Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. Г. Фокин, В. А. Дмитриев, Определение методом конечных элементов дополнительных остаточных напряжений при разрезке деталей, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2009, выпуск 1(), 95–100

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu661>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 34.227.88.159

26 апреля 2023 г., 18:30:54

УДК 539.219.2:539.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РАЗРЕЗКЕ ДЕТАЛЕЙ

В. Г. Фокин, В. А. Дмитриев

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

E-mails: mechsamgtu@samgtu.ru, tms@samgtu.ru

Предлагается алгоритм использования МКЭ для определения дополнительных остаточных напряжений в кольцах со сложной формой сечения после их разрезки. Приведен пример реализации этого алгоритма. Принятые допущения проверены путем моделирования процесса образования в кольцах типичного поля остаточных напряжений.

Ключевые слова: метод конечных элементов, остаточные напряжения, кольцо, подшипник, разрезка.

Остаточные напряжения в поверхностных слоях деталей машин оказывают значительное влияние на надежность [1]. Поэтому желательно на этапе финишных технологических операций создавать в наружных слоях ответственных рабочих поверхностей деталей сжимающие остаточные напряжения. Это условие предъявляется, например, к лопаткам компрессоров, валам, к дорожкам качения колес подшипников и другим деталям.

Теоретически рассчитать остаточные напряжения, учитывая историю получения детали, во многих случаях затруднительно из-за сложности физических и технологических процессов. Поэтому широко применяются расчётно-экспериментальные механические методы определения остаточных напряжений в поверхностных слоях, основанные на соответствующей разрезке детали с последующим травлением или обтачиванием (расточиванием) исследуемых поверхностей [1]. После разрезки измеряются деформации или перемещения образцов, возникающие вследствие разгрузки от остаточных напряжений. По измеренным величинам вычисляются дополнительные остаточные напряжения, вносимые в образцы при разрезке. Затем травлением или обтачиванием (расточиванием) последовательно удаляются наружные слои с исследуемых поверхностей образцов и измеряются возникающие при этом перемещения или деформации. На основе последних измерений вычисляются конечные остаточные напряжения в образцах. Вычитая из этих величин дополнительные напряжения, находят значения исходных остаточных напряжений в деталях. Необходимые расчётные соотношения выводятся методами сопротивления материалов или теории упругости. При этом обычно допускаются упрощения как в геометрии деталей и образцов, так и в модели их деформирования, что может заметно влиять на результаты исследований.

Метод конечных элементов (МКЭ) [2] с использованием программных средств компьютерного инженерного анализа позволяет значительно облег-

Фокин Владимир Григорьевич — доцент кафедры механики; к.т.н., доцент.

Дмитриев Владимир Александрович — доцент кафедры технологий машиностроения; к.т.н., доцент.

чить и уточнить расчёты остаточных напряжений при измерении их механическими методами. Рассмотрим алгоритм применения МКЭ для определения дополнительных остаточных напряжений в случае разрезки кольца роликового конического подшипника с целью измерения остаточных напряжений в поверхностных слоях дорожки качения.

Кольцо имеет достаточно сложную форму радиального сечения. После его разрезки измеряются расхождение сечений Δ и угол их взаимного поворота θ (рис. 1). Предполагается, что разгрузка остаточных напряжений в сечении разреза приводится только к паре сил, вектор-момент которой $\vec{M} = \vec{M}_z + \vec{M}_y$ лежит в плоскости сечения. Учитывая симметрию, расчёты МКЭ удобно выполнять только на половине кольца, считая нижнее сечение зашпеленным (рис. 2). Полагая разгрузку при разрезке кольца упругой, можно записать

$$M_z = K_1\Delta + K_2\theta, \quad M_y = K_3\Delta + K_4\theta. \quad (1)$$

Произведя на конечно-элементной модели полукольца два упругих расчёта для различных сочетаний моментов (M_{z1}, M_{y1}) , (M_{z2}, M_{y2}) и определив два соответствующих набора перемещений (Δ_1, θ_1) , (Δ_2, θ_2) , из уравнений (1) легко вычислить коэффициенты K_i :

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{M_{z1}\theta_2 - M_{z2}\theta_1}{\Delta_1\theta_2 - \Delta_2\theta_1}, & K_2 &= \frac{M_{z1}\Delta_2 - M_{z2}\Delta_1}{\theta_1\Delta_2 - \theta_2\Delta_1}, \\ K_3 &= \frac{M_{y1}\theta_2 - M_{y2}\theta_1}{\Delta_1\theta_2 - \Delta_2\theta_1}, & K_4 &= \frac{M_{y1}\Delta_2 - M_{y2}\Delta_1}{\theta_1\Delta_2 - \theta_2\Delta_1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Зная коэффициенты K_i для данного типоразмера кольца, через измеренные перемещения Δ и θ , полученные при разрезке кольца, по формулам (1) можно

Рис. 1. Перемещения кольца при разрезке

вычислить моменты M_z , M_y . Принимая в качестве нагрузки эти моменты, по расчётной схеме, показанной на рис. 2, МКЭ вычисляются дополнительные остаточные напряжения.

