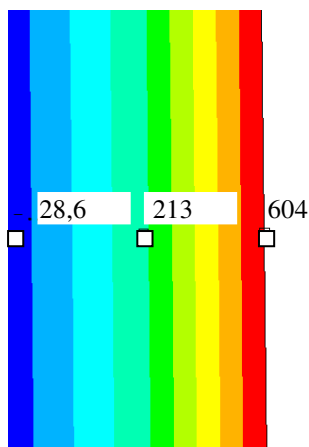


Рис. 8. Окружные остаточные напряжения, МПа, после удаления припуска 0,16 мм

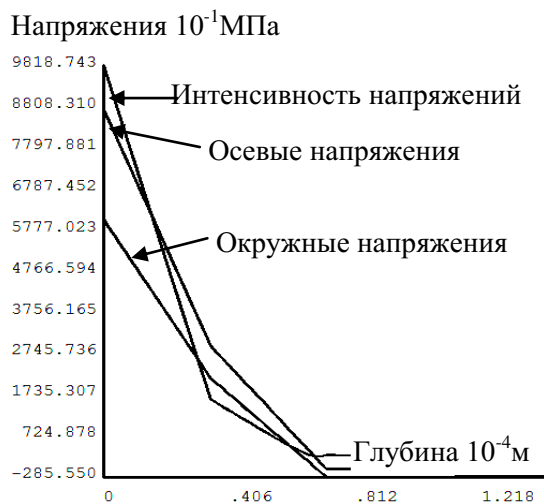


Рис. 9. Распределение остаточных напряжений по глубине после удаления припуска 0,16 мм

Заключение

1. Как показали расчеты, максимальная температура в зоне шлифования кольца из закаленной стали ШХ15 близка к 857 °С и очень быстро убывает по глубине (см. рис. 4, 5).

2. Интенсивность температурных напряжений в зоне шлифования (см. рис. 6) значительно превышает предел текучести, что ведет к образованию пластических деформаций.

3. После остывания кольца на поверхности дорожки качения создаются окружные и осевые растягивающие остаточные напряжения порядка 600...880 МПа, быстро убывающие по глубине.

4. Созданы компьютерные программы, позволяющие определять температурные поля и остаточные напряжения в кольцах роликовых подшипников разных типоразмеров при разных режимах шлифования дорожки качения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 332 с.
2. Li Y.Y., Chen Y. Моделирование процесса шлифования // Современное машиностроение. Сер. Б. – 1989. – № 8. – С. 36–44.
3. Дмитриев В.А. Технологическое обеспечение точности и долговечности подшипников качения упрочнением механическими щетками и дробеструйной обработкой: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В.А. Дмитриев; Сам. гос. техн. ун-т. – Самара, 1983. – 20 с.
4. Фокин В.Г., Дмитриев В.А. Моделирование нагрева кольца роликового подшипника при шлифовании дорожки качения // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4(40). – С. 126–131.
5. Фокин В.Г., Дмитриев В.А. Трехмерное моделирование МКЭ нагрева кольца подшипника при шлифовании дорожки качения / Известия Самарского научного центра РАН. Спец. вып. «Актуальные проблемы трибологии». – 2015. – Т. 17. – № 1. – С. 92–94.

Статья поступила в редакцию 13 февраля 2015 г.

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES BY FINITE ELEMENT METHOD RING ROLLER BEARING RACEWAY IN GRINDING

V.G. Fokin, V.A. Dmitriev

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

The method of calculating of residual stress ring roller bearing formed in a circular plunge grinding outer raceway using the finite element method was developed. It is assumed that the main influence have temperature deformations. Initially solved the corresponding plane problem of unsteady heat conduction, with a movable source of heat in the cutting zone. In the second stage sequentially solved plane nonlinear deformation problems for each step transient thermal analysis, which was discussed above. The dependence of physical properties on temperature is considered. Compiled computer programs, which allows to determine the temperature field and residual stress in rings of different sizes with different modes of grinding. Results of calculation of residual stresses in typical rings are set.

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.