

## ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ИЗНОСОУСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ В ЛОКАЛЬНЫХ ЗОНАХ ИСПЫТУЕМОЙ МОДЕЛИ СИЛОВОЙ СИСТЕМЫ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

Измерение суммарного износа  $i$  (при испытаниях на трение скольжения и фрикционно-механическую усталость) и величины смещения осей  $\delta_c$  пары трения (при испытаниях на трение качения и контактно-механическую усталость) в машинах серии СИ осуществляется с помощью индуктивного датчика микроперемещений дискретным способом в опасном сечении образца [1–3], где возбуждаются наибольшие циклические напряжения и одновременно реализуется процесс трения скольжения. Для этого отмечают по длине окружности восемь точек: (1), (2), ..., (8), в каждой из которых с высокой точностью измеряется параметр  $i$  или  $\delta_c$  в течение 1 оборота образца при его вращении. Естественно, что такие измерения могут быть проведены в любой момент испытаний (по времени  $t$ ). Таким образом, можно изучать кинетику износоусталостного повреждения (ИУП) конкретной локальной точки (зоны) образца.

Характеристику, определенную в одной из восьми точек опасного сечения образца, будем обозначать  $x_j$ , где  $j = 1, 2, 3 \dots 8$  – номер точки. Среднее значение характеристики будем обозначать  $x_m$ . Например,  $i_7$  – суммарный износ в точке № 7,  $\delta_{cm}$  – среднее сближение осей пары трения за один оборот образца:

$$\delta_{cm} = \sum_{j=1}^8 \delta_{cj} / 8. \quad (1)$$

Как было замечено выше, среднее значение характеристики можно отождествить с интегральным значением, которое измеряется обычным способом.

Как показывают результаты проведенных многочисленных износоусталостных испытаний различных силовых систем [1–4], если круговая диаграмма поверхности опасного сечения образца строго симметрична относительно центра окружности (до испытаний), то круговая диаграмма суммарного износа и сближения осей пары трения, определяемая восемью точками, в которых измерено действительное (локальное) значение характеристики, оказывается существенно несимметричной относительно того же центра (после испытаний). Степень этой асимметрии, как правило, тем выше, чем больше время испытаний (или чем больше величина суммарного износа или сближения осей).

В этой связи можно ввести специальные характеристики локального нестационарного процесса ИУП: коэффициент асимметрии

$$R_r = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{r_{\min(j)}}{r_{\max(j)}}, \quad (2)$$

где  $r_{\min}$  и  $r_{\max}$  – меньший и больший радиус одного диаметра образца, и коэффициент неравномерности контура

$$\eta_r = \frac{r_{\max}}{r_{\min}}, \quad (3)$$

где  $r_{\max}$  и  $r_{\min}$  – наименьший и наибольший радиус образца в течение данного оборота.

На рисунке 1 указаны принятые обозначения радиусов образца, а также приведены зависимости коэффициентов  $R_r$  и  $\eta_r$  от уровня циклических напряжений при испытании силовой системы сталь 45 / сталь 25ХГТ на контактно-механическую усталость методом ступенчатого изменения изгибающей нагрузки при контактном давлении  $p_0 = 0,7p_f = \text{const}$ .

Видно, что степень неравномерности локального износоусталостного повреждения растет соответственно увеличению циклических напряжений. Заметим, что неравномерность износоусталостного повреждения тем больше, чем меньше величины  $R_a$  и  $\eta_a$  [5].

