

но эксплуатируемых труб имеют «рваную» структуру. Прочность сварного продольного шва оказалась выше, чем прочность металла в зоне локального пятна язвенной коррозии, даже несмотря на то, что сварной шов имеет значительный коэффициент концентрации напряжений, допустимые внутренние (неплошности) дефекты.

Внутренняя поверхность основного металла трубы подвержена равномерной коррозии, а в зоне разрушения (рисунок 6) – язвенной коррозии. Повсеместно на внутренней поверхности трубы присутствуют пластовые отложения, состоящие из продуктов коррозии металла трубы взаимодействующего со средой. Глубина равномерной коррозии основного металла незначительна (составляет не более 0,5 мм за весь период эксплуатации). В зоне язвенной коррозии максимальная измеренная глубина язв, канавок ножевой коррозии относительно внутренней поверхности оставила 5,2 мм, а минимальная толщина остаточного металла – 4,3 мм.

Основное заключение, которое следует из результатов испытаний, состоит в том, что для труб, период эксплуатации которых превышает срок амортизации, возможно изменение критерия предельного состояния: оно достигается не в зоне сварных швов, а в области протяженного коррозионного повреждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бордовский А.М., Воробьев В.В., Сосновский Л.А. Прочностная надежность линейной части нефтепроводов. – Гомель: НПО ТРИБОФАТИКА, 2004. - 114 с. 2. Коррозионное разрушение поверхностей магистральных труб нефтепровода после длительной эксплуатации / Андрияшин В.А., Костюченко А.А., Комаров А.И., Воробьев В.В. // Защита металлов. № 1. - Т. 421.– 2006. – С. 52-56

УДК 539.538

Махутов Н. А., Сосновский Л. А.

ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

*ИМАШ РАН им. А. А. Благонравова Москва, Россия
ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» Гомель, Беларусь*

В наиболее ответственных и массовых – силовых системах машин и оборудования развивается комплексное – износоусталостное повреждение [1–3]. В таблице 1 дана классификация таких повреждений, а на рисунке 1 показан конкретный пример анализа работоспособности одной из них.

Таблица 1 – Типичные силовые системы и их комплексное повреждение

Типичная силовая система	Комплексное повреждение и разрушение	Определение	Зона реализации в системе колесо / рельс
Шейка коленчатого вала / шатунная головка с подшипником скольжения	Фрикционно-механическая усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и трения скольжения	В зоне взаимодействия гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса
Колесо / железнодорожный рельс	Контактно-механическая усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и трения качения (трения качения с проскальзыванием)	В зоне взаимодействия колеса с головкой рельса на дорожке качения

Окончание таблицы 1			
Шлицевой вал / втулка	Фреттинг-усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и фреттинга	В зоне взаимодействия подошвы рельса с подрельсовым основанием
Вал гребного винта / морская вода	Коррозионно-механическая усталость	Усталость материала при одновременном воздействии повторно-переменных напряжений и коррозионной среды	В зонах взаимодействия с окружающей средой (атмосфера, гидросфера, геосфера)
Лопатки турбины / поток жидкости или газа, несущий твердые частицы	Эрозионно-механическая усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и эрозии	
Труба / поток под давлением	Коррозионно-эрозионная усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений коррозии и эрозии	

К началу нашего века сложились два различных подхода к оценке работоспособности системы колесо / рельс. Согласно традиционной точке зрения, колесо / рельс – механическая система (рисунок 1, а). Прочности рассматривают железнодорожный рельс как балку, которая работает на усталость при действии пространственной системы сил. Естественно, что эксплуатационная надежность (долговечность) рельса оценивается ими по специфическому критерию – усталостному разрушению (F – от франц. *Fatigue* – усталость). В таком случае схема расчета сопротивления усталости рельса как элемента конструкции имеет, в первом приближении, вид

$$\sigma \rightarrow N(\sigma) \underset{\sigma_{-1}}{>} F(\sigma, \sigma_{-1}, N_{\sigma}), \quad (1)$$

где σ – циклические напряжения, $N(\sigma) = N_{\sigma}$ – усталостная долговечность, σ_{-1} – предел выносливости.

