

УДК 620.178.16

А. В. БОГДАНОВИЧ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет, Минск, С. Н. ПОДДУБКО, кандидат технических наук, О. М. ЕЛОВОЙ, кандидат технических наук, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Н. А. МАХУТОВ, член-корреспондент РАН, институт машиноведения им. А. А. Благодравова РАН, Москва, Россия, Л. А. СОСНОВСКИЙ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЛАБОРАТОРНЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ТОРМОЗНЫЕ КОЛОДКИ / КОЛЕСО / РЕЛЬС ПО ОСНОВНЫМ КРИТЕРИЯМ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ В УСЛОВИЯХ, БЛИЗКИХ К ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ

Разработаны методы и технологии износоусталостных испытаний моделей наиболее широко распространенных компонентов современных машин и оборудования – силовых систем, включая оригинальную конструктивную модель системы колесо / рельс и метод ее испытания в условиях, близких к эксплуатационным. Важным достоинством описанных методов является то, что они обеспечивают проведение ускоренных лабораторных испытаний типичных моделей – по основным видам комплексного износоусталостного повреждения.

В лабораторных условиях сопротивление износоусталостным повреждениям изучают, как правило, при испытании малоразмерных моделей силовых систем. Такие испытания проводят на специальных машинах для износоусталостных испытаний серии СИ [1–2].

Один из путей разработки методов комплексных (износоусталостных) испытаний – совмещение известных методов испытания на механическую усталость и методов испытания на трение и изнашивание [3–8]. 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.



Рисунок 1 – Формирование методов износоусталостных испытаний при главном вращательном движении:

КМУ – контактно-механическая усталость; ФМУ – фрикционно-механическая усталость; ФУ – фреттинг-усталость

Подобный подход позволяет на машинах, предназначенных для износоусталостных испытаний, проводить и обычные испытания либо на механическую усталость, либо на трение и изнашивание в заданных условиях.

Если испытания проводят на механическую усталость, то объектом испытания является элемент конструкции, например, цилиндрический образец определенной геометрии (рисунок 2, в). Если испытания производят на трение при скольжении либо качении, то объектом испытания является пара трения (рисунок 2, б, г), состоящая из образца 1 и контробразца 2; их называют также телом и контртелом. Заметим, что здесь мы образцом (телом) всегда называем цилиндрический элемент конструкции, а контробразцом (контртелом) – частичный вкладыш либо ролик. Наконец, если проводят износоусталостные испытания, то объектом испытания служат модели силовых систем, состоящие из двух элементов 1 и 2 (рисунок 2, а, д).

Главная и важнейшая особенность всех методов износоусталостных испытаний, реализуемых на машинах серии СИ, состоит в том, что все они построены на базе единого унифицированного объекта – вала диаметром 10 мм, используемого при любых схемах нагружения (см. рисунок 2); это обеспечивает сравнимость данных, полученных при испытаниях элементов конструкций, пар трения и силовых систем [3–8]. Такой возможности, до сих пор, у исследователей не было; достаточно сказать, что, например, традиционные методы испытания на трение при качении и при скольжении не позволяли сравнивать их результаты уже потому, что размеры испытываемых объектов различаются, как правило, в несколько раз.

Необходимо отметить, что все методы износоусталостных испытаний (см. рисунок 2), реализуемые на машинах серии СИ, базируются на едином гладком цилиндрическом образце с рабочим диаметром $d = 2r = 10$ мм. Он идентичен стандартному образцу для испытаний на усталость. Это обеспечивает как преемственность испытаний, так и сравнимость их результатов.

Обратимся к схеме испытания на фрикционно-механическую усталость (см. рисунок 2, д). Цилиндрический образец 1 закреплен в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью ω . На свободном его конце при-

ложена вертикальная изгибающая нагрузка Q (вверх или вниз). А к его рабочей зоне диаметром $d = 10$ мм прижимается под действием контактной нагрузки F_N невращающийся контрообразец 3, например, пластина или частичный вкладыш. Таким образом, в рабочей зоне образца одновременно возникают максимальные контактные и изгибные напряжения.

При реализации схемы испытаний согласно рисунку 2, д, можно проводить:

- износоусталостные испытания на фрикционно-механическую усталость с варьированием величин F_N , Q и ω_1 ;

- испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (см. рисунок 2, в) с варьированием величин Q и ω_1 . В этом случае контрообразец 3 снимают, так что $F_N = 0$;

- испытания на трение и изнашивание при скольжении (см. рисунок 2, в) с варьированием величин F_N и ω . В этом случае изгибающая нагрузка отсутствует ($Q = 0$), а образец 1, с целью экономии материала, делают укороченным.

Итак, если, согласно рисунку 1, объединить (совместить) известные схемы испытаний на механическую усталость и на трение скольжения, то получим схему испытаний на фрикционно-механическую усталость на рисунке 2, д (см. широкую пунктирную стрелку, направленную вниз).

