

НОВЫЕ СПОСОБЫ ИСПЫТАНИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СИСТЕМЕ КОЛЕСО/РЕЛЬС

С. А. Тюрин¹, В. И. Матвецов², С. С. Щербаков³, В. О. Замятнин⁴, Г. П. Ожигар⁴,
А. А. Сырокваш⁵

¹Институт механики и надежности машин НАНБ, г. Минск

²Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

³Белорусский государственный университет, г. Минск

⁴ПО "Гомсельмаш", г. Гомель

⁵КУП "Минский метрополитен", г. Минск

Описаны новые схемы испытания различных модификаций модели системы колесо / рельс. Устанавливаются рациональные сферы их использования.

Традиционные методы испытаний. Воспроизвести эксплуатационный процесс и характер нагруженности рельсов в лабораторных условиях практически невозможно. Поэтому при разработке методов их испытания создают, как правило, два типа независимых моделей.

Первый тип моделей имитирует циклический изгиб рельса и материализуется как элемент конструкции (образец), подвергаемый соответствующему нагружению. Схемы нагружения образцов при чистом и консольном изгибе с вращением приведены на рисунке 1, а, б. Методику испытаний на механическую усталость регламентирует ГОСТ 25.502-79 "Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость" [1]. Для натурных испытаний рельсов при циклическом изгибе разработан ряд схем нагружения (рисунок 2), которые позволяют оценить усталостную прочность рельсов в различных зонах [2]. Важно заметить, что ни в одном из случаев (см. рисунок 2, а-ж) формально не воспроизводится трение качения колеса по головке рельса.

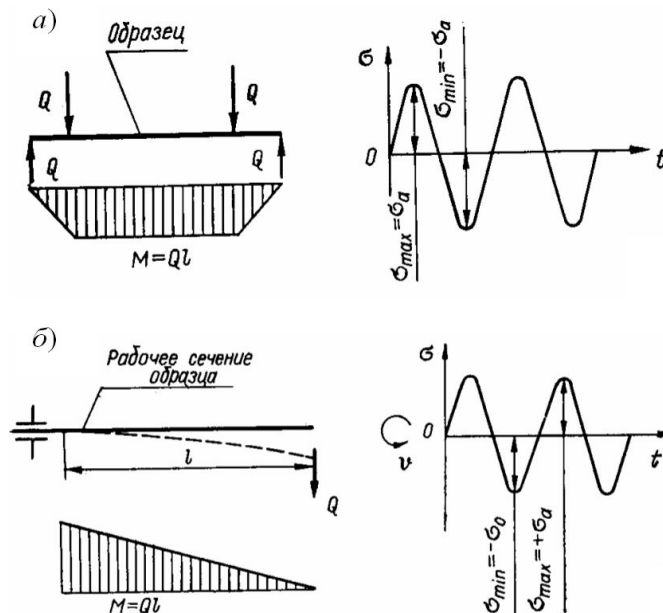


Рисунок 1 – Схемы нагружения образцов при испытаниях на усталость при чистом (а) и консольном (б) изгибах с вращением

Второй тип моделей имитирует процесс трения качения (в том числе и с проскальзыванием) и материализуется, например, как пара трения двух роликов при действии постоянной контактной нагрузки. Схема нагружения образцов при трении качения приведена на рисунке 3. Методику испытаний на механическую усталость регламентирует Р 50-54-30-87 "Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость" [3].

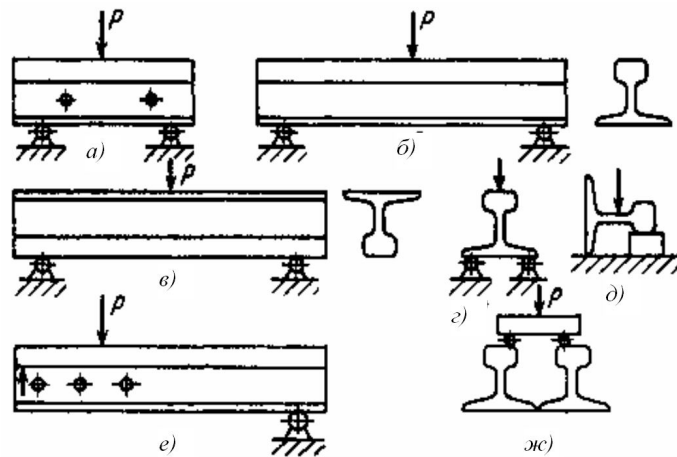


Рисунок 2 – Схемы нагружения рельсов при испытаниях на усталость для оценки усталостной прочности в различных зонах:
 а – у болтовых отверстий; б – всего сечения при изгибе подошвой вниз;
 в – всего сечения при изгибе головкой вниз; г – поперек подошвы;
 д – поперек шейки, е – на отрыв головки от шейки в зоне стыка;
 жс – в зоне перехода от головки к шейке в средней части рельса вдали от стыка