А трибологи представляют рельс как одну из деталей узла трения (колесо / рельс). Естественно, что эксплуатационная надежность (долговечность) рельса оценивается ими по другому специфическому критерию – износу (T – от греч. *Tribology* – трибология). В этом случае схема расчета износостойкости рельса как одного из тел пары трения имеет, в первом приближении, вид

$$p \rightarrow N(p) \rightarrow I(p) \underset{p_f}{>} F(p, p_f, N_p, I_p), \quad (2)$$

где p – контактное давление, $N(p) = N_p$ – долговечность по критерию износостойкости, p_f – предельное контактное давление (предел контактной усталости), $I(p) = I_p$ – интенсивность изнашивания при действии p .

И ясно, что оценки (1) и (2) существенно различны для одного и того же рельса.

С позиций же трибофатики (ТФ) еще яснее: ни одна из этих оценок не может быть верной, поскольку в действительности рельс – один из элементов *силовой системы* (рисунок 1, б) и для него характерно *комплексное – износоусталостное повреждение и разрушение*. И тогда схема расчета сопротивления комплексному повреждению и разрушению имеет, в первом приближении, вид

$$(\sigma, p) \rightarrow N(\sigma, p) \rightarrow I(\sigma, p) \begin{matrix} \sigma_{-1}(p) \\ p_f(\sigma) \end{matrix} \rightarrow F\left[\left[\sigma, p, \sigma_{-1p}, p_{f\sigma}, N(\sigma, p), I(\sigma, p)\right]\right], \quad (3)$$

где $\sigma_{-1}(p) = \sigma_{-1p}$ – предел выносливости, определяемый с учетом влияния контактного давления p ; $p_f(\sigma) = p_{f\sigma}$ – предел контактной усталости, определяемый с учетом влияния циклических напряжений σ ; $N(\sigma, p)$, $I(\sigma, p)$ – долговечность и интенсивность изнашивания, обусловленные одновременным действием σ и p .

Трибофатика создавалась на базе нескольких фундаментальных дисциплин (рисунок 2). С одной стороны, теории трения, изнашивания, смазки были объединены в единую научную дисциплину – трибологию (Т). Это естественно, потому что в парах трения реально сочетаются и взаимодействуют процессы трения и изнашивания, в том числе и со смазкой.

С другой стороны, среди общих проблем динамики, прочности и устойчивости вычленилась механика усталостного разрушения (F) как дисциплина, имеющая особое практическое значение для современного машиностроения. Чтобы эффективно решать комплексные задачи надежности (R) наиболее ответственных – силовых систем машин и оборудования по важнейшим критериям работоспособности, потребовалось создать трибофатику (TF).

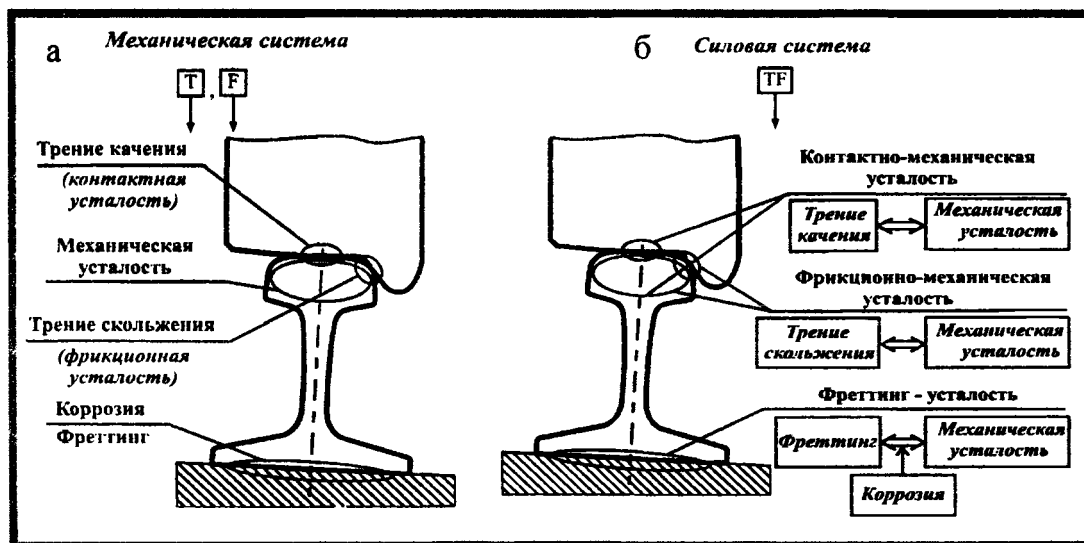


Рисунок 1 – Традиционный (а) и новый (б) подход к анализу работы системы колесо / рельс