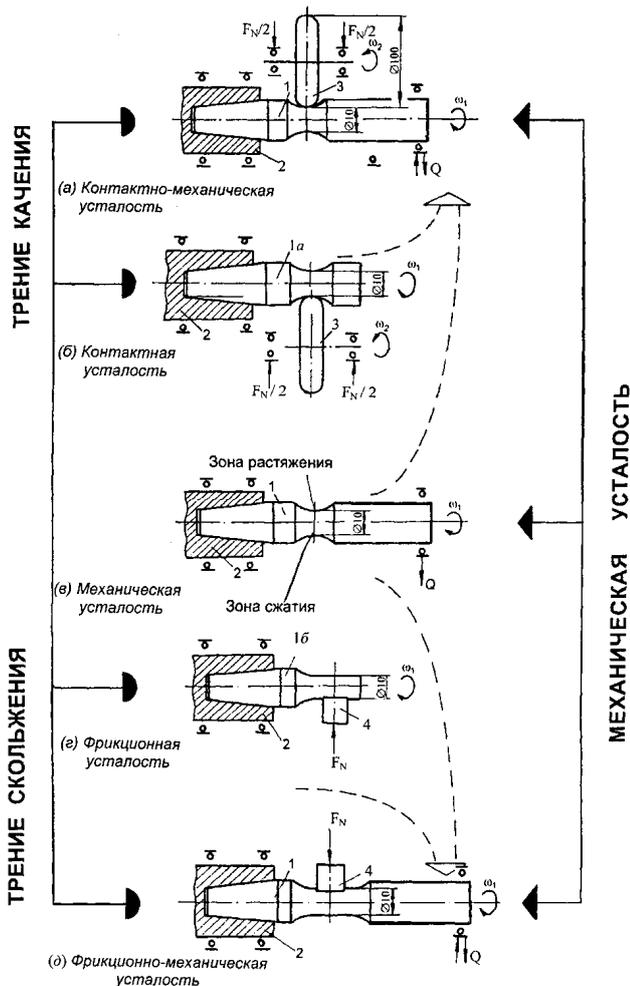


Рисунок 2 – Типичные схемы износоусталостных испытаний: 1, 1а, 1б – образцы; 2 – шпиндель испытательной машины; 3, 4 – контрообразцы; Q – изгибающая нагрузка; F_N – контактная нагрузка; ω_1 , ω_2 – скорость вращения образца, контрообразца

При испытаниях на механическую усталость (см. рисунок 2, в) изгибающая нагрузка Q может быть постоянной (неизменной во времени t), но действующие нормальные напряжения в каждой точке рабочего сечения образца 1 изменяются по симметричному циклу (рисунок 3) с периодом T вследствие вращения образца. Если наибольший изгибающий момент в рабочем сечении образца $M = Ql$, где l – расстояние от опасного сечения до линии действия нагрузки Q , то наибольшие нормальные напряжения в том же сечении определяют по формуле

$$\sigma = M / W, \quad (1)$$

где W – момент сопротивления.

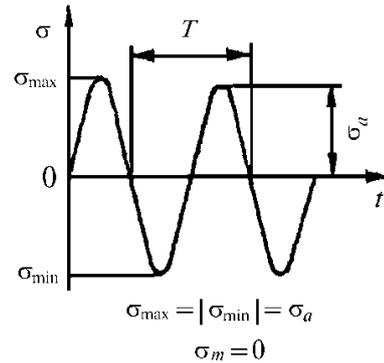


Рисунок 3 – Симметричный цикл напряжений при испытаниях на механическую усталость

При симметричном цикле нагружения максимальные (σ_{\max}), минимальные (σ_{\min}) и амплитудные (σ_a) значения напряжения оказываются численно равными; в дальнейшем в таких случаях будем говорить просто о циклических напряжениях ($\sigma = \sigma_{\max} = |\sigma_{\min}| = \sigma_a$).

При испытаниях на трение при скольжении (см. рисунок 2, з) контактная нагрузка F_N аналогично может быть статической, т. е. постоянной во времени, но действующие контактные напряжения тоже являются циклическими. В этой связи испытания на трение при скольжении согласно схеме, показанной на рисунке 2, з, это, по существу, испытания на фрикционную усталость (в условиях асимметричного растяжения–сжатия).

Условия, при которых реализуется фрикционная усталость, интегрально могут быть описаны либо контактной нагрузкой F_N , либо средним (номинальным) контактным давлением (2), либо удельной силой трения при скольжении, которую называют также фрикционным напряжением (3):

$$p_a = F_N / A_a, \quad (2)$$

$$\tau_{ws} = f_s p_a = F_s / A_a = f_s F_N / A_a, \quad (3)$$

где A_a – номинальная площадь контакта; F_s – сила трения при скольжении; f_s – коэффициент трения при скольжении.

