

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИБОФАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВАЛ/ВКЛАДЫШ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Дембовский И.Н., Богданович А.В.

Белорусский государственный университет, Минск

В силовых системах современных машин и оборудования при их эксплуатации происходят сложные кинетические процессы генерирования и накопления повреждений, в том числе при одновременном воздействии на их элементы внеконтактных (объемных) и контактных нагрузок при трении скольжения. Эти сложные процессы недостаточно исследованы экспериментально, также мало изучено напряженно-деформированное состояние подобных систем.

Для экспериментальной оценки взаимного и совместного влияния процессов трения и механической усталости на работоспособность материалов и моделей силовых систем в сложных условиях нагружения разработаны специальные методы износоусталостных испытаний [1–3].

В лабораторных условиях сопротивление износоусталостным повреждениям (ИУП) изучают, как правило, при испытании малоразмерных моделей силовых систем. Такие испытания проводят на специальных машинах для износоусталостных испытаний. В результате испытаний определяют количественные характеристики сопротивления ИУП. Эти характеристики могут быть использованы:

- при выборе конструкционных материалов для силовых систем и обосновании конструктивно-технологических решений;
- контроле качества материалов;
- расчетах на этапе проектирования силовых систем;
- сертификации силовых систем по критерию ИУП;
- конструировании и создании материалов с заданными физико-механическими свойствами для обеспечения требуемых характеристик сопротивления ИУП.

Один из путей разработки методов комплексных (износоусталостных) испытаний – совмещение известных методов испытания на механическую усталость и методов испытания на трение и изнашивание [1–3]. Принцип такого формирования в том случае, когда базовым методом испытания на усталость принимают изгиб с вращением. Заметим, что вращательное движение наиболее характерно для современных машин, поэтому методы являются практически важными.

Используя подобный подход, достигают той цели, что на машинах, предназначенных для износоусталостных испытаний, можно проводить и обычные испытания либо на механическую усталость, либо на трение и изнашивание в определенных условиях. Испытания на фрикционно-механическую усталость ведут согласно СТБ 1448-2004 [4].

При испытаниях на фрикционно-механическую усталость объектом испытания является трибофатическая система. На рис. 1 представлена схема испытаний на фрикционно-механическую усталость и основные размеры образца и контрообразца, образующих трибофатическую систему [5–7].

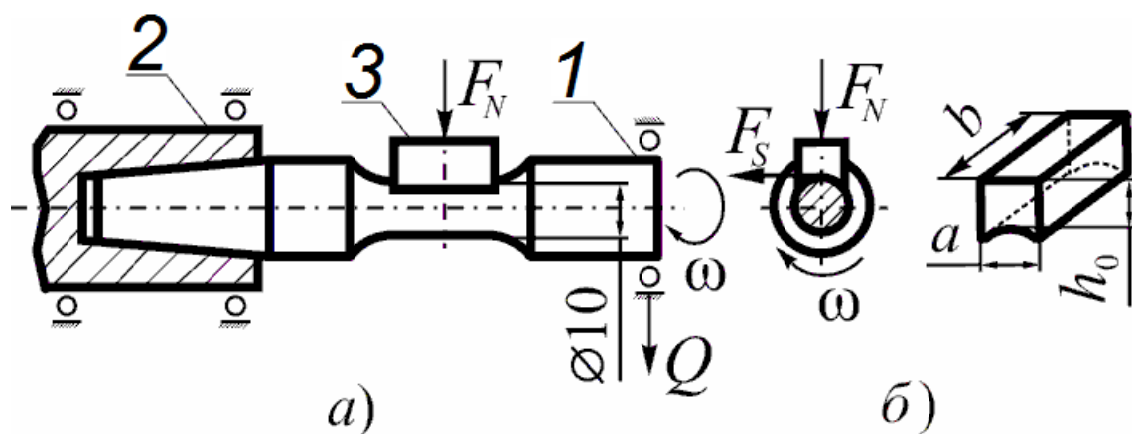


Рис. 1. Схема испытаний на фрикционно-механическую усталость:
 (а): 1 – образец; 2 – шпиндель; 3 – контрообразец (частичный вкладыш);
 (б): a – ширина, b – длина; h_0 – высота

