

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И СОСТОЯНИЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ТРИБОФАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РОЛИК/ВАЛ

асп. Мармыш Д.Е.

Белорусский государственный университет, Минск

**Введение.** При изучении моделей, используемых в трибофатике, одной из основных задач является определение и анализ напряженно-деформированного состояния систем, в которых одновременно реализуется контактное взаимодействие твердых тел и неконтактное нагружение [2].

Рассмотрим систему ролик/вал (рисунки 1 а и 1 б), которая является одной из практически наиболее важных трибофатических систем [4].

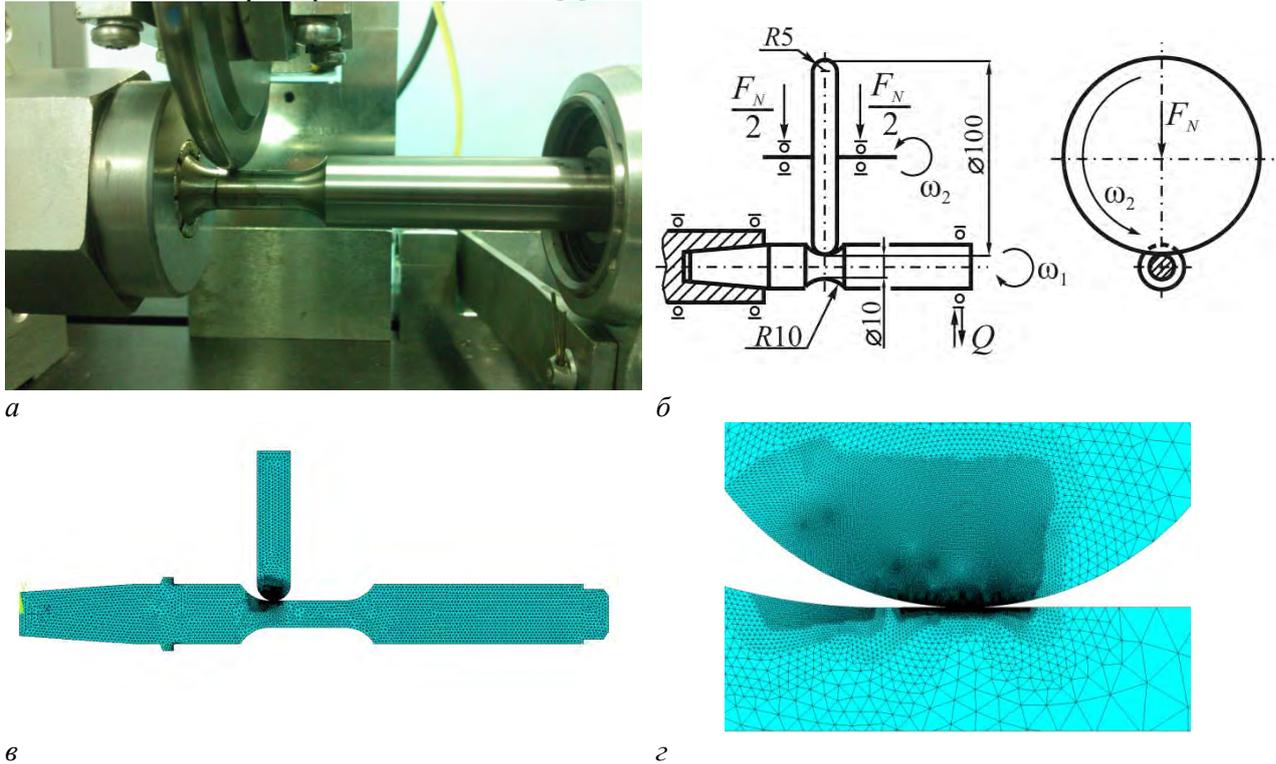


Рисунок 1 – Система ролик/вал для комплексных износоусталостных испытаний (а), ее конструктивная схема (б) и конечно-элементная модель (в, г)

Область контакта ролика и вала является наиболее нагруженной. Принципиальная особенность рассматриваемой системы в сравнении с контактной парой состоит в том, что в зоне взаимодействия вала с роликом напряженное состояние обусловлено как полем контактных напряжений, так и полем напряжений вследствие изгиба.

