

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-11-70-73

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗНОСА РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ФРЕТТИНГ-УСТАЛОСТИ

© Евгений Михайлович Морозов¹, Алексей Павлович Солдатенков²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия; e-mail: evgeny.morozof@gmail.com

² Институт металлургии и материаловедения РАН им. А. А. Байкова; e-mail: alexxx.soldatenkov@yandex.ru

Статья поступила 6 февраля 2018 г.

Представлен способ обработки результатов экспериментов, заимствованных из литературы, на фреттинг-усталость в целях установления количественной меры, оценивающей способность материала сопротивляться поверхностному износу при циклическом контактом нагружении. Практика эксплуатации и эксперименты показывают, что на поверхности контакта возникают множественные микротрещины разных размеров. Введено предположение, что появление трещин — событие случайное. Это позволило использовать аппарат математической статистики для получения характеристик, трактуемых как механические свойства трещиностойкости, оценивающие сопротивление материала контактной усталости. Исследованы образцы трех марок сталей, предназначенных для железнодорожных рельсов. Дана оценка сопротивления металла износу робастными статистическими характеристиками в предположении, что возникновение поверхностных дефектов — случайный процесс. Нагружение проводили в условиях трения качения шарами, которые вращались в оправке, создавая кольцевую площадку износа. Если нагрузку на испытательной установке считать аналогом силового воздействия колеса на рельс, то появляется количественная мера оценки качества рельсовой стали с точки зрения ее износостойкости. Измерения на каждом образце проводили при трех наработках. Представлены графики плотности распределения площади дефектов на поверхности износа образцов. Предложены количественные характеристики, оценивающие сопротивление металла фреттинг-усталости, а именно, средняя площадь трещины, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации. Эти характеристики представляют собой параметры статистической обработки экспериментальных наблюдений за числом и размерами поверхностных трещин, возникающих при циклическом нагружении поверхности металла. Обсуждается оценка степени значимости наблюдаемых повреждений для сопоставления разных сталей между собой по показателям износостойкости. Результаты эксперимента позволили расположить исследованные стали в ряд по их способности оказывать сопротивление фреттинг-коррозии. Из трех рассмотренных сталей наибольшим сопротивлением контактному износу обладает японская сталь, затем следует сталь российского производства и на последнем месте — польского.

Ключевые слова: износ; фреттинг-коррозия; статистические методы; рельсовая сталь.

THE STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE RAIL STEEL WEAR IN CONDITIONS OF FRETTING-FATIGUE

© Evgeniy M. Morozov¹, Aleksey P. Soldatenkov²

¹ National research nuclear university “MEPHI”, Moscow, Russia; e-mail: evgeny.morozof@gmail.com

² Baikov Institute of Metallurgy and Materials Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: alexxx.soldatenkov@yandex.ru

Submitted February 6, 2018.

A method of processing the results of tests for fretting fatigue drawn on the literature, is presented to determine a quantitative measure to be used in assessing the surface wear resistance in conditions of contact cyclic loading. Operation practice and experiments indicate to multiple micro-cracks of different sizes present on the contact surface. An assumption is made regarding the accidental character of the crack birth thus making possible the use of the mathematical statistics to obtain the characteristics treated as the mechanical properties of the crack resistance, which assess the resistance of contact fatigue material. The samples of three steel grades used for railway rail production are studied. The wear resistance is assessed through robust statistical characteristics under the assumption that occurrence of the surface defects is a random process. The loading is carried out in conditions of rolling friction with the balls spinning in the mandrel, thus forming an annular wear pad. As the load on the test rig is

considered an analogue of the force action of the wheel on the rail, the wear resistance can become a quantitative measure of the quality of the rail steel. Measurements on each sample were made for three runs. The curves of the density of the defect area distribution on the wear surface of the samples are presented. Quantitative characteristics are proposed to estimate the fretting fatigue resistance of the metal, namely, the average crack area, standard deviation and the variation coefficient. Those characteristics are the parameters of statistical processing of experimental observations of the number and size of the surface cracks that occur under cyclic loading of the metal surface. The degree of significance of the observed damages is discussed to be used as an indicator when comparing different steels in the wear resistance. The results of the experiment made it possible to arrange three studied steels in a series of their fretting corrosion resistance: the Japanese steel has the greatest resistance to contact wear, then Russian steel and then Polish steel that exhibits the least resistance to contact wear.

Keywords: wear; fretting-corrosion; statistical methods; railway steel.