Рассмотрим схему испытания на контактно-механическую усталость (см. рисунок 2, а). Эта схема отличается от схемы испытаний на фрикционно-механическую усталость (см. рисунок 2, д) тем, что неподвижно закрепленный вкладыш заменен на вращающийся ролик 3. При этом образец и ролик могут в общем случае вращаться с разными угловыми скоростями

ω_1 и ω_2 и в различных направлениях. При реализации схемы испытаний согласно рисунку 2, а, можно проводить:

- износоусталостные испытания на контактно-механическую усталость (см. рисунок 2, а) с варьированием величин F_N , Q , ω_1 и ω_2 ;

- испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (см. рисунок 2, в) с варьированием величин Q и ω_1 . В этом случае ролик 3 снимают, так что $F_N = 0$ и $\omega_2 = 0$;

- испытания на трение качения или трение качения с проскальзыванием (см. рисунок 2, б) с варьированием величин F_N , ω_1 и ω_2 . В этом случае изгибающая нагрузка отсутствует ($Q = 0$), а образец 1, с целью экономии материала, делают укороченным.

Итак, если, согласно рисунку 1, объединить (совместить) известные схемы испытаний на механическую усталость и на трение при качении, то получим схему испытаний на контактно-механическую усталость на рисунке 2, а (см. широкую пунктирную стрелку, направленную вверх).

Условия, при которых реализуется трение качения (см. рисунок 2, б), интегрально могут быть описаны либо контактной нагрузкой F_N , либо наибольшим давлением в центре контактной площадки (4), которое определяют по формуле Герца (для случая упругого деформирования), либо удельной силой трения при качении (5), которую называют также фрикционным напряжением

$$p_0 = n_p F_N / A_p, \quad (4)$$

$$\tau_{wr} = f_r p_0 = F_r / A_a = f_r F_N / A_a, \quad (5)$$

где A_p – площадь контакта ($A_p = a^2$ – для круговой площадки контакта с радиусом a ; $A_p = lb$ – для контакта по полоске с размерами $l \times b$; $A_p = ab$ – для эллиптической площадки контакта с размерами $a \times b$; n_p – коэффициент ($n_p = 0,478$ – для круговой и эллиптической площадок контакта и $n_p = 0,637$ – для контакта на полоске); F_r – сила трения при качении; f_r – коэффициент трения при качении.

При испытаниях на трение качения (см. рисунок 2, б) контактная нагрузка F_N , как и при трении скольжения, может быть статической, т. е. постоянной во времени, но действующие контактные напряжения (например, $p_0 = \sigma_{zmax}$), тоже являются циклическими (рисунок 4). Следовательно, испытания на трение при качении согласно схеме, показанной на рисунке 2, б, это, по существу, испытания на контактную усталость поверхностного слоя материала.

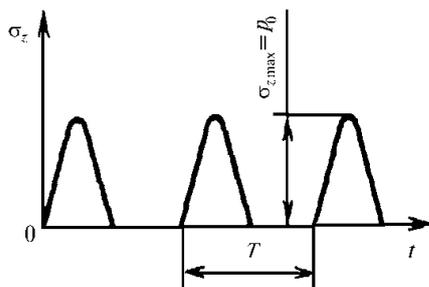


Рисунок 4 – Цикл напряжений при испытаниях на контактную усталость

Схема испытания на фреттинг-усталость приведена на рисунке 5, а. В отличие от схем испытаний на фрикционно-механическую усталость (см. рисунок 2, д) и контактно-механическую усталость (см. рисунок 2, а), в этом случае (см. рисунок 5, а) к рабочей зоне вращающегося цилиндрического образца 1, изгибаемого нагрузкой Q , прижимают контактной нагрузкой F_N два контрообразца 3, называемые мостиками фреттинга. Последним можно сообщать окружное (со скоростью v_1) или осевое (со скоростью v_2) колебательное движение малой амплитуды либо возбуждать оба движения одновременно. При реализации схемы испытаний согласно рисунку 5, а, можно проводить:

- износоусталостные испытания на фреттинг-усталость (см. рисунок 5, а) с варьированием величин F_N , Q , ω , v_1 и v_2 ;

- испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (см. рисунок 5, б) с варьированием величин Q и ω . В этом случае мостики фреттинга не монтируются, так что $F_N = 0$, $v_1 = v_2 = 0$;

- испытания на фреттинг при осевом и/или окружном проскальзывании (см. рисунок 5, в) с варьированием величин F_N , v_1 и v_2 . В этом случае изгибающая нагрузка отсутствует ($Q = 0$), а образец 1, с целью экономии материала, делают укороченным.

