

**Сосновский Л.А., Высоцкий М.С., Сенько В.И., Богданович А.В.,  
Еловой О.М., Тюрин С.А., Драган В.И.**

## ТРИБОФАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ: ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ

**Введение.** «Без испытания материалов развитая цивилизация существовать не может», – писал Дж. Гордон. И к настоящему времени экспериментальная механика стала базой для любых расчетов на прочность и долговечность; не менее важной ее функцией является познание закономерностей и особенностей поведения материалов под нагрузкой в разнообразных условиях – в том числе при повторно-переменных нагрузках, трении и т.д.

Для экспериментальной оценки взаимного и совместного влияния процессов трения и механической усталости на работоспособность материалов и моделей силовых систем в сложных условиях нагружения в трибофатике разработаны специальные методы износоусталостных испытаний [1–9]. Описанию таких методов и посвящена данная работа. При этом показано, что методы комплексных испытаний базируются, как правило, на инновационных решениях (ИР), которые, конечно же, являются изобретениями [10–23]. Приведем перечень основных ИР при разработке методов и машин для трибофатических испытаний; этот перечень служит и содержанием данной обзорной статьи:

**ИР-1 Формирование и реализация методов испытаний служебных свойств материалов и моделей силовых систем**

**ИР-2 Унификация объектов испытания**

**ИР-3 Элементы мехатроники в механизмах нагружения**

**ИР-4 Автоматизация испытаний**

**ИР-5 Ускоренные методы испытаний**

**ИР-6 Измерение и анализ локальных повреждений в процессе испытаний**

**ИР-7 Явление троппи**

**ИР-8 Оригинальная модель зубчатой передачи и методика ее испытания**

**ИР-9 Оригинальная модель системы колесо-рельс и методика ее испытания**

**ИР-10 Оригинальная модель системы труба/поток жидкости под давлением и методика ее испытания**

Ниже дано систематическое изложение указанных ИР, при этом каждое из них иллюстрируется впервые полученными (на их базе) результатами экспериментальных исследований. По существу, эти результаты тоже являются инновационными, и они составляют экспериментальные основания трибофатики – нового и перспективного раздела современной механики [24–34].

**ИР-1 Формирование и реализация методов испытаний служебных свойств материалов и моделей силовых систем.** Развитие трибологии привело к созданию особого класса испытательного оборудования – машин для испытаний на трение и изнашивание. Развитие механики усталостного разрушения, в свою оче-

редь, привело к созданию другого класса испытательного оборудования – машин для усталостных испытаний. Развитие трибофатики потребовало создания нового класса испытательного оборудования – машин для износоусталостных испытаний.

На слайде 1 в качестве примера показан принцип формирования методов износоусталостных испытаний в том случае, когда в качестве базового метода испытания на усталость принимают изгиб с вращением. Заметим, что вращательное движение наиболее характерно для современных машин, поэтому методы, представленные на слайде 1, являются практически важными. Основные методы износоусталостных испытаний при главном вращательном движении – испытания на контактно-механическую усталость (КМУ), испытания на фрикционно-механическую усталость (ФМУ), испытания на фреттинг-усталость (ФУ).

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.

В начале 90-х годов прошлого века был осуществлен инновационный проект «ПРИОРИТЕТ» – на базе ряда изобретений [10–18] создана универсальная машина СИ для износоусталостных испытаний материалов и моделей силовых систем. На слайде 2 показан общий вид машины СИ, а на слайде 3 – ее принципиальная схема и техническая характеристика. Машина СИ была первым реальным представителем нового класса испытательного оборудования, созданным в Беларуси. Подробное описание универсальной машины СИ можно найти в работах [27–28].

Отметим основные достоинства машины СИ:

1. Машина СИ является универсальной в том смысле, что позволяет реализовывать испытания на усталость, на трение и износ, а также все основные виды износоусталостных испытаний (в условиях главного вращательного движения).

2. Будучи многоцелевой, машина СИ построена на единой базе (корпус, привод, механизм движения), что обеспечивает ее высокую экономичность. Многочисленные методы испытания реализуют, применяя набор простых сменных кассет.

3. Машина СИ не содержит механических передач, что позволяет не только избавиться от потерь мощности, но и значительно снизить погрешность испытаний.

4. Частота вращения образцов регулируется бесступенчато в широком диапазоне: от 50 до 5000 мин<sup>-1</sup>. При реализации трения качения степень проскальзывания задается бесступенчато до 85 %. Благодаря наличию тиристорных приводов со следящей системой, заданный режим испытания поддерживается с высокой точностью в широком скоростном диапазоне.

**Сосновский Леонид Адамович**, д.т.н., профессор, научный руководитель Межведомственной лаборатории «ТРИБОФАТИКА», заслуженный деятель науки и техники Республики Беларусь.

Беларусь, 246050, г. Гомель-50, а/я-24.

**Высоцкий Михаил Степанович**, академик, д.т.н., профессор, генеральный директор государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», Герой Беларуси, лауреат государственной премии.

**Еловой Олег Михайлович**, к.т.н., ст. научный сотрудник государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси».

Беларусь, ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», 220072, г. Минск, ул. Академическая, 12.

**Тюрин Сергей Александрович**, к.т.н., ведущий специалист ЛИИ РУП «Гомсельмаш».

Беларусь, ПО «Гомсельмаш», 246004, г. Гомель, ул. Шоссейная, 41.

**Сенько Вениамин Исаевич**, д.т.н., профессор, ректор Белорусского государственного университета транспорта, заслуженный работник образования Республики Беларусь.

Беларусь, БелГУТ, 246000, г. Гомель, ул. Кирова, 34.

**Богданович Александр Вальдемарович**, д.т.н., доцент, профессор кафедры технической механики Гродненского государственного университета им. Я. Купалы.

Беларусь, ГрГУ, 230023, г. Гродно, ул. Э. Ожешко, 22.

**Драган Вячеслав Игнатьевич**, к.т.н., доцент, профессор кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.



5. Изгибные и контактные нагрузки изменяются также бесступенчато и по любому закону при помощи универсальных электромеханизмов со следящей системой. Можно возбуждать циклические напряжения до 100 МПа и более и контактные давления до 3500 МПа и более. С другой стороны, минимальные нагрузки таковы, что могут быть испытаны металл-полимерные и полимер-полимерные системы.

6. Контактные нагрузки могут быть заданы в зоне действия как растягивающих, так и сжимающих изгибных напряжений.

7. Машина СИ может быть оснащена современной измерительно-управляющей системой, построенной на базе ПЭВМ. Это позволяет автоматизировать процесс испытаний и обработки результатов.

Коэффициент технического уровня машины СИ существенно выше условия соответствия испытательного оборудования мировому уровню (см. слайд 3).

На машине СИ можно проводить следующие виды испытаний:

- испытания на механическую усталость в условиях консольного изгиба с вращением круглых образцов (слайд 4, а). Основные типы и размеры рабочей зоны образцов показаны на слайде 4, б-е. Испытаниям можно подвергать как гладкие образцы (слайд 4, б) с профильным радиусом 10-50 мм, так и образцы с разными концентраторами напряжений (слайд 4, в-е);
- испытания на трение и изнашивание при скольжении по схемам диск-неподвижный диск (слайд 6, а), диск-колодка (слайд 6, в), и вал-втулка (слайд 6, г). Предусмотрено также еще 6 схем контакта образец-контроль образец (слайд 5, а-е);
- испытания на трение и изнашивание при качении по схеме диск-диск (слайд 6, б). Предусмотрено еще 3 схемы контакта образец-ролик (слайд 8, а-в);



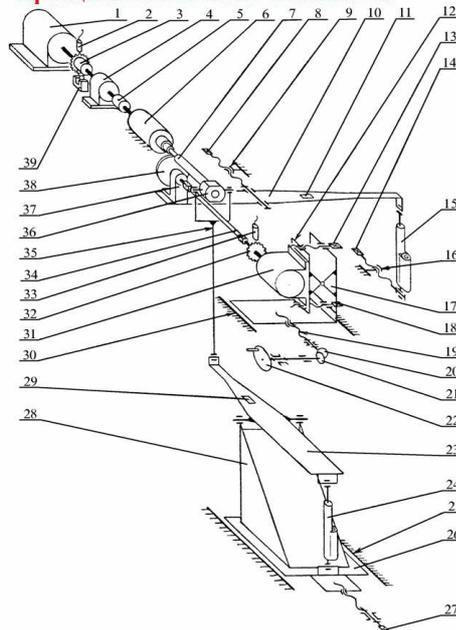
## МАШИНА СИ: ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА, ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ

**3**

### Техническая характеристика машины СИ

Наименование показателей	Значение
Количество схем испытаний	28
Диаметр рабочей части образца, мм при испытаниях на трение	10...60
при испытаниях на усталость	10
при износоусталостных испытаниях	10
Габаритные размеры контрообразца, мм	
Колодки	10x10x11,5
Ролика (диаметр)	80
Абсолютная погрешность фиксации наработки (количества оборотов вала образца - числа циклов нагружения) до момента достижения предельного состояния, оборот	1
Диапазон частот вращения образца, мин <sup>-1</sup>	50...5000
Диапазон частот вращения контрообразца, мин <sup>-1</sup>	50...2000
Предел допускаемой погрешности поддержания частоты вращения образца (контрообразца), %	2
Диапазон задаваемых значений коэффициента проскальзывания, %	0...85
Нагружение	Программное
Диапазон изгибающих нагрузок, Н	50...1500
Диапазон контактных нагрузок, Н	20...5000
Предел допускаемой погрешности поддержания контактной и изгибающей нагрузок, %	2
Диапазон измерения суммарного износа образца и контрообразца, мкм	10...1000
Предел допускаемой погрешности измерения суммарного износа образца и контрообразца, %	2
Диапазон измерения момента трения, Нм	0,5...20
Предел допускаемой погрешности измерения момента трения, %	2

### Принципиальная схема машины СИ

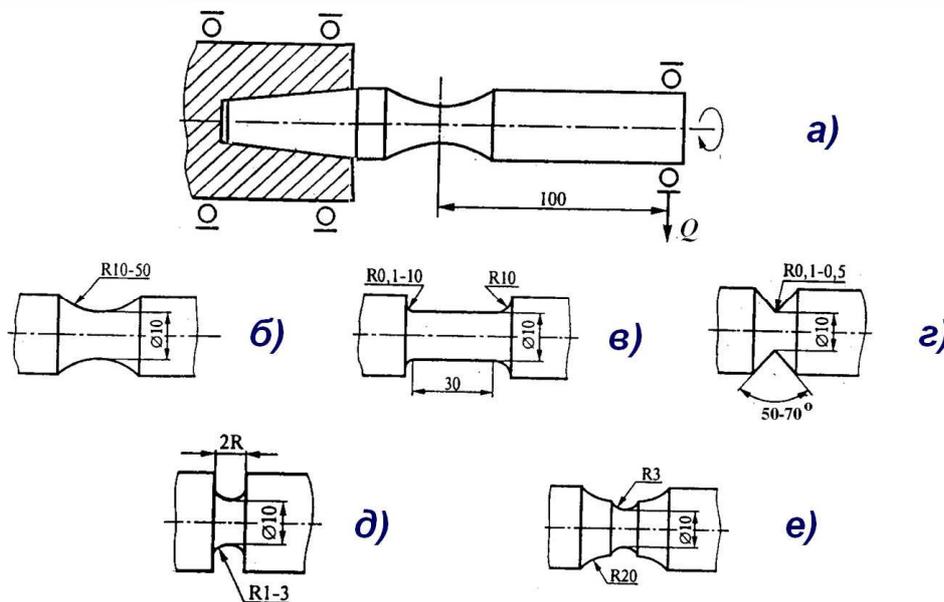


Условие соответствия испытательной машины мировому уровню – коэффициент технического уровня  $K_{TY} \geq 1$   
Для машины СИ  $K_{TY} = 2,39$



## МАШИНА СИ: ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ИСПЫТАНИЙ

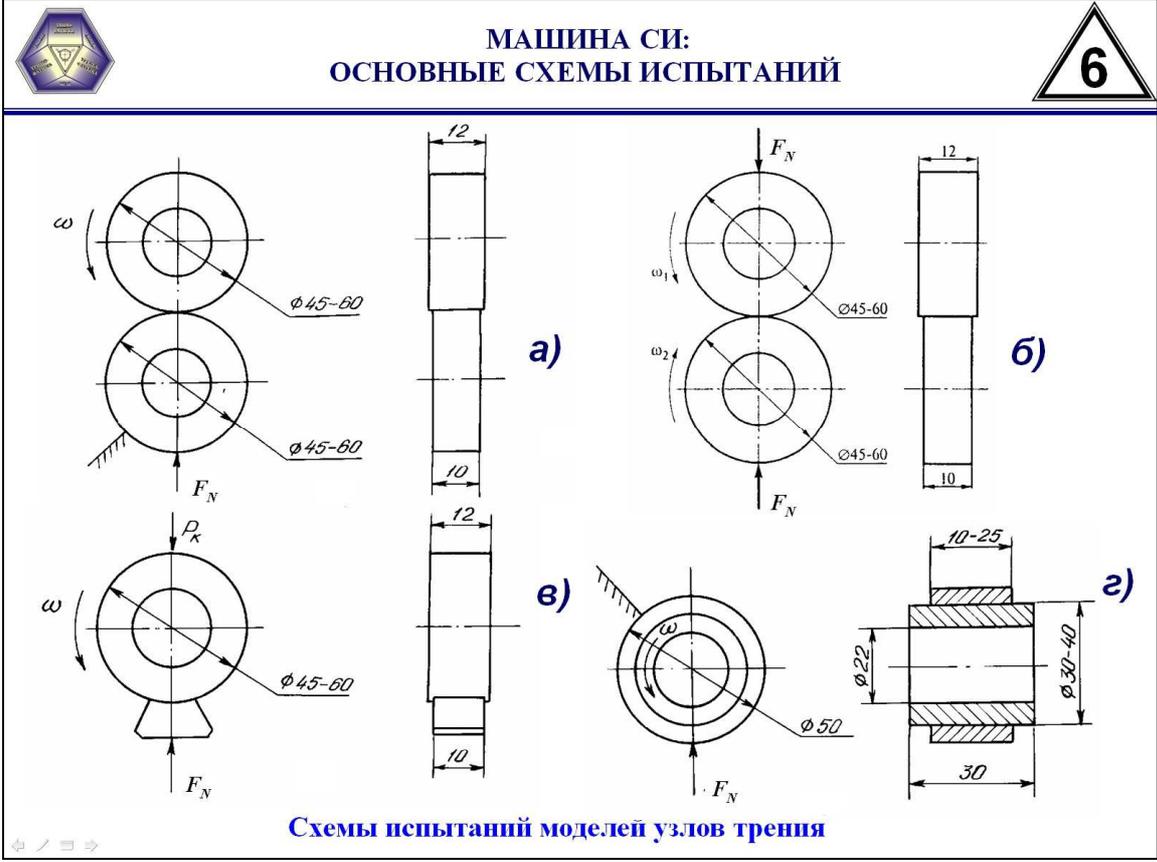
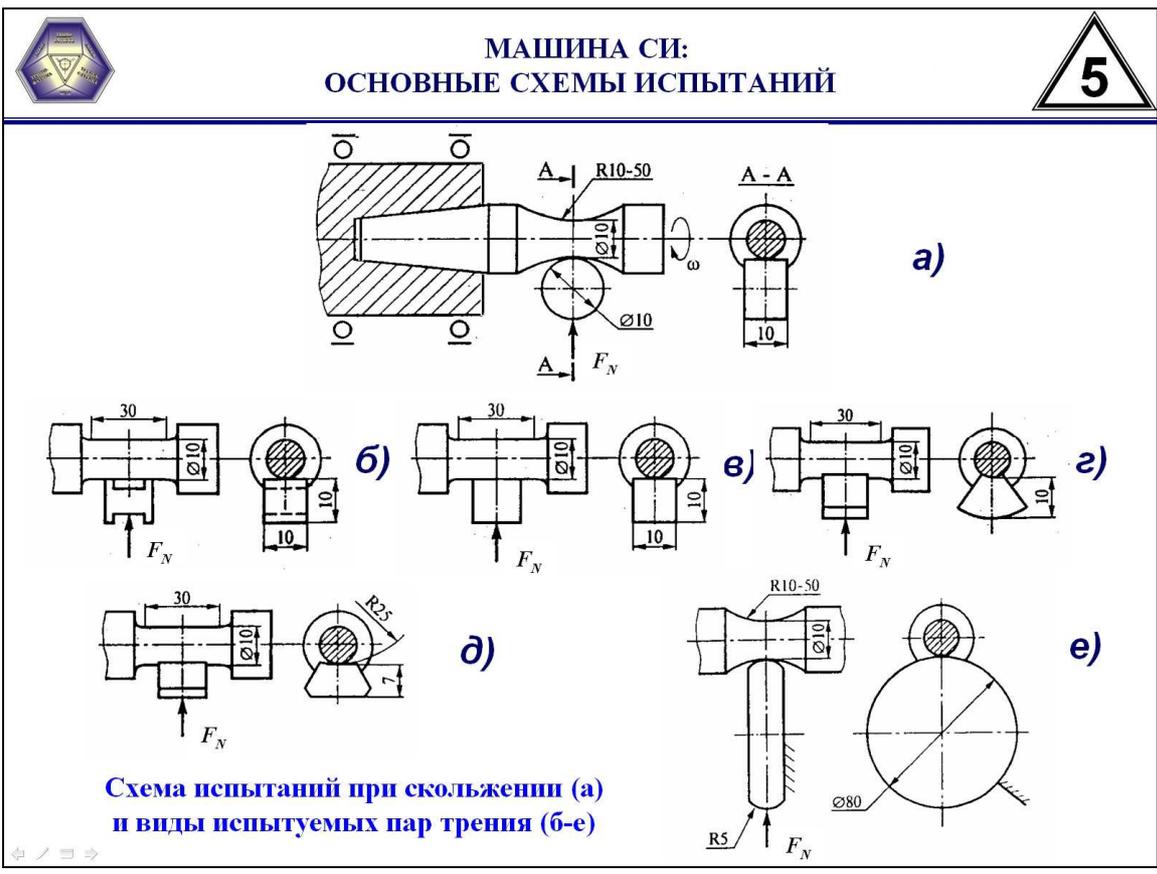
**4**