Изложенным выше способом были определены дополнительные окружные остаточные напряжения во внутреннем кольце конического роликоподшипника (рис. 3), характеристики которого и величины перемещений сечений при разрезке представлены в таблице. Коническая поверхность дорожки качения обработана шлифованием. Реальное сечение кольца аппроксимировалось четырехугольником. Взаимный угол поворота сечений θ был незначительным, и им пренебрегли.

Характеристики сечения кольца и перемещения при разрезке

Тип кольца	R , мм	I_u , мм ⁴	I_v , мм ⁴	α , град.	U_c , мм	Δ , мм	Θ , град.
7517-02	47,12	33200,89	2890,39	10,21	3,38	0,10	0

В таблице: R — радиус окружности, проходящей через центры тяжести радиальных сечений кольца; I_u , I_v — моменты инерции сечения относительно главных центральных осей; α — угол наклона главных центральных осей; U_c — координата точки c (см. рис. 3).

Предварительные расчёты МКЭ позволили найти по формулам (2) коэффициенты жесткости кольца: $K_1 = 3,303 \cdot 10^4$ Н; $K_2 = -8,65 \cdot 10^4$ Н·мм; $K_3 = 20,117$ Н; $K_4 = 3,35 \cdot 10^6$ Н·мм. Для измеренных при разрезке кольца перемещений $\Delta = 0,1$ мм и $\theta \approx 0^\circ$ по формулам (1) вычисляются моменты,

Рис. 2. Расчётная схема

Рис. 3. Реальное и аппроксимированное сечения кольца подшипника 7517-02

создаваемые остаточными напряжениями, действующими в радиальном сечении: $M_z = K_1 \cdot \Delta = 3,303 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{мм}$; $M_y \approx 0$. Расчёт МКЭ кольца по схеме, представленной на рис. 2, при нагрузке $M_z = 3,303 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{мм}$ дал поле иско-
мых дополнительных окружных остаточных напряжений, не изменяющееся в окружном направлении и переменное в осевом направлении. На поверхно-
сти дорожки качения эти напряжения изменяются от $-2,9 \text{ МПа}$ вблизи тон-
кого торца до $-8,7 \text{ МПа}$ вблизи толстого торца. Для точки c в центральной
зоне дорожки (см. рис. 3) дополнительное окружное напряжение оказалось
равным $\sigma \approx -5 \text{ МПа}$, что согласуется с расчётным значением, полученным
по приближенной формуле, взятой из статьи [3]:

$$\sigma \approx -\frac{E\Delta U_c}{2\pi R^2 \cos \alpha} = -\frac{2 \cdot 10^5 \cdot 0,1 \cdot 3,38}{2 \cdot 3,14 \cdot 47,12^2 \cdot \cos 10,21} = -4,9 \text{ [МПа]}. \quad (3)$$

Здесь E — модуль упругости материала кольца, другие величины даны на
рис. 3 и в таблице.

В [3] для подобных колец с помощью интеграла Мора выведены расчётные
формулы, позволяющие вычислять окружные дополнительные остаточные
напряжения через измеренные величины Δ и θ . Расчеты по этим формулам
весьма трудоемки, так как требуется определять центр тяжести сложного
сечения кольца, положение главных осей, его главные моменты инерции и
рассчитывать значения остаточных напряжений во многих точках. Предлага-
емый подход в случае использования программы, реализующей МКЭ, значи-
тельно облегчает анализ дополнительных остаточных напряжений.

Рассмотренная выше методика определения дополнительных остаточных
напряжений в кольцах, так же как методика в работе [3], основаны на до-
пущении, что остаточные напряжения в радиальном сечении кольца приво-
дятся только к паре сил с моментом $\vec{M} = \vec{M}_z + \vec{M}_y$. Докажем МКЭ, что это
условие соответствует реальной картине распределения остаточных напря-
жений в кольцах подшипников после типичных финишных технологических
операций. Кроме того, на примере кольца (см. рис. 1) покажем допустимость
использования предлагаемой методики в случае, когда ширина кольца соиз-
мерима с радиусом.

