

## НОВЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛЕЙ СИЛОВЫХ СИСТЕМ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Объединенный институт машиностроения НАНБ

Минск, Беларусь

РУП «Гомельтранснефть Дружба»

Гомель, Беларусь

РУП «Гомельский завод сельскохозяйственного машиностроения «Гомсельмаш»

Гомель, Беларусь

Белорусский государственный университет транспорта

Гомель, Беларусь

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 [1–8].

В результате таких испытаний определяют количественные характеристики сопротивления износоусталостным повреждениям. Эти характеристики могут быть использованы:

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

Один из путей разработки методов комплексных (износоусталостных) испытаний – совмещение известных методов испытания на механическую усталость и методов испытания на трение и изнашивание. На рисунке 1 в качестве примера показан 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, представленные на рисунке 1, 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.

Основная концепция разработки методов износоусталостных испытаний состоит в том, что все они построены на базе единого типоразмера основного элемента силовой систе-



Рисунок 1 – Формирование методов износоусталостных испытаний при главном вращательном движении: КМУ – контактно-механическая усталость; ФМУ – фрикционно-механическая усталость; ФУ – фреттинг-усталость

мы – вала (диаметром 10 мм). Это позволяет корректно сравнивать и анализировать результаты любых испытаний.

К настоящему времени типичные методы износоусталостных испытаний доведены до стандартного уровня (ГОСТ 30754–2001, СТБ 1233–2000, СТБ 1448–2004).

Рассмотрим основные методы износоусталостных испытаний применительно к конкретным силовым системам современных машин и оборудования.

**Метод испытания моделей зубчатых зацеплений.** На рисунке 2 показан оригинальный метод совмещенных испытаний материалов для зубчатых колес. Метод позволяет получить кривые изгибной и контактной усталости в процессе испытаний модели зубчатого зацепления при действии только контактной нагрузки – как в натуральных условиях.

Особенность модели состоит в том, что цилиндрический образец 1, изготовленный из материала зубчатого колеса, представляет собой консоль, на свободном конце которой сформирована зона контактного взаимодействия с роликом 2. С другой стороны формируется зона изгиба в виде галтели (радиусом  $r$ ), соответствующей переходной кривой у основания зуба. Образец-модель 1, закрепленный в шпинделе 3, вращается с угловой скоростью  $\omega_1$ , а ролик 2 – с заданной скоростью  $\omega_2$ . Путем регулирования скоростей  $\omega_1$  и  $\omega_2$  можно получить требуемый коэффициент проскальзывания, имитируя скольжение в зубчатой передаче. Сила  $F_N$ , приложенная на плече  $L$ , обеспечивает одновременное возбуждение как контактных, так и изгибных напряжений в соответствующих зонах, а расстояние между этими зонами выбирают соответственно расстоянию между полюсом зацепления и основанием зуба.

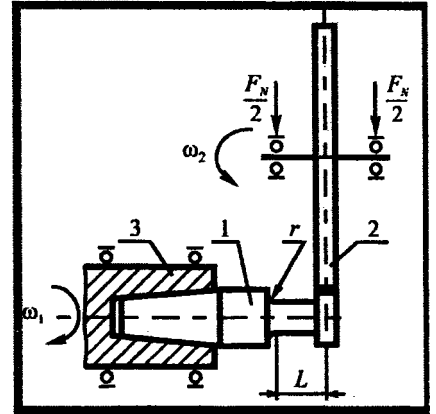


Рисунок 2 – Схема испытаний модели зубчатого зацепления

Пример реализации данного метода испытаний показан на рисунке 3. Были проведены совмещенные испытания моделей зубчатого зацепления, изготовленных из стали 18ХГТ. Упрочнение поверхностного слоя образцов и роликов проведено по технологии натурной детали – цементация (на глубину  $h = 0,4 \dots 0,8$  мм) с закалкой до твердости 54 ... 64 HRC<sub>3</sub>. Рабочие поверхности образцов ( $d = 10$  мм) и роликов ( $d = 100$  мм) шлифовали.