**Схема испытаний на механическую усталость (а)  
и виды испытываемых элементов конструкций (б-е)**

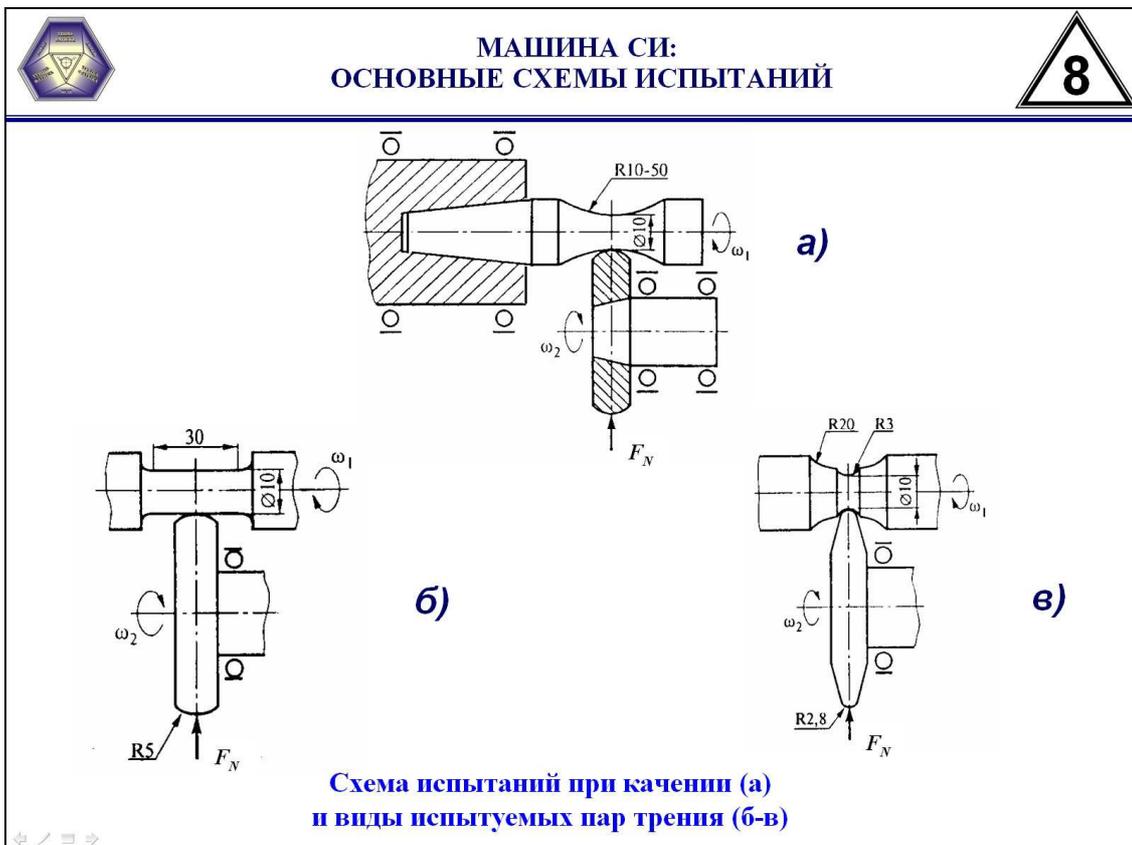
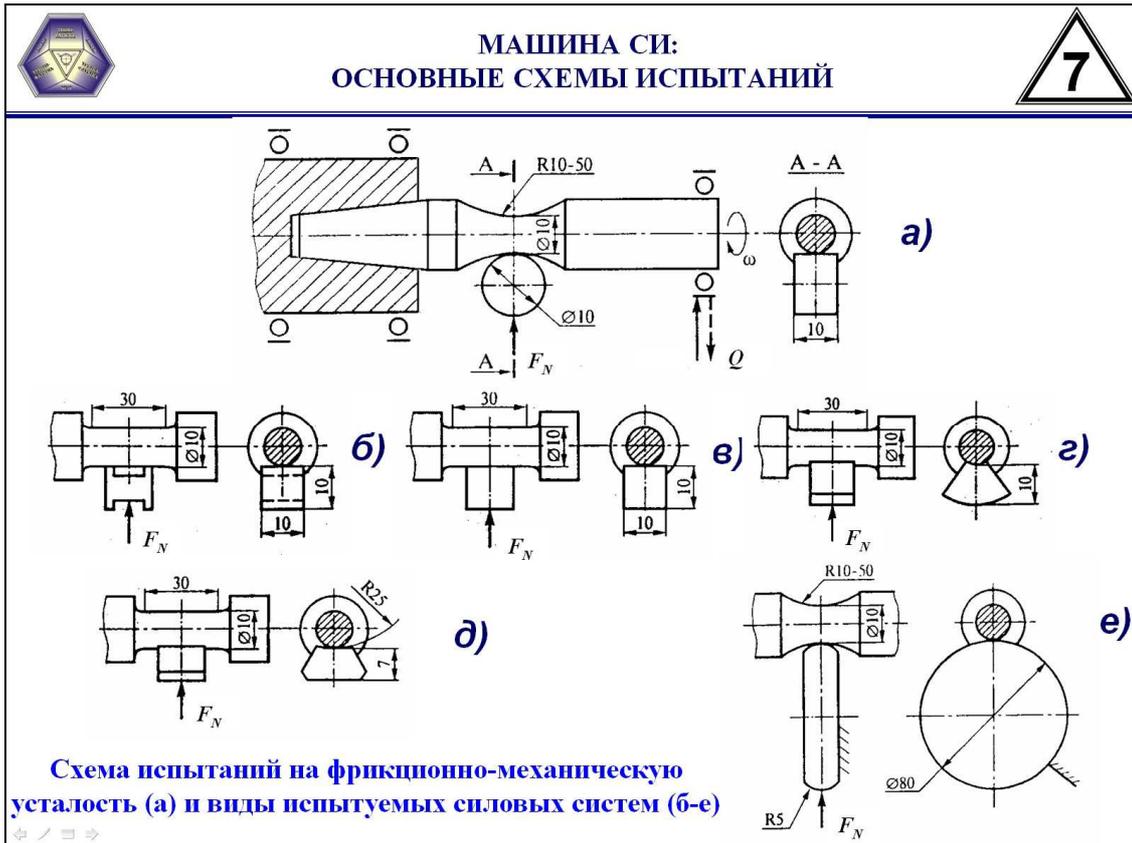
- комплексные износоусталостные испытания на фрикционно-механическую усталость (слайд 7, а-е), на контактно-механическую усталость (слайд 9, а-в), на фреттинг-усталость (слайд 9).

Как уже отмечалось, ИП при создании испытательной машины СИ позволили получить и новые фундаментальные результаты испытаний. На слайдах 10 и 11 представлены некоторые из таких экспериментальных результатов, полученные на универсальной машине СИ [35–36].



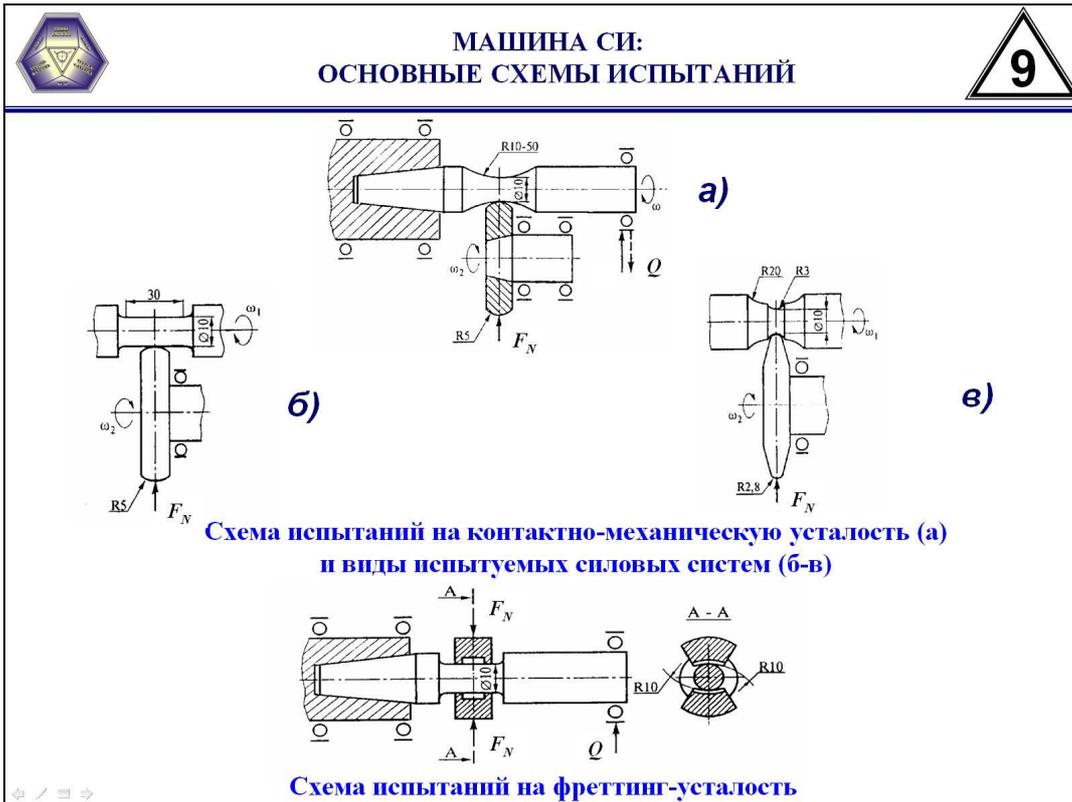
На слайде 10 дано первое и убедительное подтверждение гипотезы о возможности построения полной кривой фрикционной усталости [35]; это – результаты уникального эксперимента, для проведения

которого потребовалось более 2-х лет непрерывных испытаний, поскольку была принята базовая долговечность, равная 80 млн. циклов.



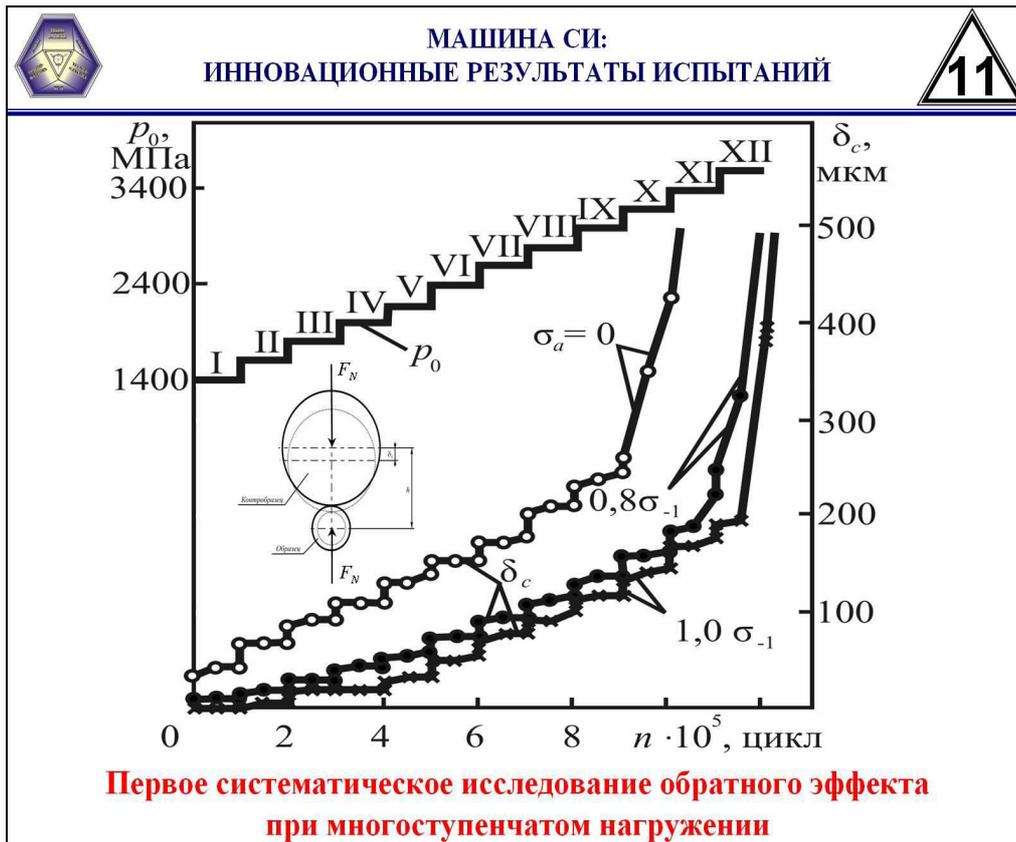
Значение этой кривой, по нашему мнению, переоценить трудно. В самом деле, известно, что в механике трения и износа отсутствует общепризнанный метод расчета на износостойкость, тогда как в механике прочности (в том числе и усталостной) он давно разрабо-

тан и плодотворно применяется. Теперь, когда установлена полная кривая фрикционной усталости, можно, используя, например, одну её часть – кривую многоциклового усталости, записать соответствующее условие износостойкости.



На слайде 11 представлены результаты первых экспериментов по изучению обратного эффекта при КМУ методом многоступенчатого нагружения [36]. Было сравнительно изучено повреждение деформируемой системы при трении качения и при комплексном нагружении – контактно-механической усталости. Испытания в обоих случаях проводили при многоступенчатом повышении контактного давления  $p_0$  в широком диапазоне его изменения (слайд 11, ступени I, II, ..., XII). В

процессе испытания системы вал / ролик измеряли сближение  $\delta_c$  осей этой пары элементов в условиях трения качения (когда амплитуда циклических напряжений  $\sigma_a = 0$ ) и в условиях контактно-механической усталости (при  $\sigma_a = 0,8 \sigma_{-1}$  и  $\sigma_a = 1,0 \sigma_{-1}$ , где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости).



Из полученных данных следует, что процесс накопления износусталостных повреждений существенно замедляется по сравнению с процессом повреждения при трении качения, при этом диапазон

нормального трения по контактному давлению увеличивается примерно на 14 % (см. слайд 11).

**ИР-2 Унификация объектов испытания.** Главная и важнейшая особенность методов износоусталостных испытаний состоит в том, что все они построены на базе единого унифицированного объекта – вала диаметром 10 мм, используемого при любых схемах нагружения (слайд 12); это обеспечивает сравнимость данных, полученных при испытаниях элементов конструкций, пар трения и силовых систем [1–9]. 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 испытуемых объектов различаются, как правило, в несколько раз.

К настоящему времени типичные методы износоусталостных испытаний доведены до стандартного исполнения (см. слайд 12) [37–41].

Был осуществлен и ещё один важный проект: на основе ряда изобретений [10–18] создан новый класс испытательных машин – модульные машины серии СИ, на которых проводят износоусталостные испытания по любой из принятых (см. слайд 12) схем испытания. Были созданы следующие базовые модели машин СИ для износоусталостных испытаний (слайд 13):

- машина СИ-01 (испытания на фрикционно-механическую усталость);
- машина СИ-02 (испытания на контактно-механическую усталость);
- полнокомплектная машина СИ-03 (испытания на фрикционно-механическую и контактно-механическую усталость).

На всех этих машинах можно проводить и испытания на фреттинг-усталость.

Подробное описание модульных машин серии СИ можно найти в работах [27–28].

Общий вид модульной машины СИ-03М, а также основные технические характеристики машин СИ-01, СИ-02, СИ-03 приведены на слайде 13.

Машины серии СИ изготавливаются в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 30755–2001 «Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования» [42].

На слайдах 14 и 15 показаны инновационные результаты испытаний, полученные на модульных машинах серии СИ. Впервые экспериментально построены четыре кривые усталости [43], а именно: кривая механической усталости  $N(\sigma_a)$ , построенная по результатам испытаний образцов углеродистой стали 45 (после нормализации); кривая контактной усталости  $N(\rho_0)$ , построенная по результатам испытаний на трение качения пары образец из углеродистой стали 45/ролик из стали 25ХГТ (после улучшения), а также две кривые контактно-механической усталости, построенные по результатам износоусталостных испытаний силовой системы сталь 45/сталь 25ХГТ (см. слайд 14).

При испытаниях на механическую усталость критерием предельного состояния принято разделение образца на части, при испытаниях на контактную усталость – критическая плотность ямок выкрашивания на поверхности качения. 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 ( $\sigma_{-1}$ ,  $\rho_f$ ,  $\sigma_{-1p}$ ,  $\rho_{f0}$ ), параметры наклона левой ветви кривых усталости ( $m_\sigma$ ,  $m_p$ ,  $m_{\sigma p}$ ,  $m_{p\sigma}$ ), а также абсциссы точек перелома кривых усталости ( $N_{\sigma G}$ ,  $N_{pG}$ ,  $N_{\sigma pG}$ ,  $N_{p\sigma G}$ ). Заметим: если пределы выносливости при механической ( $\sigma_{-1}$ ) и контактной ( $\rho_f$ ) усталости являются однозначными и единственными характеристиками соответствующих объектов при заданной базе испытания, то пределы выносливости при контактно-механической усталости ( $\sigma_{-1p}$ ,  $\rho_{f0}$ ) таковыми не являются. Подобных кривых усталости можно построить как угодно много – столько, сколько значений параметров  $\rho_0 = \text{const}$  или  $\sigma_a = \text{const}$  принимают при износоусталостных испытаниях, когда изучают закономерности прямого и обратного эффектов.

