



МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 539.3

С.С. ЩЕРБАКОВ, канд. физ.-мат. наук
Белорусский государственный университет, г. Минск

С.М. БОРОДАКО
ПО «Гомсельмаш», г. Гомель

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРИБОФАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РОЛИК/КОЛЬЦО

Рассмотрена трибофатическая система ролик/кольцо, являющаяся моделью системы колесо/рельс, используемой при износоусталостных испытаниях. Как и в системе колесо/рельс, напряженно-деформированное состояние элементов системы ролик/кольцо определяется наличием контактного взаимодействия между ними, а также объемным деформированием одного из элементов (изгиб кольца). Данные виды нагружения в системе ролик/кольцо реализуются посредством приложения единой сжимающей нагрузки. Представлены результаты конечноэлементного моделирования напряженно-деформированного состояния такой системы. Показано значительное изменение характера распределений напряжений и численных значений параметров контакта данной системы вследствие изгиба кольца по сравнению с контактной парой. Это означает, что не учет изгибных напряжений при анализе напряженного деформированного состояния системы колесо/рельс может приводить к неверной оценке ее работоспособности.

Ключевые слова: трибофатическая система, контактное взаимодействие, изгиб, ролик/кольцо, колесо/рельс, напряженно-деформируемое состояние, компьютерное моделирование

Постановка задачи. В трибофатике одной из важнейших задач является определение и анализ напряженно-деформированного состояния систем, в которых одновременно реализуется контактное взаимодействие с трением (качения, скольжения) между твердыми де-

формируемыми телами и неконтактное (объемное) деформирование по крайней мере одного из элементов трибофатической системы [1–3].

Система колесо/рельс является одной из практически наиболее важных трибофатических систем.

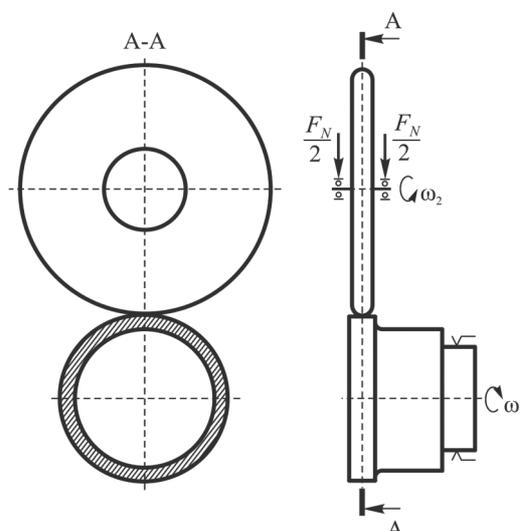
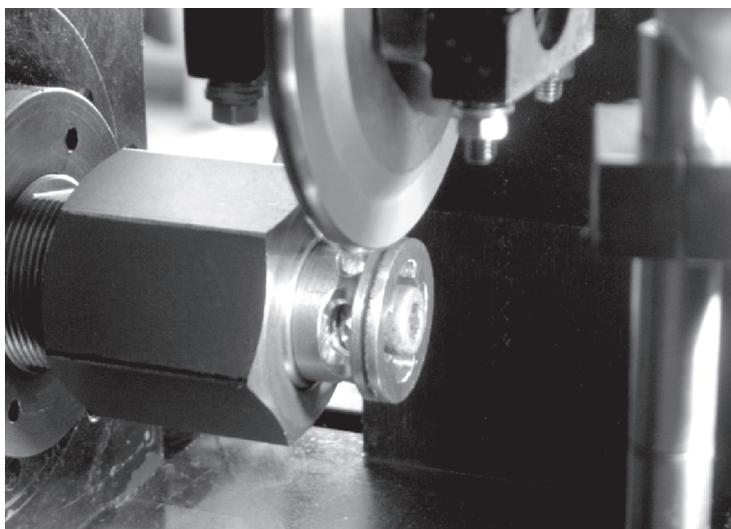


Рисунок 1 – Модель системы колесо/рельс для комплексных износоусталостных испытаний и ее конструктивная схема