Рабочая поверхность железнодорожных рельсов испытывает периодические силовые воздействия по нормали к поверхности и вдоль нее. Это обуславливает возникновение распределенных повреждений в результате фреттинг-усталости металла. Данный вид сопротивления металла разрушению теоретически и экспериментально изучали на протяжении длительного времени, однако решение вопроса далеко от завершения. Это вызвано разномасштабностью, неоднородностью деформированного объекта. Соответственно, и методы изучения эффекта фреттинг-усталости разнообразны — от физических до континуальных аналитических [1].

Практика эксплуатации и эксперименты показывают, что на поверхности контакта возникают множественные микротрещины разных размеров. Предположение, что появление трещин — событие случайное позволяет воспользоваться аппаратом математической статистики для получения характеристик, которые можно трактовать как механические свойства трещиностойкости, оценивающие сопротивление материала контактной усталости. Предположение о случайности появления трещин в определенной мере условно, так как это появление подготавливается в инкубационной фазе развития повреждений, а также определяется структурной неоднородностью поликристаллических материалов. В то же время появление трещины в значительной мере и закономерное явление. Именно индивидуальная специфика конкретного материала должна найти отражение в статистических показателях, которые позволят разные материалы расположить в ряд по степени их надежности в отношении износостойкости.

В данной работе предложены количественные характеристики, оценивающие сопротивление металла фреттинг-усталости. Для исследований использовали результаты эксперимента на трех марках рельсовой стали, изложенные в работе [2]. Предлагаемые характеристики представляют собой параметры статистической обработки экспериментальных наблюдений за числом и размерами поверхностных трещин, возникающих при циклическом нагружении поверхности металла. Механические свойства исследованных сталей разных производителей приведены в табл. 1.

Образцы для эксперимента представляли собой диски диаметром 26 мм и толщиной 6 мм. Нагружение проводили в условиях трения качения четырьмя шарами, которые вращались в оправке, создавая кольцевую площадку нагружения и, соответственно, износа. Скорость вращения оправки — 4250 об/мин. Поскольку в оправке вращались четыре рабочих шарика, при каждом обороте оправки имели четыре цикла пульсирующего нагружения.

При диаметре нагружаемой области $D = 17$ мм линейная скорость движения шаров по поверхности образца составляла $v = \pi n D / 60 = 3,78$ км/ч. При числе оборотов, равном, например, $N = 10^6$, длина пути, проходимого шаром, $\pi D N = 53,4$ км. На каждый шар усилие вдавливания $P = 90,9$ Н; диаметр шара $2R = 4,763$ мм. Модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ Н/мм² и коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Радиус отпечатка под шариком $a = \sqrt[3]{\frac{3P(1-\nu^2)R}{2E}} = 0,114$ м. В центре под нагружающим шариком максимальное на-

Таблица 1. Механические свойства рельсовых сталей

Марка стали	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCV_{20} , МДж/м ²	HB
NS HE-X (Япония)	920	1460	10	26	0,15 – 0,21	385
НТМК ТЭК-3 (Россия)	934	1326	13,4	46,2	0,4 – 0,48	365
Arcelor Mittal (Польша)	748	1162	9,7	24,9	0,11 – 0,16	321

пряжение сжатия $q_0 = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi a^2} = 3,34$ ГПа. На краю области контакта в радиальном направлении возникает максимальное растягивающее напряжение $\sigma_1^{\max} = 0,2 \frac{P}{\pi a^2} = 445$ МПа. Однако оба полученных напряжения условны, поскольку использованы формулы упругости. Поэтому можно считать, что деформирование образца в окрестности контакта необратимое.

Измерения на каждом образце проводили при трех наработках (табл. 2).

След от качения шаров имеет вид кольцевой канавки, появившейся в результате необратимой деформации, износа и трещинообразования в подповерхностном объеме. На поверхности этой канавки возникали видимые трещины, которые изучали на оптическом микроскопе при фиксированном числе циклов нагружения. На всей кольцевой площади канавки (износа) имелись пятна вырыва металла (язвы) и трещины. Их число подсчитывали и измеряли площади язвочек и площади раскрытия трещин. Далее при разных наработках для каждой марки стали строили частотные кривые (плотности распределения площади трещины).

Робастные характеристики плотности распределения — средняя площадь трещины, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации — отражают степень износа поверхности. По нашему мнению, эти показатели можно считать параметрами, отражающими сопротив-

ление стали износному воздействию циклической нагрузки, хотя, безусловно, существуют и другие способы оценки износостойкости [3].