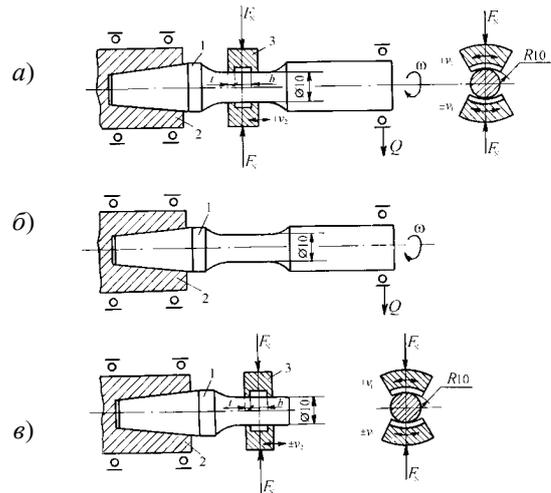


Рисунок 5 – Схемы испытаний на фреттинг-усталость (а), механическую усталость (б) и фреттинг (в)

Условия силового взаимодействия образца и контрообразца при фреттинг-усталости интегрально могут быть охарактеризованы циклическими напряжениями (1), номинальным контактным давлением

$$q = F_N / A_0, \quad (6)$$

где A_0 – начальная (номинальная) площадь контакта, или фрикционными напряжениями (3).

На рисунке 2 приведены схемы износоусталостных испытаний силовых систем, которые имеют ту особенность, что в них обнаруживаются взаимодействующие повреждения – они обусловлены различными видами нагрузок (контактной и внеконтактной), но возникают и развиваются в одной и той же области ее деформируемых элементов, именно – в окрестности площадки контакта.

Существует иной тип силовых систем, в которых повреждения развиваются в различных областях при действии одной и той же нагрузки. Типичным приме-

ром могут служить зубчатые зацепления, модель которых представлена на рисунке 6. Разработанный оригинальный метод совмещенных испытаний материалов для зубчатых колес [9] позволяет получить кривые изгибной и контактной усталости при испытаниях единой модели зубчатого зацепления при действии единой (в обоих случаях) контактной нагрузки – как в натуральных условиях. Особенностью модели является то, что цилиндрический образец 1, изготовленный из материала зубчатого колеса, представляет собой консоль, на свободном конце которой сформирована зона контактного взаимодействия, а на другом конце – зона изгиба в виде галтели, соответствующей переходной кривой у основания зуба. Образец-модель 1, закрепленный в шпинделе 2, вращается с угловой скоростью ω_1 . К поверхности образца 1 в зоне контакта с силой F_N прижат контрольный образец 3, ось вращения которого параллельна оси вращения образца, и который вращается с заданной скоростью ω_2 . Путем регулирования скоростей ω_1 и ω_2 можно получить коэффициент проскальзывания, с высокой точностью имитируя скольжение в зубчатой передаче. Таким образом, в модели имитируются основные условия работы цилиндрических зубчатых колес: в полюсе зацепления (контакт двух роликов) реализуется трение качения при действии контактной нагрузки F_N , а в зоне перехода зуба в венец (галтельный переход радиусом R) – циклический изгиб (при консольном изгибе) под действием той же нагрузки F_N . И хотя износовые и усталостные повреждения обнаруживаются в разных областях деформируемого элемента (зуба зубчатого колеса или его модели), значительно удаленных друг от друга, они оказываются взаимосвязанными повреждениями, поскольку, например, при увеличении нагрузки F_N интенсифицируются оба повреждающих явления вследствие одновременного и пропорционального ей роста циклических и контактных напряжений

$$\sigma = F_N \frac{l}{W}, \quad \tau_w = F_N \frac{f_R}{A_a}.$$

Отметим, что предложенная модель имеет тот недостаток, что направление качения (и проскальзывания) у нее не совпадает с направлением действия максимального изгибающего напряжения. Однако этот недостаток, видимо, нельзя считать существенным.

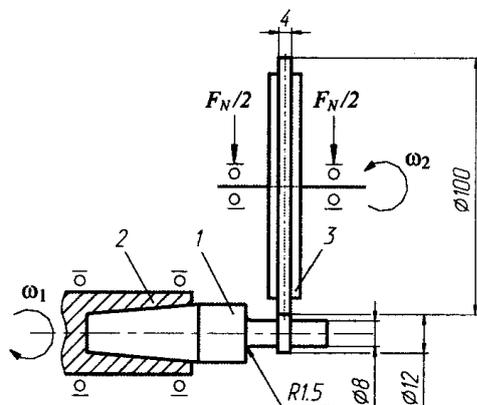


Рисунок 6 – Модель зубчатого зацепления

Пример реализации метода совмещенных испытаний дан на рисунке 7. Были проведены совмещенные

испытания моделей зубчатых зацеплений, изготовленных из стали 18ХГТ. Упрочнение поверхностного слоя образца проведена по технологии натурной детали – цементация на глубину $h = 0,4 \dots 0,8$ мм с последующей закалкой до твердости 54...64 HRCэ. Рабочие поверхности образцов и роликов шлифовали. Схема испытаний, а также основные размеры образца и контрообразца показаны на рисунке 6.