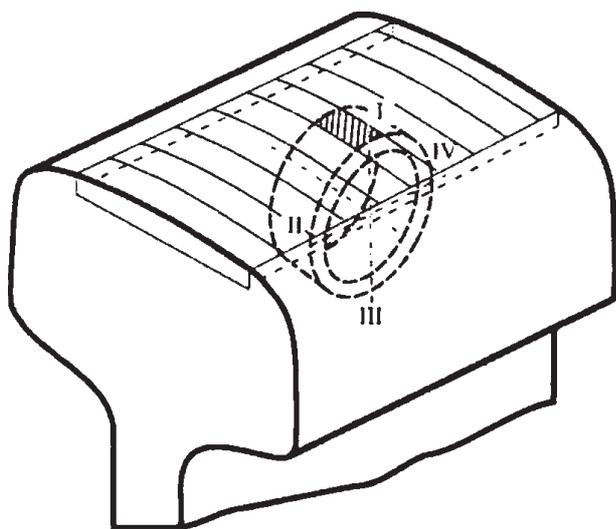


Рисунок 2 – Схема вырезки кольца, моделирующего работу рельса с сохранением рабочего поверхностного слоя

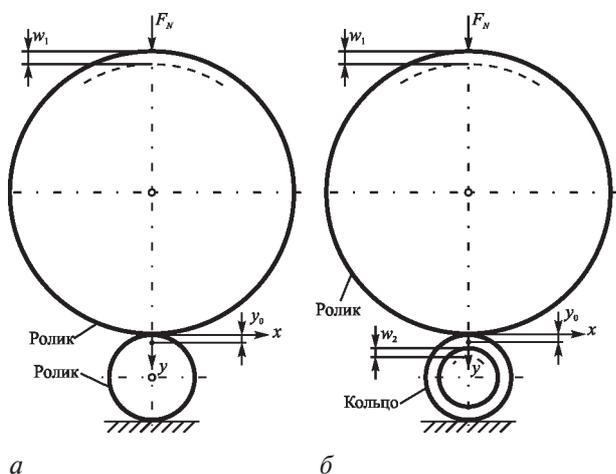


Рисунок 3 – Схемы нагружения и определения параметров перемещений вдоль оси y : w_1 – общее смещение системы; $w_2 < w_1$ – смещение кольца; y_0 – смещение точки контакта

Для моделирования основных параметров ее нагружения при износостойких испытаниях применяется система ролик/кольцо (рисунок 1) [3–5]. В данной системе ролик моделирует колесо, а кольцо – бесконечный рельс. Отметим, что кольцо может быть вырезано из головки рельса так, что одна из его периферийных рабочих зон оказывается расположенной на дорожке катания рельса (рисунок 2).

Область контакта ролика и кольца является наиболее нагруженной в системе ролик/кольцо [1–3]. Принципиальная особенность данной системы (рисунок 3 б) по сравнению с соответствующей традиционной контактной задачей (см. рисунок 3 а) для системы ролик/ролик состоит в том, что в зоне взаимодействия ролика с кольцом напряженное состояние обусловлено как полем контактных напряжений, так и полем напряжений вследствие изгиба. При этом оба поля возбуждаются единой контактной нагрузкой, как и в процессе эксплуатации системы колесо/рельс.

Таким образом, при построении механико-математической модели для исследования напря-

женного состояния трибофатической системы ролик/кольцо будем учитывать действие как распределенных нормальных $p(S)$ и касательных $q(S)$ усилий на контактной поверхности S , так и воздействие неконтактных (M, N, Q) нагрузок.

При исследовании напряженно-деформированного состояния системы ролик/кольцо (см. рисунок 3 б) принималось, что приложенная к системе нагрузка F_N вызывает в последней как локальные контактные деформации, так и объемное деформирование кольца. Следовательно, сила F_N «расходуется» как на общее (изгиб), так и на локальное (в зоне контакта) деформирование, и граничные условия задачи принимают следующий вид:

$$\sigma_{m|_S} = p(F_N, S); \quad \sigma_{\tau|_S} = fp(F_N, S); \quad u_i|_{B_k} = 0, \quad (1)$$

где $n \perp S$; $\tau \parallel S$; f – коэффициент трения; $i = 1, 2, 3$; $k = 1 \dots 2m$ (m – количество опор-«шпал»).