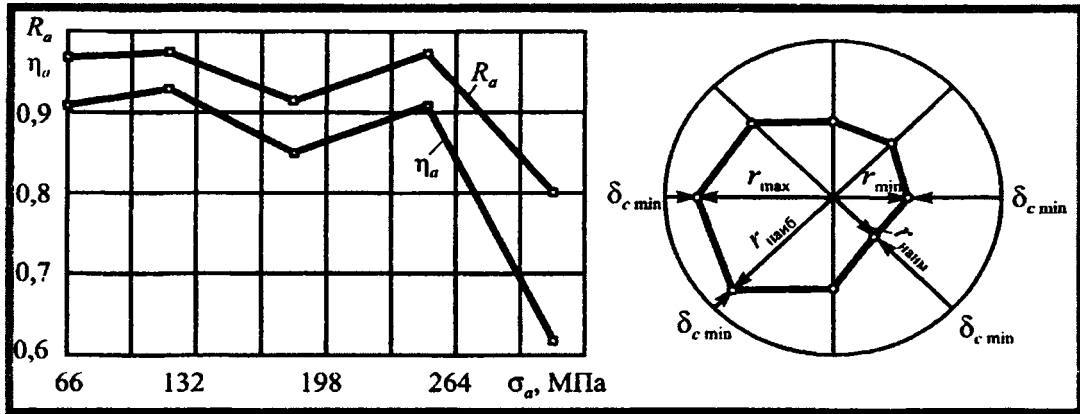


Рисунок 1 – Зависимость коэффициентов асимметрии и неравномерности износоусталостного повреждения при испытаниях на контактно-механическую усталость силовой системы сталь 45 / сталь 25ХГТ

При испытаниях на трение скольжения и на фрикционно-механическую усталость оценку коэффициентов асимметрии и неравномерности контура можно производить по формулам:

$$R_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{i_{\min(j)}}{i_{\max(j)}}, \quad \eta_i = \frac{i_{\text{наим}}}{i_{\text{наиб}}}, \quad (4)$$

где  $i_{\min}$  и  $i_{\max}$  – наименьший и наибольший суммарный износ одного диаметра за оборот образца;  $i_{\text{наим}}$  и  $i_{\text{наиб}}$  – наименьший и наибольший суммарный износ в течение данного оборота образца.

При испытаниях на трение качения и на контактно-механическую усталость аналогично можно выполнить оценку коэффициентов асимметрии и неравномерности контура по формулам:

$$R_\delta = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{\delta_{c \min(j)}}{\delta_{c \max(j)}}, \quad \eta_\delta = \frac{\delta_{c \text{ наим}}}{\delta_{c \text{ наиб}}}, \quad (5)$$

где  $\delta_{c \min}$  и  $\delta_{c \max}$  – наименьшее и наибольшее сближение осей одного диаметра за оборот образца;  $\delta_{c \text{ наим}}$  и  $\delta_{c \text{ наиб}}$  – наименьшее и наибольшее сближение осей в течение данного оборота образца (см. рисунок 2).

Предлагается также ввести коэффициенты неравномерности износа  $\beta(i)$  и сближения осей  $\beta(\delta_c)$ :

$$\beta(i)_j = \frac{i_{\max j}}{i_{\max j} + i_{\min j}}, \quad \beta(i) = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{i_{\max j}}{i_{\max j} + i_{\min j}}, \quad (6)$$

$$\beta(\delta_c)_j = \frac{\delta_{c \max j}}{\delta_{c \max j} + \delta_{c \min j}}, \quad \beta(\delta_c) = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{\delta_{c \max j}}{\delta_{c \max j} + \delta_{c \min j}}. \quad (7)$$

С помощью первых формул в (6), (7) определяются коэффициенты неравномерности суммарного износа и сближения осей на  $j$ -том диаметре, а вторые формулы в (6), (7) служат для оценки среднего значения коэффициента неравномерности суммарного износа и сближения осей за один оборот образца.

Следует заметить, что в практике авторемонтного производства широко используется определяемый при дефектации деталей автомобиля подобный коэффициент неравномерности износа  $\beta = i_{\max} / i$ , где  $i_{\max}$  – максимальный износ поверхности детали на сторону;  $i$  – величина износа на диаметр [5]. При симметричном износе детали, когда  $i_{\max} = i_{\min} = i/2$ , коэффициент неравномерности износа  $\beta = i_{\max} / i = 0,5$ . А при одностороннем износе, когда  $i_{\min} = 0$ ;  $i_{\max} = i$ , коэффициент неравномерности износа  $\beta = i_{\max} / i = 1$ . Поэтому значения коэффициента  $\beta$  могут изменяться в интервале  $0,5 \leq \beta \leq 1$ .