При точении, шлифовании, дробеструйной обработке в поверхностном
слое дорожки качения кольца подшипника возникают пластические дефор-
мации, которые после разгрузки приводят к образованию остаточных на-
пряжений. Имитируем подобный физический процесс в кольце (см. рис. 1)
путем внесения в поверхностный слой толщиной $0,4 \text{ мм}$ начальных деforma-
ций $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = 2 \cdot 10^{-3}$. Результаты расчёта МКЭ такого деформирования
кольца даны на рис. 4.

Касательные и радиальные остаточные напряжения близки к нулю, по-
этому не представлены на этом рисунке. Вне краевых зон остаточные на-
пряжения не изменяются вдоль образующей и имеют характерное распределение
по радиусу. В радиальных сечениях кольца окружные остаточные на-
пряжения приводятся только к паре с моментом M_z . Осевые остаточные на-
пряжения создают равномерно распределённые по окружности кольца изгибающие
моменты M_x .

Полученная картина остаточных напряжений в радиальном сечении со-
ответствует предположению о приведении их к паре сил, заложенному в ме-

тодике определения дополнительных остаточных напряжений в кольцах. Из результатов моделирования также следует, что в поверхностном слое кольца вследствие пластических деформаций может создаваться плоское остаточное напряженное состояние, измерение которого требует дополнительных исследований на образцах, вырезанных из кольца в осевом направлении.

Рис. 4. Остаточные напряжения от начальных деформаций: а — изолинии осевых напряжений (σ_z , МПа); б — изолинии окружных напряжений (σ_x , МПа); в — распределение напряжений в разрезе А-А

Моделирование МКЭ разрезанного кольца, имеющего форму сечения как на рис. 3, с внесёнными в поверхностный конический слой начальными деформациями $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = 2 \cdot 10^{-3}$, показало, что в основном происходит расхождение сечений Δ , а угол их взаимного поворота θ почти нулевой (рис. 5). Это совпадает с наблюдаемыми перемещениями при разрезке реального кольца роликового конического подшипника, имеющего шлифованную дорожку качения (см. таблицу).

Рис. 5. Перемещения разрезанного кольца от начальных деформаций

Выводы. В работе представлен алгоритм расчётов МКЭ дополнительных остаточных напряжений в кольце подшипника по результатам измерения перемещений при разрезке. МКЭ облегчает расчёты дополнительных остаточных напряжений и повышает точность анализа в случае сложной формы радиального сечения кольца.

Предложенным методом определены дополнительные остаточные напряжения после разрезки кольца серийного подшипника со шлифованной дорожкой качения.

Моделирование МКЭ остаточных напряжений в кольце со сложным сечением, в поверхностный слой которого внесены начальные деформации, показало достоверность принятых допущений.

Разработанный алгоритм использования МКЭ в расчётах дополнительных остаточных напряжений после разрезки применим не только для колец, но и для других типов деталей, например, стержней, пластин, оболочек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бургер И. А. Остаточные напряжения. — М.: Машгиз, 1963. — 232 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 541 с.
3. Фокин В. Г. Дмитриев В. А. Определение дополнительных напряжений при разрезке кольца с остаточными напряжениями // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки*, 2001. — № 11. — С. 93–96.

Поступила в редакцию 13/I/2009;
в окончательном варианте — 02/III/2009.

MSC: 74A10, 74S05

DEFINITION OF ADDITIONAL RESIDUAL STRESSES OF CUT PARTS BY FINITE ELEMENTS METHOD

V. G. Fokin, V. A. Dmitriev

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

E-mails: mechsamgtu@samgtu.ru, tms@samgtu.ru

Algorithm of the method of finite elements is proposed for definition of additional residual stress in rings with complex cut surface configuration. The example of algorithm application is demonstrated. Accepted assumptions are verified by modeling of the process of typical residual stress field formation in rings.

Key words: *finite elements method, residual stresses, ring, bearing, cut.*

Original article submitted 13/I/2009;
revision submitted 02/III/2009.

*Fokin Vladimir Grigorievich, Ph. D. (Techn.), Ass. Prof., Dep. of Mechanics.
Dmitriev Vladimir Alexandrovich, Ph. D. (Techn.), Ass. Prof., Dept. of Production Engineering.*