Конечноэлементное моделирование. Результаты моделирования напряженного состояния при чистом контакте приведены в работах [6–8]. Компьютерное моделирование трибофатической системы ролик/кольцо проводилось как в двумерной (первоначальный контакт по линии), так и в трехмерной (первоначальный контакт в точке) постановке.

При решении двумерной задачи часть кольца, заключенная между «шпалами» (см. рисунок 3 б), рассматривалась в виде жестко заделанной по концам арки. Расчетные данные при выполнении компьютерного моделирования выбирались как в модели, используемой при комплексных износостойких испытаниях на машинах серии СИ: нагрузка $F_N = 1000$ Н приложена в середине арки (угол $\pi/2$), радиус ролика $R_{12} = 50$ м, внешний радиус кольца $R_{21} = 15$ мм. Поскольку в данной постановке задача является осесимметричной, то рассматривалась лишь половина исходной модели (рисунок 4) [8].

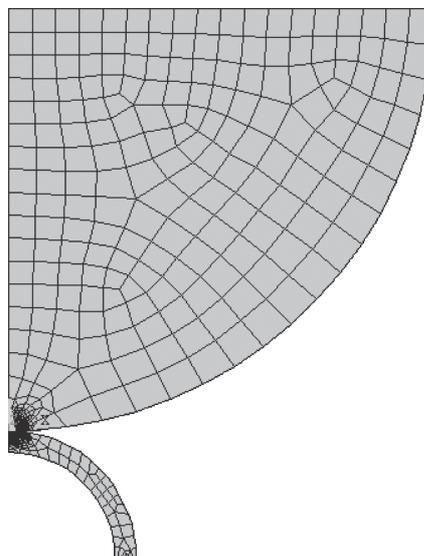


Рисунок 4 – Конечно-элементная модель системы ролик/кольцо

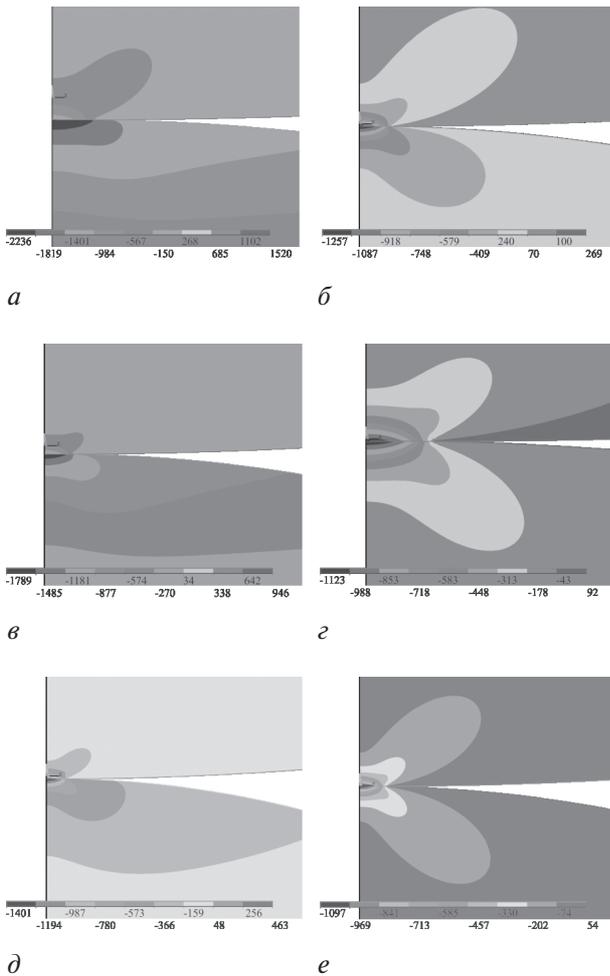


Рисунок 5 – Распределение напряжений σ_{xx} : а – $h = 2$ мм; б – $h = 4,5$ мм; в – $h = 2,5$ мм; г – $h = 7,5$ мм; д – $h = 3,5$ мм; е – $h = 10$ мм

Расчеты были проведены для моделей с различной толщиной кольца: $h = 1$ мм; $h = 1,5$ мм; $h = 2$ мм; $h = 3,5$ мм; $h = 4,5$ мм; $h = 7,5$ мм; $h = 10$ мм; $h = 12,5$ мм; $h = R_{21} = 15$ мм.

