

УДК 621.88.084

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗНОРАЗМЕРНОСТИ ШАРИКОВ НА НАГРУЖЕННОСТЬ ПОДШИПНИКА

*д-р техн. наук, проф. А.Т. СКОЙБЕДА, Д. ЭЛЬМЕССАУДИ*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*С использованием конечно-элементной модели рассмотрено влияние разноразмерности шариков на напряженность подшипника. Даны рекомендации по проектированию подшипниковых узлов, изготовлению и сборке подшипников.*

Контактная усталость деталей подшипника качения определяется многими факторами, к которым относятся нормальные и касательные контактные напряжения, качество поверхностей и структура материалов контактирующих тел, остаточные напряжения в поверхностных слоях материалов и др.

Одним из основных факторов, оказывающих влияние на работоспособность и долговечность подшипников качения, является концентрация контактных давлений, возникающих в результате неудовлетворительного распределения внешней нагрузки между элементами качения из-за разноразмерности шариков. Высокие контактные напряжения, сопровождающиеся наличием взаимного скольжения деталей подшипников качения, приводят к преждевременным усталостным повреждениям.

При вращении подшипника шарик с большим диаметром непрерывно вызывает перераспределение нагрузки между другими шариками от минимума до максимума. В результате шарики воспринимают пульсирующую нагрузку, что является причиной увеличения вибрации, которая в свою очередь вызывает рост напряжений в точках соприкосновения и, периодически повторяясь, они могут стать причиной разрушения дорожек качения [1].

Поэтому некорректно искать непосредственно корреляцию между контактными напряжениями  $\sigma_n$  и параметром  $\xi$ , учитывающим разноразмерность шариков. Разноразмерность шариков возникает в процессе селективной сборки подшипника и во время его эксплуатации вследствие оплавления поверхности шариков и уменьшения их диаметров и искажения геометрической формы при недостаточной смазке. Зависимость между  $\sigma_n$  и  $\xi$  с учетом базового числа циклов и соответствующего ему напряжения [2]:

$$\xi = \frac{1}{\sigma_n} \cdot \frac{\sigma_{n0}}{\sqrt[m]{N_{y0}}}, \quad (1)$$

где  $N_{y0}$  – число циклов нагружения, условно принятое за базовое;  $N_n$  – ресурс при действующем контактом напряжении  $\sigma_n$ ;  $\sigma_n$  – контактные напряжения, МПа;  $\sigma_{n0}$  – контактное напряжение, соответствующее  $N_{y0}$ ;  $m = ctg\beta$  – параметр, определяющий наклон левой ветви кривой усталости в логарифмических координатах.

Для определения контактных напряжений и перемещений тел качения весьма эффективным является расчетно-экспериментальный метод, основанный на использовании метода конечных элементов (МКЭ) и современных методов экспериментальной механики.

По разработанным для МКЭ математическим моделям программы позволяют предварительно рассчитывать различные варианты конструктивных параметров (разноразмерность шариков, радиус желоба качения, зазор и т.д.) с наименьшими контактными напряжениями и повышенным ресурсом по износу и усталости.

Использование фотоупругих моделей позволяет получить с достаточной точностью информацию о распределении напряжений в сложных трехмерных объектах.

Распределение нагрузки между элементами качения при учете влияния разноразмерности шариков подшипника 6-305AE рассматривалось с применением пакета прикладных программ ANSYS.

Условия нагружения (табл. 1):

- начальная нагрузка 100 Н;
- промежуточная нагрузка 4500 Н;
- максимальная нагрузка 11400 Н.

Таблица 1

Влияние распределения нагрузки и разноразмерности шариков на эксплуатационные характеристики подшипников

Действующая сила F на подшипник, Н	Разноразмерность шариков, мкм	Сила F на центральный шарик, Н	Процентное распределение силы F на центральный шарик	Максимальное перемещение внутреннего кольца, мкм	Жесткость, Н/мкм
100	0	59,9	59,9 %	7,5	13,3
100	6	96,7	96,7 %	10,2	9,8
100	12	99,5	99,5 %	10,5	9,5
4500	0	3048	70,0 %	37,9	118,7
4500	6	3216	71,5 %	41,2	109,2
4500	12	3604	80,1 %	43,7	103,0
11400	0	7324	64,2 %	68,5	166,4
11400	6	7664	67,2 %	71	160,6
11400	12	8115,7	71,16%	75,4	154,8

Как видно из табл. 1, нагрузка на центральный шарик увеличивается с ростом разноразмерности шариков, при этом также увеличивается перемещение внутреннего кольца (рис. 1).