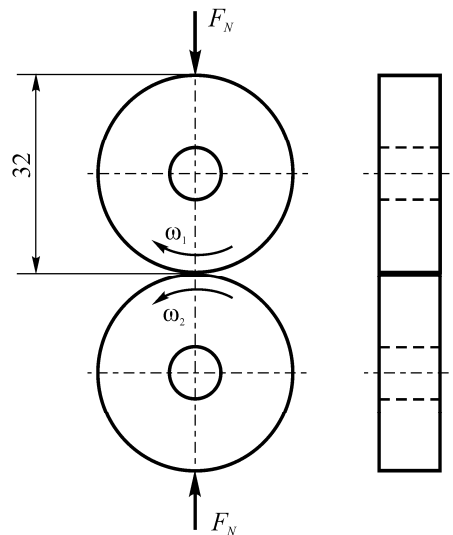


Рисунок 3 – Схема нагружения образцов при испытаниях на трение качения

Для испытаний рельсов при трении качения применяют, в частности, устройство, имитирующее взаимодействие колеса с рельсом (рисунок 4) [4]. Устройство содержит валы со средствами крепления образца и контробразца соответственно на каждом из них, привод для вращения валов, привод для осевого перемещения вала и нагружающее приспособление. Устройство отличается тем, что с целью приближения условий испытаний к эксплуатационным при осевом перемещении колеса относительно рельса оно снабжено двумя упругими элементами различной жесткости, установленными между средствами крепления образца и контактирующими с ним.

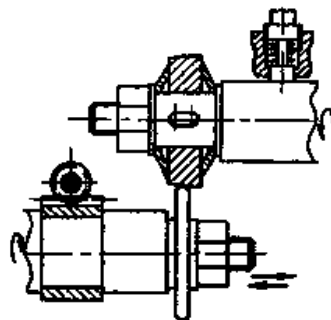


Рисунок 4 – Схема устройства для испытаний пары, имитирующей взаимодействие колеса и рельса, на трение качения

Для натурных испытаний рельсов на трение качения применяют стенд, содержащий связанный с электродвигателем вал колеса, контактирующего с имитатором рельсового пути (рисунок 5) [5]. Имитатор рельсового пути представляет собой отрезок рельса, опирающийся с одной стороны от зоны контакта с колесом на роликовую опору на основании стенда, а на втором конце подпружиненного колеса установлен ролик для опирания на него другой стороны отрезка рельса, который зафиксирован с обоих торцов пружинами с регулируемой затяжкой.

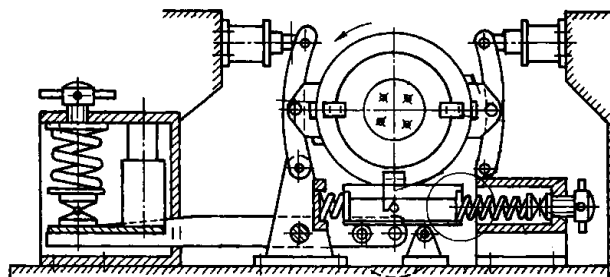


Рисунок 5 – Испытания натурального образца рельса на трение качения

Важно заметить, что при испытаниях на контактную усталость формально не производится объемное нагружение (изгибом, например). Таким образом, традиционный подход к испытанию системы колесо/рельс имеет два принципиальных недостатка. Во-первых, сопротивление трению качения и изгибу изучают на различных (не связанных друг с другом) объектах. Во-вторых, процессы контактной (при трении качения) и механической (при изгибе) усталости реализуются отдельно и независимо, что не соответствует реальным условиям эксплуатации рельсов.

Методы износоусталостных испытаний. В рамках трибофатики разработаны методы комплексных износоусталостных испытаний (рисунок 6). В частности, разработан и реализован способ испытания моделей на контактно-механическую усталость, лишенный указанных выше недостатков [6–10]. Схемы испытаний представлены на рисунке 7.

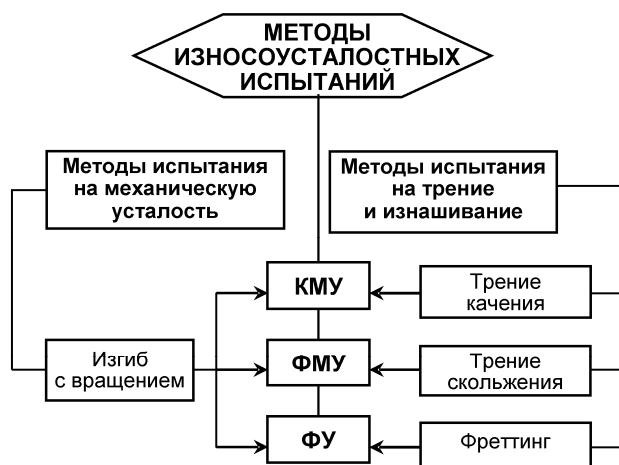


Рисунок 6 – Методы износоусталостных испытаний:
 КМУ – контактно-механическая усталость,
 ФМУ – фрикционно-механическая усталость,
 ФУ – фреттинг-усталость