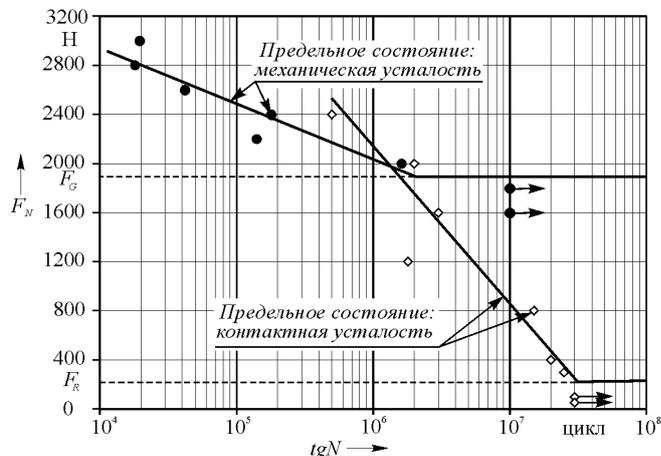


Рисунок 7 – Результаты испытания моделей зубчатых зацеплений из стали 18ХГТ:

F_G – предельная нагрузка по критерию изгибной усталости; F_R – предельная нагрузка по критерию контактной усталости

испытания проводили при частоте 3000 мин⁻¹ 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 – 10⁷ циклов. По результатам испытаний построена кривая изгибной усталости с абсциссой точки перелома порядка 2·10⁶ циклов, и определена предельная нагрузка по критерию изгибной усталости $F_G = 1900$ Н, соответствующая пределу выносливости $\sigma_{-1} = 570$ МПа.

Разработанная модель зубчатой передачи и методика ее испытания стандартизована и запатентована [10–12].

Рассмотрим теперь комбинированную силовую систему, образованную верхним строением железнодорожного пути и колесом (рисунок 8).

В первом приближении примем, что при движении экипажа действует вертикальная нагрузка Q_y , приложенная внецентренно по отношению к оси симметрии поперечного сечения рельса, а также боковая нагрузка Q_x . Можно указать четыре опасные зоны, условно отмеченные штриховкой:

(а) в зоне 1 взаимодействия колеса с головкой рельса (в окрестности дорожки катания) реализуется контактно-механическая усталость (изгиб с кручением рельса + трение качения);

(б) в зоне 2 взаимодействия реборды колеса с боковой поверхностью головки рельса реализуется фрикци-

онно-механическая усталость (изгиб с кручением рельса + трение скольжения);

(е) в зоне 3 взаимодействия подошвы рельса со шпалой реализуется фреттинг-усталость (фреттинг вследствие повторно-переменного деформирования как рельса, так и шпалы);

(з) в зоне 4 взаимодействия шпалы с земляным полотном реализуется фреттинг-усталость (фреттинг вследствие повторно-переменного изгиба шпалы, лежащей на упругом основании).

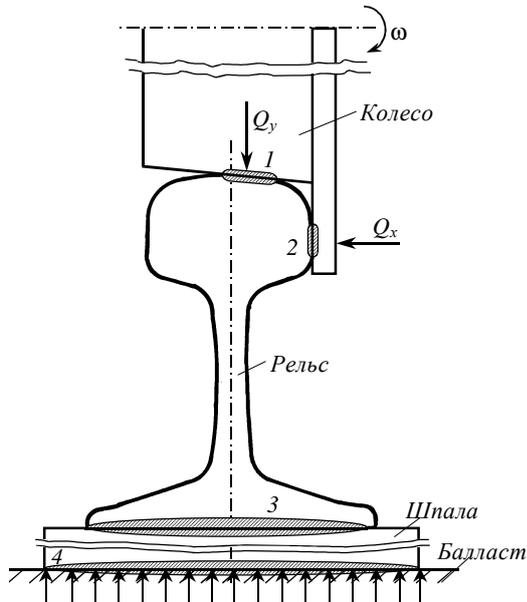


Рисунок 8 – Комбинированная силовая система колесо / рельс / шпала / полотно железной дороги

Анализ показал, что традиционные методы испытаний (либо на механическую, либо на контактную усталость) не могут правильно охарактеризовать сопротивление системы колесо / рельс комплексному износоусталостному повреждению и разрушению. Моделирование системы колесо / рельс может оказаться корректным только в том случае, если контактные и изгибные напряжения удалось бы возбуждать при действии единой нагрузки F_N – как в процессе эксплуатации.

Таким образом, требуется иметь принципиально новую модель для испытаний системы колесо / рельс. Сформулируем основные требования к построению такой модели.

1 Изгибающая и контактная нагрузка должна быть единой.

2 Опасные (наибольшие) контактные и опасные (наибольшие) изгибные напряжения должны обнаруживаться в единой области конечных размеров – в окрестности площадки контакта.

3 В общем случае площадка контакта должна быть эллиптической; по мере деформации и износа в процессе испытаний она может трансформироваться в (почти) полосу.

4 Элемент, моделирующий рельс, должен иметь варьируемую жесткость (по направлению действия силы F_N).