Однако при дальнейшем увеличении нагрузки и разноразмерности шариков нагрузка на центральный шарик может уменьшиться (рис. 2). Это объясняется тем, что другие шарики воспринимают определенную долю нагрузки, когда шарик наибольшего диаметра находится в зоне нагружения. Данное явление рассмотрено в работе [3], где равновесие внутреннего кольца, описываемое уравнением

$$F = P_0 + 2P_1 \cos \alpha + 2P_2 \cos 2\alpha + \dots + 2P_n \cos n\alpha,$$

принимает следующий вид:

$$F = P_0 + P_1 \cos \alpha + P'_1 \cos \alpha + P_2 \cos 2\alpha + P'_2 \cos 2\alpha + \dots + P_n \cos n\alpha + P'_n \cos n\alpha - R \sin \varphi,$$

где  $P'_1 = q_1 P_1$ ;  $P'_2 = q_2 P_2$ ; ...  $P'_n = q_n P_n$ .

$$F = P_0 + P_1 \cos \alpha + q_1 P_1 \cos \alpha + P_2 \cos 2\alpha + q_2 P_2 \cos 2\alpha + \dots + P_n \cos n\alpha + q_n P_n \cos n\alpha - R \sin \varphi;$$

$$F = P_0 + (q_1 + 1) P_1 \cos \alpha + (q_2 + 1) P_2 \cos 2\alpha + \dots + (q_n + 1) P_n \cos n\alpha - R \sin \varphi,$$

где  $P_0$  – наибольшая нагрузка, которую несет шарик, расположенный на линии действия усилия  $F$ ;  $R$  – реакция со стороны наружной обоймы против ролика или шарика наибольшего диаметра;  $n$  – половина числа тел качения в нагруженной зоне;  $q_1, \dots, q_n$  – коэффициент неравномерности распределения нагрузки между телами качения;  $0 < q_i \leq 1$ .

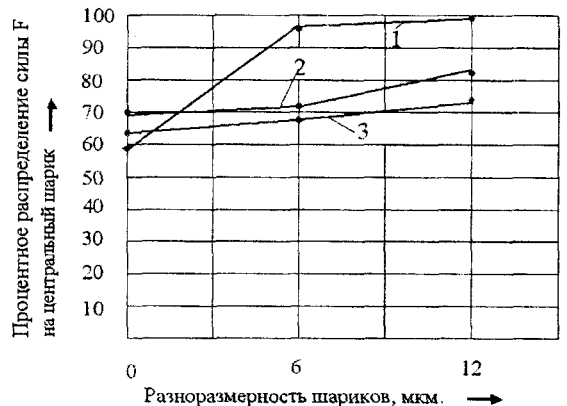
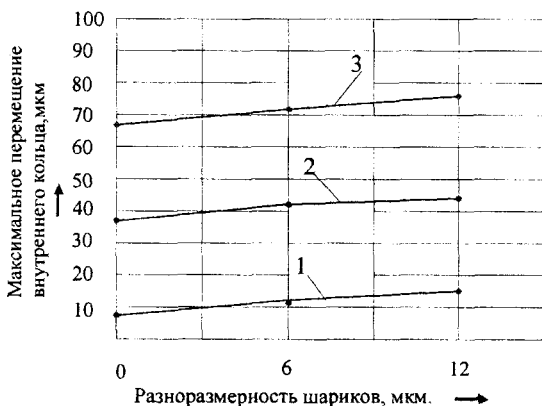


Рис. 1. Изменения нагрузки на центральный шарик в зависимости от разноразмерности шариков: 1 - при F = 100 Н; 2 - при F = 4500 Н; 3 - при F = 11400 Н

Рис. 2. Изменения перемещения внутреннего кольца в зависимости от нагрузки и разноразмерности шариков: 1 - при F = 100 Н; 2 - при F = 4500 Н; 3 - при F = 11400 Н

Используя МКЭ (рис. 3), можем получить наглядные изображения полей напряжений в зоне контактов тел качения и колец подшипника (рис. 4, 5).