Для сравнения была также изучена контактная пара ролик/ролик, диаметры элементов которой такие же, как и в системе ролик/кольцо (см. рисунок 3 а).

В результате проведенного в ANSYS конечно-элементного анализа было определено напряженно-деформированное состояние контактирующих тел (ролика и кольца) при различной толщине кольца (рисунки 5–7).

В процессе исследования перехода от системы ролик/кольцо к системе ролик/ролик было сделано качественное сравнение распределений напряжений при контактом взаимодействии с изгибом кольца (трибофатическая система) и при чистом контакте (контактная пара).

Из рисунков 5–7 видно, что если в контактной паре распределения напряжений практически симметричны относительно оси x , то в трибофатической системе формы распределений и величины напряжений для ролика и кольца различны. Переход от

контактной к трибофатической системе становится заметным уже при толщине кольца, равной 7,5 мм. Если напряженное состояние ролика обусловлено только контактным взаимодействием, то напряженное состояние кольца в непосредственной близости от точки первоначального контакта является «переходным», обусловленным также изгибом кольца.

Таким образом, результаты расчета демонстрируют существенное влияние изгиба кольца на напряженное состояние в области контакта в результате действия единой, приложенной к системе силы F_N . Аналогичные изменения имеют место для деформаций и перемещений.

Количественный анализ системы ролик/кольцо дан в таблице. Из нее видно, что величина перемещения осей $\delta = \omega_1 - \omega_2$, которая определяется разностью между перемещениями верхней и нижней поверхности (см. рисунок 3), увеличивается с ростом толщины кольца (рисунок 8).

По этим данным можно сделать вывод, что при переходе от системы ролик/кольцо (трибофатическая система) к системе ролик/ролик (контактная пара) величина сближения осей (сближение тел) при контакте δ (вдоль оси y) увеличилась примерно на 35 %. Это можно объяс-