Испытания проводили при частоте 3000 мин<sup>-1</sup> в условиях нормальной температуры. При испытаниях в зону контакта капельным способом подавали смазочный материал (редукторное масло ТАД-17).

Испытания вели непрерывно до наступления предельного состояния или до базового числа циклов.

Сначала при более высоких нагрузках реализуется изгибная усталость. Критерием предельного состояния являлось разрушение образца (разделение его на две части в результате развития в опасном сечении поперечной магистральной трещины). База испытаний – 10<sup>7</sup> циклов. По результатам испытаний построена кривая изгибной усталости с абсциссой точки перелома порядка 2 · 10<sup>6</sup> циклов, и определена предельная нагрузка по критерию изгибной усталости  $F_G = 1900$  Н (см. рисунок 3), соответствующая пределу выносливости  $\sigma_{-1} = 570$  МПа.

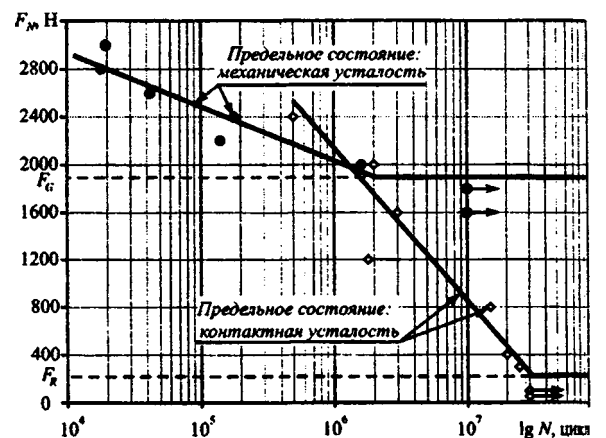


Рисунок 3 – Результаты испытания моделей зубчатого зацепления из стали 18ХГТ

Затем, при более низких нагрузках, реализуется контактная усталость. Критерием предельного состояния являлось предельное сближение осей в силовой системе ( $\delta_c = 100 \text{ мкм}$ ). База испытаний –  $3 \cdot 10^7$  циклов. По результатам испытаний построена кривая контактной усталости и определена предельная нагрузка  $F_R = 200 \text{ Н}$  (см. рисунок 3), соответствующая пределу контактной усталости  $p_f = 3100 \text{ МПа}$ .

**Метод испытания моделей системы труба/поток нефти.** На рисунке 4 приведена схема оригинального способа испытаний, который в известной мере имитирует работу системы труба / поток жидкости (под давлением).

Особенность контактного взаимодействия образца 1 и контробразца 2 состоит в том, что диаметр контактной поверхности контробразца вдвое превышает диаметр образца. Поэтому контакт осуществляется по узкой полоске, а между образцом и контробразцом реализуется конструктивный клин, в который затягивается жидкость при вращении образца. Если контакт между образцом и контробразцом будет чисто жидкостным, то контробразец исполняет лишь роль устройства для создания рабочего давления на площадке контакта твердого тела с жидкостью; последняя организуется в зоне растяжения изгибаемого образца. Непрерывное движение жидкости через конструктивный клин и площадку контакта обуславливает либо гидрозрозию (если среда слабо агрессивна), либо коррозионную эрозию (если среда агрессивна по отношению к металлу образца). Таким образом, предложенный метод испытаний имитирует, например, все основные условия работы внутренних поверхностей труб линейного участка нефтепровода.