Если нагрузку на испытательной установке считать аналогом силового воздействия колеса на рельс, то появляется количественная мера оценки качества рельсовой стали с точки зрения ее износостойкости.

Эксперимент показывает появление на поверхности катания износных пятен отрыва разного размера, а также трещин, выходящих из глубины на видимую поверхность. Соответственно, появляются следы повреждений, на несколько порядков различающиеся по размерам. Возникает вопрос о степени значимости наблюдаемых повреждений для возможности взаимного сопоставления разных сталей между собой по показателям износостойкости. Очевидно, что эффект, вносимый многими мелкими и небольшим числом крупных повреждений, разный. Иными словами, следует принимать во внимание масштабный уровень повреждения, что предопределяет и разный механизм разрушения. Поэтому нами рассмотрен диапазон измеряемых площадей дефектов, соответствующих величинам одного порядка. Таким образом, измеренные максимальные размеры дефектов, деленные на десять, дают минимальные размеры дефектов. Дефекты, размеры которых меньше минимально установленных, не принимались во внимание.

Статистическую обработку результатов эксперимента для каждой стали проводили, следуя классической схеме. Для каждой наработки (числа циклов N) измеряли число дефектов N_d в виде вырыва металла и их площади на всей поверхности контакта. Затем диапазон площадей $S_{\max} - S_{\min}$ делили на равные интервалы и находили частоту попадания площади дефекта в данный интервал. Ориентировочное число интервалов n определяли из зависимости $n = \sqrt{N_d}$. Далее известными способами находили среднюю площадь

Таблица 2. Число циклов контактного нагружения образцов трением качения

Марка стали	Наработки		
	1	2	3
NS HE-X	$2,55 \cdot 10^6$	$24 \cdot 10^6$	$94 \cdot 10^6$
НТМК ТЭК-3	$2,04 \cdot 10^6$	$4,08 \cdot 10^6$	$6,12 \cdot 10^6$
Arcelor Mittal	$2,04 \cdot 10^6$	$5,1 \cdot 10^6$	$7,64 \cdot 10^6$

Таблица 3. Результаты измерений и расчетов статистических параметров дефектов

Марка стали	Число циклов	N_d	S_s , мм ²	$S_{\text{кольца}}$, мм ²	S_d , %	$S_{\min}$, мм ²	$S_{\max}$, мм ²	S_{av} , мм ²	σ_s , мм ²	ν
NS HE-X	$2,55 \cdot 10^6$	41	1,43	56,71	2,5	0,0109	0,1073	0,0348	0,0234	0,66
	$24 \cdot 10^6$	92	2,61	64,37	4,1	0,0095	0,0941	0,0284	0,0188	0,65
	$94 \cdot 10^6$	377	3,44	65,30	5,3	0,0039	0,0391	0,0091	0,0057	0,62
НТМК ТЭК-3	$2,04 \cdot 10^6$	5	0,48	67,75	0,7	0,0311	0,2603	0,0960	0,0611	0,53
	$4,08 \cdot 10^6$	42	2,65	66,22	4,0	0,0285	0,2835	0,0631	0,0407	0,62
	$6,12 \cdot 10^6$	76	4,31	101,93	4,2	0,0224	0,2199	0,0566	0,0397	0,68
Arcelor Mittal	$2,04 \cdot 10^6$	50	0,49	60,57	0,8	0,0038	0,0374	0,0098	0,0054	0,55
	$5,1 \cdot 10^6$	47	4,57	71,52	6,4	0,0336	0,3287	0,0972	0,0661	0,66
	$7,64 \cdot 10^6$	51	7,53	69,94	10,8	0,0461	0,4296	0,1477	0,1008	0,67

дефекта, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации. Эти данные приведены в табл. 3, где N_d — число дефектов; S_s — суммарная площадь, занятая дефектами; $S_{\text{кольца}}$ — площадь дорожки (кольца) контакта; S_d — доля дорожки контакта, занятая дефектами; $S_{\min}$ и $S_{\max}$ — минимальная и максимальная площади дефекта; $S_{av} = S_s/N_d$ — средняя площадь дефекта в дорожке контакта; σ_s — среднее квадратическое отклонение; ν — коэффициент вариации. Этих данных достаточно для оценки износостойкости металла.

На рис. 1 представлены плотности распределения износных усталостных трещин P от их площади S (мм²) для трех марок сталей.