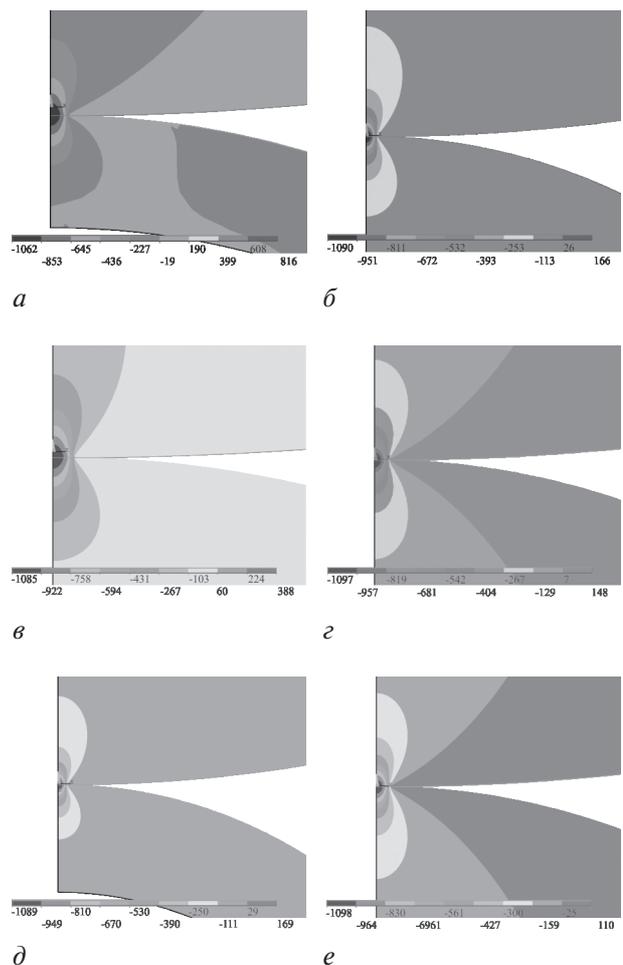


Рисунок 6 – Распределение напряжений σ_{xx} : а – $h = 2$ мм; б – $h = 4,5$ мм; в – $h = 2,5$ мм; г – $h = 7,5$ мм; д – $h = 3,5$ мм; е – $h = 10$ мм

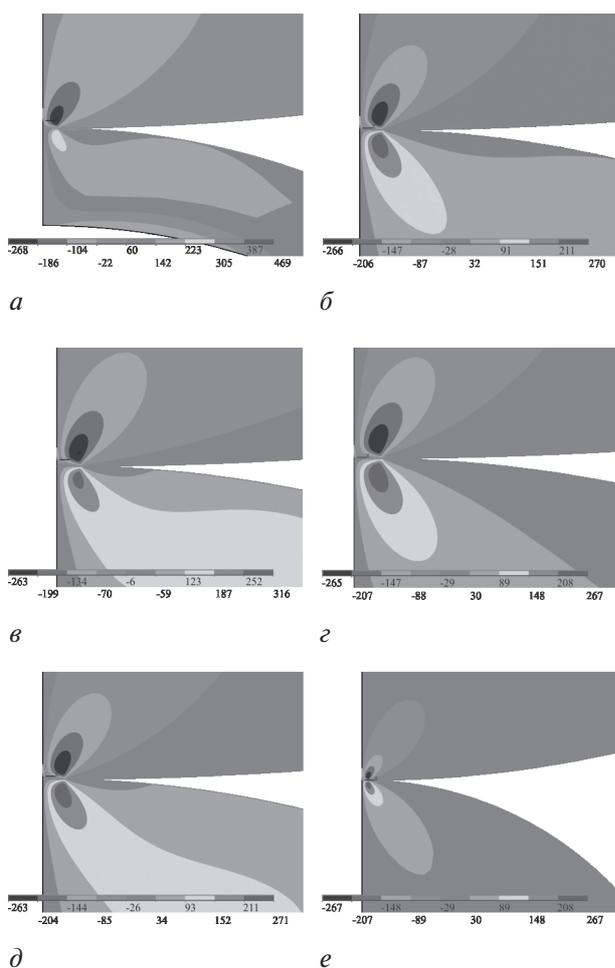


Рисунок 7 – Распределение напряжений σ_{xy} : а – $h = 2$ мм; б – $h = 4,5$ мм; в – $h = 2,5$ мм; г – $h = 7,5$ мм; д – $h = 3,5$ мм; е – $h = 10$ мм

нить тем, что при увеличении толщины кольца уменьшается его прогиб, а следовательно и w_2 . Отметим, что поскольку нижнее тело в контакт-

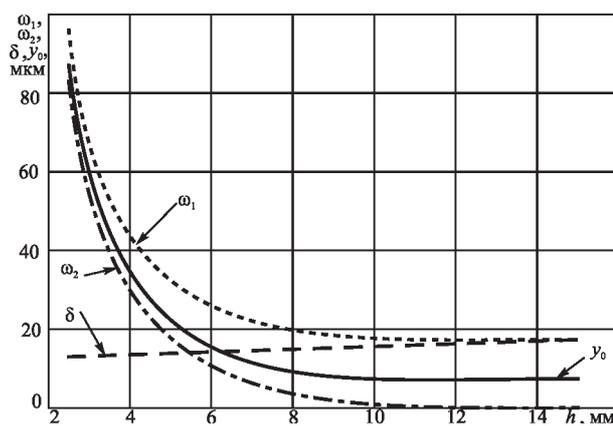


Рисунок 8 – Зависимость перемещений в системе от толщины кольца: w_1 – перемещение ролика; w_2 – перемещение кольца; δ – перемещение осей; y_0 – перемещение точки контакта

ной паре полностью закреплено, сближение будет определяться перемещением только верхнего тела w_1 , т.е. $\delta = w_1$ [3, 8].