5 Условия испытаний должны привести к комплексному износоусталостному повреждению модели, основными проявлениями которого являются:

– различные виды поверхностного контактно-усталостного повреждения (износ, остаточная деформация, продольные микротрещины, ямки выкрашивания и т. п.);

– объемное разрушение путем развития поперечной магистральной усталостной трещины.

Нетрудно видеть, что эти требования вполне отражают условия работы и повреждения натурной системы колесо / рельс в процессе эксплуатации – во всяком случае, в наиболее существенных моментах.

Моделирование колеса, в соответствии со сформулированными выше требованиями, в принципе не представляет собой затруднений: это может быть ролик с одним либо двумя радиусами кривизны.

Примем, что и рельс должен быть конструктивно представлен в виде ролика с одним либо с двумя радиусами кривизны. Это немедленно обеспечивает выполнение одного из главных требований: ролики можно вырезать из головки рельса так, что одна из его периферийных рабочих зон оказывается расположенной на дорожке катания рельса (рисунок 9, зона I). Дополнительно получается, что так вырезанный ролик обнаруживает важное свойство: при последовательном переходе от зоны I к зонам II либо IV (см. рисунок 9) испытаниям будут подвергаться соответствующие слои под поверхностью рельса, то есть под дорожкой катания на любой глубине. Более того: в зонах II-III и III-IV будем иметь дело с практически неповрежденным – исходным материалом рельса. Таким образом, обеспечивается уникальная возможность сравнить свойства материала до и после эксплуатации рельса при испытании одного образца-модели.

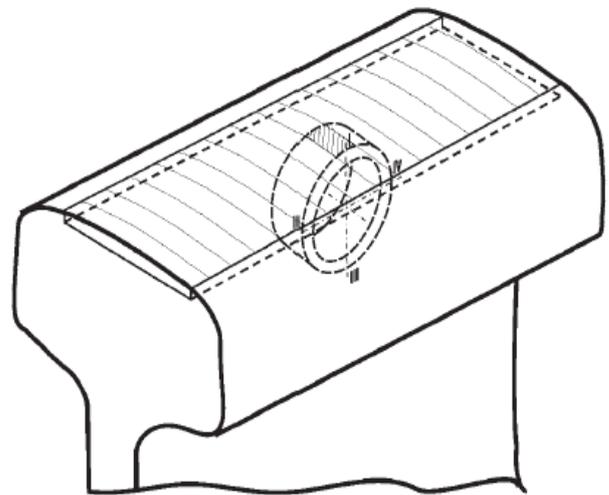


Рисунок 9 – Схема вырезки образца, имитирующего рельс, с сохранением рабочего поверхностного слоя

Чтобы удовлетворить еще одному из главных требований к испытательной модели, примем, что элемент, моделирующий рельс, является не роликом, а кольцом. Это основополагающая идея, которая позволяет, в конечном счете, предложить общую принципиальную схему модели колесо / рельс (рисунок 10) [13–16], удовлетворяющую основным требованиям к ней, изложенным выше.

Таким образом, основными достоинствами предложенного способа испытаний являются:

- осуществление контактной нагрузки, прижимающей контробразец к образцу, одновременного возбуждения в зоне взаимодействия как контактных, так и изгибных напряжений, что приближает условия испытаний к условиям эксплуатации системы колесо / рельс;

- выполнение образца в виде кольца, что позволяет при его вырезке из натурального рельса не снимать его рабочий поверхностный слой.

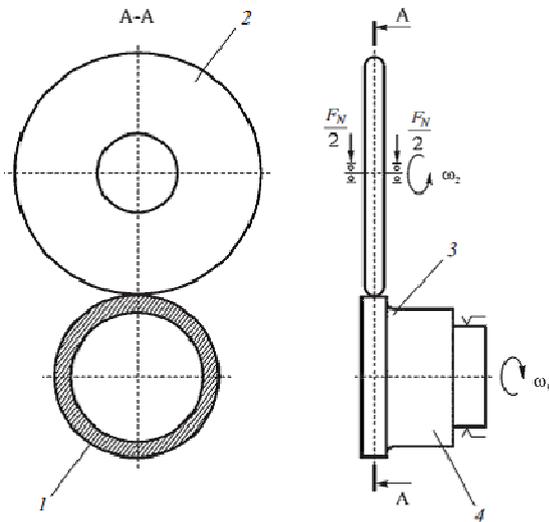


Рисунок 10 – Конструктивная схема модели колесо / рельс:
1 – образец; 2 – контробразец; 3 – консоль; 4 – основание

Описанный способ моделирования системы колесо / рельс допускает совершенствование. Кольцо, моделирующее рельс, может иметь дискретно расположенные на внутренней поверхности выступающие элементы, имитирующие шпалы, количество которых может варьироваться (рисунок 11, а, б). Изменение количества дискретно расположенных на внутренней поверхности кольца выступающих элементов приводит к возможности изменения соотношения изгибных и контактных напряжений в соответствующих зонах. При вращении кольца происходит поочередный переход от надшпальной области (максимальная жесткость) к середине пролета (минимальная жесткость); тем самым имитируется изменение жесткости в системе рельс/основание. Кроме того, в кольце могут быть прорезаны пазы, имитирующие стыки рельсов, имеющиеся в реальных условиях эксплуатации (рисунок 11, в).