Таким образом, при построении механико-математической модели для исследования напряженно-деформированного состояния трибофатической системы ролик/вал будем учитывать действие как распределенных усилий  $p(S)$  по области контакта, так и воздействие неконтактных нагрузок  $(M, Q, N)$ .

В рассматриваемой модели к ролику прикладывалась контактная нагрузка  $F_N$ , а к валу – изгибающая нагрузка  $Q$ , и, следовательно, полное напряжение в области контакта будет обусловлено взаимодействием полей напряжений возникающих от действия нагрузки  $F_N$  и силы  $Q$ , т.е.

$$\sigma_{ij}(F_N, Q) = \sigma_{ij}^N + \sigma_{ij}^Q, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij}^N$  – поле напряжений, возникающее за счет действия нагрузки  $F_N$ ,

$\sigma_{ij}^Q$  – поле напряжений, возникающее за счет действия нагрузки  $Q$ .

Граничное условие в области контакта имеет вид:

$$\sigma_{nm}|_S = p(F_N, Q), \quad (2)$$

где  $n \perp S$ .

**Конечно-элементное моделирование.** Компьютерное моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния трибофатической системы ролик/вал проводилось в двумерной постановке для несогласованного контактного взаимодействия (первоначальный контакт в точке) с помощью пакета ANSYS.

Для построения геометрической модели системы использовались размеры стандартных образцов используемых для комплексных износоусталостных испытаний на машинах серии СИ [3]. Значения для контактной  $F_N$  и изгибающей  $Q$  нагрузок также принимались характерными для данного вида испытаний. Линия действия силы  $F_N$  лежит на оси, которая проходит через точку первоначального контакта. На рисунке 1 *в* показан общий вид рассматриваемой модели после разбиения на конечные элементы. Так как размеры площадки контакта имеют малые по сравнению со всей длиной вала размеры, то целесообразно конечно-элементную сетку детализировать в области контакта ролика и вала (рисунок 1 *з*).

Правильность построенной модели системы ролик/вал и адекватность результатов полученных при расчете оценивалась путем сравнения нормального напряжения  $\sigma_y$ , полученного при конечно-элементном расчете в случае отсутствия объемного деформирования, т.е. при  $Q=0$ , с рассчитанным аналитически для случая плоской деформации [1].

Расчет проводился для следующих величин: контактная сила  $F_N$  приложенная к ролику принималась равной 30 кН, изгибающая нагрузка  $Q$  – 3 кН.

Из рисунка 2 *а* видно небольшое расхождение аналитического и конечно-элементного решений. Данное явление обусловлено тем, что численное решение получено для модели образца, которая имеет конечные размеры, а аналитическое решение из работы [1] получено для полуплоскости. Из рисунка 2 *б* видно, что при форма контактного давления хорошо аппроксимируется при конечно-элементном моделировании.