Таким образом, трибофатика – это наука о комплексном – износоусталостном повреждении и разрушении силовых систем (ГОСТ 30638–99). Поскольку речь идет о механике износоусталостного повреждения, то термин «трибофатика» вполне, хотя и очень кратко, отражает ее содержание: от греч. *tribos* – трение, что символизирует современную трибологию, в том числе и трибологическую надежность; от франц. *fatigue* – усталость, что символизирует современную механику усталостного разрушения, в том числе и прочностную надежность. Как видно, термин «трибофатика» состоит из двух слов (понятий), которые совершенно равноправны. Если же говорить о физико-механических процессах, определяемых указанными понятиями, то следует принять во внимание их диалектическое взаимодействие и взаимовлияние: трение (и изнашивание) \leftrightarrow усталость = трибофатика (*friction (and wear) \leftrightarrow fatigue = tribo-fatigue*). Поскольку трибофатика – это новый раздел механики, ее можно определить и как механику силовых систем.

В таблице 2 дан сравнительный анализ методов исследования и расчета объектов, вучаемых в трибологии, механике усталостного разрушения и трибофатике.

Обратимся сначала к экспериментальным методам

Таблица 2 – Методы исследования объектов

Дисциплина	Объект для изучения	Основные методы исследования		Масштаб повреждения
		экспериментальные	теоретические	
Т (трибология)	Пара трения	Испытания на трение	Механика контактного взаимодействия	Поверхностное повреждение (износ, питтинг и др.)
F (механика усталостного разрушения)	Элемент конструкции	Испытания на усталость	Механика деформирования и разрушения	Объемное (усталостное) разрушение
TF (трибофатика)	Силовая система	Износоусталостные испытания	Механика износоусталостного повреждения	Комплексное поверхностное повреждение и объемное разрушение

Специалисты по механике усталостного разрушения разрабатывают и применяют методы и машины для испытания элементов конструкций в различных условиях циклического нагружения. Трибологи разрабатывают и применяют методы и машины для испытания пар трения в различных условиях контактного взаимодействия. А специалисты по трибофатике создают методы и машины для комплексных – износоусталостных испытаний моделей силовых систем. А разница вот в чем. На машинах трения нельзя изучать сопротивление усталости элементов конструкций. На машинах для усталостных испытаний нельзя изучать процессы трения и изнашивания. А на машинах для износоусталостных испытаний (серии СИ) можно и должно изучать и то, и другое, но – и это главное – можно проводить комплексные испытания при любых сочетаниях циклических и контактных нагрузок, действующих одновременно. Естественно, что это позволяет получать принципиально новые экспериментальные результаты.

Обратимся теперь к методам теоретических исследований (см. таблицу 2). Теория, как известно, опирается на опыт. Вот почему трибологи, исходя из своего опыта, прежде всего разрабатывают механику контактного взаимодействия. А прочнисты, исходя из своего опыта, разрабатывают механику деформирования и разрушения. Специалисты по трибофатике, конечно, используют и то, и другое – к тому же в неразрывном единстве. Но, имея более сложный объект для изучения,