Обычно все характеристики ИУП оценивают на основе измерения среднего износа (остаточной деформации) образца (интегральный способ измерения). Однако предложенный [1–3] дискретный способ измерения и регистрации параметров поверхностного повреждения позволяет фиксировать локальные характеристики ИУП в нескольких точках опасного сечения образца. Соответственно появляется возможность оценивать характеристики ИУП в каждой такой точке. Для практических же расчетов представляется целесообразным использовать только два значения каждой характеристики – среднее и соответствующее 1-й точке, достигшей предельно допустимого износа (остаточной деформации). Так, для обозначения характеристик ИУП по 1-й точке, достигшей предельного состояния, предлагается использовать надстрочный индекс (1), например,  $I_h^{(1)}$  – интенсивность изнашивания по 1-й точке, достигшей предельного состояния.

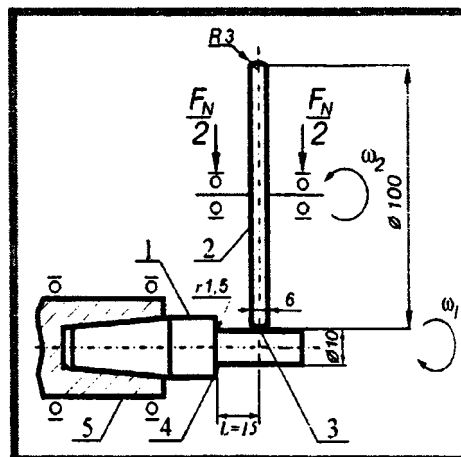


Рисунок 2 – Схема испытания модели зубчатого зацепления: 1 – образец-модель зуба; 2 – контрообразец; 3 – зона контакта; 4 – зона изгиба; 5 – шпиндель

Таблица – Основные характеристики сопротивления ИУП

Характеристика свойств	Обозначение			
	Кривые контактно-механической усталости		Кривые фрикционно-механической усталости	
	$N(\sigma_a, p_0 = \text{const})$	$N(p_0, \sigma_a = \text{const})$	$N(\sigma_a, \tau W = \text{const})$	$N(\tau W, \sigma_a = \text{const})$
Предел выносливости	$\sigma-1p$	$p\sigma$	$\sigma-1\tau$	$\tau\sigma$
Окончание таблицы				
Предел ограниченной усталости	$\sigma-1pN$	$p\sigma\sigma$	$\sigma-1\tau N$	$\tau\sigma\sigma$
Абсцисса точки перелома кривой усталости	$N\sigma pG$	$Np\sigma G$	$N\sigma\tau G$	$N\tau\sigma G$
Показатель наклона кривой усталости	$m\sigma p$	$m p\sigma$	$m\sigma\tau$	$m\tau\sigma$

Результаты износоусталостных испытаний представляют, как известно, в виде кривых фрикционно-механической и контактно-механической усталости, с помощью которых по ГОСТ 30638-99 определяют следующие характеристики сопротивления ИУП, приведенные в таблице. Эти характеристики получают экспериментально на основе измерения среднего износа (остаточной деформации) образца. Предлагается также оценивать их по 1-й точке, достигшей предельно допустимого износа (остаточной деформации). А для обозначения этих характеристик сопротивления ИУП по 1-й точке, достигшей предельного состояния, можно

также использовать надстрочный индекс (1), например,  $P_{f\sigma}^{(1)}$  – предел выносливости (при контактно-механической усталости) по 1-й точке, достигшей предельного состояния.

Рассмотрим некоторые результаты исследования локальных характеристик ИУП.