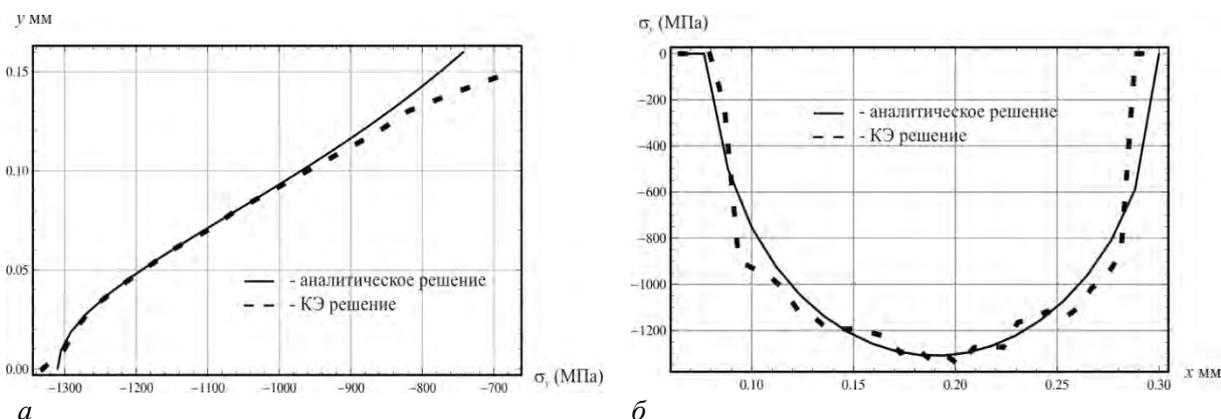


Рисунок 2 – Численное и аналитическое решения для нормального напряжения  $\sigma_y$  вдоль нормали к поверхности контакта, проходящей через его центр (а), и вдоль линии контакта (б)

В результате проведенного в ANSYS конечно-элементного анализа было определено напряженно-деформированное состояние контактирующих тел (ролик и вал) при различном направлении изгибающей нагрузки  $Q$  (см. рисунок 3). Из характерных картин распределения нормального напряжения  $\sigma_x$  и интенсивности напряжений  $\sigma_{int}$  в области контакта, представленных рисунком 3 видны значительные отличия напряженного состояния вала вследствие неконтактного изгиба. При этом напряженное состояние ролика остается практически неизменным.