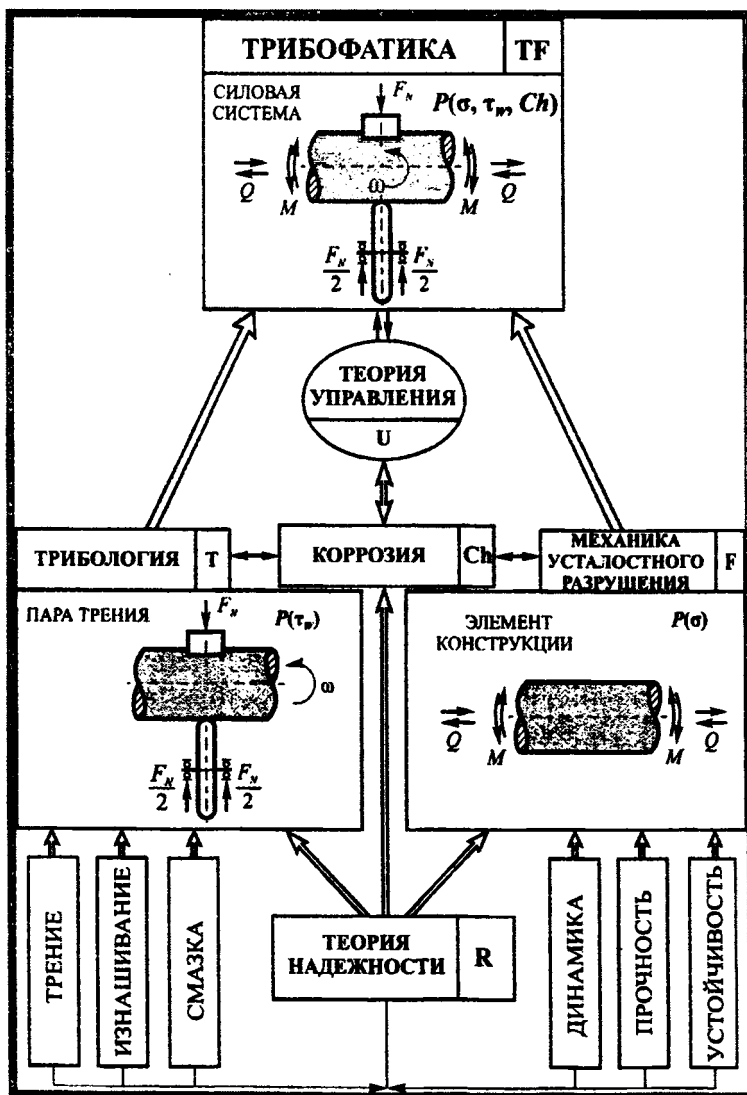


Рисунок 2 – Трибофатика как комплексная научная дисциплина

им приходится искать и новые подходы к исследованию комплексных явлений.

Контактные задачи составляют отдельное и широкое направление исследований в механике деформируемого твердого тела и в трибологии. В трибофатике развивается нетрадиционный подход к постановке и решению контактных задач [3–6], поскольку требуется их приложение к специфическим объектам – силовым системам машин и оборудования.

Классификация контактных задач для случая, когда контактная нагрузка F_N является одновременно и изгибающей, дана на рисунке 3. Традиционно решается лишь тип задач А. Типы задач В и С требуют учета объемного деформирования одного либо обоих тел, находящихся в силовом контакте. При этом тела могут представлять собой и «сэндвичи», т. е. состоять из двух и более слоев (толщиной h' и т. д.), материал которых отличается физико-механическими свойствами. Заметим, что при контакте тел вращения элементы могут иметь как положительную, так и отрицательную кривизну, и реализуются основные типы площадки реального контакта (полоска, круг, эллипс).

Статический контакт			
Элемент 1: $R_{11} > 0$ $R_{12} > 0$			
Элемент 2: $R_{21} > 0$ $R_{22} > 0$			
Тип контакта	А	В	С
Подвижный контакт			
Элемент 1:			
Элемент 2: $R_{21} > 0$ $R_{22} > 0$			
Тип контакта	А	В	С

Рисунок 3 – Классификация контактных задач для тел вращения по двум признакам: характеру нагружения и условиям деформации

Более простой является задача построения *механико-математической модели* [3]

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(F_N, Q_m), \quad (5)$$

являющейся частным случаем (4); предложен [1] простейший способ учета коррозионно-химических воздействий (D_{ch}). Что касается функции (4), то, конечно, возникает принципиальное сомнение о возможности (и, пожалуй, целесообразности) учета «сил» F_A и D_{ch} при расчете напряжений в рамках теории упругости. До его разрешения несомненный практический интерес представляет *термомеханическая модель*

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(F_N, Q_m, T_\Sigma). \quad (6)$$

Более общим является случай расчета силовой системы при раздельном действии контактных (F_N) и внеконтактных (M, M_s, Q) нагрузок (рисунок 4).

Таким образом, развитие трибофатики привело к тому, что *механика контактного взаимодействия* получила новый класс задач; это – *задачи Сосновского*. В более общем плане такие задачи ведут к построению *нового подхода к оценке напряжений в точке* [3].

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(F_N, Q_m, T_\Sigma, F_A, D_{ch}), \quad (4)$$

которые рассматриваются как функция контактной (F_N) и любого комплекса внеконтактных (Q_m) нагрузок; температуры (T_Σ), обусловленной всеми источниками тепла; атомно-молекулярных сил взаимодействия (F_A) на площадке контакта; электрохимических воздействий (D_{ch}).