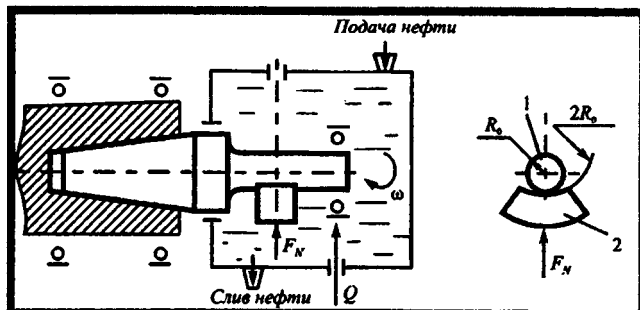


Рисунок 4 – Схема испытаний на коррозионно-эрозионную усталость

С применением разработанного метода проведены испытания на коррозионно-эрозионную усталость в среде нефти двух серий образцов низколегированной трубной стали; в качестве контробразцов использовали полимер. Образцы одной серии имели обычную феррито-перлитную структуру; структурные составляющие характеризуются следующими значениями микротвердости: перлит – 200...210 HV, феррит – 170...180 HV. Микроструктура другой серии образцов имела особенность: в зернах перлита (средняя микротвердость 200...210 HV) обнаруживаются включения, которые имеют аномально высокую твердость (360...380 HV). Методами дефектоскопического контроля было установлено, что в стали с такой микроструктурой возникают магнитные аномалии. Поэтому цель испытаний состояла в том, чтобы оценить роль микроструктурного состояния стали на изменение ее сопротивления коррозионно-эрозионной усталости.

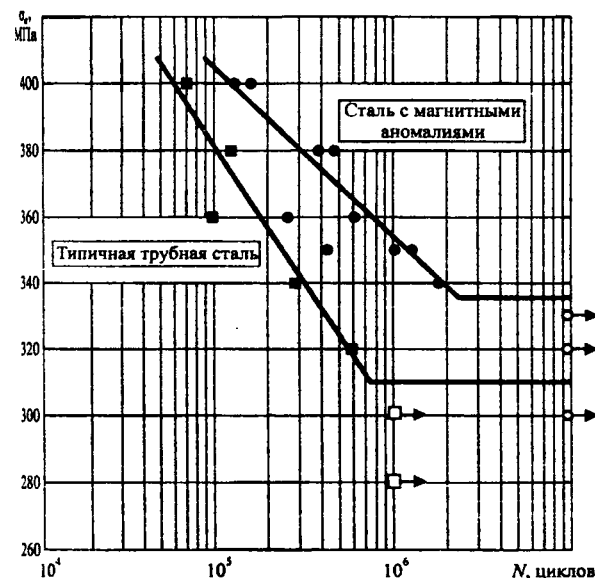


Рисунок 5 – Сравнение кривых коррозионно-эрозионной усталости типичной трубной стали и трубной стали с магнитными аномалиями

Видно, что предел выносливости стали с магнитными аномалиями примерно на 8 % выше, чем обычной стали. Это означает, что имеется известная перспектива повышения