Из таблицы и рисунка 9 видно, что давление в центре контакта $p_0 = \sigma_{yy}|_{x=z=0}$ в трибофатической системе с наименьшей толщиной кольца в силу перераспределения части F_N для реализации изгиба кольца примерно на 14 % меньше, чем в контактной паре.

Перемещение y_0 точки контакта и полное перемещение w_1 (см. рисунки 3 и 8) в трибофатической системе вследствие изгиба примерно в 50 и 22 раза соответственно больше, чем в контактной паре.

Из рисунков 10–12 хорошо видно, что для колец различной толщины в системе ролик/кольцо напряжение σ_{yy} в ролике (т.е. при $y > 0$) остается практически неизменным. Однако из-за перераспределения напряжений в кольце вследствие изгиба как максимальные значения p_0 , так и распределения σ_{yy} вдоль оси y для раз-

Таблица – Перемещения и напряжения, характеризующие переход от системы ролик/кольцо к системе ролик/ролик

Толщина кольца h , мм	Перемещение ролика w_1 , 10^{-2} мм	Перемещение кольца w_2 , 10^{-2} мм	Перемещение осей $\delta = w_1 - w_2$, 10^{-2} мм	Перемещение точки контакта y_0 , 10^{-2} мм	Напряжение в центре площадки контакта $\sigma_{yy} = p_0$, Н/мм ²
1,5	39,24	38,02	1,125	38,29	953
2	16,53	15,24	1,287	17,74	1062
2,5	9,658	8,359	1,299	8,712	1085
3,5	4,856	3,495	1,361	3,834	1089
4,5	3,324	1,926	1,398	2,322	1096
7,5	2,097	0,592	1,505	1,132	1097
10	1,845	0,268	1,577	0,851	1098
12,5	1,756	0,105	1,651	0,761	1103
15	1,734	0	1,734	0,743	1104

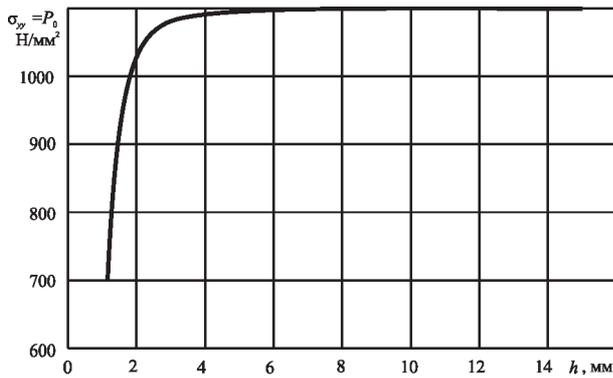


Рисунок 9 – Зависимость напряжения в центре площадки контакта от толщины кольца

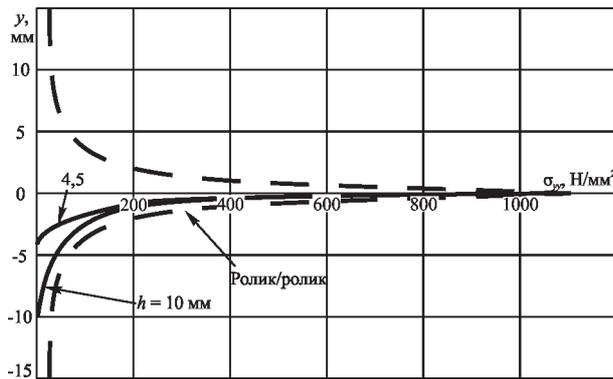


Рисунок 10 – Распределение σ_{yy} в системе ролик/кольцо и паре трения при $F_N = 1000$ Н вдоль оси y