По нашему мнению, не видно непреодолимых трудностей для ее строения на базе современного знания – в рамках нового раздела теории упругости.

На основании большого комплекса теоретических экспериментальных исследований [1-3] было установлено, что в зависимости от условий нагружения:

(1) процессы трения и изнашивания могут не только снижать, но и существенно повышать сопротивление усталости (прямой эффект);

(2) циклические напряжения, обусловленные внеконтактной нагрузкой, способы управлять износостойкостью системы – повышать либо снижать интенсивность изнашивания, коэффициент трения, долговечность (обратный эффект) – примерно в такой же степени, как и контактная нагрузка;

(3) развитие локальных износоусталостных повреждений обуславливает возникновение виброударного процесса (явление троппи), т. е. резкое снижение долговечности системы.

Очевидно, что неучет описанных эффектов при расчете и проектировании силовых систем ведет к неверной оценке их эксплуатационной надежности.

По нашему мнению, развитие и внедрение нового подхода к анализу динамики, прочности и износостойкости в их органической взаимосвязи практически ведет к обеспечению требуемой надежности наиболее ответственных – силовых систем современных машин и оборудования. В этой связи представляется весьма полезным и своевременным многолетний опыт [7, 8] преподавания учебного курса «Основы трибофатики» в техническом университете. Распространение этого опыта способствовало бы повышению качества подготовки будущих инженеров-механиков.

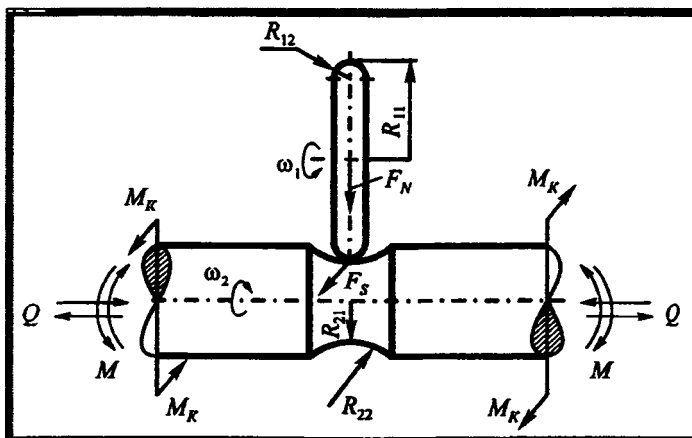


Рисунок 4 – Расчетная схема силовой системы при действии контактной (F_N) и внеконтактных (M , M_K , Q) нагрузок

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Сосновский Л. А. Основы трибофатики. – Гомель: БелГУТ, 2003. – Т.1. – 246 с., – Т.2. – 234 с. 2 Сосновский Л.А., Махутов Н. А. Трибофатика: износоусталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности машин. – Москва-Гомель: ФЦНТП "Безопасность"-НПО "ТРИБОФАТИКА", 2000. – 304 с. 3 Сосновский Л. А. Механика износоусталостного повреждения. – Гомель: УО «БелГУТ», 2007. – 434 с. 4 Сосновский Л. А., Щербаков С. С. 0 классификации контактных задач применительно к силовым системам машин / Современные методы проектирования машин: сб. науч. тр. вып. 2. В 7 т. / под общ. ред. П. А. Витязя. – Мн.: УП "Технопринт", 2004. – Т. 4. – С. 48–58. 5 Sosnovskiy L. A., Shcharbakou S. S. New Class of Contact Problems / Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Orlando, 5–11 November 2005). – Orlando, 2005. – 6 pp. 6 Сенько В. И., Сосновский Л. А., Щербаков С. С. Нетрадиционный подход к решению контактных задач / Основные идеи трибофатики. – Гомель: БелГУТ, 2005. – С. 147–180. 7 Сенько В.И., Сосновский Л.А. Основные идеи трибофатики и их изучение в техническом университете. –Гомель: БелГУТ, 2005. –187 с. 8 Фролов К.В., WEN Shi-Zhu, Трощенко В.Т., Высоцкий М.С., Махутов Н.А., Сенько В.И., Хоменко А.П., YAN Xinpeng, Сосновский Л.А. Трибофатика как учебная дисциплина в техническом университете / Тр. V-го Международного 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. 2. –С. 44-61.