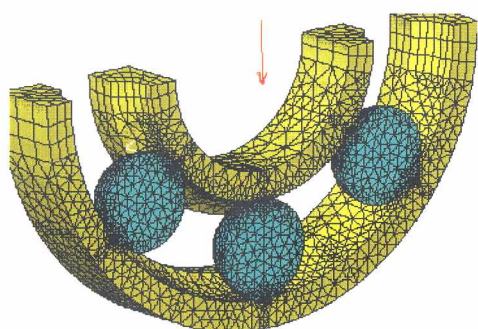


Рис. 3. Конечно-элементная модель подшипника 6-305AE

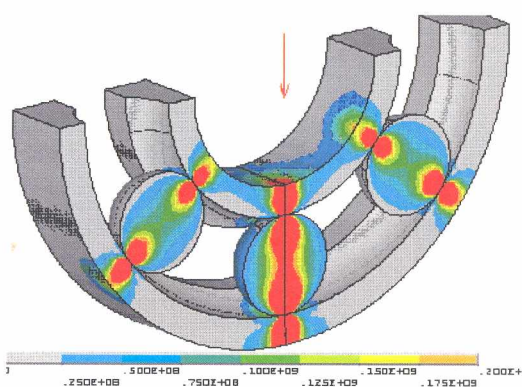


Рис. 4. Поля напряжений (Па) центральных шариков и колец при одинаковых шариках

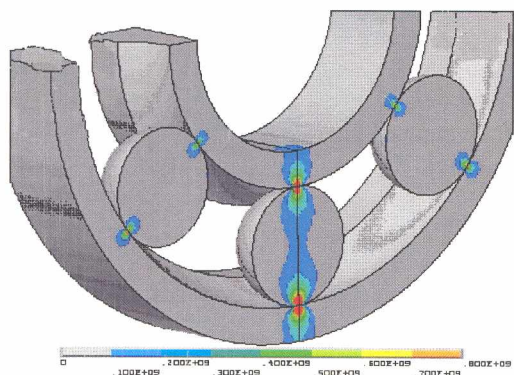


Рис. 5. Поля напряжений (Па) центральных шариков и колец при разноразмерных шариках

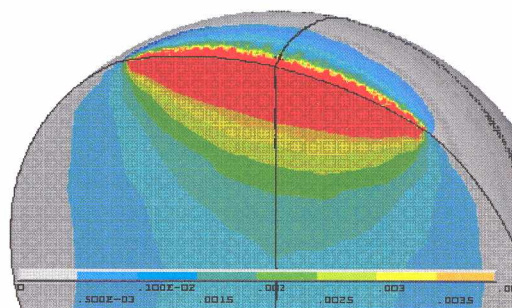


Рис. 6. Поля напряжений (Па) центрального шарика

В результате расчета получены распределения полей напряжения в зоне центральных шариков (рис. 6) и колец подшипника (см. рис. 4, 5) с учетом разноразмерности шариков.

Максимальные эквивалентные напряжения и перемещения для соответствующих условий контакта (см. рис. 4-6) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Максимальные эквивалентные напряжения и перемещения в зависимости от условий контакта

Условия контакта	Максимальные эквивалентные напряжения, $\sigma_{\max}$ , Па	Перемещения $\delta$ , М
Одинаковые шарики	$232 \cdot 10^{10}$	$0,685 \cdot 10^{-4}$
Разноразмерные шарики	$167 \cdot 10^{10}$	$0,437 \cdot 10^{-4}$
Центральный шарик	$134 \cdot 10^{10}$	$0,543 \cdot 10^{-4}$

Полученные результаты показывают, что разноразмерность по диаметру шариков приводит к снижению долговечности подшипника. Это подтверждает необходимость ограничения разноразмерное™ шариков подшипников при селективной сборке. Применение современных программных средств обеспечивает определение характеристик сопротивления усталости деталей подшипника на ранних стадиях проектирования и уменьшает сроки проектирования новых изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование влияния разноразмерности шариков на вибрацию подшипников / А.Т. Скойбеда, Г.А. Достанко, Г.П. Кревко, Д. Эльмессауди // Современные методы проектирования машин: Сб. тр. первой междунар. науч.-техн. конф., Минск. - Мн.: Технопринт, 2002.
2. Скойбеда А.Т., Эльмессауди Д. Влияние разноразмерности шариков подшипников качения на контактную усталость // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Труды междунар. науч.-техн. конф. - Мн.: Технопринт, 2005.
3. Эльмессауди Д. Влияние некоторых конструкционных факторов на распределение нагрузки между телами качения подшипников // Машиностроение: Сб. науч. тр. Вып. 17. - Мн.: Технопринт, 2001.