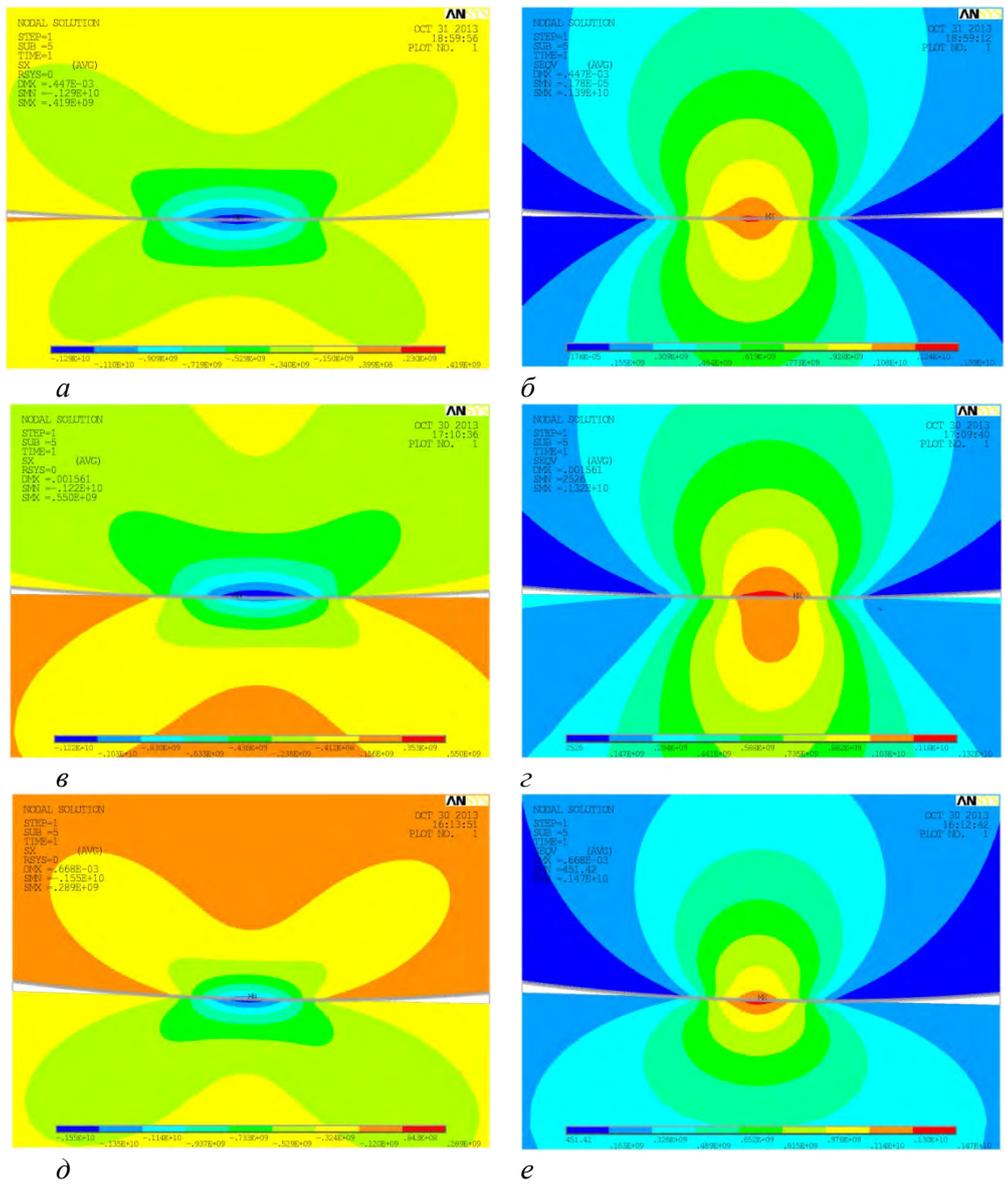


Рисунок 3 – Распределение нормального напряжения  $\sigma_x$  и интенсивности напряжений  $\sigma_{int}$  в случае отсутствия изгибающей нагрузки (а, б), изгибающей нагрузки направлена вверх, реализуя сжатие контактной области (в, г), изгибающая нагрузка направлена вниз, реализуя растяжение контактной области (д, е)

**Опасные объемы и состояние поврежденности.** В рамках построенной модели трибофатической системы ролик/вал, также был проведен анализ повреждаемости системы контактирующих тел по интенсивности напряжений в соответствии с методикой описанной в [4, 5]. Следует отдельно отметить, что в плоском случае опасные объемы трансформируются в опасные площади.

В общем случае при действии на однородную изотропную трибофатическую систему предельной нагрузки  $F_{*lim}$  для деформируемого элемента системы определим предельные значения для интенсивности  $\sigma_{int}^{(*lim)}$ :

$$\sigma_{int}^{(*lim)} = \max_{dV} \left[ \sigma_{int} (F_{*lim}, dV) \right]. \tag{3}$$

где  $dV$  – элементарный объем нагруженного тела.

Тогда условие для ограничения октаэдрического опасного объема по интенсивности будет иметь вид

$$V_{int} = \left\{ dV / \sigma_{int} \geq \sigma_{int}^{(*lim)}, dV \subset V_k \right\} \tag{4}$$

Функция повреждаемости опасного объема определяется как интеграл по опасному объему, в котором подынтегральной функцией выступает отношение действующей интенсивности к предельной, т.е. имеет вид [4]

$$\Psi_{\text{int}} = \int_{\sigma_{\text{int}} \geq \sigma_{\text{int}}^{(*\text{lim})}} \frac{\sigma_{\text{int}}}{\sigma_{\text{int}}^{(*\text{lim})}} dV \quad (5)$$