Согласно данной схеме, цилиндрический образец 1 одним концом закреплен в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью ω_1 . На другом его конце приложена вертикальная изгибающая нагрузка Q (направлена вниз). К его рабочей зоне ($d = 10$ мм) прижимается под действием контактной нагрузки F_N закрепленный неподвижно контрообразец 3 (частичный вкладыш). Особенностью проводимых испытаний является то, что в опасном сечении образца возникают напряжения от одновременного действия нагрузок F_N и Q . В результате в трибофатической системе возникает комплексное повреждение – повышение температуры в зоне трения, износ контрообразца, одновременный износ образца и контрообразца, повышение вибрации и температуры в зоне трения (при испытании металл-металлической трибофатической системе) и излом образца.

Для определения характеристик сопротивления фрикционно-механической усталости необходимо построить кривую фрикционно-механической усталости [8–11]. Для построения кривой фрикционно-механической усталости в многоцикловой области строят либо кривую механической усталости по параметру фрикционных напряжений N ($\sigma_a, \tau_w = \text{const}$) (рис. 2, а) – прямой эффект (влияние процессов и условий трения и изнашивания при скольжении (определяемых уровнем τ_w) на изменение характеристик сопротивления механической усталости трибофатической системы и/или ее элементов), либо кривую фрикционной усталости по параметру амплитуды напряжений цикла N ($\tau_w, \sigma_a = \text{const}$) (рис. 2, б) – обратный эффект (влияние повторно-переменных напряжений (деформаций) (определяемых уровнем σ_a) на изменение характеристик трения и изнашивания при скольжении трибофатической системы и/или ее элементов).

Для предварительного определения программ испытания при построении кривой фрикционно-механической усталости можно использовать компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния трибофатической системы.

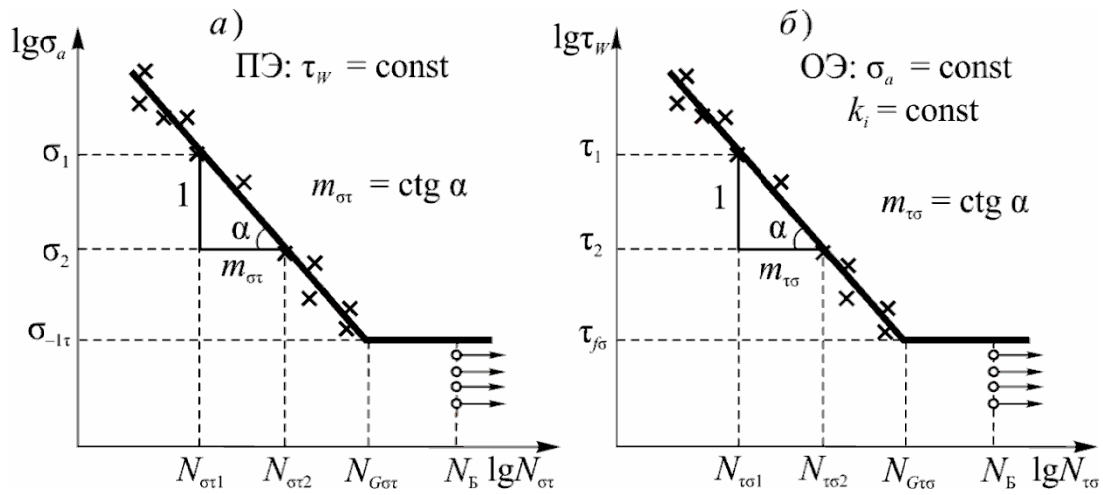


Рис. 2. Схемы кривых фрикционно-механической усталости: прямой эффект (а); обратный эффект (б)

В данной работе использовалась среда Ansys Workbench. Модель образца была выполнена в соответствии с производственным чертежом, в качестве материала использовалась конструкционная сталь с нелинейной моделью поведения. Положение контрообразца было выбрано так, чтобы напряжения возникающие под действием силы трения были в области максимальных изгибных напряжений в теле образца, в качестве материала использовался алюминиевый сплав с нелинейной моделью поведения. Износ при моделировании был задан равным 50 мкм.