Цилиндрический образец 1 одним концом закреплен в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью ω_1 . На другом его конце приложена вертикальная изгибающая (внеконтактная) нагрузка Q , направленная вверх или вниз. К рабочей зоне образца, которая имеет диаметр $d = 10$ мм, прижимается под действием контактной нагрузки F_N контрообразец – ролик 3, который вращается с частотой ω_2 , при этом может быть $\omega_2 \geq \omega_1$, $\omega_2 \leq \omega_1$, так что обеспечивается бесступенчатое регулирование степени проскальзывания от 0 до 85 %. Таким образом, рабочая зона образца 1 может имитировать рельс, а ролик 3 может имитировать колесо, при этом контактную и изгибную нагрузки задают отдельно, обеспечивая необходимое отношение между ними (F_N / Q).

Нетрудно видеть, что испытания согласно схеме, показанной на рисунке 7, а, ведут на едином объекте (модель системы колесо/рельс), а процессы контактной и изгибной усталости реализуются

совместно, в единой поверхностной зоне, которая имитирует дорожку качения – как в условиях эксплуатации.

Для реализации разработанных методов на базе ряда изобретений разработан новый класс испытательного оборудования – машины серии СИ [11–13]. На испытательных машинах серии СИ предусмотрена также возможность реализации и традиционных способов испытания: либо только на трение качения (рисунок 7, б), либо только на механическую усталость (при изгибе – рисунок 7, в). Отличительной и важной особенностью таких испытаний на машинах серии СИ является тот факт, что объекты оказываются одинаковыми при всех трех видах испытания: на механическую усталость (см. рисунок 7, б), на трение при качении – на контактную усталость (см. рисунок 7, в) и на контактно-механическую усталость (см. рисунок 7, а). Это обеспечивает получение сравнимых результатов испытаний, и их анализ оказывается корректным.

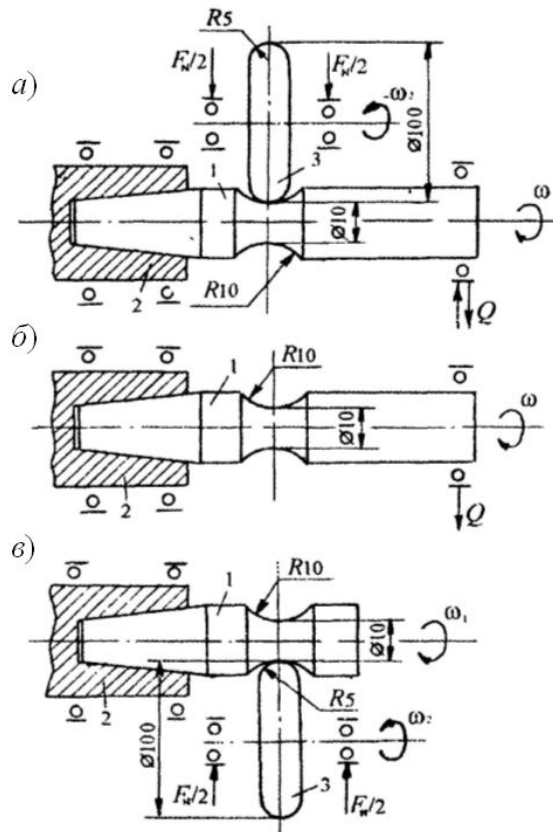


Рисунок 7 – Схемы испытаний на контактно-механическую усталость (а), механическую усталость (б) и трение качения (в)

На рисунке 8 показан общий вид одной из последних модификаций машин, в таблице 1 даны технические характеристики базовых машин серии СИ, а на рисунках 9 и 10 можно видеть принципиальную схему машины, систему ее управления и измерения основных параметров в процессе испытания.

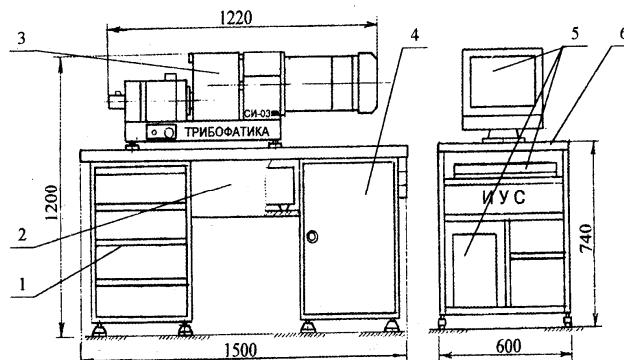


Рисунок 8 – Общий вид модульной машины СИ-03:
 1, 6 – столы специальные; 2 – блок информационно-управляющей системы (ИУС);
 3 – установка испытательная; 4 – электрошкаф; 5 – ПЭВМ с принадлежностями