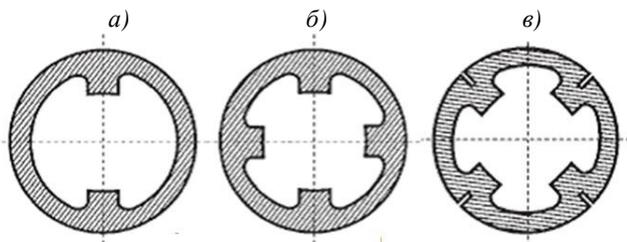


Рисунок 11 – Варианты исполнения образца с выступающими элементами, имитирующими шпалы

Апробацию разработанного метода испытаний системы колесо / рельс проводили на испытательной машине СИ-03М [2]. Образцы вырезали из головки рельса

Р50 (ГОСТ 16210–77) в состоянии до эксплуатации и испытывали по схеме, показанной на рисунке 12, в достаточно тяжелых условиях: частота нагружения образца составляла 3000 мин⁻¹, степень проскальзывания в системе – 50 %. Были реализованы две ступени нагружения (рисунок 13, а) при контактной нагрузке $F_N = 40$ Н длительностью 10^6 циклов и при $F_N = 130$ Н длительностью $3,9 \cdot 10^5$ циклов (определилось достижение предельного состояния).

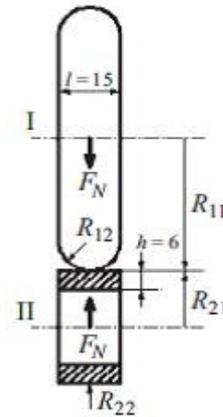


Рисунок 12 – Схема модели колесо / рельс, реализованная при испытании на машине СИ-03М

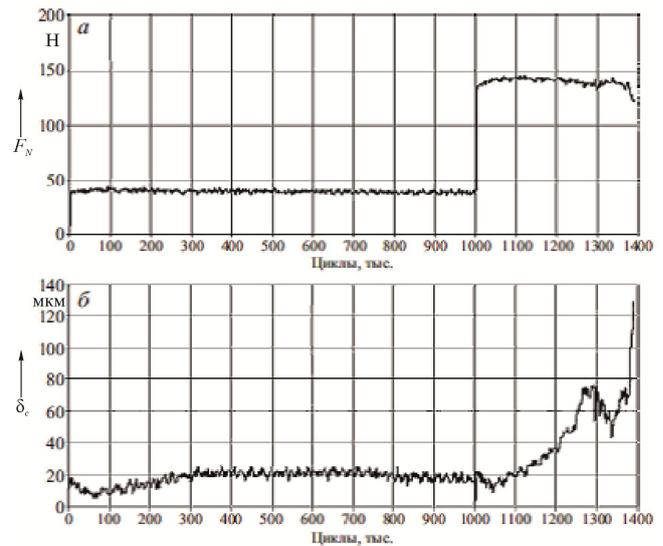


Рисунок 13 – Результаты испытания образца-рельса

Развитие процессов повреждаемости, иллюстрируемое временным графиком изменения сближения осей δ_c образца и контробразца (рисунок 13, б) является обычным, без каких-либо отклонений от установленных закономерностей. Причем если на первой ступени нагружения график δ_c носит почти линейный характер, то с переходом на вторую степень происходит резкий и нерегулярный рост сближения осей, усиленный вибрацией. Это приводит к возникновению ударно-усталостного процесса. Предельное состояние наступает, когда величина δ_c достигает ~ 100 мкм (см. рисунок 13, б).

На испытанном образце-рельсе получено характерное повреждение – остаточная деформация и износ на дорожке катания, а также ямки выкрашивания. Все это аналогично картине повреждения при эксплуатации железнодорожных рельсов.

Описанные новые схемы испытания различных модификаций модели системы колесо / рельс в настоящее время запатентованы [17–18].

Таким образом, разработаны методы и технологии износоусталостных испытаний моделей наиболее широко распространенных компонентов современных машин и оборудования – силовых систем, включая оригинальную конструктивную модель системы колесо / рельс и метод ее испытания в условиях, близких к эксплуатационным. Важным достоинством описанных методов является то, что они обеспечивают проведение ускоренных лабораторных испытаний типичных моделей – по основным видам комплексного износоусталостного повреждения.