Сравнение кривых усталости  $N(\sigma_a)$  и  $N(\sigma_a, \rho_0 = \text{const})$  позволяет охарактеризовать влияние процессов трения и изнашивания на



## ИР-2: ПЕРВАЯ УНИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗНОСУСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ



1. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 30754-2001. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость. –Мн.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. –32 с.
2. СТБ 1066-97. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость (Стандарт Беларуси). –Минск: ГОССТАНДАРТ, 1997. –58 с.
3. СТБ 1233-2000. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость (Стандарт Беларуси). –Минск: ГОССТАНДАРТ, 2000. –8 с.
4. СТБ 1448-2004. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на фрикционно-механическую усталость (Стандарт Беларуси). –Минск: ГОССТАНДАРТ, 2004. –14 с.
5. СТБ 1758-2007. Трибофатика. Метод совмещенных испытаний на изгибную и контактную усталость материалов зубчатых колес (Стандарт Беларуси). – Минск: ГОССТАНДАРТ, 2007. –45 с.

ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ

ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

МЕХАНИЧЕСКАЯ УСТАЛОСТЬ

а) контактно-механическая усталость

б) контактная усталость

в) механическая усталость

г) фрикционная усталость

д) фрикционно-механическая усталость

□ усталость



**ИР-2: ПЕРВЫЕ ОПЫТНЫЕ ОБРАЗЦЫ МАШИН СЕРИИ СИ**



**Общий вид первой универсальной модульной машины СИ-03М**



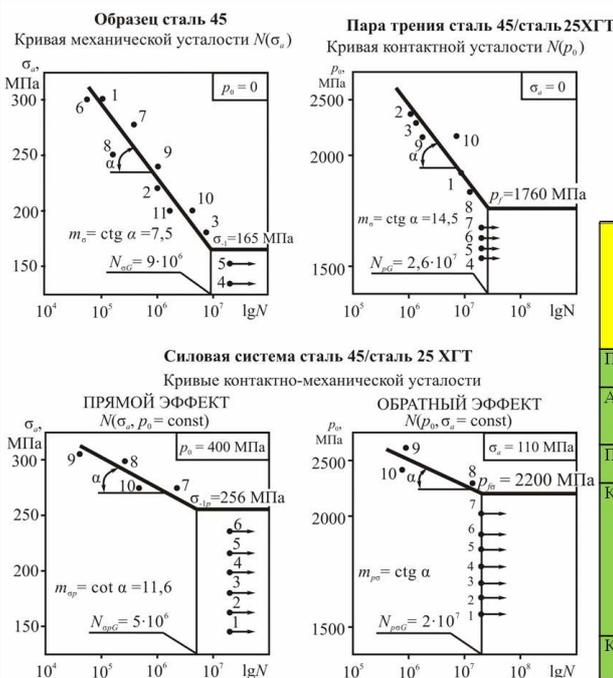
**Технические характеристики модульных машин серии СИ**

Показатель	СИ-01	СИ-02	СИ-03
	Пара трения		
	цилиндр – колодка	цилиндр – ролик	цилиндр-колодка, цилиндр-ролик
Диаметр рабочей части образца, мм	10	10	10
Размеры контрообразца, мм	10×10×11,5	∅100	10×10×11,5 ∅100
Диапазон частот вращения образца, мин <sup>-1</sup>	40...4000	3000	600...6000
Диапазон частот вращения контрообразца, мин <sup>-1</sup>	–	50...500	50...500
Диапазон изгибающих нагрузок, Н	70...700	70...700	10...800
Диапазон контактных нагрузок, Н	10...500	50...1000	10...2000
Диапазон измерения суммарного износа образца и контрообразца, мкм	10...3000	10...3000	10...4000
Диапазон измерения момента трения, Н·м: – при трении скольжения – при трении качения	0,01...1,2 –	– 0,2...20	0,01...1,2 0,2...20

1. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 30755-2001. Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования. –Мн.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. –8 с.  
2. СТБ 1067-97. Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования (Стандарт Беларуси). –Минск: ГОССТАНДАРТ, 1997. –10 с.



**МАШИНА СИ-03: ИННОВАЦИОННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ**



**Первые результаты сравнительных испытаний унифицированных объектов и система характеристик трения, сопротивления усталости и комплексного – износоусталостного повреждения**

Характеристика свойств	Кривая механической усталости	Кривая контактной усталости	Кривые контактно-механической усталости	
	$N(\sigma)$	$N(p_0)$	$N(\sigma, p_0 = \text{const})$	$N(p_0, \sigma = \text{const})$
Предел выносливости, МПа	$\sigma_{-1} = 165$	$p_{-1} = 1760$	$\sigma_{-1p} = 256$	$p_{-1\sigma} = 2200$
Абсцисса точки перелома кривой усталости, цикл	$N_{\sigma\sigma} = 9 \cdot 10^6$	$N_{p_0 p_0} = 2,6 \cdot 10^7$	$N_{\sigma p_0} = 5 \cdot 10^6$	$N_{p_0 \sigma} = 2 \cdot 10^7$
Показатель наклона кривой усталости	$m_\sigma = 7,5$	$m_{p_0} = 14,5$	$m_{\sigma p_0} = 11,6$	$m_{p_0 \sigma} = 24,6$
Коэффициенты прямого ( $K_D$ ) и обратного ( $K_B$ ) эффектов – по несущей способности – по интенсивности повреждения	–	–	$K_D = 1,55$ $K_D = 1,54$	$K_B = 1,25$ $K_B = 1,70$
Коэффициент трения	–	$f_p = 0,055$	$f_{\sigma p} = 0,074$	$f_{p \sigma} = 0,072$

изменение характеристик сопротивления механической усталости при данных условиях испытания. Такое влияние принято называть

прямым эффектом (direct effect). В частности, можно определить коэффициент прямого эффекта

$$K_D = \sigma_{-1p} / \sigma_{-1} \quad (1)$$



По существу, коэффициент  $K_D$  является прочностной характеристикой. В условиях опытов, результаты которых представлены на слайде 14, имеем  $K_D=256/165=1,55$ .

Сравнение кривых усталости  $N(p_0)$  и  $N(p_0, \sigma_a = \text{const})$  позволяет охарактеризовать влияние процессов механической усталости на изменение характеристик трения и изнашивания в данных условиях испытания. Такое влияние принято называть обратным эффектом (back effect). В частности, можно определить коэффициент обратного эффекта

$$K_B = p_{f\sigma} / p_f \quad (2)$$

По существу, коэффициент  $K_B$  является трибологической характеристикой. В условиях опытов, результаты которых представлены на слайде 14, имеем  $K_B=2200/1760=1,25$ .

Если коэффициенты (1) и (2) характеризуют прямой и обратный эффекты по несущей способности системы, то аналогичные им коэффициенты

$$K_D = m_{\sigma p} / m_{\sigma}, K_B = m_{p\sigma} / m_p, \quad (3)$$

характеризуют их по интенсивности повреждения, поскольку параметры наклона кривых усталости описывают, по существу, скорость изменения сопротивления усталости по числу циклов нагружения до наступления предельного состояния.

В таблице на слайде 14 даны система обозначений и численные значения всех параметров, устанавливаемых по кривым усталости, представленным на слайде 14.

На слайде 15 представлена первая многокритериальная диаграмма предельных состояний силовой системы при контактно-механической усталости [44].

Изучение диаграммы ABCD (см. слайд 15) позволяет сделать следующие основные выводы.

(1) Предел выносливости образца повышается до 1,5–1,6 раза, если одновременно реализуется процесс трения качения (прямой эффект – участок AB).

(2) Критическое (предельное) давление при трении качения повышается до 1,2...1,25 раза, если одновременно в образце возбуждаются циклические напряжения (обратный эффект – участок DC).

(3) В оптимальной области контактных давлений ( $p_0 \approx 400\text{--}1300$  МПа) процесс изнашивания при качении ведет к существенному повышению надежности системы по критерию сопротивления усталости, так что стремление к безыносному трению в данном случае неправомерно.

(4) Растягивающие напряжения при циклическом нагружении в оптимальных условиях ( $\sigma_a \approx 50 \dots 100$  МПа) благоприятны – они способствуют существенному повышению надежности системы по критерию сопротивления трению качения.

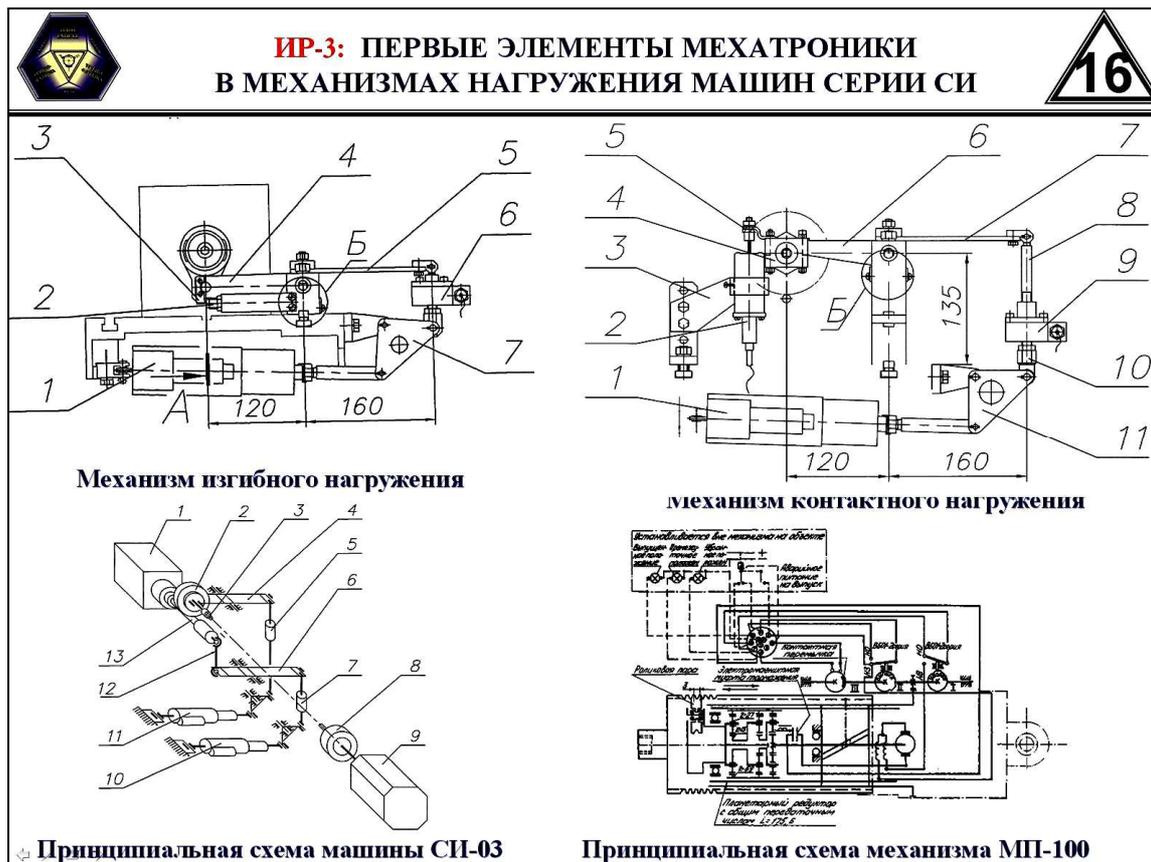
Повышение характеристик предельного состояния  $\sigma_{-1p}$  и  $p_{f\sigma}$  в процессе износоусталостных испытаний по сравнению с таковыми при трении качения ( $p_f$ ) и механической усталости ( $\sigma_{-1}$ ) можно объяснить с позиций механики следующими основными причинами:

- сложением напряжений разного знака (контактных и изгибных), что ведет к сдвигу среднего напряжения цикла в сторону отрицательных значений и, следовательно, снижению максимального напряжения цикла;
- упрочнением рабочей части образца поверхностным пластическим деформированием;
- образованием благоприятных остаточных напряжений сжатия;
- залечиванием первичных усталостных трещин при упругопластическом деформировании в процессе трения качения.

**ИР-3 Элементы мехатроники в механизмах нагружения.**

Обычно в механизмах нагружения испытательных машин применяется грузовая подвеска [45]. Однако такой способ силовозбуждения является неудовлетворительным с той точки зрения, что в процессе испытания напряжения в испытуемых объектах нельзя варьировать.

В качестве механизмов изгибного и контактного нагружения в модульных машинах серии СИ впервые использованы механизмы



МП-100 с приводом постоянного тока (слайд 16). Напряжение питания механизмов 24 В, потребляемый ток до 2 А. Несмотря на небольшую потребляемую мощность, механизмы этой серии развивают усилие 1700 Н непосредственно на выходном штоке.

Механизмы оснащены путевыми выключателями, которые позволяют определять крайние положения штока. Кроме того, имеется путевой выключатель, который может быть установлен в любое промежуточное (среднее) положение.

Таким образом, применение элементов мехатроники в машинах серии СИ открыло реальную возможность автоматизации процесса нагружения по любой программе.

Более подробное описание элементов мехатроники в машинах серии СИ можно найти в работах [27–28].

**ИР-4 Автоматизация испытаний.** Обычно в испытательных машинах с главным вращательным движением для управления ходом эксперимента, сбора и обработки данных применяется шкаф управления, имеющий встроенные контрольно-измерительные приборы (КИП), аппаратуру управления и сигнализации. Однако такая система управления, хотя и является простой в эксплуатации, требует постоянного «надзора» со стороны испытателя, она громоздка и трудноперестраиваема.

Для машин серии СИ впервые разработана информационно-управляющая система, которая позволяет полностью автоматизировать управление процессом испытаний и измерение основных параметров (слайды 17–19).

Система управления позволяет определять частоту вращения образца, частоту вращения контробразца, величину контактной нагрузки, величину изгибной нагрузки, крутящий момент на валу двигателя контробразца, температуру в зоне испытаний, уровень вибрации, суммарный износ пары трения, температуру окружающей среды, время испытаний, количество циклов нагружения образца. Точки подключения датчиков и первичных преобразователей условно показаны на слайде 17.

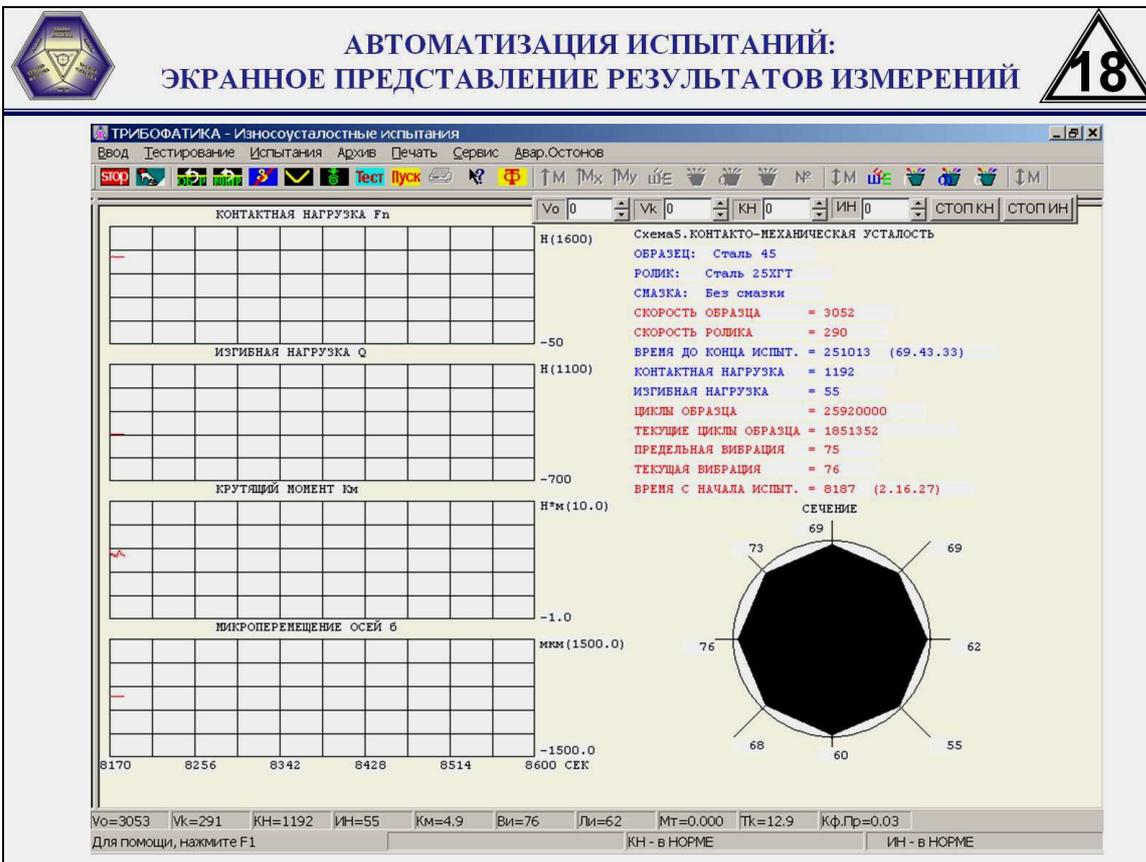
Система измерений построена таким образом, что оператор-испытатель с помощью персонального компьютера задаёт параметры испытания и критерии его останова, после чего машина запускается в автономном режиме, формирует необходимые управляющие воздействия, осуществляет сбор данных с датчиков и запись их на жесткий диск Персонального компьютера. В процессе сбора данных на экране отображаются основные параметры испытания и измеряемые величины (слайд 18). После завершения испытаний файл базы данных с результатами измерений можно анализировать с помощью стандартных программ пакета Microsoft Office или с помощью других специализированных программ.