На машине СИ-03М, которая удовлетворяет всем требованиям ГОСТ 30755, при частоте 3000 мин<sup>-1</sup> в условиях нормальной температуры были проведены испытания моделей зубчатых зацеплений, изготовленных из стали 20ХН3А, на контактную усталость по схеме, изображенной на рисунке 2. При испытаниях в зону контакта капельным способом подавали смазочный материал (редукторное масло ТИ5-2). Испытания вели непрерывно до наступления предельного состояния или до базового числа циклов.

Обратимся теперь к изучению собственно локальных повреждений. Анализ показал, что можно обнаружить одиночные и связанные локальные повреждения; последние соединены между собой дорожкой качения [6]. Формирование ярко выраженного одиночного локального повреждения показано на рисунке 3. Нетрудно понять, что «сплошные» волнообразные повреждения есть конечная стадия развития локальных повреждений: от одиночного к связанным – и далее к тропи [6]. Если предельное состояние связывается, например, с глубиной локального повреждения  $\delta_{lim}$ , то можно построить своеобразную кривую усталости по критерию локального повреждения (рисунок 4).

Цифрами 1, 2, ..., 8 здесь обозначены точки по периметру дорожки качения, в которых достигнуто предельное состояние ( $\delta_{lim}$ ) за соответствующее число циклов  $N$ . Анализ последовательности расположения точек 1, 2, ..., 8 приводит к заключению, что они располагаются на графике случайным образом.

Отсюда следует заключение: пунктирные кривые на рисунке 4 ограничивают область рассеяния данных. Такое заключение не противоречит известным статистическим результатам испытания образцов на механическую усталость: рассеяние растет с уменьшением действующей нагрузки. Подчеркнем, однако, что области рассеяния долговечности на каждом уровне напряжений устанавливаются по результатам испытания только одной пары трения.

Подойдем к анализу данных, представленных на рисунке 4, с иной позиции: построим кривые усталости для каждой из восьми точек по отдельности (рисунок 5) [6]. Тогда сплошные линии на этом рисунке представляют собой кривые локальной усталости; каждая из них описывает достижение предельного состояния в конкретной точке периметра дорожки качения.

Таким образом, кривые Сосновского – Богдановича – Елового (см. рисунки 4 и 5) описывают (характеризуют) неоднородность физико-механических свойств в локальных областях испытываемого твердого тела.

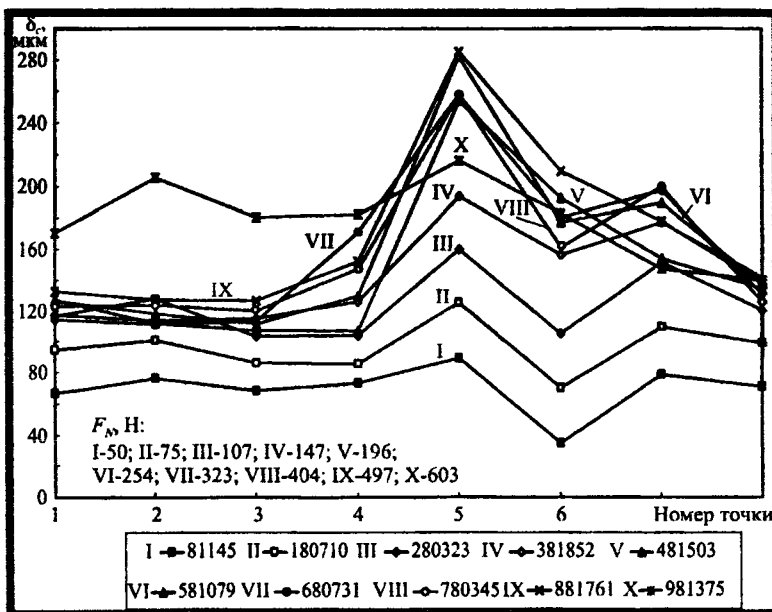


Рисунок 3 – Сближение осей в 8 точках на дорожке качения в процессе контактно-механической усталости в зависимости от числа циклов многоступенчатого (I, II, ..., X) нагружения силовой системы вал (сталь 45) / ролик (сталь 25 ХГТ)