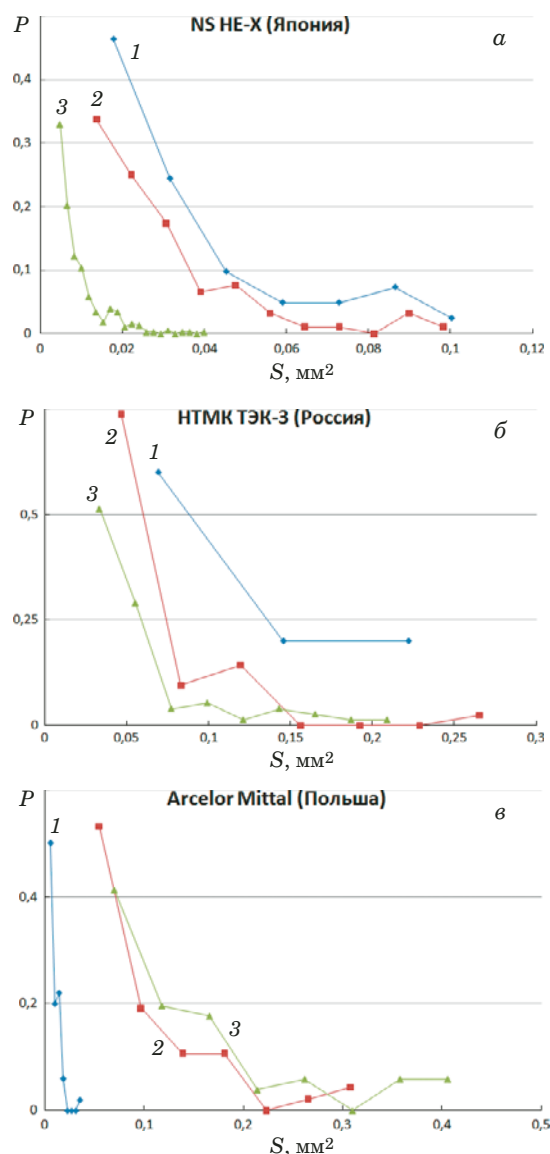
Из табл. 3 видно, что во всех случаях площадь дефектов нарастает с наработкой, равно как и число дефектов. Наблюдается очень большой разброс площадей дефектов — коэффициент вариации составляет около 60 % для всех сталей при любой наработке, что в определенной мере отражает шероховатость поверхности износа. Наибольшее сопротивление износу показывает японская сталь, поскольку у нее самая небольшая площадь $S_{\max}$ дефекта при максимальной наработке, а сумма площадей всех дефектов — наименьшая. Хуже всех выглядит польская сталь — по суммарной, максимальной и средней площадям дефектов.

Отметим такое необъяснимое явление, как заживление дефектов, наблюдающееся в японской и российской сталях [2]. Оно заключается в уменьшении максимальной и средней площадей дефектов с ростом наработки. Можно предположить, что увеличение наработки приводит к нагреву и большим пластическим деформациям, которые заваривают дефекты. Не исключен и эффект от возможного падения нагрузки из-за повышения податливости материала в сочетании с соответствующим изменением жесткости испытательной машины.

Таким образом, из трех рассмотренных сталей наибольшим сопротивлением контактному износу обладает японская сталь, затем следует сталь российского производства и на последнем месте — польского.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ботвина Л. П. Разрушение. Кинетика, механизмы, общие закономерности. — М.: Наука, 2008. — 334 с.
2. Ботвина Л. П., Левин В. П., Жаркова Н. А., Тютин М. Р., Солдатенков А. П., Демина Ю. А. Кинетика накопления повреждений рельсовых перлитных сталей в условиях



Плотности распределения дефектов от их площади для сталей трех марок при разной наработке: 1 – 3 соответствуют наработкам 1 – 3

контактной усталости / Трение и износ. 2016. Т. 37. № 3. С. 309 – 317.

3. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. — М.: Машиностроение, 1999. — 544 с.

REFERENCES

1. Botvina L. R. Fracture. Kinetics, mechanisms, general regularities. — Moscow: Nauka, 2008. — 334 p. [in Russian].
2. Botvina L. R., Levin V. P., Zharkova N. A., Tyutin M. R., Soldatenkov A. P., Demin Yu. A. Kinetics of damage accumulation pearlitic rail steel under contact fatigue / Trenie Iznos. 2016. Vol. 37. N 3. P 309 – 317 [in Russian].
3. Morozov E. M., Zernin M. V. A contact problem of fracture mechanics. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1999. — 544 p. [in Russian].