Система измерений по своей архитектуре является распределенной. Ее структура представлена на слайде 19. Отдельные составные части системы измерений конструктивно разделены и связаны в единую систему с помощью аналоговых и цифровых линий связи. В машинах серии СИ применены электронные датчики, обладающие высокой точностью и линейностью, высокой устойчивостью к вибрации.

Основными устройствами системы измерений являются управляющий компьютер, датчики и первичные преобразователи, нормирующие усилители, механизмы нагружения, электроприводы, система смазки.

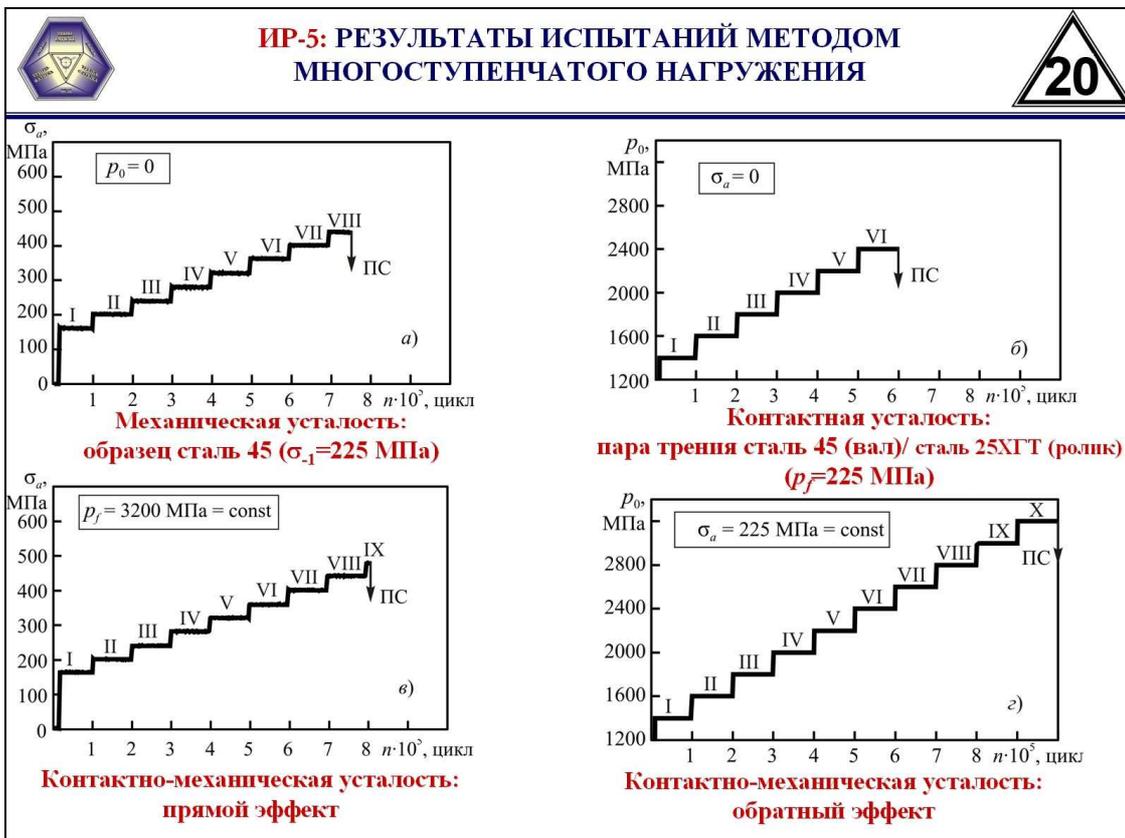
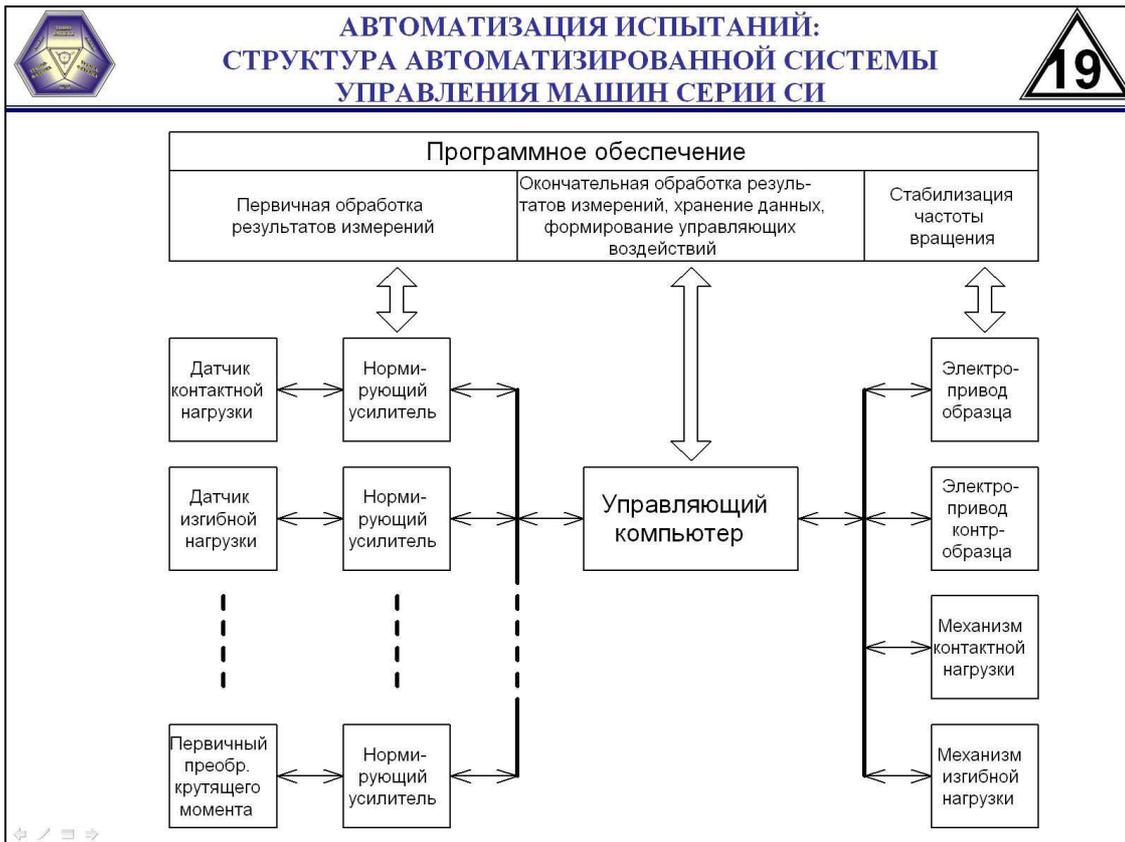
Важнейшим элементом системы управления и измерений является программное обеспечение (ПО). Специализированное ПО позволяет в диалоговом режиме задать режимы испытаний, периодичность измерения и регистрации параметров, обеспечивает отображение режимов работы оборудования и текущих значений измеряемых параметров в удобном для испытателя виде.

Следует отметить, что программное обеспечение, так же как и аппаратные средства системы управления, является распределенным. Так, контроль некоторых аварийных сигналов и стабилизация частот вращения обеспечивается программным обеспечением электроприводов, формирование управляющих воздействий, окончательная обработка результатов измерений, хранение данных, выполняется программным обеспечением управляющего компьютера.



Подробное описание информационно-управляющей системы машин серии СИ можно найти в работах [46–47].

**ИР-5 Ускоренные методы испытаний.** Метод многоступенчатого нагружения широко используют для ускоренной оценки основной характеристики сопротивления усталости металлических материалов



– предела выносливости [48 и др.]. Мы используем этот метод для того, чтобы получить комплекс специфических характеристик износоусталостного повреждения в специфических же условиях [49].

На слайде 20 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 слайд 20 достаточно, чтобы увидеть: сопротивление износоусталостному повреждению и разрушению сравниваемых



**ИР-5: ХАРАКТЕРИСТИКИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПРИ МНОГОСТУПЕНЧАТОМ НАГРУЖЕНИИ**



Характеристики свойств	Механическая усталость	Контактная усталость	Контактно-механическая усталость	
			Прямой эффект	Обратный эффект
Предельное напряжение, МПа	$\sigma_k = 440$	$p_k = 2400$	$\sigma_{kp} = 480$	$p_{k\sigma} = 3200$
Интервал нагрузочности, МПа	$\Delta\sigma = \sigma_k - \sigma_n = 280$	$\Delta p = p_k - p_n = 1000$	$\Delta\sigma = \sigma_{kp} - \sigma_n = 320$	$\Delta p = p_{k\sigma} - p_n = 1800$
Интервал предельных напряжений, МПа	$\Delta\sigma_{lim} = \sigma_k - \sigma_{-1} = 215$	$\Delta p_{lim} = p_k - p_f = 640$	$\Delta\sigma_{lim} = \sigma_{kp} - \sigma_{-1} = 255$	$\Delta p_{lim} = p_{k\sigma} - p_f = 1440$
Параметры несущей способности	$K_{lim} = \frac{\sigma_k}{\sigma_{-1}} = 1,956$ $\Delta K_{lim} = \frac{\Delta\sigma_{lim}}{\Delta\sigma} = 0,768$	$K_{lim} = \frac{p_k}{p_f} = 1,364$ $\Delta K_{lim} = \frac{\Delta p_{lim}}{\Delta p} = 0,640$	$K_{lim} = \frac{\sigma_{kp}}{\sigma_{-1}} = 2,133$ $\Delta K_{lim} = \frac{\Delta\sigma_{lim}}{\Delta\sigma} = 0,797$	$K_{lim} = \frac{p_{k\sigma}}{p_f} = 1,818$ $\Delta K_{lim} = \frac{\Delta p_{lim}}{\Delta p} = 0,800$
Суммарная долговечность, цикл	$\sum n_\sigma = 7,51 \cdot 10^5$	$\sum n_p = 6 \cdot 10^5$	$\sum n_{\sigma p} = 8,04 \cdot 10^5$	$\sum n_{p\sigma} = 10 \cdot 10^5$
Суммарная живучесть, цикл	$\sum n(\Delta\sigma_{lim}) = 5,51 \cdot 10^5$	$\sum n(\Delta p_{lim}) = 4 \cdot 10^5$	$\sum n(\Delta\sigma_{lim}) = 6,04 \cdot 10^5$	$\sum n(\Delta p_{lim}) = 8 \cdot 10^5$
Предельная циклонпряженность, МПа · цикл	$\sum (n\sigma) = 2,18 \cdot 10^8$	$\sum (np) = 9,4 \cdot 10^8$	$\sum (n\sigma) = 2,42 \cdot 10^8$	$\sum (np) = 2,3 \cdot 10^9$

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.

В таблице на слайде 21 дана сводка характеристик износоустойчивости повреждения, численные значения которых можно получить по результатам испытаний методом многоступенчатого нагружения; в этой же таблице приведены и необходимые формулы для их оценки.

**ИР-6 Измерение и анализ локальных повреждений в процессе испытаний.** Понимание того, что всякому предельному состоянию, особенно в зонах контактного взаимодействия, всегда предшествует то или иное развивающееся локальное (местное) повреждение, стало давно обычным; и в теоретическом, и в прикладном планах было ясно, что повреждения бывают неравномерные (например, износ вкладышей подшипников и шеек коленчатых валов) и локальные (например, ямки выкрашивания, питтинги, зоны теплового схватывания). Были разработаны и широко применяются экспериментальные методы исследования локальных повреждений – обычно после того, как они достигли некоего фиксированного состояния (методы микротвердости, оптической металлографии, рентгеноструктурного анализа, электронной микроскопии и др.). Однако развитие работ в этой области тормозилось одним, но важнейшим обстоятельством: по существу, отсутствовал достаточно простой и эффективный метод изучения локальных повреждений в процессе контактного нагружения. Это означает, что кинетику повреждений нельзя было воспроизвести в лабораторных условиях, следовательно, нельзя было экспериментально исследовать закономерности их возникновения и развития.

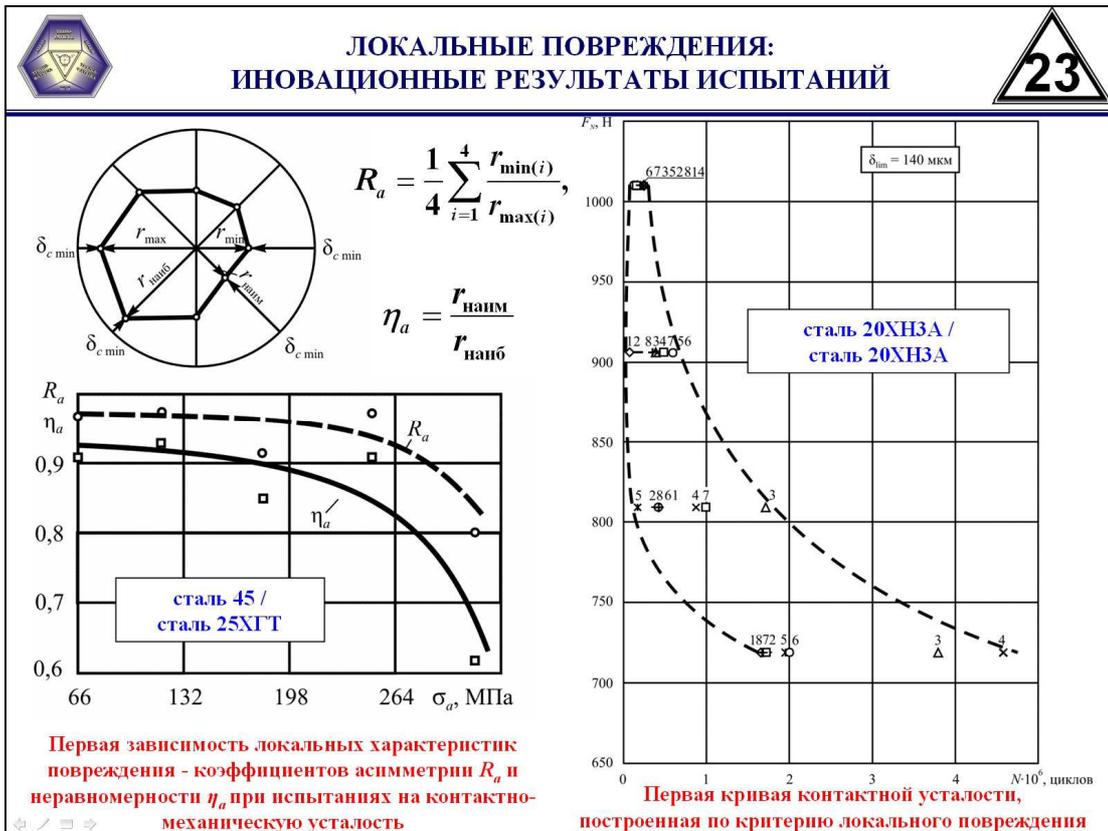
В трибофатике предложен, разработан и практически реализован (на испытательных машинах серии СИ) новый, простой и эффективный метод обнаружения, регистрации и анализа локальных повреждений в процессе испытаний [50–52 и др.]. Его сущность иллюстрирует слайд 22 для двух основных параметров износоустой-

стого повреждения – износа  $i$  для систем типа подшипник скольжения/вал и сближения осей  $\delta_c$  для систем типа ролик/вал (рисунки слева). На рисунке в центре приведена схема автоматического измерения и регистрации параметров повреждения, а на рисунке справа – типичные результаты измерений при испытаниях системы сталь 45/сталь 45 на фрикционно-механическую усталость.

Измерения могут производиться двумя способами – интегральным и дискретным. Интегральный способ предусматривает измерение величины  $i$  (либо  $\delta_c$ ) через заданные промежутки времени. Главная особенность дискретного способа – их измерения в восьми точках дорожки трения в любом цикле нагружения в течение всего времени испытаний.

Сущность метода состоит в том, что в опасном сечении образца, где возбуждаются наибольшие циклические напряжения и одновременно реализуется процесс трения (скольжения или качения), по длине окружности отмечены восемь точек (1), (2), ..., (8), при прохождении каждой из которых зоны контакта образца и контробразца измеряется локальный износ либо сближение осей.

Полученные результаты испытаний можно представлять двояко. Первое представление – в виде кинетических кривых изменения локального износа по времени  $t$  (слайд 22, рисунок справа вверху). Каждое сечение таких кривых имеет восемь экспериментальных точек, которые определяют изменение величины износа в одном сечении образца в данном цикле нагружения. Таким образом, получается восемь реализаций случайного процесса локального изнашивания. Полоса разброса снизу и сверху ограничена сплошными линиями, показано также изменение среднего значения износа. По существу, это среднее значение можно отождествить с интегральным износом, который измеряется традиционно. Нетрудно видеть, сколь серьезно отличается локальная картина изнашивания от интегральной в количественном отношении. Другое представление – в виде круговых диаграмм локального износа, получаемых в заданные моменты времени и представляющих собой соответствующие сечения кинетических процессов локального износа. Экспериментальные точки на диаграммах соединены между собой условными прямыми.



Обнаруживается существенное отличие картины действительно-го (локально измеряемого) износа в точках сечения образца за один его оборот от интегрального износа. Хотя нагрузки в течение одного оборота не изменяются, реакция поверхностных слоев металла в различных локальных зонах пути трения оказывается существенно различной по причине того, что физико-механические свойства по-

верхностных слоев металла также неодинаковы. Следовательно, поскольку сопротивление разрушению локальных поверхностных участков образца различно, то и локальный износ на таких участках разный. Таким образом экспериментально исследуется анизотропия локальных свойств материала путем измерения локального износа в процессе модельных испытаний.