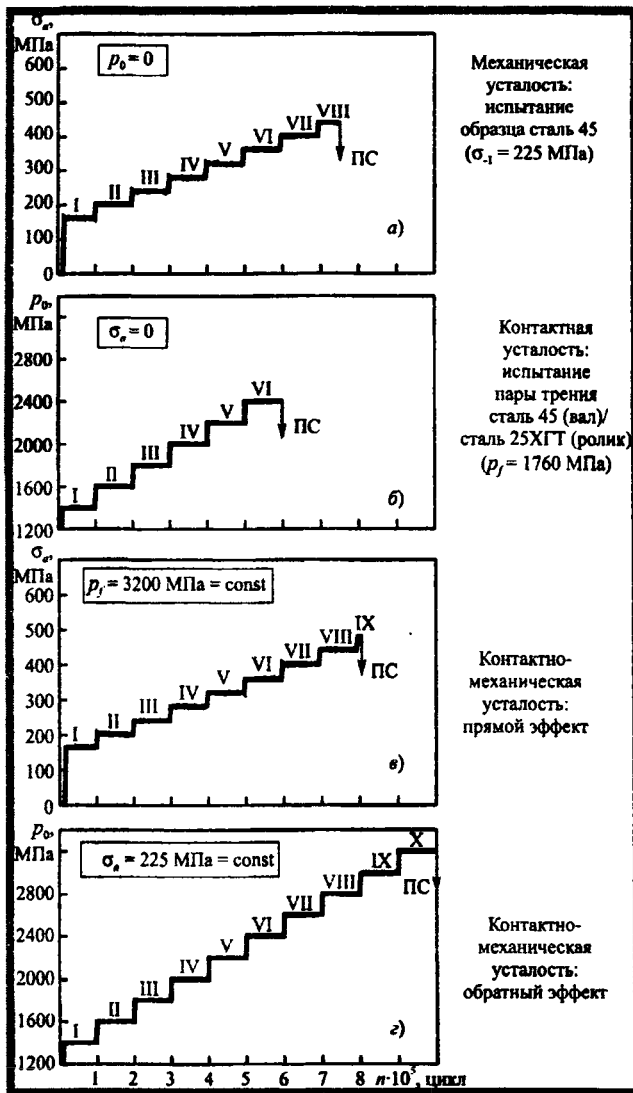


Рисунок 6 – Результаты испытаний объектов методом многоступенчатого нагружения (ПС – предельное состояние по соответствующему признаку)

важной особенностью: в этом случае контактная нагрузка является одновременно и изгибающей – как в условиях эксплуатации. Условия испытаний таких моделей позволяют в лабораторных условиях воспроизвести:

- различные виды поверхностного контактно-усталостного повреждения (износ, остаточная деформация, микротрещины, ямки выкрашивания и т. п.);
- объемное разрушение путем развития поперечной магистральной усталостной трещины (в том числе и с той особенностью, что очаг трещины обнаруживается под поверхностью качения).

На рисунке 8 дан один из результатов испытаний. Получено характерное повреждение – остаточная деформация и износ на дорожке катания; на этой дорожке обнаруживаются ямки выкрашивания – подобно

сопротивления трубной стали коррозионно-эрозионной усталости путем упрочнения литной фазы.

**Метод многоступенчатого нагружения.** Этот метод широко используют для ускоренной оценки основной характеристики сопротивления усталости металлических материалов – предела выносливости. Мы используем этот метод для того, чтобы получить комплекс специфических характеристик износоусталостного повреждения.

На рисунке 6 приведены результаты сравнительных испытаний образца стали 45 на механическую усталость, пары трения сталь 45 (вал) / сталь 25ХГТ (ролик) – на контактную усталость и аналогичной силовой системы сталь 45 (вал)/сталь 25ХГТ (ролик) – на контактно-механическую усталость в условиях прямого и обратного эффектов. Одного взгляда на рисунок 6 достаточно, чтобы увидеть: сопротивление износоусталостному повреждению и разрушению сравниваемых объектов существенно различно – по уровню предельных напряжений, по долговечности (суммарному числу циклов нагружения до наступления предельного состояния) и, наконец, по числу ступеней нагружения, которое может выдержать данный объект до перехода к предельному состоянию.

**Метод испытания моделей системы колесо/рельс.** На рисунке 7 показана схема испытаний системы ролик/кольцо, которая имитирует работу системы колесо/рельс в зоне качения с

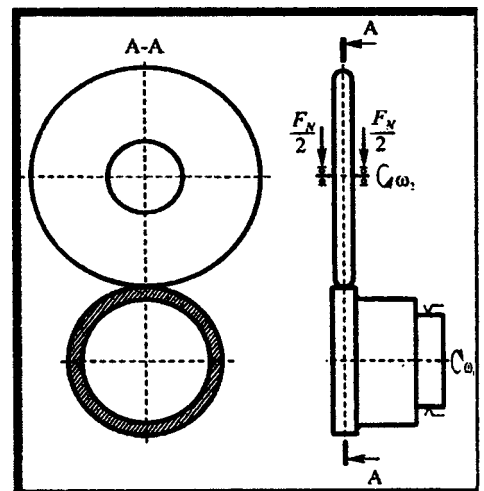


Рисунок 7 – Конструктивная схема модели системы колесо/рельс: система ролик/кольцо

тому, как это бывает при эксплуатации рельсов.

К настоящему времени разработаны и введены в действие следующие государственные стандарты, регламентирующие методы определения характеристик износоусталостного повреждения:

- ГОСТ 30638–99. Трибофатика. Термины и определения.
- ГОСТ 30754–2001. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость.
- СТБ 1233–2000. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость.
- СТБ 1448–2004. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на фрикционно-механическую усталость.