Задача решалась в динамической постановке. Телу образца с помощью удаленного перемещения было задано вращение частотой 3000 об/мин. Перемещения образца были ограничены с помощью цилиндрической поддержки. Контактная нагрузка была принята равной 10 Н, а изгибающая нагрузка – 100 Н, она была направлена вверх, вниз или принималась равной нулю (рис. 3). Коэффициент трения был задан равным 0,1. Шаг конечно-элементной сетки в опасном сечении образца и в теле контрообразца был выбран равным 1 мм.

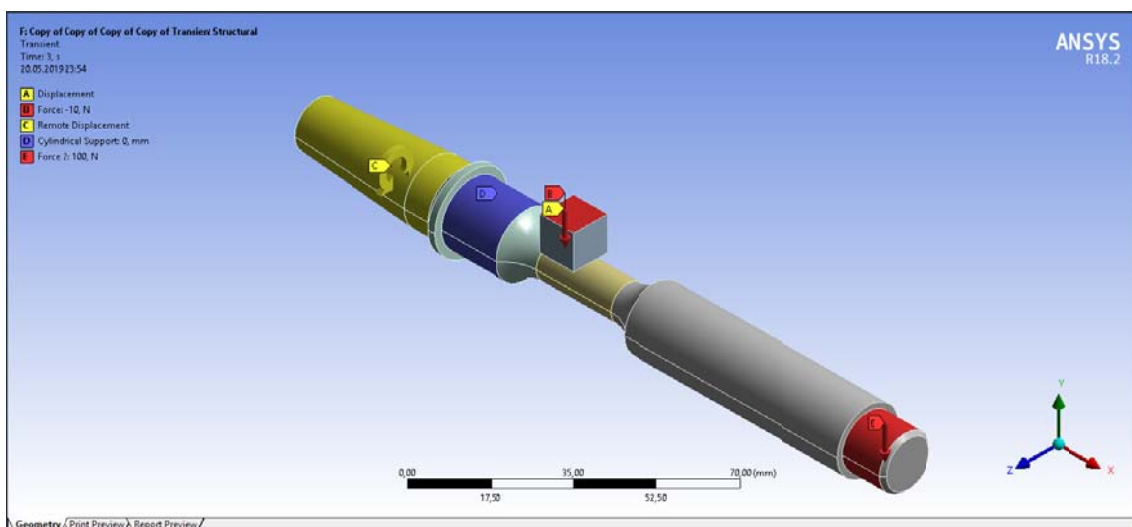


Рис. 3. Схема нагружения и закрепления модели трибофатической системы

По результатам моделирования, напряжения в рабочей части образца при изгибающей нагрузке, направленной вниз, составили около 120 МПа (рис. 4). Прогиб образца в хвостовой части составил 0,51 мм.