Введены специальные количественные параметры локального повреждения (слайд 23, рисунок слева): коэффициент асимметрии (степень локальной поврежденности по четырем диаметрам образца)

$$R_a = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \frac{r_{min(i)}}{r_{max(i)}}, \quad (4)$$

где  $r_{min}$  и  $r_{max}$  – меньший и больший радиусы одного опасного сечения образца и коэффициент неравномерности (обобщенная по сечению характеристика):

$$\eta_a = \frac{r_{наим}}{r_{наиб}}, \quad (5)$$

где  $r_{наим}$  и  $r_{наиб}$  – наименьший и наибольший радиусы образца в течение одного оборота. На рисунке приведены соответствующие обозначения радиусов и представлены экспериментально полученные зависимости  $R_a$  и  $\eta_a$  от уровня циклических напряжений при испытании силовой системы сталь 45/ сталь 25ХГТ на контактно-механическую усталость методом ступенчатого изменения изгибающей нагрузки при контактном давлении  $p_0 = 0,7 p_f = const$ . Видно, что степень неравномерности локального износусталостного повреждения растет при увеличении циклических напряжений (величины коэффициентов  $R_a$  и  $\eta_a$  при этом уменьшаются).

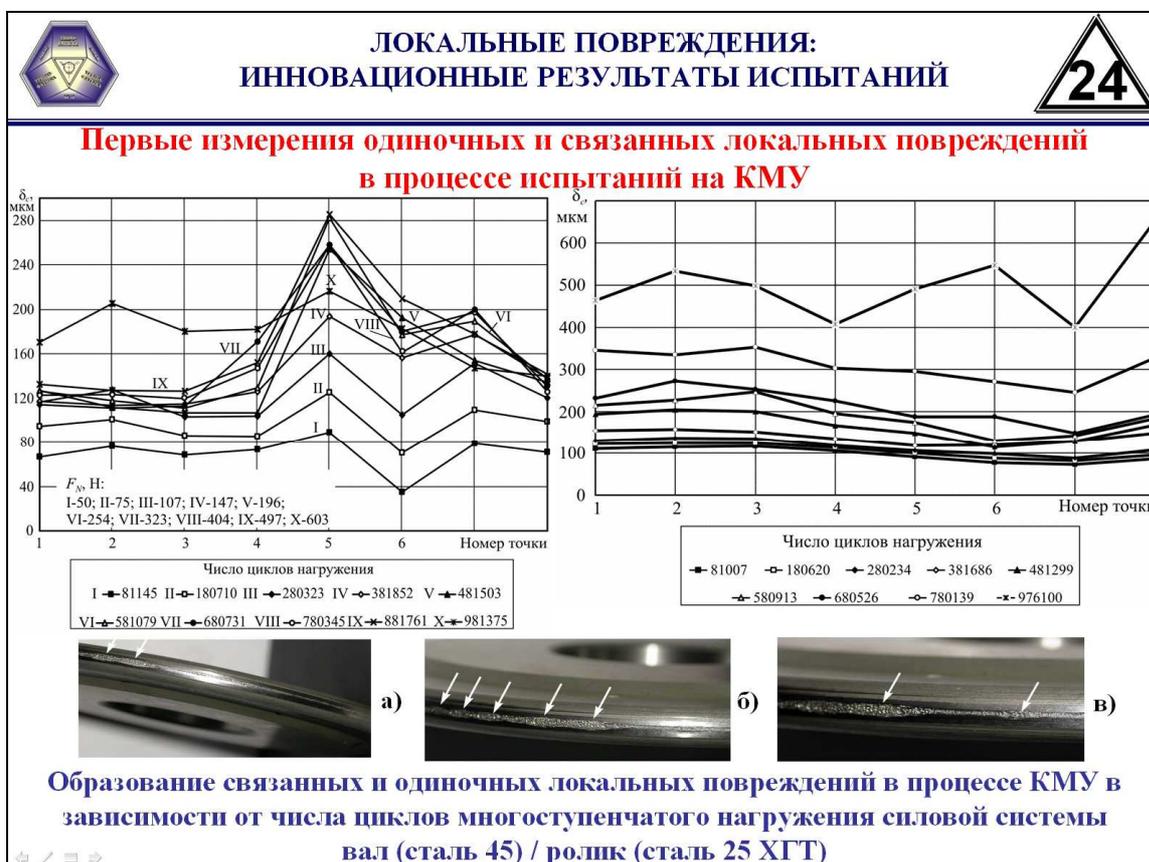
Если предельное состояние связывается, например, с глубиной  $h$  локального повреждения  $\delta_{lim} = h$ , то можно построить кривую усталости по критерию локального повреждения (слайд 23, рисунок справа). Цифрами 1, 2, ..., 8 опять обозначены точки по периметру дорожки качения (полученные из круговых диаграмм сближения осей), в которых достигнуто предельное состояние ( $\delta_{lim} = h$ ) за число циклов  $N$ . Анализ точек 1, 2, ..., 8 показывает, что они располагаются на графике случайным образом; пунктирные кривые ограничивают их область рассеяния, которая увеличивается с ростом долговечности. Такое поведение не противоречит известным

статистическим результатам испытания образцов на механическую усталость: рассеяние растет с уменьшением нагрузки. Но в анализируемом случае области рассеяния долговечности на каждом уровне напряжений установлены по результатам испытания одной пары трения. Анализируя кривые, представленные на этом рисунке, можно заключить, что сопротивление разрушению локальных зон поверхности одного образца существенно различно. Рассеяние их долговечности в условиях данного опыта может составлять от  $2,5 \cdot 10^4$  до  $8 \cdot 10^5$  циклов (т.е. различаться более чем в 30 раз).

На слайде 24 даны результаты испытаний разных систем ролик/вал при контактно-механической усталости. Результаты экспериментов представлены на развертке дорожки качения, длина которой равна периметру вала. В процессе испытаний указаны величины контактной нагрузки  $F_N$  и число циклов нагружения. Таким образом, каждая горизонтальная линия на рисунках соответствует определенным условиям испытания. Совокупность линий на каждом из рисунков описывает кинетику повреждений в каждой из восьми точек за все время испытаний. Легко видеть, что в принципе наблюдаются формирование локальных повреждений двух типов (слайд 24): одиночные (слева) и связанные (справа). Было установлено, что обычно одиночные локальные повреждения постепенно трансформируются в связанные (слайд 24, внизу), если контактная нагрузка и время испытаний достаточно велики.

Рассмотрим некоторые аспекты локального повреждения более подробно. На слайде 25 вы видите одиночные (слева) и связанные (справа) повреждения на дорожке качения ролика, изготовленного из стали 20ХНЗА. Микротвердость на рабочей поверхности после цементации (до испытания) достигает 8000 МПа. Микроструктура цементованного слоя – мелкоигльчатый мартенсит, остаточный аустенит (~12 об. %), карбидные фазы цементитного типа в виде отдельных мелких равномерно распределенных частиц.

На макроуровне (слайд 26) абсолютное значение радиальной пластической деформации  $h$  можно рассматривать в виде суммы равномерной деформации ( $h_0 = R_1 - R_0 > 0$ ), определяемой как





**ЛОКАЛЬНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ:  
ИННОВАЦИОННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ**



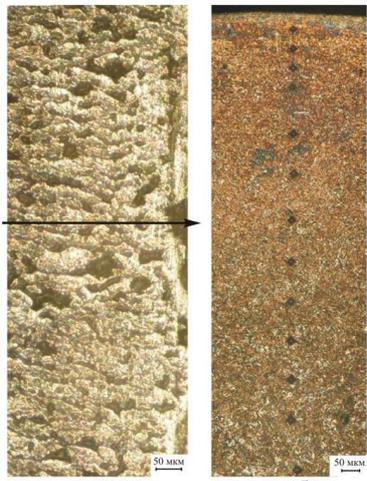
**Явление локального пластифицирования высокопрочной стали при контактной усталости**



Локальное повреждение

Дорожки качения

Локальные повреждения



(а) (б)

59...63 HRC

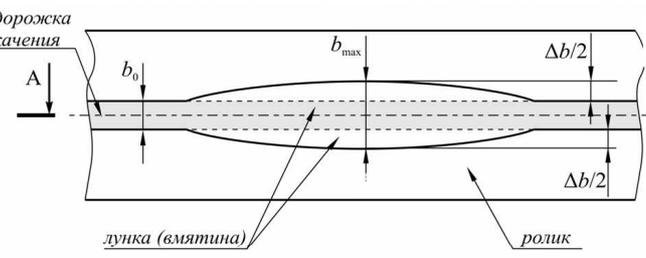
**Пластифицирование и фрагментация структуры поверхности в результате испытаний (а) и микроструктура поверхностного слоя до испытаний (б)**



**ЛОКАЛЬНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ:  
ИННОВАЦИОННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ**



**Первый анализ деформаций при локальном пластифицировании**



дорожка качения

лунка (вмятина)

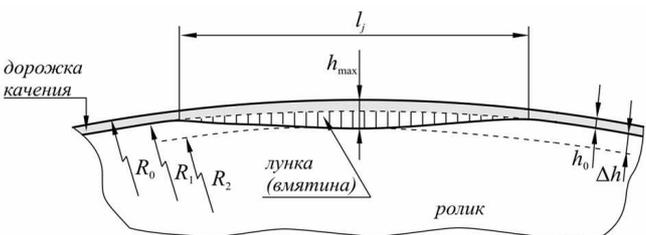
ролик

$b_0=2,280 \text{ мм}, b_{\max}=4,400 \text{ мм},$   
 $\Delta b/2=1,06 \text{ мм}$

$0 \leq b = b_0 + \Delta b \leq b_{\max} \quad (1)$

$\varepsilon_b = \Delta b / b_{\max} \leq 1 \quad (2)$

**а) Осевая остаточная деформация**



дорожка качения

лунка (вмятина)

ролик

$l_j=6,270 \text{ мм}, h_0=0,042 \text{ мм},$   
 $h_{\max}=0,160 \text{ мм}, \Delta h=0,118 \text{ мм}$

$0 \leq h = h_0 + \Delta h \leq h_{\max} \leq 1 \quad (3)$

$\varepsilon_h = \Delta h / h_{\max} \leq 1 \quad (4)$

**б) Радиальная остаточная деформация**

остаточная глубина дорожки качения, и локальной деформации ( $\Delta h = R_2 - R_1 \geq 0$ ), определяемой как остаточная глубина лунки (вмятины); соотношение последних может принимать значения  $\Delta h / h_0 = k_h \approx 1$ . (6)

В условиях опыта численное значение  $k_h$  достигает 200 %, т.е. локальная радиальная пластическая деформация оказывается в 2 раза большей, чем равномерная остаточная деформация. Это означает, что тонкий поверхностный слой высокопрочной стали в процессе циклического контактного нагружения сильно пластифицируется в локальных зонах.

Аналогичный вывод можно сделать, анализируя степень локализации пластической деформации (4), определяемую как долю локальной пластической деформации ( $\Delta h$ ) в общей величине ( $h_{max}$ ) остаточной деформации в зоне трения; в условиях опыта она достигает значений  $\varepsilon_h = 0,6 \dots 0,7$ , т. е. локальная деформация составляет более 60 % деформации общей.

Подобный анализ локального пластифицирования поверхностного слоя можно дать и по характеристике локальной осевой остаточной деформации (1); выводы будут аналогичными.

Если ввести в рассмотрение отношение между радиальной (4) и осевой (2) степенями локализации пластической деформации, получим двумерный параметр локализации

$$v_{h,b} = \varepsilon_h / \varepsilon_b \approx 1, \quad (7)$$

значения которого, в принципе, изменяются в интервале от нуля (при  $\varepsilon_h = 0$ ) до бесконечности (при  $\varepsilon_b = 0$ ).

Заметим: если волнообразные повреждения распространяются практически на всю длину дорожки качения (весь периметр вала или ролика), то в общем случае локализация остаточной деформации должна рассматриваться как непрерывный и случайный процесс  $\varepsilon(t, x, y, z)$ .

Специальными измерениями установлено, что микротвердость на дне лунки (в условиях опыта) достигает 11000 МПа, т. е. в результате локального пластифицирования имеет место, казалось бы, существенное деформационное упрочнение материала (до 30 %). Однако исследования на микроуровне показали (слайд 25, справа), что локальное пластифицирование есть, по существу, процесс начального поверхностного разрушения: отчетливо наблюдается фрагментирование зеренной структуры поверхности в результате пластического сдвига и выдавливания материала из зоны трения по направлению (указано черной стрелкой на слайде 25), перпендикулярному движению при качении; такое фрагментирование сопровождается образованием системы микротрещин, окаймляющих конгломераты зерен.

В результате проведенных модельных испытаний пар трения и силовых систем при различных схемах нагружения установлено, что локальные повреждения – основной фактор существенного снижения долговечности. Для повышения (или поддержания) ресурса необходим комплекс мероприятий, позволяющих свести к минимуму локальные повреждения, который должен быть реализован на стадиях проектирования конкретного узла и технологической подготовки его производства.

**ИР-7 Явление троппи.** При разработке методов оценки ресурса и задачи управления износоусталостными повреждениями, естественно, возникает новая проблема: силовая система в принципе нестатична, для нее органически присуще движение. Роль и значимость движения при работе конкретной силовой системы проиллюстрированы на слайде 27. Это – результаты эксперимента: контактно-механическая усталость силовой системы ролик/вал, которая, как уже отмечалось, в известной мере моделирует основные условия работы реальной системы колесо-рельс; в рабочей зоне одновременно возникают как циклические напряжения при объемном деформировании (изгиб нагрузкой  $Q$ ), так и поле контактных напряжений при действии контактной нагрузки  $F_N$ . При таких условиях испытания ранее был обнаружен особый тип предельного состояния: образование на дорожке качения нерегулярных остаточных волнообразных повреждений (явление троппи) [53–56]. Это происходит в результате нестационарного процесса циклического упругопластического деформирования в зоне контактного взаимодействия при трении качения. Из слайда 27 видно, например, что если погрешность изготовления системы достаточно велика ( $\Delta = \pm 40$  мкм), то движение ролика по валу становится нестационарным (точка 1) при ограниченной долговечности, затем возбуждается (после точки 2) случайный ударно-усталостный процесс, который и порождает нерегулярные волнообразные повреждения поверхностей трения.

С теоретической точки зрения описанное повреждение представляет собой результат потери устойчивости движения ролика по валу. Потеря устойчивости движения характеризуется самовозбуждением колебаний в системе вследствие ее повреждения и сопровождается, как уже отмечалось, упругопластическим деформированием тел в области контакта.





Изучению устойчивости движения посвящено большое количество работ. Наиболее общая постановка задачи была сформулирована А. М. Ляпуновым. Он предложил ряд эффективных методов решения задачи об устойчивости. В работах И. Г. Малкина дано систематическое изложение теории устойчивости с учетом ее использования в практических задачах.

Среди многочисленных и разнообразных явлений потери устойчивости движения можно выделить такие, в которых возмущающие движение факторы обусловлены сложным взаимодействием элементов (в общем случае различной природы) механической системы. Таковы, например, флаттер и шимми, исчерпывающее описание которых было приведено в работах М. В. Келдыша. Кроме конструктивных особенностей крыла (флаттер) и самолетного шасси (шимми), потеря ими устойчивости при движении происходит в результате особого рода взаимодействия либо с потоком воздуха (при флаттере), либо с грунтом (при шимми). Корректная оценка возмущающих факторов имеет большое значение для исследуемых систем и является довольно сложной задачей.

Явление троппи, установленное в трибофатике, стоит в одном ряду с явлениями флаттера и шимми по сложности характера взаимодействия в системе. Однако троппи имеет и существенную особенность: в силовой системе происходит взаимодействие двух твердых деформируемых тел. Кроме того, для троппи важное значение имеет история движения и нагружения (поврежденность элементов силовой системы), которая определяет изменение условий взаимодействия. Если при флаттере и шимми возмущающие факторы являются внешними по отношению к механической системе и не зависят от нее, то при троппи возмущающие факторы определяются механическими параметрами системы, которые изменяются в процессе движения и повреждения. Другими словами, реализуется обратное воздействие движения на возмущающие факторы.

Был проведен специальный эксперимент, чтобы определить влияние локального нарушения геометрии вала. Для этого в рабочей зоне вал имел лыску, которая и изначально инициировала возникновение колебаний в системе. Результаты испытаний на контактную

усталость приведены на слайде 28 в виде дискретных величин  $\delta_c$ , измеряемых отдельно в каждой из 8 точек, зафиксированных по периметру дорожки качения (см. слайд 28).

Из слайда 28 видно, что движение ролика по валу практически нестационарно изначально – и эта нестационарность усиливается вследствие остаточного изменения размеров площадки контакта и локальных свойств материала вдоль дорожки качения. В окрестности лыски (точка 1) дискретная величина  $\delta_c$  достигает 100 мкм уже к  $2 \cdot 10^5$  циклам, а при  $6 \cdot 10^5$  циклах она удваивается. И это происходит за счет того, что после подскока на лыске ролик ударно воздействует на металл в окрестности очередной точки 2. Далее аналогичный процесс формирования волнообразных лунок происходит уже в окрестности точки 3, и при долговечности  $\sim 10^6$  циклов достигается дискретное значение  $\delta_c \sim 300 \dots 400$  мкм. Получается, что остаточные волнообразные повреждения как бы перекачиваются от точки к точке. Когда наступает ударно-усталостный процесс, они формируются (после  $N > 1,1 \cdot 10^6$  циклов) по всей длине дорожки качения в течение очень короткого времени испытаний ( $\sim 100\,000$  циклов) – и становятся глубокими и широкими.