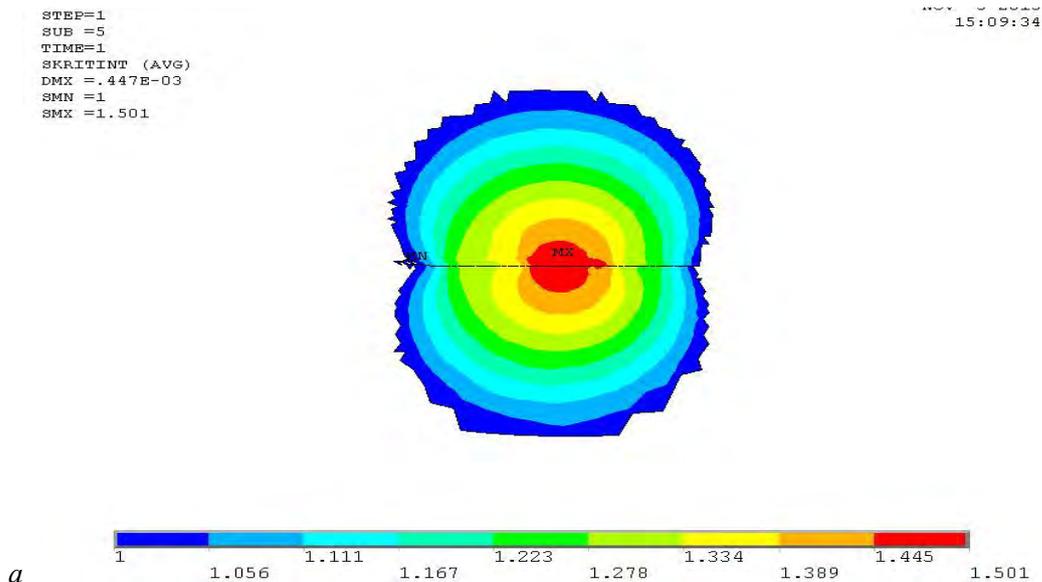
Рассмотрим изменение повреждаемости в зависимости от соотношения контактного давления и неконтактной нагрузки для рассматриваемой модели трибофатической системы ролик/вал. На рисунке 4 показаны изменения величин и форм опасных объемов, рассчитанных по (3)–(4). Величина предельного напряжения бралась как предел контактной усталости  $\sigma_{\text{int}}^{(*\text{lim})} = F_{*\text{lim}} = 888$  МПа.

Из рисунка 4 видно, что величина опасного объема ролика остается неизменной во всех трех случаях нагружения и равна  $0,026 \text{ мм}^2$ , что составляет  $0,006 \%$  от рабочей площади системы. Что же касается опасного объема вала, то в случае только контактного взаимодействия тел, величина опасного объема вала равна  $0,026 \text{ мм}^2$ , т.е. в данном случае ролик и вал имеют одинаковые величины опасных объемов (рис. 4 а). Повреждаемость системы рассчитанная по формуле (5) в данном случае одинакова для вала и ролика и равна  $0,032 \text{ мм}^2$ .

При нагружении вала изгибающей нагрузкой направленной вверх происходит сжатие контактной области. В этом случае величина опасного объема вала равна  $0,031 \text{ мм}^2$ , что составляет  $0,006 \%$  от рабочей площади системы и что на  $19,2 \%$  больше, чем в случае только контактного взаимодействия. Из рисунка 4 б также видно, что повреждаемость вала имеет более широкие границы, чем повреждаемость ролика. Повреждаемость системы в данном случае равна: ролика –  $0,032 \text{ мм}^2$ , вала –  $0,038 \text{ мм}^2$ .

При нагружении вала изгибающей нагрузкой направленной вниз происходит растяжение контактной области. В этом случае величина опасного объема равна  $0,045 \text{ мм}^2$ , что составляет  $0,01 \%$  от рабочей площади системы и что на  $73,1 \%$  больше, чем в случае только контактного взаимодействия. Также из рисунка 4 в видно, что опасный объем имеет вытянутую вдоль оси  $y$  форму. Повреждаемость системы в данном случае равна: ролика –  $0,032 \text{ мм}^2$ , вала –  $0,051 \text{ мм}^2$ .

**Заключение.** В работе представлены результаты компьютерного моделирования в среде ANSYS напряженно-деформированного состояния трибофатической системы ролик/вал. Построена геометрическая модель системы, которая соответствует реальным размерам образцов используемых при комплексных испытаниях на контактно-механическую усталость. Получены картины распределения полей напряжений в окрестности контакта твердых тел при различном соотношении контактной и изгибающей нагрузок. При исследовании повреждаемости системы построен октаэдрический опасный объем и проанализировано изменение его размеров и форм при растяжении-сжатии области контакта вследствие неконтактного изгиба.