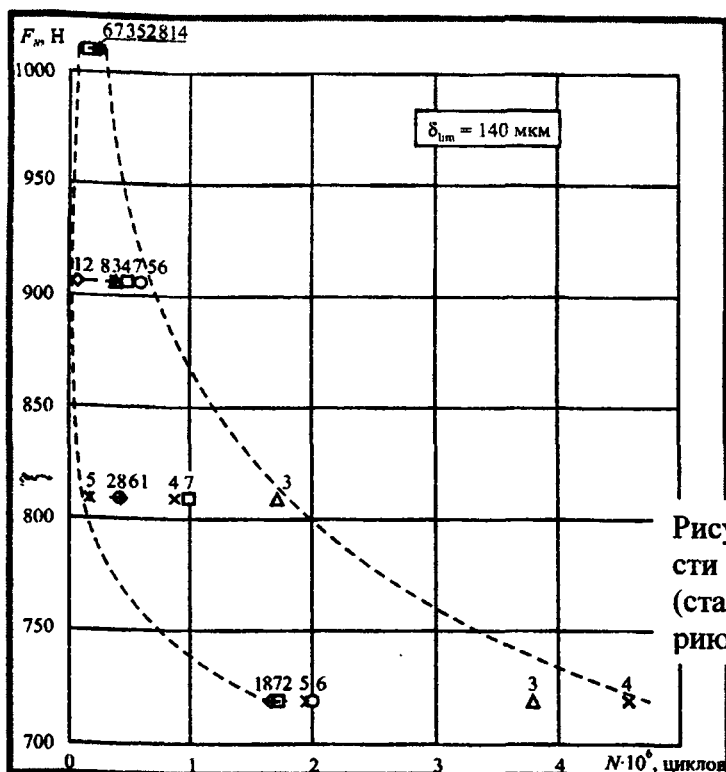


Рисунок 4 – Кривая контактной усталости для пары вал (сталь 20ХН3А) / ролик (сталь 20ХН3А), построенная по критерию локального повреждения

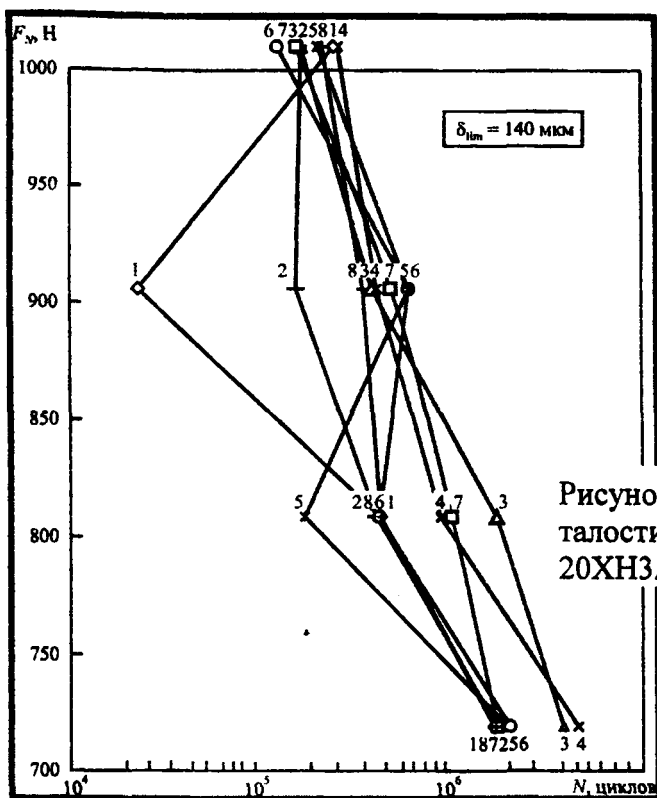


Рисунок 5 – Кривые локальной усталости для пары вал (сталь 20ХН3А) / ролик (сталь 20ХН3А)

На рисунке 5 изображены кривые усталости локальных точек опасного сечения образца, построенные в координатах контактная нагрузка  $FN$  – число циклов  $N$  до момента достижения предельно допустимого сближения осей  $\delta_{lim} = 140$  мкм пары трения вал (сталь 20ХН3А) / ролик (сталь 20ХН3А). Как можно видеть из рисунка 5, сопротивление разрушению локальных точек поверхности образца существенно различается.