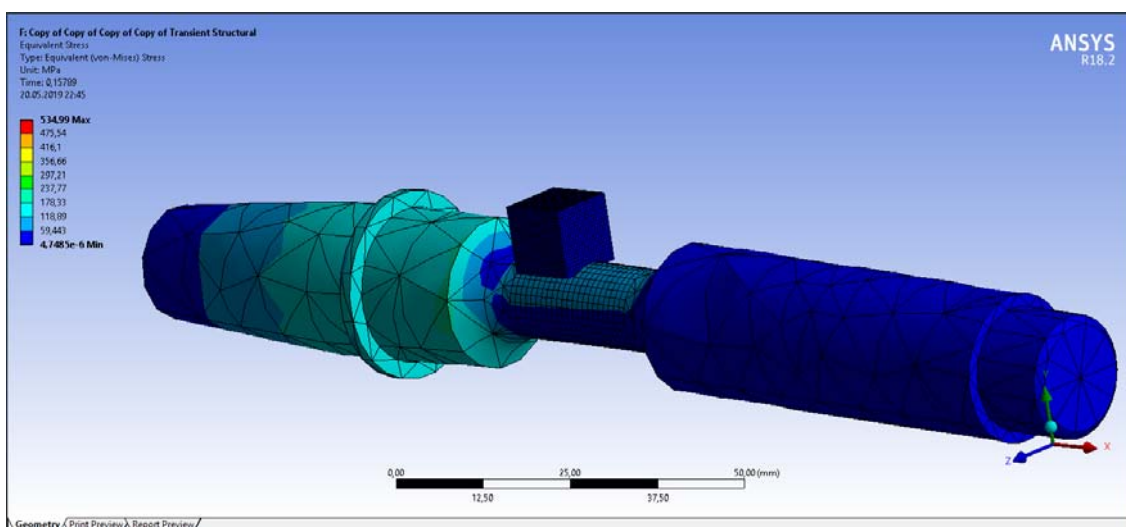


Рис. 4. Результаты моделирования трибофатической системы, изгибающая нагрузка направлена вниз

По результатам моделирования, напряжения в рабочей части образца при изгибающей нагрузке, направленной вверх, составили около 180 МПа (рис. 5). Прогиб образца в хвостовой части составил 0,47 мм.

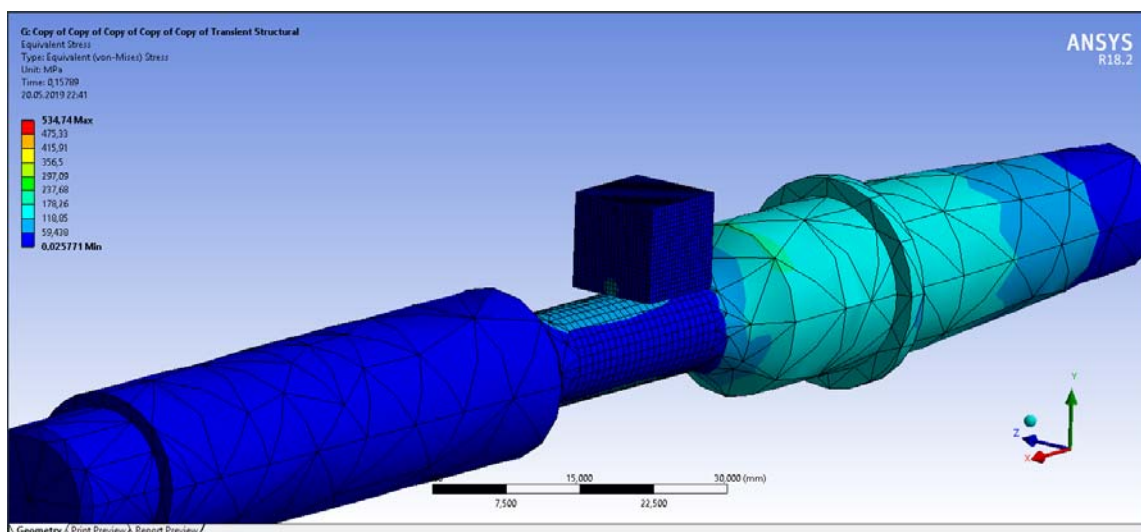


Рис. 5. Результаты моделирования трибофатической системы, изгибающая нагрузка направлена вниз

На рис. 5 хорошо видна локализация напряжений в теле контробразца, связанная с прогибом образца вверх, именно в этой области и были достигнуты напряжения в 180 МПа. Таким образом, такая схема является более опасной.

Так же было проведено моделирование данной трибофатической системы при изгибающей нагрузке равной нулю (фрикционная усталость). Результаты моделирования представлены на рис. 6.