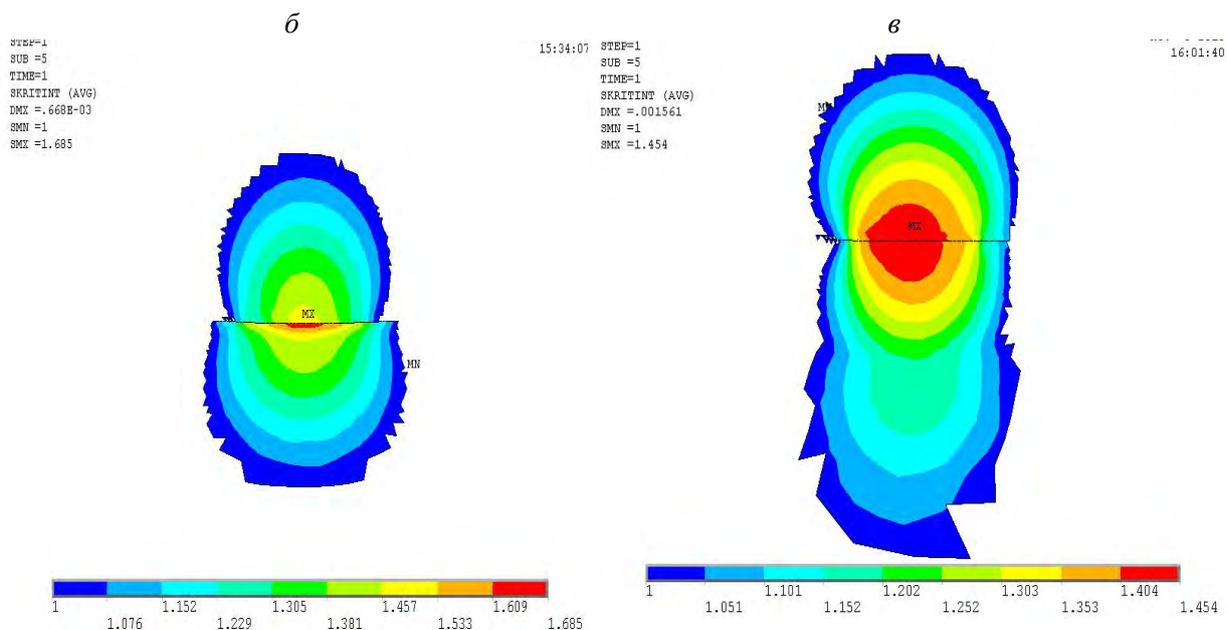


Рисунок 4 – Опасные объемы в системе ролик/вал в случае отсутствия изгибающей нагрузки (а), изгибающей нагрузки направлена вверх, реализуя сжатие контактной области (б), изгибающая нагрузка направлена вниз, реализуя растяжение контактной области (в)

## РЕЗЮМЕ

В работе рассмотрены результаты конечно-элементного моделирования трибофатической системы ролик/вал в плоской постановке. Представлены картины распределения полей напряжений в окрестности области контакта ролика и вала. Проведено исследование объемной повреждаемости системы. Показано значительное изменение форм и размеров октаэдрического опасного объема в зависимости от характера приложения изгибающей нагрузки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Макушин, В.М. Упругие перемещения и напряженное состояние деталей в местах силового контакта деталей / В.М. Макушин // Расчеты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев [и др.]; под ред. С.Д. Пономарева. – М.: 1958. Т. 2. – 547 с.
2. Сосновский, Л.А. Основы трибофатики/ Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2003. Т. 1. – 246 с.; Т. 2. – 234 с.
3. СТБ 1066–97. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость (Стандарт Беларуси). – Минск: Госстандарт, 1997. – 58 с.
4. Щербаков, С.С. Механика трибофатических систем / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. – Минск: БГУ, 2011. – 407 с.
5. Щербаков, С.С. Моделирование напряженно-деформированного состояния трибофатической системы ролик/кольцо // С.С. Щербаков, С.М. Бородако / Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. № 1 (18). – С. 80–85.

## SUMMARY

*Results of two-dimensional computer simulation of Tribo-Fatigue roller/shaft system are considered. Pictures of stress distribution in the neighbourhood of the area of contact of roller and shaft are given. Study of the damageability of Tribo-Fatigue system is made. Significant change in the shape and size of the octahedral dangerous volume due to the nature of the bending force application is shown.*

Поступила в редакцию 29.10.2013