Таблица 1 – Технические характеристики модульных машин серии СИ

Показатель	Значение		
	Машина СИ-01	Машина СИ-02	Машина СИ-03 М
Основная пара трения	Цилиндр-колодка	Цилиндр-ролик	Цилиндр-колодка, цилиндр-Ролик
Диаметр рабочей части образца, мм	10		
Размеры контробразца, мм	10×10×11,5	∅ 100	10×10×11,5 ∅ 100
Режим смазки контробразца, мм	Капельный		
Диапазон частот вращения образца, мин ⁻¹	40–4000*	3000	600–6000
Диапазон частот вращения контробразца, мин ⁻¹	–	50–500	50–500
Диапазон изгибающих нагрузок, Н	70–700	70–700	10–800
Диапазон контактных нагрузок, Н	10–500	10–1000	10–2000
Предел допускаемой погрешности измерения нагрузок, %	2	2	1
Диапазон измерения суммарного износа образца и контробразца, мкм	10–2000	10–3000	10–4000
Предел допускаемой погрешности измерения суммарного износа образца и контробразца, %, не более	± 3	± 3	± 1
Диапазон измерения момента трения, Н·м: при трении скольжения при трении качения	0,01–1,2 –	– 0,2–20	0,01–1,5 0,2–30
Предел допускаемой погрешности измерения момента трения, %, не более	3	3	2
Установленная мощность электрооборудования, кВт	2	2,5	2,0

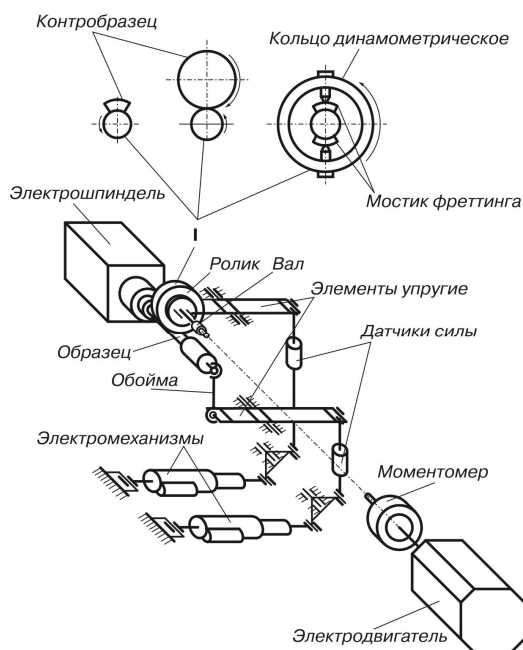


Рисунок 9 – Принципиальная схема испытательной установки машины СИ-03

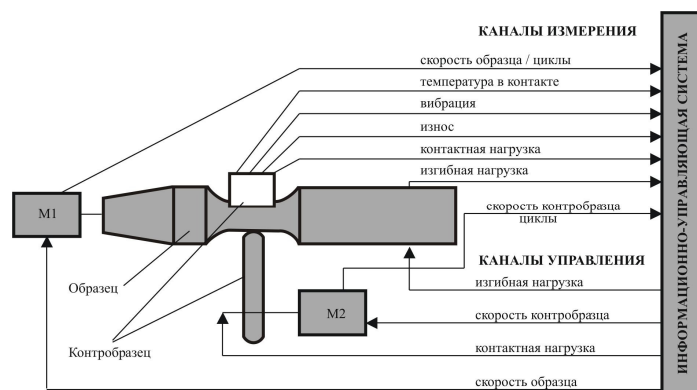
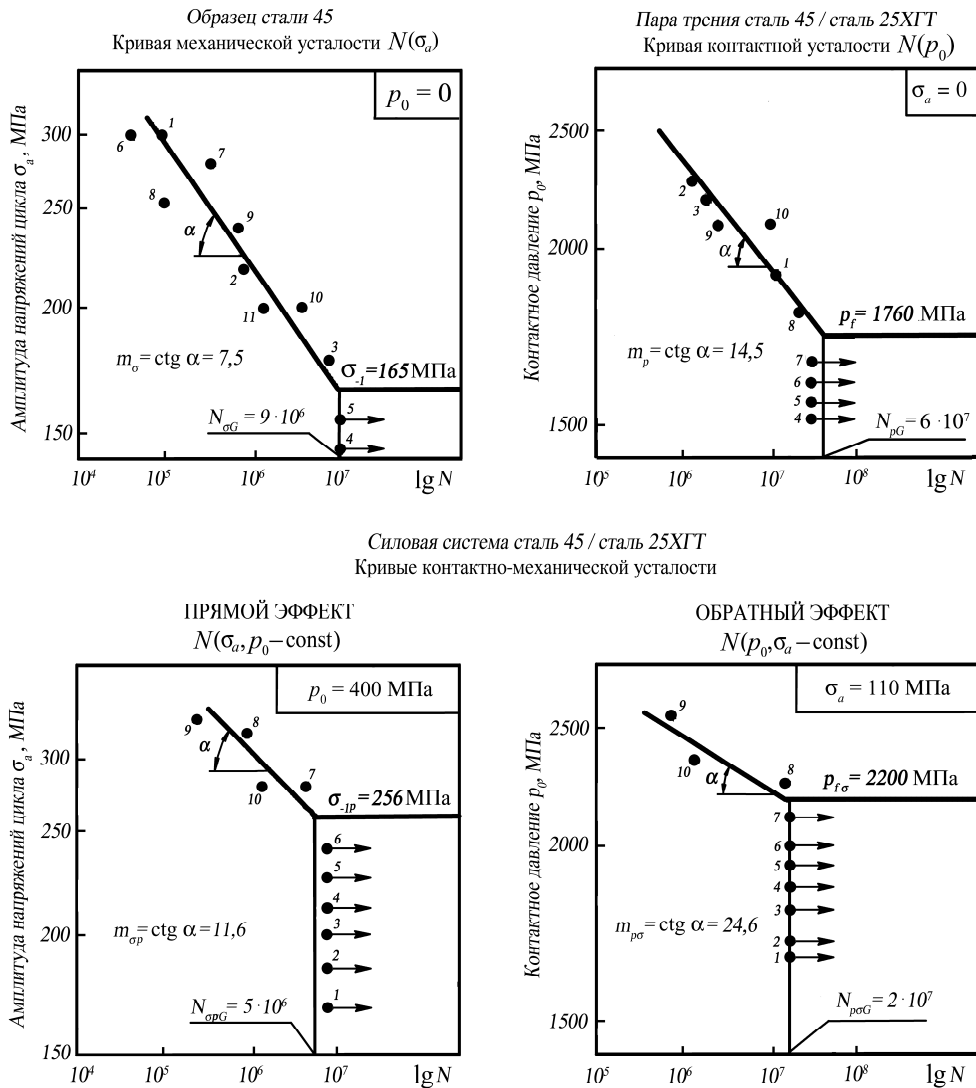