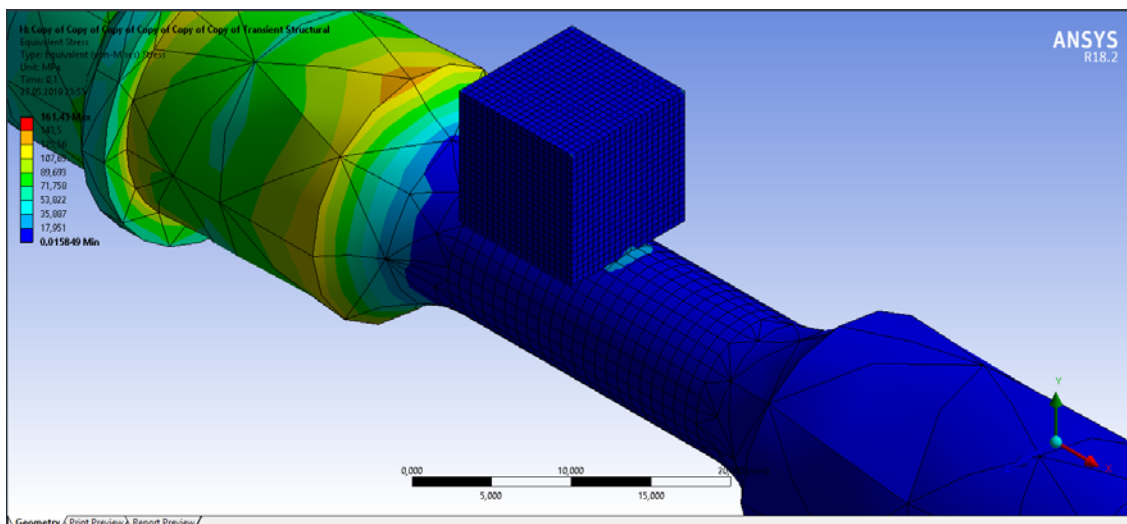


Рис. 60 Результаты моделирования трибофатической системы, изгибающая нагрузка равна нулю

Данную модель можно использовать для предварительной оценки напряженно-деформированного состояния системы вал-вкладыш при испытаниях на фрикционную и фрикционно-механическую усталость, однако для ускорения и уточнения расчетов имеет смысл использовать упрощенную модель, имеющую цилиндрическую часть вместо конусной с упорным выступом, необходимым для крепления образца. В таком случае так же удастся избежать высоких напряжений, возникших вблизи упорного кольца, по сути являющегося концентратором напряжений, которых не возникает в реальных условиях благодаря особенностям крепления образца в испытательном центре.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Methods and Main Results of Tribo-Fatigue Tests / L.A. Sosnovskiy [et al.] // International Journal of Fatigue. – 2014. – V. 66. – P. 207–219.*
2. *Методы износоусталостных испытаний и их реализация на машине СИ / Н.А. Махутов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1995. – № 6. – С. 17–42.*
3. *Сосновский, Л.А. Экспериментальные основания трибофатиги. Сообщения 1–3 / Л.А. Сосновский // Проблемы прочности. –1997. – № 3. – С. 74–82. –№ 4. – С. 17–29.*
4. *Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость (Стандарт Беларуси). СТБ 1233-2000. – Минск : Госстандарт, 2000. – 16 с.*
5. *Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.*
6. *Износоусталостные повреждения и их прогнозирование (трибофатика). Науч. редактор Сосновский Л.А. / Л.А. Сосновский [и др.]– Гомель, Киев, Москва, Ухань, 2001. – 170 с.*
7. *Щербаков, С.С. Механика трибофатических систем / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. – Минск: БГУ, 2010. – 407 с.*
8. *Сосновский, Л.А. Методы износоусталостных испытаний силовых систем и их моделей / Л.А. Сосновский // Трение и износ. – 1993. – № 5. – С. 937– 952.*

9. *Высоцкий, М.С. Трибофатика – новые пути для повышения надежности машин / М.С. Высоцкий [и др.] // Весці АНБ. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 1994. – № 4. – С. 32– 41.*

10. *Трибофатика-95 : ежегодник / под общ. ред. Л.А. Сосновского // Вып. 1 : Машины серии СИ для износоусталостных испытаний / под ред. М.С. Высоцкого / Ф.Ю. Белиц [и др.]. – Гомель : НПО «ТРИБОФАТИКА», 1996. – 80 с.*

11. *Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования (Стандарт Беларуси) : СТБ 1067–97. – Введ. 01.01.1998. – Мн.: ГОССТАНДАРТ, 1997. – 10 с.*