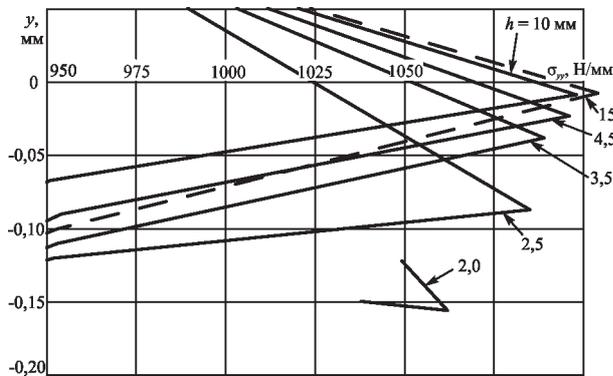


Рисунок 11 – Распределение $\sigma_{yy} = P_0$ вдоль оси y в окрестности точки первоначального контакта при $F_N = 1000$ Н и различной толщине кольца

личных h значительно уменьшаются при уменьшении толщины кольца.

При решении трехмерной задачи были введены три дополнительных, по сравнению с двумерной задачей, расчетных параметра: радиусы $R_{11} = 3$ мм, $R_{22} = \infty$ и ширина кольца $d = 2$ мм.

В целом результаты расчета для трехмерного случая (рисунок 13) при $F_N = 2000$ Н, $h = 2,5$ мм качественно являются аналогичными результатам расчетов для двумерной задачи.

Заключение. Разработанная методика конечноэлементного моделирования напряженно-деформируемого состояния трибофатической системы ролик/кольцо позволила провести анализ

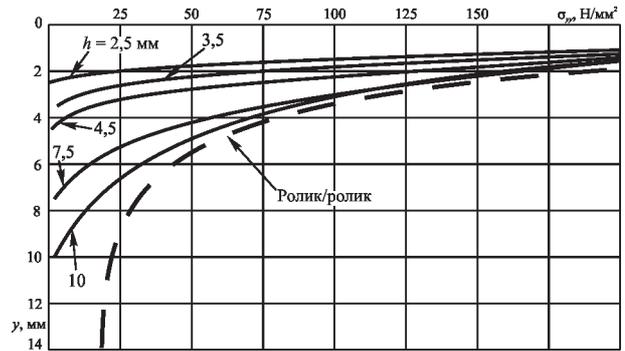


Рисунок 12 – Распределение σ_{yy} вдоль оси y при $F_N = 1000$ Н и различной толщине кольца ($h = 2,5$ мм; $3,5$ мм; $4,5$ мм; $7,5$ мм)

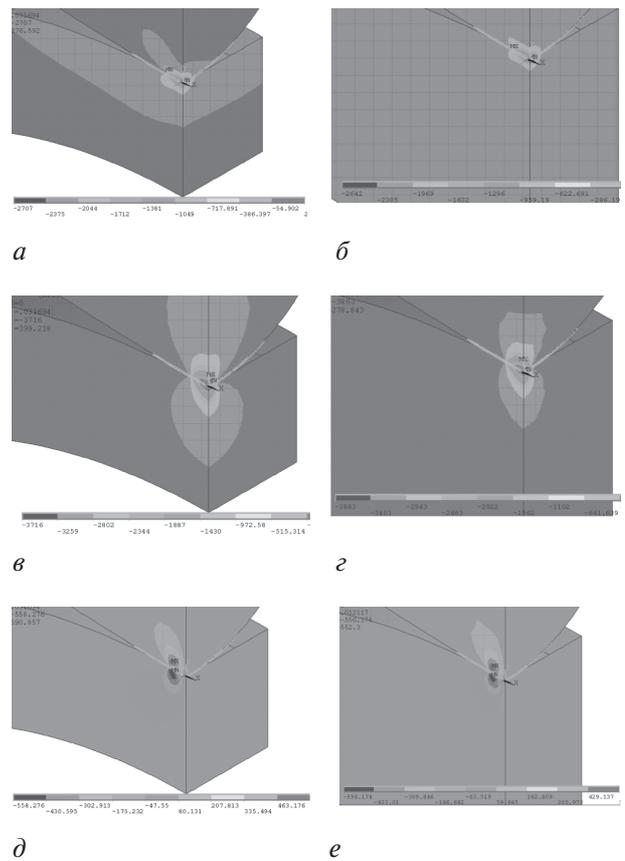


Рисунок 13 – Распределение напряжений в трехмерных моделях трибофатической системы (слева) и контактной паре (справа): $a - \sigma_{xx}$; $b - \sigma_{yy}$; $c - \sigma_{zz}$; $d - \sigma_{xy}$; $e - \sigma_{xz}$; $f - \sigma_{yz}$