Испытания моделей деталей и узлов можно вести на универсальном испытательном оборудовании – автоматизированных машинах серии СИ, основные технические параметры которых регламентированы требованиями стандарта. Это резко снижает затраты и расширяет возможности испытаний по количеству испытываемых объектов. Результат – повышение точности оценки служебных свойств объектов.

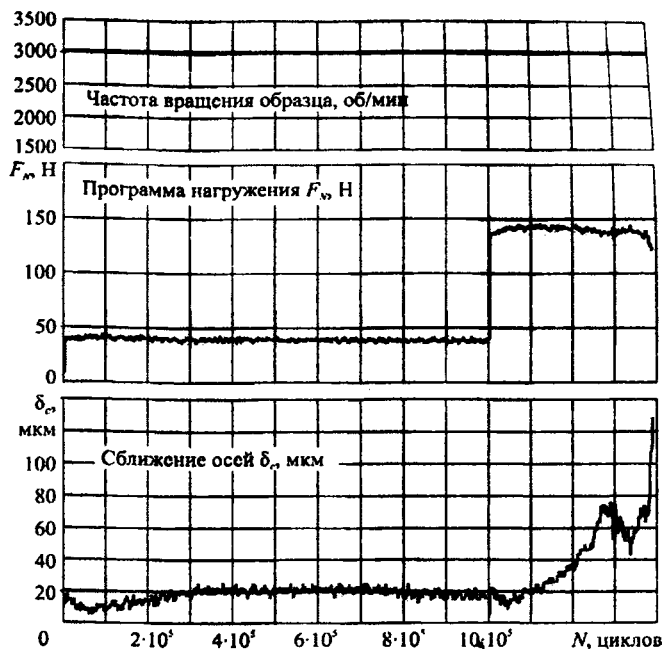


Рисунок 8 – Протокол испытаний системы ролик/кольцо

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сосновский, Л. А. Основы трибофатики / Л. А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2003. – Т. 1. – 246 с.; Т. 2. – 234 с. 2. Трибофатика: библиографический указатель (1985–2005) / Сост. С. А. Тюрин // Материалы V Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2005) / под ред. А. П. Хоменко. – Иркутск-Братск, 2005. – С. 69–116. 3. Фролов, К. В. Новые машины и методы испытаний / К. В. Фролов, Н. А. Махутов // Заводская лаборатория. – 1995. – № 5. – С. 32–33. 4. Сосновский, Л. А. Методы износоусталостных испытаний материалов / Л. А. Сосновский // Заводская лаборатория. – 1990. – № 6. – С. 90–95. 5. Махутов, Н. А. Методы износоусталостных испытаний и их реализация на машине СИ / Н. А. Махутов [и др.] // Заводская лаборатория. – 1995. – № 6. – С. 17–42. 6. Красневский, Л. Г. Оригинальные методы и технологии испытаний моделей компонентов общетехнического применения / Л. Г. Красневский, В. И. Сенько, В. А. Андрияшин, С. А. Тюрин // Тр. V Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2005), 3–7 октября 2005 г., Иркутск (Россия) / отв. ред. А. П. Хоменко. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2005. – Т. 1. – С. 178–203. 7. Жмайлик, В. А. Концепция испытаний сельскохозяйственных машин / В. А. Жмайлик // Тр. V Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2005), 3–7 октября 2005 г., Иркутск (Россия) / отв. ред. А. П. Хоменко. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2005. – Т. 1. – С. 234–246. 8. Плескачевский, Ю. М. Современные методы комплексных износоусталостных испытаний / Ю. М. Плескачевский, Н. А. Махутов, Л. А. Сосновский, Ю. Н. Дроздов, М. М. Гаденин, А. В. Богданович, С. А. Тюрин, В. В. Воробьев // Современные методы проектирования машин: сб. науч. тр. Вып. 2. В 7 т. / под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск: УП "Технопринт", 2004. – Т. 1. – С. 33–47.