Список литературы

- 1 **Индман, Н. Л.** Конструктивные особенности машины СИ / Н. Л. Индман, Г. П. Ожигар, Л. А. Сосновский // Заводская лаборатория. – 1995. – № 6. – С. 44–48.
- 2 Трибофатика-95 : Ежегодник / под общ. ред. Л. А. Сосновского. – Вып. 1 : Машины серии СИ для износоусталостных испытаний под ред. М. С. Высоцкого. – Гомель : НПО «ТРИБОФАТИКА», 1996. – 80 с.
- 3 **Сосновский, Л. А.** Методы износоусталостных испытаний силовых систем и их моделей / Л. А. Сосновский // Трение и износ. – 1993. – Т. 14. – № 5. – С. 937–952.
- 4 **Фролов, К. В.** Новые машины и методы испытаний / К. В. Фролов, Н. А. Махутов // Заводская лаборатория. – 1995. – № 5. – С. 32–33.
- 5 К разработке методов стандартных износоусталостных испытаний / М. С. Высоцкий [и др.] // Заводская лаборатория. – 1995. – № 5. – С. 35–38.
- 6 Методы износоусталостных испытаний и их реализация на машине СИ / Н. А. Махутов [и др.] // Заводская лаборатория. – 1995. – № 6. – С. 17–42.
- 7 Оригинальные методы и технологии испытаний моделей компонентов общетехнического применения / Л. Г. Красневский [и др.] // Тр. V Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2005), 3–7 октября 2005 г., Иркутск (Россия) / отв. ред. А. П. Хоменко. – Иркутск : Иркутский гос. ун-т путей сообщения, 2005. – Т. 1. – С. 178–203.
- 8 Современные методы комплексных износоусталостных испытаний / Ю. М. Плещачевский [и др.] // 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.

9 Метод совмещенных усталостных испытаний моделей зубчатых зацеплений / Н. А. Махутов [и др.] // Заводская лаборатория. – 2005. – Т. 71. – № 1. – С. 55–57.

10 Трибофатика. Метод совмещенных испытаний на изгибную и контактную усталость материалов зубчатых колес (Стандарт Беларуси) : СТБ 1758–2007. – Введ. 01.12.2007. – Мн. : ГОССТАНДАРТ, 2007. – 45 с.

11 Методика оценки сопротивления изгибной и контактной усталости зубчатых колес по результатам ускоренных испытаний малоразмерных моделей (Стандарт предприятия) : СТП 315-625–2007. – Введ. 2007–12–20. – Гомель : ПО «ГОМСЕЛЬМАШ», 2007. – 20 с.

12 Способ испытания материала зубчатого колеса на контактную и изгибную усталость : пат. 9247 Респ. Беларусь, МПК G 01M13/02 / В. А. Жмайлик [и др.] ; заявители ПО «Гомсельмаш», ОИМ НАН Б. – № a20040781 ; заявл. 19.08.2004 ; опубл. 30.04.2007. – 2007. – 6 с.

13 **Сенько, В. И.** О проблеме колесо-рельс с позиций трибофатики / В. И. Сенько, Л. А. Сосновский / Тр. V Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2005), 3–7 октября 2005 г., Иркутск (Россия) / отв. ред. А. П. Хоменко. – Иркутск : Иркутский гос. ун-т путей сообщения, 2005. – Т. 1. – С. 358–374.

14 **Сенько, В. И.** Проблема «колесо-рельс»: новый взгляд / В. И. Сенько, Л. А. Сосновский // Вестник БелГУТа. – 2005. – № 2. – С. 7–17.

15 Новые способы испытаний применительно к системе колесо-рельс / С. А. Тюрин [и др.] // Вестник БелГУТа. – 2005. – № 2. – С. 54–63.

16 **Сосновский, Л. А.** Проблема колесо-рельс с позиций трибофатики / Л. А. Сосновский, В. И. Сенько // Железнодорожный транспорт. – 2007. – № 3. – С. 38–44.

17 Способ износоусталостных испытаний материала рельса системы колесо – рельс : пат. 10326 Респ. Беларусь, МПК G 01N3/56 / В.И. Сенько, Л.А. Сосновский ; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». – № a20050296 ; заявл. 28.03.2005 ; опубл. 28.02.2008. – 2008. – 5 с.

18 Способ испытания на контактно-механическую усталость материала рельса системы колесо – рельс – основание : пат. 10327 Респ. Беларусь, МПК G 01N3/56 / Г. П. Ожигар [и др.] ; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». – № a20050297 ; заявл. 28.03.2005 ; опубл. 28.02.2008. – 2008. – 6 с.

Получено 19.02.2016

A. V. Bogdanovich, S. N. Poddubko, O. M. Elovoy, N. A. Makhutov, L. A. Sosnovskiy. Modern methods of modeling and test of tribo-fatigue systems and their use for accelerated testing laboratory models of brake pads / wheel / rail by the main criterion damageability in conditions similar to performance.

Methods and wear-fatigue testing technology models the most common components of modern machinery and equipment – active systems, including the original structural system model wheel / rail and tests under conditions close to operational. An important advantage of these methods is that they provide an accelerated laboratory testing of typical models – the main types of complex wear-fatigue damage.