основных характеристик контактного взаимодействия (контактного давления, перемещений, распределений напряжений, сближения осей).

Конечноэлементное моделирование выявило существенное влияние изгиба кольца на напряженное состояние в области контакта в результате действия единой, приложенной к системе, силы F_N . Из полученных распределений напряжений, представленных на рисунках 5–7, хорошо видно, что напряженно-деформируемое состояние трибофатической системы значительно отличается (качественно и количественно) от такового при традиционно отдельно изучаемых контакте и изгибе.

При уменьшении толщины кольца сближение осей и максимум контактного давления в системе ролик/кольцо вследствие объемного деформирования кольца уменьшаются по сравнению с системой ролик/ролик.

Игнорирование изгибных напряжений при анализе напряженного состояния элементов системы ролик/кольцо (а следовательно, и колесо/рельс) может приводить к искаженному представлению о нагруженности системы и, следовательно, к неверной оценке ее работоспособности.

Список литературы

1. Сосновский, Л.А. О классификации контактных задач применительно к силовым системам машин / Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков // Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование, технология: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 6–10 дек. 2004 г. / БНТУ; редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. — Минск, 2004. — Т. 4. — С. 44–55.
2. Экспериментальное исследование закономерностей обратного эффекта силовой системы сталь 45 — силумин при фрикционно-механической усталости / А.В. Богданович [и др.] // Тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. — 1 нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др.]. — Минск: БГУ, 2010. — Т. 1. — С. 527–532.
3. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.
4. Новые способы испытаний применительно к системе колесо/рельс / С.А. Тюрин [и др.] // Вест. БелГУТА. — 2005. — № 2. — С. 54–63.
5. Сосновский, Л.А. К разработке метода испытаний рельсов на моделях в условиях, близких к эксплуатационным / Л.А. Сосновский, В.И. Матвеев, С.С. Щербаков // Современные проблемы путевого комплекса. Повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований: тр. Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 19–20 окт. 2004 г. / МИИТ. — М., 2004. — Т. IV. — С. 37.
6. Компьютерное моделирование опасных объемов для модели зубчатых зацеплений / М.А. Журавков [и др.] // Тр. V Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2005), Иркутск, Россия, 3–7 окт. 2005 г. / ИргУПС; отв. ред. А.П. Хоменко. — Иркутск: ИргУПС, 2005. — Т. 1. — С. 142–148.
7. Компьютерный анализ напряженно-деформированного состояния в зоне эллиптической площадки контакта тел при качении применительно к модели зубчатых зацеплений / М.А. Журавков [и др.] // Трение и износ. — 2006. — № 1. — С. 12–16.
8. Щербаков, С.С. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния моделей системы колесо/рельс / С.С. Щербаков, С.М. Бородако // Тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. — 1 нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др.]. — Минск: БГУ, 2010. — Т. 2. — С. 227–232.

Sherbakov S.S., Borodako S.M.

Modeling stress-strain state of roller/ring tribo-fatigue system

Roller/ring tribo-fatigue system which is used in wear-fatigue tests as the model of wheel/rail system is considered. In this system as well as in wheel/rail system stress-strain state is defined by interaction of contact and volume deformation of one of the system elements. These loads in the roller/ring system are defined by single compressive force. Results of finite element simulation of stress-strain state of roller/ring system are presented. Significant change of contact parameters and stresses distributions in this system due to the bending of the ring comparing to the contact pair is shown.

Поступила в редакцию 16.01.2012.