Рисунок 10 – Электромеханическая схема расположения датчиков в машине СИ-03: М1, М2 – приводы образца и контробразца соответственно

На рисунке 11 в качестве примера показаны: две кривые контактно-механической усталости, построенные по результатам износоусталостных испытаний силовой системы сталь 45 / сталь 25ХГТ; кривая механической усталости $N(\sigma_a)$, построенная по результатам испытаний образцов стали 45 (после нормализации); кривая контактной усталости $N(p_0)$, построенная по результатам испытаний на трение качения пары образец стали 45 / ролик стали 25ХГТ (после улучшения).



Силовая система сталь 45 / сталь 25ХГТ
Кривые контактно-механической усталости

Рисунок 11 – К определению основных характеристик износоусталостного повреждения (номер точки указывает последовательность испытаний)

При испытаниях на механическую усталость критерием предельного состояния принято разделение образца на части, при испытаниях на контактную усталость – критическая плотность ямок выкрашивания на поверхности катания. При испытаниях на контактно-механическую усталость наступление предельного состояния определяется критериями повреждения и разрушения, характерными для испытаний на механическую и контактную усталость. Во всех четырех случаях установлены пределы выносливости (σ_{-1} , p_f , σ_{-1p} , $p_{f\sigma}$), параметры наклона левой ветви кривых усталости (m_σ , m_p , $m_{\sigma p}$, $m_{p\sigma}$), а также абсциссы точек перелома кривых усталости ($N_{G\sigma}$, N_{Gp} , $N_{G\sigma p}$, $N_{Gp\sigma}$).

В таблице 2 даны система обозначений и численные значения всех параметров, устанавливаемых по кривым усталости, представленным на рисунке 11.

Анализ экспериментальных данных убедительно показывает, что традиционные методы испытаний (либо на механическую, либо на контактную усталость) не могут правильно охарактеризовать сопротивление системы колесо/рельс комплексному износоусталостному повреждению и разрушению.

Таблица 2 – Система обозначений и численные значения основных характеристик

Характеристики свойств	Кривая механической усталости	Кривая контактной усталости	Кривые контактно-механической усталости	
	$N(\sigma_a)$	$N(p_0)$	$N(\sigma_a, p_0 = \text{const})$	$N(p_0, \sigma_a = \text{const})$
Предел выносливости, МПа	$\sigma_{-1} = 165$	$p_f = 1760$	$\sigma_{-1p} = 256$	$p_{f\sigma} = 2200$
Абсцисса точки перелома кривой усталости, цикл	$N_{G\sigma} = 9 \cdot 10^6$	$N_{Gp} = 26 \cdot 10^7$	$N_{G\sigma p} = 5 \cdot 10^6$	$N_{Gp\sigma} = 2 \cdot 10^7$
Показатель наклона кривой усталости	$m_\sigma = 7,5$	$m_p = 14,5$	$m_{\sigma p} = 11,6$	$m_{p\sigma} = 24,6$