Таким образом, остаточные поверхностные волнообразные повреждения можно рассматривать как результат нестационарного процесса упругопластического деформирования в зоне контактного взаимодействия двух элементов системы. Этот нестационарный процесс сопровождается трехмерными искажениями размеров дорожки качения обоих элементов и неодинаковым локальным сопротивлением материала в разных «точках» на пути движения (слайд 29).

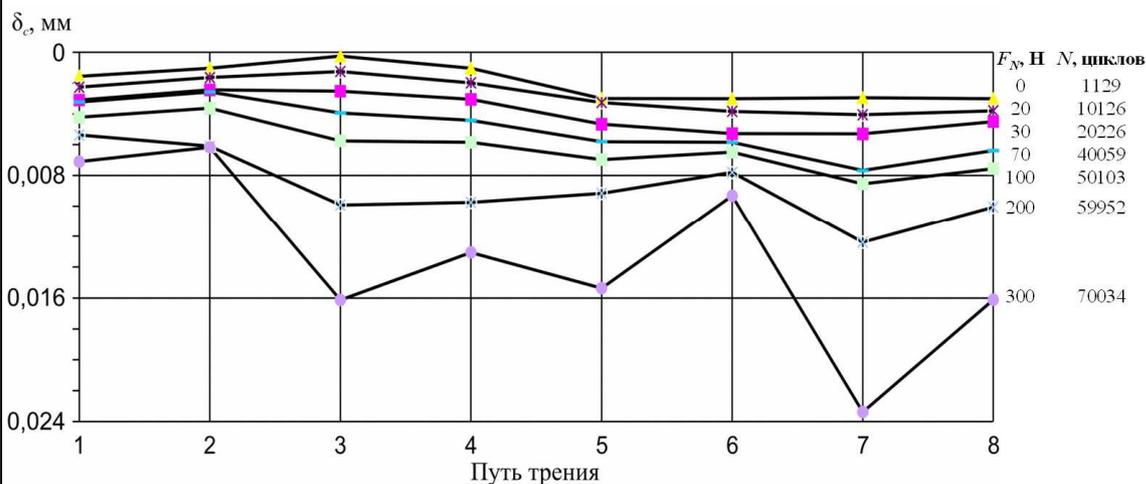
На слайде 30 показаны остаточные радиальные деформации вала, измеряемые в процессе испытаний. Можно видеть потерю устойчивости движения, наступающую после 800000 циклов нагружения (сечение вала затемнено). При этом в системе вал-ролик наступают недопустимые вибрация и шум.



ЯВЛЕНИЕ ТРОППИ: ПЕРВЫЕ  
ИННОВАЦИОННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ



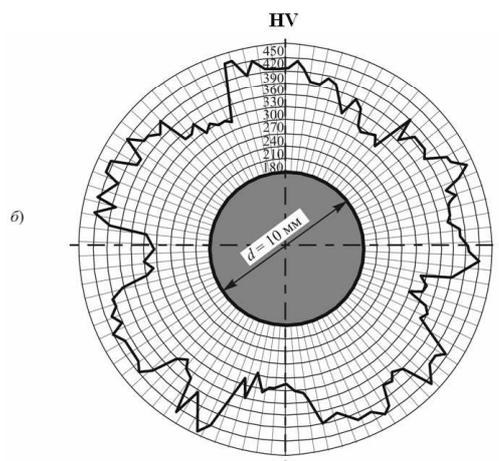
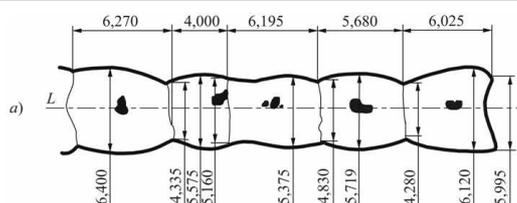
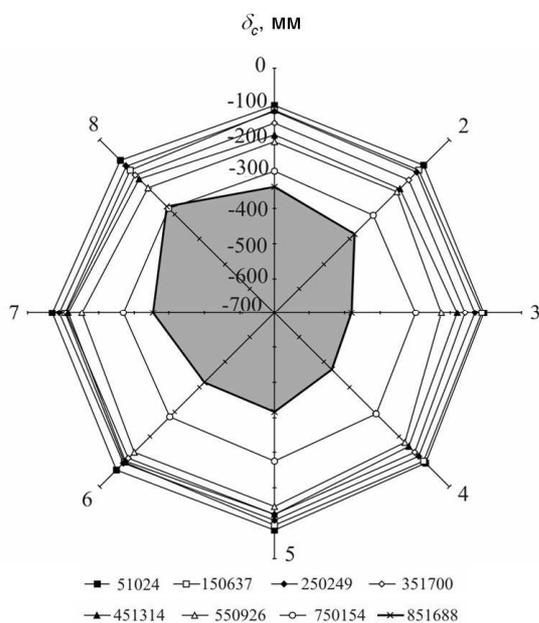
Силовая система ролик/кольцо



**Формирование волнообразных повреждений вследствие неоднородности свойств материала по пути трения**



ЯВЛЕНИЕ ТРОППИ: ПЕРВЫЕ  
ИННОВАЦИОННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ



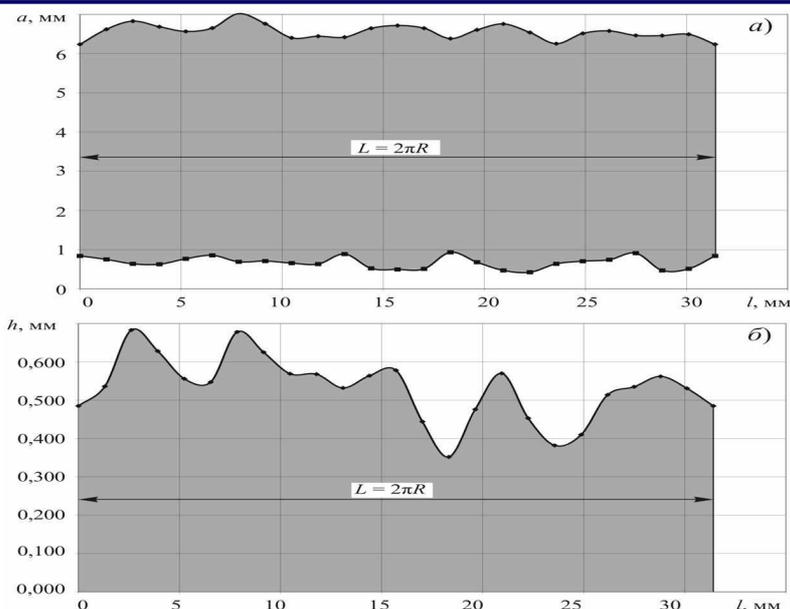
**Повреждения поверхности дорожки качения и неоднородность свойств материала**

Прочность материала, оцениваемая, например, твердостью, существенно различна в указанных точках как до, так и после испытаний (см. слайд 30).

На слайде 30 на развертке дорожки качения можно видеть характерные повреждения в окрестности дорожки качения вала: острые поверхностные волнообразные повреждения, на дне которых обнаруживаются ямки выкрашивания.



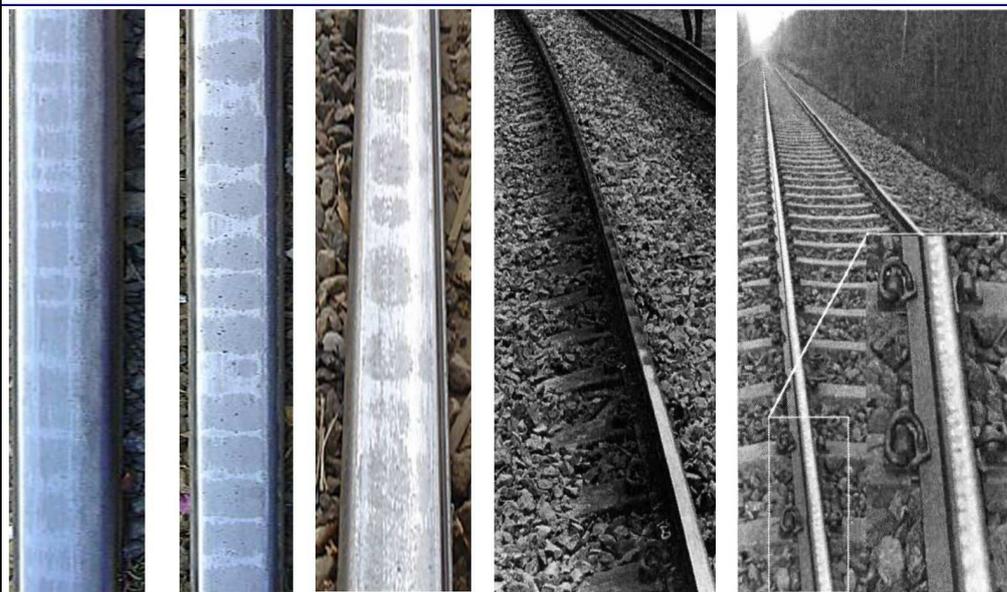
### ЯВЛЕНИЕ ТРОППИ: ПЕРВЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ



**Осевые (а) и радиальные (б) остаточные волнообразные деформации после испытаний на КМУ ( $N_{\Sigma} = 976100$  циклов)**



### ВОЛНООБРАЗНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ РЕЛЬСОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ



**Беларусь**

**Australia**

**Sweden**

**Главная особенность волнообразных повреждений – их нерегулярность**

Главные особенности повреждения вала таковы. На дорожке качения образовывались несколько своеобразных застывших волн поверхностной пластической деформации. Они представляют собой совокупность нерегулярных лунок полубочкообразной формы. Ни одна из лунок не повторяется, каждая из них имеет свои, отличающиеся от других, размеры во всех трех измерениях – радиальном, осевом, окружном. Деформации вала после испытаний представлены на слайде 31.

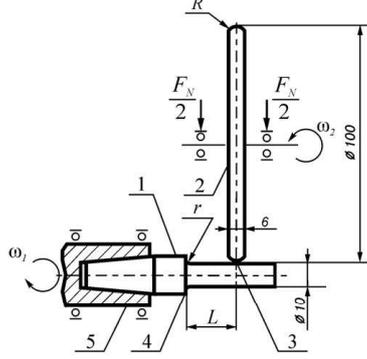
На слайде 32 показаны фотографии нескольких рельсов; здесь ясно видны нерегулярные остаточные волнообразные повреждения

поверхностей трения, образовавшиеся в процессе эксплуатации. Для современных железнодорожных путей это – очень опасное повреждение, поэтому исследователи и практики выдвигали ряд гипотез о причинах их образования. И лишь в рамках трибофатики они были правильно поняты; это позволило нам воспроизвести подобные повреждения в лабораторных условиях. Как известно, познание причин явления есть верный путь для эффективной борьбы с ним. Теперь мы имеем и аналитическую модель троппи, анализ которой дает полезные практические рекомендации.

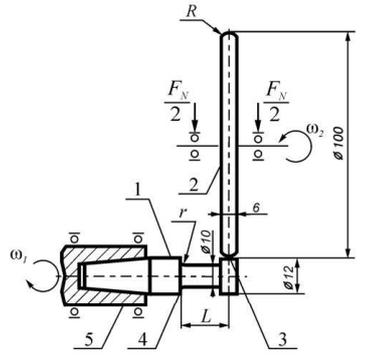


### ИР-8: ПЕРВЫЕ МОДИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ



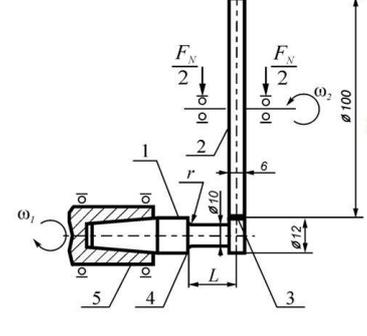


**а)**



**б)**

**в)**



*СТБ 1758-2007. Трибофатика. Метод совмещенных испытаний на изгибную и контактную усталость материалов зубчатых колес (Стандарт Беларуси). – Минск: ГОССТАНДАРТ, 2007. –45 с.*

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

*Способ испытаний материалов зубчатых колес на контактную и изгибную усталость: пат. 9247 Респ. Беларусь, МПК G 01M13/02/ В.А. Жмайлик, В.А. Андрияшин, Л.А. Сосновский, А.М. Захарик, В.В. Комиссаров, С.С. Щербаков; заявители ПО «Гомсельмаш», ОИМ НАН Б. –№ а20040781; заявл. 19.08.2004; опубл. 30.04.2007. –2007. –6 с.*

**ИР-8 Оригинальная модель зубчатой передачи и методика ее испытания.** Зубчатые передачи являются наиболее ответственными и высоконагруженными силовыми системами контактного взаимодействия современных машин. К основным видам разрушения зубчатых колес относятся усталостный излом зубьев, происходящий у основания ножки зуба в области переходной кривой, и контактные разрушения рабочих поверхностей зубьев [57].

Существующие методы испытания зубчатых колес обладают рядом недостатков. В частности, в результате испытаний определяют сопротивление либо только контактной, либо только изгибной усталости, при этом для испытаний требуются разные стенды (и разные типоразмеры образцов) [58–61].

В этой связи предложен оригинальный метод совмещенных испытаний материалов для зубчатых колес. Метод 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. Для экспериментального определения сопротивления как изгибной, так и контактной усталости одновременно используется специальная модель зубчатого зацепления (слайд 33) [62].

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 сформирована зона изгиба в виде галтели, соответствующей переходной кривой у основания зуба. Образец-модель 1, закрепленный в шпинделе 5, вращается с угловой скоростью  $\omega_1$ . К поверхности образца 1, в зоне контакта 3, с силой  $F_N$  прижат контрообразец 2, ось вращения которого параллельна оси вращения образца, и который вращается с заданной скоростью  $\omega_2$ . Путем регулирования скоростей  $\omega_1$  и  $\omega_2$  можно получить коэффициент проскальзывания, с высокой точностью 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 соответствующим расстоянию между полюсом зацепления и основанием зуба.

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.

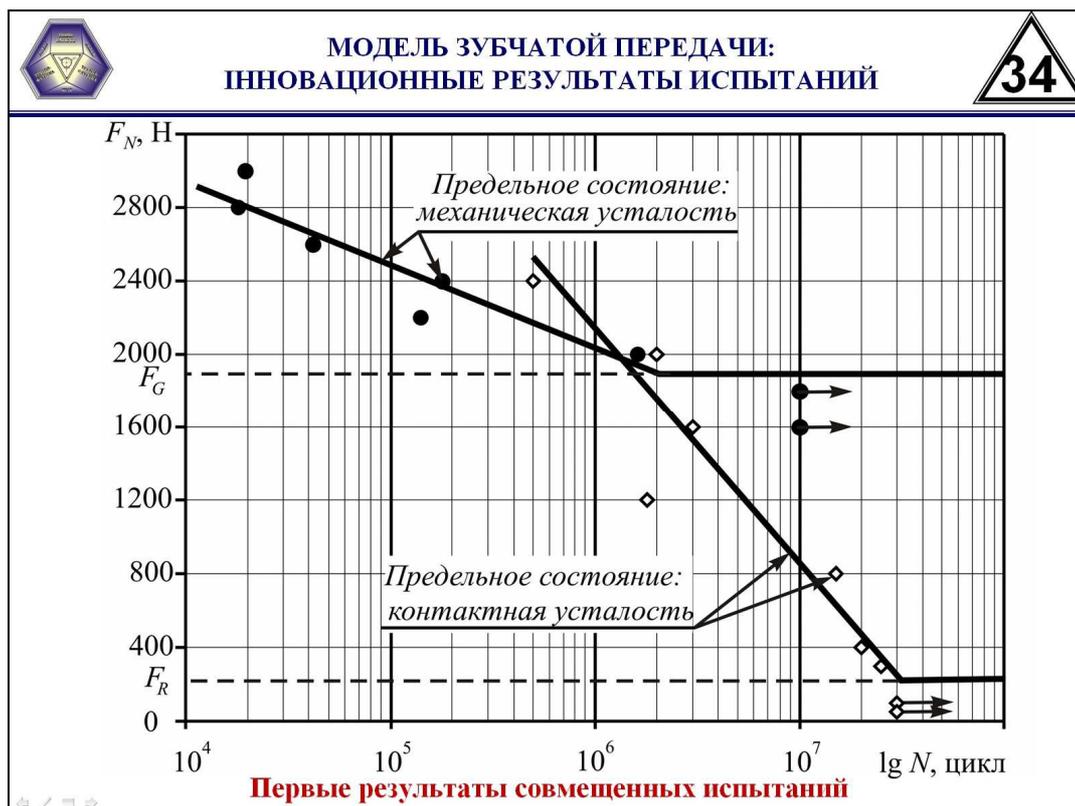
Пример реализации метода совмещенных испытаний дан на слайде 34. Были проведены совмещенные испытания моделей зубчатых зацеплений, изготовленных из стали 18ХГТ. Упрочнение поверхностного слоя образца проведено по технологии натурной детали – цементация на глубину  $h = 0,4...0,8$  мм с последующей закалкой до твердости 54...64 HRCэ. Рабочие поверхности образцов и роликов шлифовали. Схема испытаний, а также основные размеры образца и контрообразца показаны на слайде 33, б.

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. слайд 34), соответствующая пределу выносливости  $\sigma_{-1} = 570$  МПа.