Аналогичные результаты получены также для других металл-металлических силовых систем при контактной и контактно-механической усталости.

По-видимому, следует провести широкие исследования сопротивления ИУП локальных зон различных силовых систем машин и оборудования и отразить их в новых методах

расчета, учитывающих неоднородность свойств материала в зависимости от вида ИУП, характера нагруженности, типа силовой системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1 Сосновский, Л.А. Основные закономерности износоусталостных повреждений /Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, О.М. Еловой и др. // Материалы II Белорусского конгресса по теор. и прикл. механике. Под ред. акад. М.С. Высоцкого. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – С. 121 – 122. 2 Еловой, О.М. Методы и некоторые результаты измерения параметров износоусталостного повреждения в дискретных точках / О.М. Еловой // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2001. – № 4. – С.32 – 36. 3 Еловой О. М. Измерение и регистрация дискретных параметров износоусталостных повреждений моделей силовых систем мобильной техники / Тр. 4-го Междунар. симп. по трибофатике, 23 – 27 сент. 2002 г., Тернополь, Украина / отв. ред. В.Т. Трощенко. – Тернополь: Тернопольский гос. техн. ун-т им. И. Пулюя, 2002. – Т.1. – С. 128 – 133. 4 Сосновский, Л.А. Основы трибофатики: учеб. пособие для студентов вузов: В 2 ч. /Л.А. Сосновский – Гомель: БелГУТ, 2003. – Ч.1. – 246 с.; Ч.2. – 235 с. 5 Дюмин, И.Е. Повышение эффективности ремонта автомобильных двигателей / И.Е. Дюмин. – М.: Транспорт, 1987. – 176 с. 6 Сосновский Л. А. Механика износоусталостного повреждения. – Гомель: УО «БелГУТ», 2007. – 434 с.

УДК 625.143

*Сосновский Л. А., Матвеев В. И., Кебилов А. А.*

### **КРИТЕРИЙ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВ**

*Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Беларусь*

**Введение.** Под воздействием колес подвижного состава происходит уменьшение размеров головки железнодорожных рельсов и изменение ее формы, что является следствием работы сил трения в зонах контакта колеса и рельса. Кроме того, из-за действия системы циклических нагрузок в металле происходят: остаточная деформация на поверхности катания, развитие внутренних и поверхностных трещин, изменение напряженного состояния и др. Эти факторы приводят к изменению сопротивления усталости, которое является особым свойством материала, формирующим эксплуатационную долговечность системы колесо/рельс и ее отдельных элементов, в том числе и рельсов. Изучению изменения характеристик механических свойств материала рельсов в процессе эксплуатации посвящены многочисленные исследования [1–6], однако, на наш взгляд, указанная проблема до сих пор остается не решенной. В данной работе в развитие [7, 8] установлен критерий достижения критического состояния рельсовой стали и выполнено его экспериментальное подтверждение.

**1 Критерий механического состояния стали.** Одной из важнейших характеристик работоспособности рельсов является предел контактной усталости [1, 9]. Известно, что рост твердости стали ( $HB$ ) означает пропорциональное повышение предела контактной усталости  $p_f$ . Анализ результатов исследований [9] позволяет принять следующую зависимость

$$p_f = 3,12HB. \quad (1)$$

Изучение массива экспериментальных данных [10] по исследованию связи контактной усталости и твердости конструкционных сталей показывает, что зависимость (1), полученная для рельсовой стали, представляется в этом случае как среднестатистическая.