Новые схемы испытаний. Способ испытаний на контактно-механическую усталость, показанный на рисунке 7, а, оказывается неприменимым в том практически важном случае, когда требуется исследовать, например, остаточный ресурс рельсов после пропуска некоторого тоннажа. Дело в том, что при вырезке образца из натурального отрезка рельсов неизбежно снимается его рабочий поверхностный слой, так что изменение свойств материала в зоне дорожки качения не может быть оценено. Следует указать и на другой недостаток способа испытаний модели системы колесо/рельс согласно рисунку 7, а: модель рельса, как и модель колеса, оказывается жесткой, тогда как в действительности рельс лежит на упругом основании и имеет, следовательно, различную жесткость, например, над шпалой и в междушпальном пространстве. Наконец, моделирование системы колесо/рельс может оказаться более корректным, если контактные и изгибные напряжения удалось бы возбуждать при действии единой нагрузки – как в процессе эксплуатации. В литературе по железнодорожному транспорту эту нагрузку называют “осевой”, потому что она передается от вагона вдоль вертикальной оси симметрии каждого из колес. Мы ее будем называть контактной и обозначать F_N , как на рисунке 7.

Таким образом, требуется создать принципиально новую модель для испытаний системы колесо/рельс. Сформулируем, на основании изложенного, основные требования к построению такой модели:

1 Изгибающая и контактная нагрузки должны быть едиными, при этом в зоне контакта должны возбуждаться сжимающие изгибные напряжения.

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) полоску.

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 с 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: ролик можно вырезать из головки рельса так, что одна из его периферийных рабочих зон оказывается расположенной на дорожке катания рельса (рисунок 12 – зона I). Дополнительно получается, что так вырезанный ролик обнаруживает замечательное свойство: при последовательном переходе от зоны I к зонам II либо IV испытаниям будут подвергаться соответствующие слои под поверхностью рельса, т. е. 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 единственного образца.

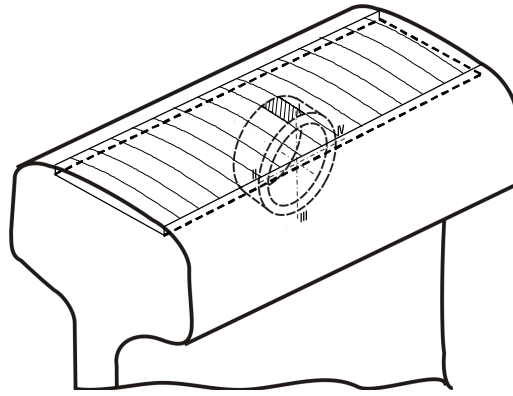


Рисунок 12 – Схема вырезки образца, моделирующего рельс, с сохранением рабочего поверхностного слоя

Чтобы удовлетворить еще одно из главных требований к испытательной модели, примем, что элемент, моделирующий рельс, является не роликом, но – кольцом. Эта основополагающая идея оказывается настолько богатой, что позволяет в конечном счете предложить общую принципиальную схему модели колесо/рельс (рисунок 13), удовлетворяющую основным требованиям к ней, изложенным выше.

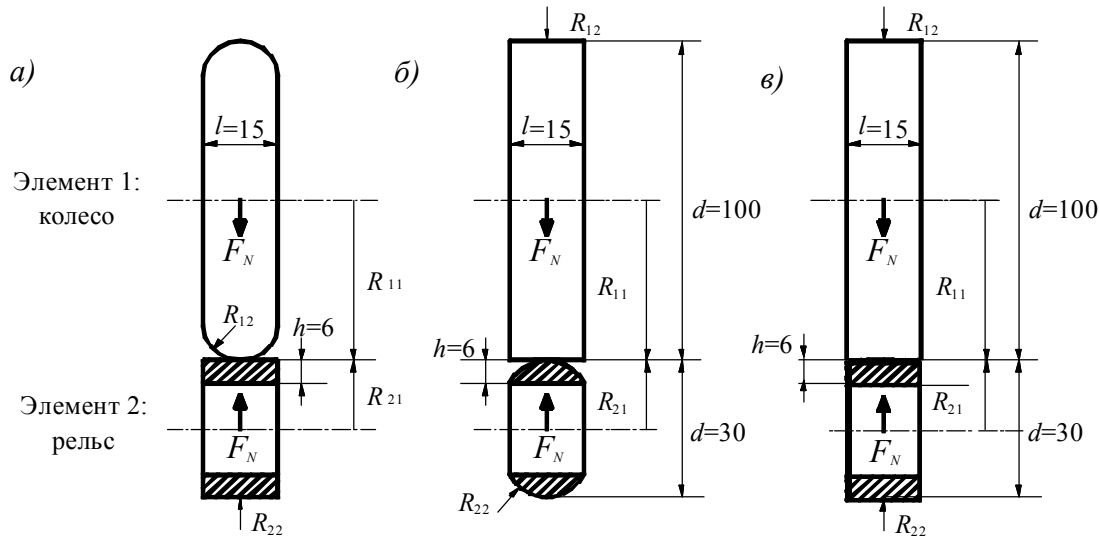


Рисунок 13 – Варианты схемы модели системы колесо/рельс, при которой в зоне взаимодействия реализуется эллиптический контакт