Затем, при более низких нагрузках, реализуется контактная усталость. Критерием предельного состояния являлось предельное сближение осей в силовой системе (100 мкм). База испытаний – 3·10<sup>7</sup> циклов. По результатам испытаний построена кривая контактной усталости с абсциссой точки перелома порядка 3·10<sup>7</sup> циклов и определена предельная нагрузка по критерию контактной усталости  $F_R = 200$  Н (см. слайд 34), соответствующая пределу контактной усталости  $p_f = 3100$  МПа.



Таким образом, специалисты получили оригинальную модель зубчатого зацепления и метод совмещенных испытаний. Метод позволяет построить кривые изгибной и контактной усталости при действии единой (в обоих случаях) контактной нагрузки.

Разработанная модель зубчатой передачи и методика ее испытания стандартизована и запатентована (см. слайд 33).

**ИР-9 Оригинальная модель системы колесо-рельс и методика ее испытания.** 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 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: ролики можно вырезать из головки рельса так, что одна из его периферийных рабочих зон оказывается расположенной на дорожке катания рельса (слайд 35, слева внизу – зона I). Дополнительно получается, что так вырезанный ролик обнаруживает важное свойство: при последовательном переходе от зоны I к зонам II либо IV 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.

Чтобы удовлетворить еще одному из главных требований к испытательной модели, примем, что элемент, моделирующий рельс, является не роликом, но – кольцом. Это основополагающая идея, которая позволяет в конечном счете предложить общую принципиальную схему модели колесо-рельс (слайд 35) [63–66], удовлетворяющую основным требованиям к ней, изложенным выше.

Конструктивная схема модели представлена на слайде 35, слева вверху.

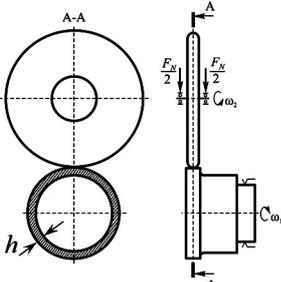
Таким образом, основными достоинствами предложенного способа испытаний являются:

- осуществление контактной нагрузкой, прижимающей контрообразец 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 натурного рельса не снимать его рабочий поверхностный слой.

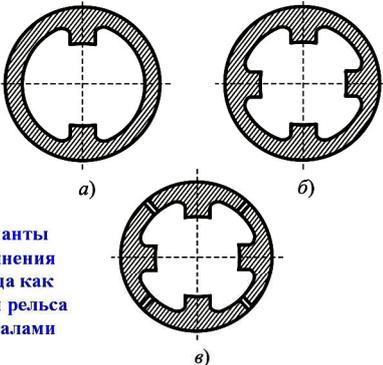


### ИР-9: ПЕРВЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ КОЛЕСО-РЕЛЬС





Система ролик / кольцо



Варианты исполнения кольца как модели рельса со шпалами

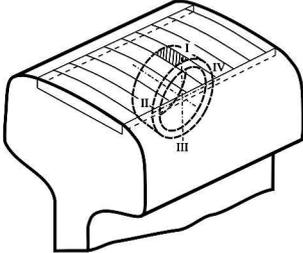


Схема вырезки кольца, моделирующего работу рельса, с сохранением рабочего поверхностного слоя

*Способ износоусталостных испытаний материала рельса системы колесо-рельс: пат. 10326 Респ. Беларусь, МПК G 01N3/56/ В.И. Сенюк, Л.А. Сосновский; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». –№ а20050296; заявл. 28.03.2005; опубл. 28.02.2008. –2008. –5 с.*

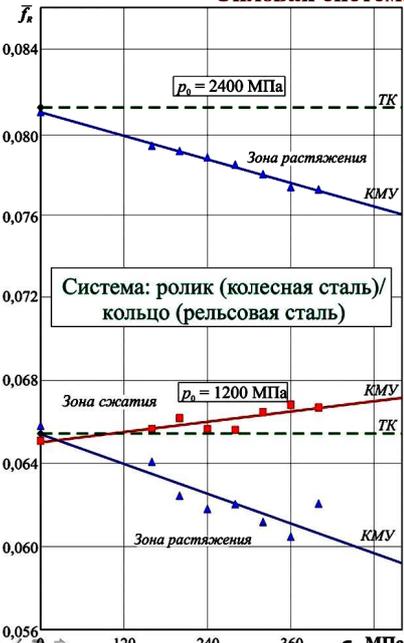
*Способ испытания на контактно-механическую усталость материала рельса системы колесо-рельс-основание: пат. 10327 Респ. Беларусь, МПК G 01N3/56/ Г.П. Ожигар, Л.А. Сосновский, В.О. Замятин, В.И. Матвеев, А.А. Сырковаш, С.С. Щербаков, А.А. Кебиков; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». –№ а20050297; заявл. 28.03.2005; опубл. 28.02.2008. –2008. –6 с.*



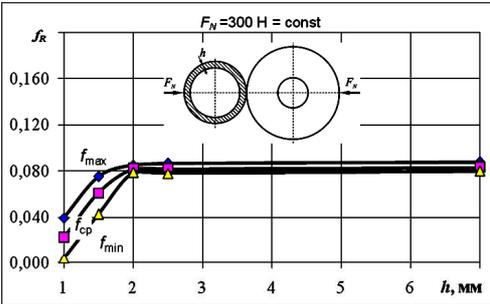
### МОДЕЛЬ КОЛЕСО-РЕЛЬС: ИННОВАЦИОННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ



#### Силовая система сталь рельсовая/сталь колесная



Система: ролик (колесная сталь)/ кольцо (рельсовая сталь)



Первая зависимость коэффициента трения от толщины кольца при  $F_N = 300 \text{ Н}$

Первая зависимость средних значений коэффициента трения от амплитуды напряжений цикла

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 (слайд 35, справа вверху, 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 (слайд 35, справа вверху, в).

Апробацию разработанного метода испытаний системы колесо-рельс проводили на испытательной машине СИ-03. На слайде 36 представлены зависимости осредненных значений коэффициента трения качения  $\bar{f}_R$  от амплитуды напряжений цикла  $\sigma_a$  при испытаниях на контактно-механическую усталость. Каждой точке на гра-

фиках соответствует 66 значений  $f_R$ . Главное заключение по данным слайда 36: величины  $\bar{f}_R$  всегда меньше или больше того значения, которое установлено при чистом трении качения, когда  $\sigma_a = 0$  (показано пунктиром). Это наблюдается как при упругом ( $p_0 = 1200$  МПа), так и при упругопластическом ( $p_0 = 2400$  МПа) деформировании.

На слайде 36 также представлены зависимости значений коэффициента трения качения  $f_R$  от толщины кольца модели  $h$ .

Описанные новые схемы испытания различных модификаций модели системы колесо-рельс в настоящее время запатентованы (см. слайд 35); производится экспериментальная отработка соответствующих методик испытаний; устанавливаются рациональные сферы их использования.

**ИР-10 Оригинальная модель системы труба/поток жидкости под давлением и методика ее испытания.** Проблема борьбы с коррозионно-эрозивной усталостью сталей является острой в различных отраслях: машиностроении (в том числе сельхозмашиностроении), трубопроводном транспорте и т.д. [67–69].

Отметим, что известны и широко применяются многообразные методы экспериментального исследования коррозионно-механической усталости (см., например, [70] и мн. др.) и эрозии (см., например, [71]). Однако, по имеющимся сведениям, комплексные методы испытаний на коррозионно-эрозивную усталость, отсутствуют.

На слайде 37 приведена схема оригинального способа испытаний, который в известной мере имитирует работу системы труба/поток жидкости под давлением [72–74].

Особенность контактного взаимодействия образца 1 и контро образца 2 состоит в том, что диаметр контактной поверхности контро образца вдвое превышает диаметр образца. Поэтому контакт осуществляется по узкой полоске, а между образцом и контро образцом реализуется конструктивный клин, в который затягивается жидкость при вращении образца. Если контакт между образцом и контро образцом будет чисто жидкостным, то контро образец исполняет лишь роль устройства для создания рабочего давления на площадке контакта твердого тела с жидкостью; последняя организуется в зоне растяже-

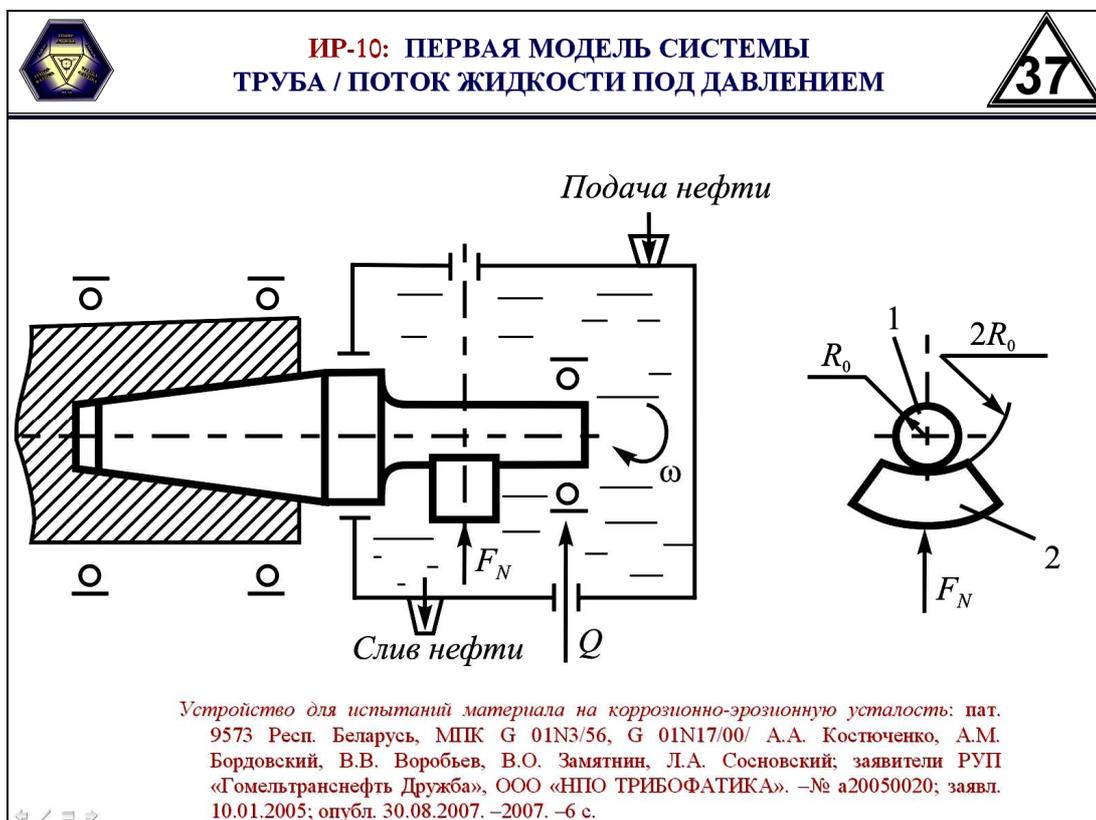
ния изгибаемого образца. Непрерывное движение жидкости через конструктивный клин и площадку контакта обуславливает либо гидрозизию (если среда слабо агрессивна), либо коррозионную эрозию (если среда агрессивна по отношению к металлу образца). Таким образом, предложенный метод испытаний имитирует, например, все основные условия работы внутренних поверхностей труб линейного участка нефтепровода.

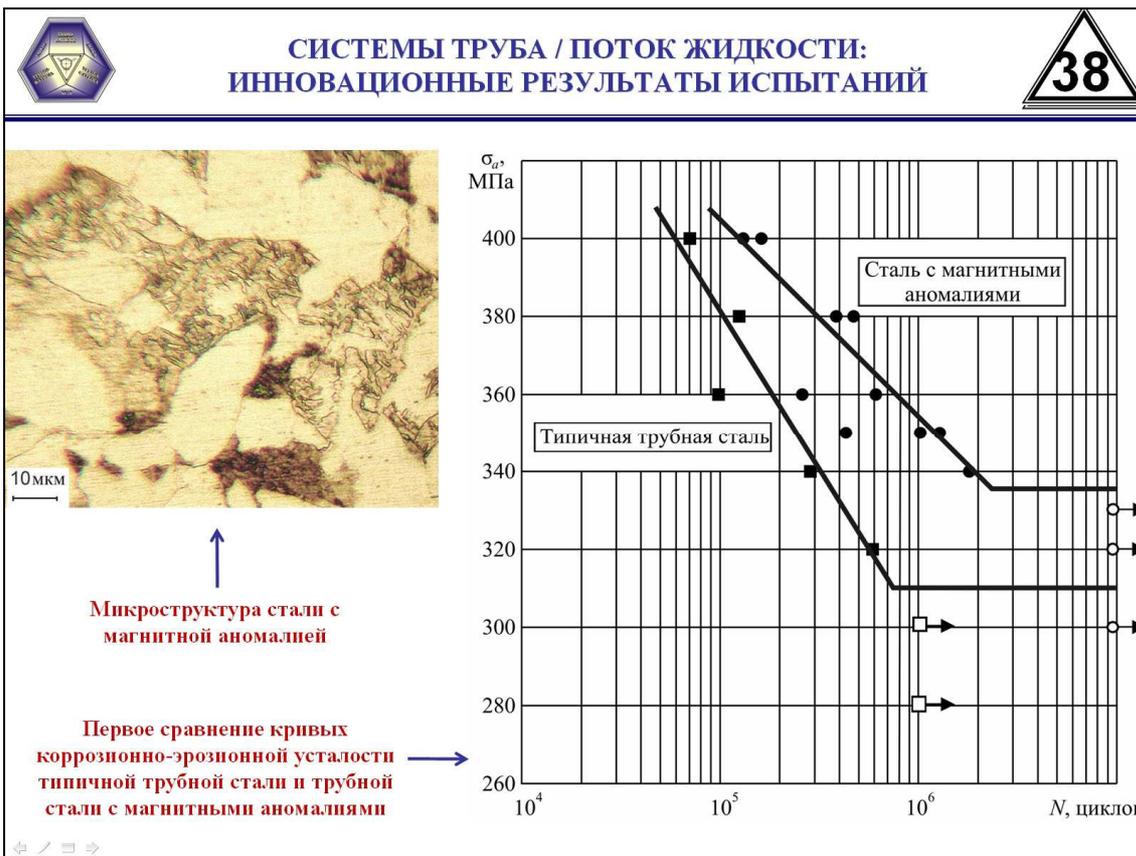
С применением разработанного метода проведены испытания на коррозионно-эрозивную усталость в среде нефти двух серий образцов низколегированной трубной стали; в качестве контро образцов использовали полимер. Образцы одной серии имели обычную феррито-перлитную структуру; структурные составляющие характеризуются 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-эрозивной усталости.

Результаты испытаний приведены на слайде 38. Видно, что предел выносливости стали с магнитными аномалиями примерно на 8 % выше, чем обычной стали. Это означает, что имеется известная перспектива повышения сопротивления трубной стали коррозионно-эрозивной усталости путем упрочнения перлитной фазы.

Описанная модель системы труба/поток жидкости под давлением и методика ее испытания в настоящее время запатентованы (см. слайд 37).

**Заключение.** В работе дано систематическое описание методов и технологий трибофатических испытаний моделей наиболее широко распространенных компонентов современных машин и оборудования – силовых систем. Важным достоинством описанных методов является то, что они обеспечивают проведение как обычных, так и ускоренных лабораторных испытаний типичных моделей – по основным видам комплексного износоусталостного повреждения.





К настоящему времени разработан и утвержден ряд государственных стандартов, регламентирующих методы определения характеристик износусталостного повреждения [37-41]. Реализованы многие патенты [10-23].

Все методы и технологии испытаний прошли широкую экспериментальную апробацию, что подтверждается рядом инновационных результатов испытаний.

Испытания моделей деталей и узлов можно вести на универсальном испытательном оборудовании – автоматизированных машинах серии СИ [27–28], основные технические параметры которых регламентированы требованиями стандарта [42]. Машины серии СИ, разработанные ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» в сотрудничестве с институтами Академий Наук Беларуси, России и Украины, являются наукоемкой продукцией и предоставляют исследователям уникальные возможности изучения процессов повреждения и разрушения силовых систем.

Общий анализ достоинств разработанных машин для износоусталостных испытаний материалов и моделей силовых систем представлен на слайде 39.

Машины серии СИ помогут исследователям в сжатые сроки решить самые сложные задачи экспериментальной оценки и повышения надежности наиболее ответственных узлов современной техники – как по отдельным критериям сопротивления усталости и износоустойчивости, так и по комплексным критериям сопротивления износоусталостным повреждениям.

По докладу «Трибофатические методы испытания: инновационные решения» на конференции «Инновации в машиностроении» (г. Минск, ОИМ НАНБ, 30-31 октября 2008 г.).

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сосновский, Л. А. Основы трибофатики / Л. А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2003. – Т. 1. – 246 с.; Т. 2. – 234 с.
2. Сосновский, Л. А. Методы износоусталостных испытаний материалов / Л. А. Сосновский // Заводская лаборатория. – 1990. – № 6. – С. 90–95.
3. Сосновский, Л. А. Методы износоусталостных испытаний силовых систем и их моделей / Л. А. Сосновский // Трение и износ. – 1993. – № 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. 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. Богданович, А. В. Унифицированные методы износоусталостных испытаний при главном вращательном движении / А. В. Богданович // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – Т. 71. – № 2. – С. 41–46.
7. 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.
8. 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.
9. Плещачевский, Ю. М. Современные методы комплексных износоусталостных испытаний / Ю. М. Плещачевский, 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.
10. А.с. 1164579 СССР. Способ усталостных испытаний рельсов / Л. А. Сосновский, П. А. Сыцко, В. И. Матвеев, В. Г. Альбрехт, Л. Г. Крысанов, Е. А. Шур. – Оpubл. в БИ, 1985. – N 24.
11. А.с. 1245934 СССР. Способ испытания образцов на усталость и устройство для его осуществления / Л. А. Сосновский, В. И. Матвеев. – Оpubл. в БИ, 1986. – N 27.
12. А.с. 1341538 СССР. Способ износоусталостных испытаний материалов / Л. А. Сосновский. – Оpubл. в БИ, 1987. – N 36.