На рисунке 13, *а, б* показаны, по существу, обратимые модели: реализация любой из них практически равноценна, и выбор той или иной из них диктуется соображениями удобства. Для обоих элементов указаны конкретные значения диаметров. Диаметр рельса-кольца ($d = 30$ мм) определяется радиусом головки рельса Р50 по высоте (см. рисунок 12). Диаметр колеса-ролика ($d = 100$ мм) принят по рисунку 7, *а*, чтобы обеспечить возможность испытания модели на имеющихся машинах серии СИ. Что касается определения размеров h и l , а также оставшихся радиусов, нетрудно понять, что это – задача непринципиального свойства. Она решается из конструктивных соображений, а также исходя из величины наибольшей нагрузки, которую можно задавать на испытательных машинах серии СИ.

В случае большого износа рельса правомерно использовать модель по рисунку 13, *в*. Следовательно, расчетная задача должна предусматривать исследование напряженно-деформированного состояния в окрестности эллиптической площадки контакта, которая может трансформироваться в полосу.

Конструктивная схема модели представлена на рисунке 14.

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.

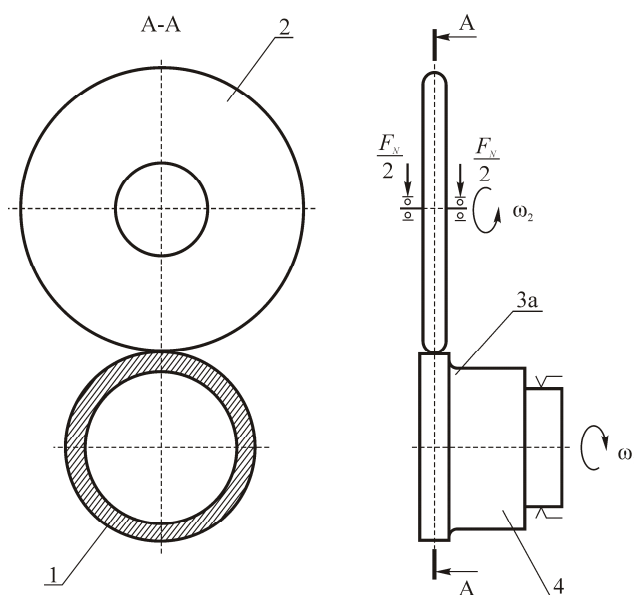


Рисунок 14 – Конструктивная схема модели системы колесо/рельс:
1 – образец; 2 – контрообразец; 3 – консоль; 4 – основание

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 15, а–в). 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). Кроме того, в кольце могут быть прорезаны пазы, имитирующие стыки рельсов в реальных условиях эксплуатации (см. рисунок 15, в).

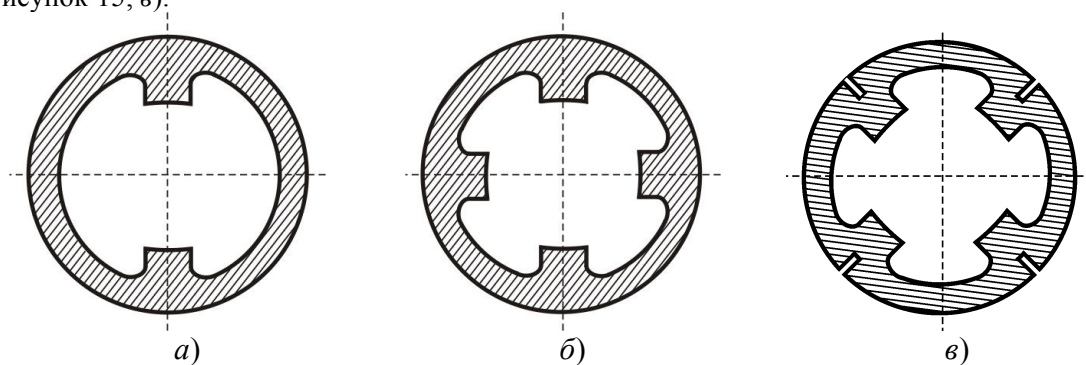


Рисунок 15 – Варианты исполнения образца со “шпалами”

На рисунке 16 показана еще одна модель системы колесо/рельс, которая позволяет более полно воспроизвести реальное напряженное состояние ее элементов. Образец 1, выполненный в виде кольца с радиусами кривизны в двух взаимно перпендикулярных направлениях, моделирует рельс, а контрообразец 2, представляющий собой усеченный конус 3 с ребордой 4 у большего основания, моделирует колесо. Взаимодействие колеса и рельса осуществляется в зонах качения и скольжения, как в реальных условиях.