13. А.с. 1348700 СССР. Способ усталостных испытаний рельсов / Л. А. Сосновский, В. И. Матвеев. – Оpubл. в БИ, 1987. – N 40.
14. А.с. 1381368 СССР. Устройство для износоусталостных испытаний материалов / Л. А. Сосновский, Н. К. Бабич. – Оpubл. в БИ, 1988. – N 10.
15. А.с. 1388757 СССР. Способ износоусталостных испытаний материалов / Л. А. Сосновский. – Оpubл. в БИ, 1988. – N 14.
16. А.с. 1590958 СССР. Способ износоусталостных испытаний материалов / Л. А. Сосновский. – Оpubл. в БИ, 1990. – N 33.
17. А.с. 1656400 СССР. Способ износоусталостных испытаний материалов / Л. А. Сосновский. – Оpubл. в БИ, 1991. – N 22.
18. А.с. 1663504 СССР. Способ испытания материалов на изнашивание / Л. А. Сосновский. – Оpubл. в БИ, 1991. – N 26.
19. Способ испытаний материалов зубчатых колес на контактную и изгибную усталость: пат. 9247 Респ. Беларусь, МПК G 01M13/02/ В. А. Жмайлик, В. А. Андрияшин, Л. А. Сосновский, А. М. Захарик, В. В. Комиссаров, С. С. Щербаков; заявители ПО «Гомсельмаш», ОИМ НАН Б. – № а20040781; заявл. 19.08.2004; опубл. 30.04.2007. – 2007. – 6 с.
20. 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». – № а20050296; заявл. 28.03.2005; опубл. 28.02.2008. – 2008. – 5 с.
21. Способ испытания на контактно-механическую усталость материала рельса системы колесо-рельс-основание: пат. 10327 Респ. Беларусь, МПК G 01N3/56/ Г. П. Ожигар, Л. А. Сосновский, В. О. Замятин, В. И. Матвеев, А. А. Сырокваш, С. С. Щербаков, А. А. Кебиков; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». – № а20050297; заявл. 28.03.2005; опубл. 28.02.2008. – 2008. – 6 с.
22. Устройство для испытаний материала на коррозионно-эрозионную усталость: пат. 9573 Респ. Беларусь, МПК G 01N3/56, G 01N17/00/ А. А. Костюченко, А. М. Бордовский, В. В. Воробьев, В. О. Замятин, Л. А. Сосновский; заявители РУП «Гомельтранснефть Дружба», ООО «НПО ТРИБОФАТИКА». – № а20050020; заявл. 10.01.2005; опубл. 30.08.2007. – 2007. – 6 с.
23. Узел трения для испытаний материалов зубчатых колес на контактную и изгибную усталость: В. А. Жмайлик, Л. А. Сосновский, С. А. Тюрин, В. В. Комиссаров; заявитель ПО «Гомсельмаш» и ООО «НПО ТРИБОФАТИКА». – № а20040884; заявл. 20.10.04; опубл. 28.02.06. – положительное решение предварительной экспертизы.
24. Сосновский, Л. А. Комплексная оценка надежности силовых систем по критериям сопротивления усталости и износоустойчивости (основы трибофатики) / Л. А. Сосновский. – Гомель: БелИИЖТ, 1988. – 56 с.
25. Сосновский, Л. А. Трибофатика: проблемы и перспективы. Доклад на тематической выставке АН СССР «Математика и механика – народному хозяйству» / Л. А. Сосновский. – Гомель: БелИИЖТ, 1989. – 65 с.
26. Фролов, К. В. Трибофатика: новые идеи в перспективном направлении / К. В. Фролов [и др.]. – Гомель: БелИИЖТ, 1990. – 7 с.
27. Трибофатика-95: ежегодник; под общей ред. Л. А. Сосновского // Вып. 1: Машины серии СИ для износоусталостных испытаний; под ред. М. С. Высоцкого / Авт.: Белиц Ф. Ю., Богданович А. В., Высоцкий М. С., Еловой О. М., Замятин В. О., Индман Н. Л., Ковалев В. В., Лагойкин А. Н., Марченко А. В., Махутов Н. А., Ожигар Г. П., Рождественский А. Ю., Сосновский Л. А., Тюрин С. А., Циммерман В. В. – Гомель: НПО «Трибофатика», 1996. – 80 с.
28. 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. Трощенко. – Тернополь: Тернопольский государственный технический университет имени Ивана Пулюя, 2002. – Т. 1. – С. 98–104.

29. Сосновский, Л.А., Махутов, Н.А. Трибофатика: износоусталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности машин / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов. – Москва-Гомель: ФЦНТП "Безопасность" – НПО "ТРИБОФАТИКА", 2000. – 304 с.
30. Износоусталостные повреждения и их прогнозирование (трибофатика). Научный редактор Сосновский Л.А. / Авт.: Л.А.Сосновский, В.Т. Трощенко, Н.А. Махутов, Гао Ван-Чжэн, А.В. Богданович, С.С. Щербаков. – Гомель, Киев, Москва, Ухань, 2001. – 170 с.
31. Сосновский, Л.А., Щербаков, С.С. Сюрпризы трибофатики / Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков. Гомель: БелГУТ, 2005. – 192 с.
32. Сенько, В.И., Сосновский, Л.А. Основные идеи трибофатики и их изучение в техническом университете / В.И. Сенько, Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2005. – 187 с.
33. Sosnovskiy, L.A. Tribo-Fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction (Foundations of engineering mechanics) / L.A. Sosnovskiy. Series: Foundations of Engineering Mechanics. – Springer, 2005. – 424 p.
34. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.
35. Сосновский, Л. А. О полной кривой усталости / Л. А. Сосновский, Н.А. Махутов // Заводская лаборатория. – 1995. – № 5. – С. 33–34.
36. Сосновский, Л. А. Экспериментальное исследование контактно-механической усталости стали 45 методом многоступенчатого нагружения / Л. А. Сосновский, А. В. Богданович, С. А. Тюрин // Заводская лаборатория. – 1996. – № 3. – С. 30–34.
37. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 30754-2001. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость. – Мн.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. – 32 с.
38. СТБ 1066-97. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость (Стандарт Беларуси). – Минск: ГОССТАНДАРТ, 1997. – 58 с.
39. СТБ 1233-2000. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость (Стандарт Беларуси). – Минск: Госстандарт, 2000. – 8 с.
40. СТБ 1448-2004. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на фрикционно-механическую усталость (Стандарт Беларуси). – Минск: ГОССТАНДАРТ, 2004. – 14 с.
41. СТБ 1758-2007. Трибофатика. Метод совмещенных испытаний на изгибную и контактную усталость материалов зубчатых колес (Стандарт Беларуси). – Минск: ГОССТАНДАРТ, 2007. – 45 с.
42. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 30755-2001. Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования. – Мн.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. – 8 с.
43. Богданович, А.В. Закономерности накопления повреждений стали 45 при контактно-механической усталости / А.В. Богданович, С.А. Тюрин, Е.Л. Сенькова // Заводская лаборатория. – 1996. – N 2. – С. 42–45.
44. Сосновский, Л. А. Диаграмма предельных состояний стали 45 при контактно-механической усталости / Л. А. Сосновский [и др.] // Заводская лаборатория. – 1996. – № 2. – С. 39–42.
45. Трощенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – К.: Наукова думка, 1987. – Т.1. – 514 с.
46. Громов, В.В. Автоматизированные информационно-управляющие системы машин для износоусталостных испытаний / В.В. Громов, О.М. Еловой, И.П. Лукашевич // Современные проблемы машиноведения (Материалы Международной научно-технической конференции, 1–3 июля 1998 г.). – Гомель: ГПИ, 1998. – Т. 1. – С. 59–60.
47. Шкарубо, В.Н. Автоматизированная система управления машинами для износоусталостных испытаний / В.Н. Шкарубо / 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. 1. – С. 258-266.
48. Школьник, Л.М. Методика усталостных испытаний: справочник / Л. М. Школьник. – М.: Машиностроение, 1978. – 302 с.
49. Андрияшин, В.А. Принципы и методы ускоренных износоусталостных испытаний / В.А. Андрияшин, С.А. Тюрин / Тр. IV-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2002), 23–27 сентября 2002 г., Тернополь (Украина) / Отв. ред. В.Т. Трощенко. – Тернополь: Тернопольский государственный технический университет имени Ивана Пулюя, 2002. – Т. 1. – С. 105–111.
50. Сосновский, Л.А. Локальные повреждения и долговечность силовых систем мобильных машин / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, О.М. Еловой // Механика машин, механизмов и материалов. – 2008. – № 1 (2). – С. 24–29.
51. Высоцкий, М.С. Новые подходы в механике износоусталостного повреждения и разрушения / М.С. Высоцкий [и др.] // «Механика-2007» (Материалы III Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике, Минск, 16-18 октября 2007 г.). – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2007. – С. 38–114.
52. Еловой, О.М., Богданович, А.В. Локальные характеристики повреждений и сопротивление разрушению силовых систем / О.М. Еловой, А.В. Богданович // Горная механика. – 2007. – № 1. – С. 76–83.
53. Сосновский, Л.А. Формирование остаточных волнообразных поверхностных повреждений при контактно-механической усталости / Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков // Вестник БелГУТа. – 2005. – № 2. – С. 71–87.
54. Тюрин, С.А. Экспериментальное исследование остаточных волнообразных повреждений при инициированном начальном искажении формы образца / С.А. Тюрин, С.С. Щербаков // Вестник БелГУТа. – 2005. – № 2. – С. 88–93.
55. Яковлев, В.А. Об одном критерии предельного состояния при контактно-механической усталости / В.А. Яковлев, Л.А. Сосновский, С.А. Тюрин // Современные проблемы машиноведения: материалы Междунар. научно-технической конференции. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2000. – Т. 1. – С. 177–179.
56. Щербаков, С.С. О явлении тропи / С.С. Щербаков // Тезисы докладов IX-го всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 22–28 августа 2006 г.). – Нижний Новгород, 2006. – Т. I. – 107 с.
57. Генкин, М.Д. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач / М.Д. Генкин, М.А. Рыжов, Н.М. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
58. Трубин, Г.К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес / Г.К. Трубин / – М.: Машгиз, 1962. – 404 с.
59. Часовников, Л.Д. Передачи зацеплением. Изд 2-е / Л.Д. Часовников. – М.: Машиностроение, 1969. – 487 с.
60. Остроумов, В.П. Повышение прочности зубчатых колес / В.П. Остроумов, М.А. Елизветин. – Свердловск: Машгиз, 1962. – 91 с.
61. Орлов, А.В. Испытания конструкционных материалов на контактную усталость / А.В. Орлов, О.Н. Черменский, В.М. Нестеров. – М.: Машиностроение, 1980. – 110 с.
62. Махутов, Н.А. Метод совмещенных усталостных испытаний моделей зубчатых зацеплений / Н.А. Махутов [и др.] // Заводская лаборатория. – 2005. – Т. 71. – № 1. – С. 55–57.
63. Сенько, В.И. О проблеме колесо-рельс с позиций трибофатики / В.И. Сенько, Л.А. Сосновский / 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. 1. – С. 358–374.
64. Сенько, В.И. Проблема «колесо-рельс»: новый взгляд / В.И. Сенько, Л.А. Сосновский // Вестник БелГУТа. – 2005. – № 2. – С. 7–17.
65. Тюрин, С.А. Новые способы испытаний применительно к системе колесо-рельс / С.А. Тюрин [и др.] // Вестник БелГУТа. – 2005. – № 2. – С. 54–63.
66. Сосновский, Л.А. Проблема колесо-рельс с позиций трибофатики / Л.А. Сосновский, В.И. Сенько // Железнодорожный транспорт. – 2007. – № 3. – С. 38–44.
67. Сосновский, Л.А. Коррозионно-механическая усталость: основные закономерности (обобщающая статья) / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов // Заводская лаборатория. – 1993. – № 7. – С. 33–44.
68. Похмурский, В.И. Коррозионная усталость металлов / В.И. Похмурский. – М.: Металлургия, 1985. – 205 с.

69. Олейник, Н.В. Сопротивление усталости материалов и деталей машин в коррозионных средах / Н.В. Олейник, А.Н. Магденко, С.П. Скляр. – Киев: Наукова думка, 1987. – 198 с.
70. Романив, О.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов / О.Н. Романив, Г.Н. Никифорчин. – М.: Металлургия, 1986. – 293 с.
71. Эрозия: пер. с англ. / Под ред. К. Пирс. – М.: Мир, 1982. – 464 с.
72. Воробьев, В.В. Эрозионно-коррозионная усталость силовой системы типа поток жидкости-труба / В.В. Воробьев / Тр. IV-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2002), 23–27 сентября 2002 г., Тернополь (Украина) / Отв. ред. В.Т. Трощенко. – Тернополь: Тернопольский государственный технический университет имени Ивана Пулюя, 2002. – Т. 1. – С. 196–199.
73. Костюченко, А.А. О методике испытания трубной стали на усталость с учетом коррозионно-эрозионных процессов / А.А. Костюченко, В.В. Воробьев, Л.А. Сосновский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – Т. 71. – № 2. – С. 51–53.
74. Костюченко, А.А. Модель коррозионно-механической усталости трубной стали / А.А. Костюченко // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта (Материалы Международной научно-технической конференции, 7–29 июня 2006 г.). – Новополоцк, 2006. – С. 55–57.

Материал поступил в редакцию 04.06.09

**SOSONOVSKIY L.A., VYSOCKIY M.S., SENKO V.I., BOGDANOVICH A.V., ELOVOY O.M., TJURIN S.A., DRAGAN V.I. Tribophatica methods of test: innovation of the decision**

For an experimental estimation of mutual and joint influence of processes of friction and mechanical weariness on serviceability of materials and models of power systems in complex conditions workload in tribophatic the special methods depreciation-fatigue of tests are developed. The given work is devoted to the description of such methods. Thus is shown, that the methods of complex tests are based, as a rule, on innovation the decisions (ID), which are the inventions.

In work the regular statement specified ID is given, thus each of them is illustrated for the first time received (on their base) results of experimental researches. In essence, these results too are innovation, and they make the experimental bases tribophatic – new and perspective unit of the modern mechanics.

УДК 921.793

**Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Комаров А.И., Яцкевич О.К.**

## ФОРМИРОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИФфуЗИОННО ЛЕГИРОВАННОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

**Введение.** Все важнейшие свойства керамических покрытий – износостойкость, адгезионная прочность, теплопроводность, изоляционная способность, стойкость к высокотемпературным нагревами, высокая чистота поверхности при шлифовке определяются микроструктурой и фазовым составом керамики [1]. Для реализации технологии получения покрытий с мелкозернистой и равномерной структурой, а также высокой прочностью сцепления с основой необходимы так называемые «идеальные» порошки с оптимальными свойствами: оптимальный размер частиц порошка, форма, равномерное распределение легирующих компонентов по объему или поверхности частиц.

Порошки для напыления могут быть получены как в процессе механического смешивания, так и определенной технологической подготовки. Однако большинство порошков не соответствует требованиям, предъявляемым к исходному сырью. Так, в частности, присутствие в порошках индивидуальных частиц приводит к образованию в плазменных покрытиях разноплотных областей с неоднородным распределением пор по размерам. Из таких порошков без применения специальных добавок и технологических приемов (прокаливания, измельчения, гранулирования) нельзя получить керамические покрытия с высокими эксплуатационными показателями [2, 3].

Для достижения необходимых свойств покрытий требуется применение дополнительных способов и технологических приемов по улучшению строения исходного порошка для напыления.

Предлагаемый способ диффузионного легирования является эффективным механизмом воздействия на фазовый состав и структуру исходного порошка. В качестве основы для керамического по-

крытия был выбран широко распространенный оксид алюминия, который подвергали диффузионному легированию бором. В качестве легирующего элемента был выбран бор, поскольку он обладает хорошими фрикционными свойствами.

Смешанные в определенном соотношении исходные компоненты засыпались в герметичный контейнер, который размещался в лабораторной установке. Контейнер, вращающийся со скоростью 60...90 мин<sup>-1</sup>, подвергался изотермической выдержке при температуре 1100-1250°C, 1...2,5 часа.

В процессе диффузионной обработки происходит насыщение поверхностного слоя легирующими элементами и модификация первоначальной структуры керамических порошков.

**Цель работы:** изучение влияния диффузионного легирования оксида алюминия бором на формирование структуры и фазового состава полученных впоследствии плазменных керамических покрытий.

**Методика исследования** морфологии образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения "Mira" фирмы "Tescan" (Чехия). Микроскоп оснащен детекторами вторичных электронов и обратно отраженных электронов, которые позволяют проводить исследование образцов в двух режимах.

Исследование элементного состава проводилось с помощью микрорентгеноспектрального анализатора «INCA 350» фирмы «Oxford Instruments» (Англия). Определяемые элементы от В до U. Минимальный предел обнаружения элемента – 0,5%. Точный количественный анализ. Погрешность метода – 3–5 относительных процентов.

**Девойно Олег Георгиевич**, д.т.н., главный научный сотрудник НИИЛ плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета.

**Кардаполова Маргарита Анатольевна**, к.т.н., ведущий научный сотрудник НИИЛ плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета.

**Яцкевич Ольга Константиновна**, инженер кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

**Комаров Александр Иванович**, к.т.н., ведущий научный сотрудник государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси».

Беларусь, ОИМ НАН Беларуси, 220072, г. Минск, ул. Академическая, 12.