Контактная нагрузка F_N одновременно возбуждает на дорожке качения изгибные и контактные напряжения, а осевая нагрузка F_X – фрикционные и изгибные напряжения в зоне трения скольжения реборды колеса по боковой поверхности рельса. При этом зона контактного взаимодействия 5 отстоит от вертикальной оси симметрии рельса (плоскости действия силы F_N) на расстоянии эксцентриситета e , что позволяет, изменяя угол α между образующей и высотой конусной поверхности колеса, изменять соотношение изгибных и контактных напряжений в рельсе.

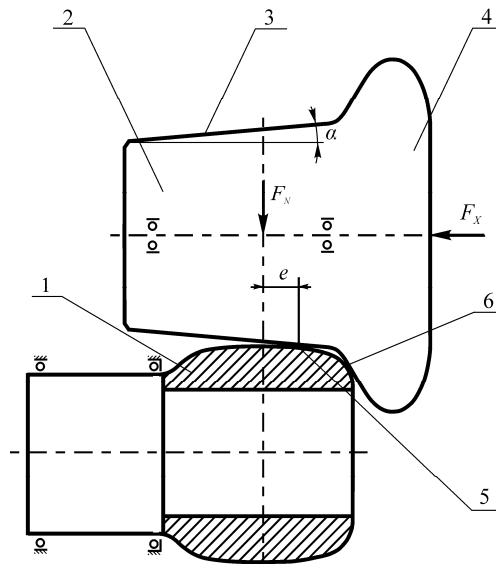


Рисунок 16 – Схема модели системы колесо/рельс (образец – кольцо с ребордой)

Описанные новые схемы испытания различных модификаций модели системы колесо/рельс в настоящее время патентуются; производится экспериментальная отработка соответствующих методик испытаний; устанавливаются рациональные сферы их использования.

Список литературы

- 1 ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – Введ. 01.01.1981. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 32 с.
- 2 Школьник, Л. М. Методика усталостных испытаний: справочник / Л. М. Школьник. – М.: Metallurgy, 1978. – 302 с.
- 3 Р 50-54-30-87. "Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость". – Введ. 01.01.1989 – М.: – Изд-во стандартов, 1988. – 122 с.
- 4 А.с. № 627383, МПК: G01N3/56. Устройство для испытания материалов пары, имитирующей взаимодействие колеса с рельсом на трение и износ (опубл.).
- 5 А.с. № 2115908, МПК: G01M17/00. Стенд для исследования взаимодействия колеса с рельсом железнодорожного транспорта (опубл.).
- 6 Сосновский, Л. А. Основы трибофатики / Л. А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2003. – Т.1. – 246 с.; Т.2. – 234 с.
- 7 ГОСТ 30754-2001. Межгосударственный стандарт. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость. – Введ. 01.01.2002 – Мн.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. – 32 с.
- 8 ГОСТ 30755-2001. Межгосударственный стандарт. Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования. – Введ. 07.01.2002. – Мн.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. – 8 с.
- 9 Богданович, А. В. Закономерности накопления повреждений стали 45 при контактно-механической усталости / А. В. Богданович, С. А. Тюрин, Е. Л. Сенькова // Заводская лаборатория. – 1996. – № 2. – С. 42–45.
- 10 Еловой, О. М. Предельные состояния силовых систем при контактно-механической усталости / О.М. Еловой, С. А. Тюрин // Проблемы безопасности на транспорте: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., 18–20 октября 2000 г./ ред. В. Я. Негрей. – Гомель: БелГУТ, 2000. – С.183.
- 11 Методы износоусталостных испытаний и их реализация на машине СИ / Н. А. Махутов [и др.]. // Заводская лаборатория. – 1995. – № 6. – С. 17–42.
- 12 Андрияшин, В. А. Определение характеристик контактно-механической усталости при прямом и обратном эффектах на испытательных машинах серии СИ / В. А. Андрияшин, С. А. Тюрин // Проблемы безопасности на транспорте: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., 18–20 октября 2000 г./ ред. В.Я. Негрея. – Гомель: БелГУТ, 2000. – С.179.
- 13 Высоцкий, М. С. Машины серии СИ для износоусталостных испытаний материалов, моделей элементов конструкций, пар трения и силовых систем / М. С. Высоцкий, Г. П. Ожигар // Тр. 4-го Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 4), 23–27 сентября 2002 г., Тернополь (Украина) / отв. ред. В. Т. Трошенко. – Тернополь: Тернопольский государственный технический университет им. И. Пулюя, 2002. – Т. 1. – С. 99–105.

Получено 03.04.2005

S. A. Tjurin, V. I. Matvetsov, S. S. Shcherbakov, V. O. Zamjatnin, G. P. Ozhigar, A. A. Syrovkash.
New ways of tests as applied to the wheel/rail system.

New schemas of test of various modifications of model of the wheel / rail system are described. Rational spheres of their use are established.