

6. Добренко Сэм, Пряхин В. Н., Храпов В. Б., Чибухчян С. С. Определение надежности резервирования систем АПК по критериям уравнивания чувствительности // Вестник Международной общественной академии экологической безопасности и природопользования. – 2009. – Вып. 7(14). – С. 22–26.

7. Оптимизация режима работы рабочих органов в системах автоматического управления на объектах АПК / Сэм Добренко [и др.] // Вестник Международной общественной академии экологической безопасности и природопользования. – 2012. – Вып. 13 (20). – С. 63–68.

8. Добренко Сэм, Максимов В. М., Пряхин В. Н. Оптимизация режима устранения отказов системы сепарации ТБО // Вестник Международной общественной академии экологической безопасности и природопользования. – 2012. – Вып. 13 (20). – С. 35–40.

9. Добренко Сэм, Пряхин В. Н., Соко-

лов В. В. Современное состояние и мониторинг системы сбора опасных отходов и материалов // Вестник Международной общественной академии экологической безопасности и природопользования. – 2009. – Вып. 7(14). – С. 61–66.

Материал поступил в редакцию 17.02.13.

*Добренко Сэм, соискатель*

*Тел. 8-499-976-21-94*

*E-mail: sam.dobrenko@gmail.com*

*Долгов Александр Анатольевич, доцент*

*Тел. 8-926-581-64-81*

*E-mail: dolaa@rambler.ru*

*Максимов Вячеслав Михайлович, докторант*

*Тел. 8-916-419-33-09*

*E-mail: 4193309@mail.ru*

*Пряхин Вадим Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности»*

*Тел. 8-917-500-74-13*

*E-mail: vpryahin@inbox.ru*

УДК 502/504:620.194.8

**С. С. ЧИБУХЧЯН, М. Г. СТАКЯН**

Государственный инженерный университет Армении (Политехник)

**Е. И. ВЫБРИК**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ УСТАЛОСТИ ВАЛОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

*Рассмотрены вопросы повышения точности определения показателей сопротивления коррозионной усталости валов передаточных механизмов, расположенных в ходовой части транспортных средств и технологического оборудования, которые работают под воздействием атмосферных осадков и при переменном сложном нагружении (совместный циклический изгиб и кручение). По результатам испытаний на усталость валов, максимально приближенных к реальным условиям работы, получены уравнения семейств линий усталости для интервала вероятностей неразрушения.*

*Коррозионная усталость, валы, транспортные средства, вероятность неразрушения, циклическая долговечность.*

*There are considered problems of accuracy enhancement of determining shaft corrosion fatigue resistance indices of transmission mechanisms located in the running gear of vehicles and process equipment which operate under the influence of precipitation and at variable complex loading (joint cyclic bend and torque). According to the shafts fatigue tests results maximally approximated to the operation real conditions there are received equations of fatigue lines for the interval of survival probabilities.*

*Corrosion fatigue, shafts, vehicles, survival probability, fatigue crack life.*

Тенденции развития человеческой деятельности за последние десятилетия обусловили резкое увеличение объемов добычи природных богатств и использование возможностей окружающей среды для нужд общества. Произошли революционные изменения в сферах горнорудных и добывающих производств, стали разрабатывать новые технологические процессы, создавать высокоэффективные транспортные средства и технологическое оборудование с более высокой производительностью и надежностью работы для добычи, перевозки и переработки природных запасов при соблюдении минимальных весовых характеристик их конструкций.

Значимыми стали проблемы расширения поля деятельности и бурное развитие грузо-, пассажироперевозок в связи с глобализацией и расширением региональных культурно-экономических связей, а также с ростом мобильности населения, стремлением приобрести всепогодные транспортные средства, которые удовлетворяют современным требованиям дорожного комфорта и безопасности передвижения в экстремальных условиях и обеспечивают мобильность в трудовой деятельности, организации отдыха на природе. Эти потребности общества во всех развитых странах стимулируют массовое производство вездеходных автомобилей различного назначения, а также создание новой дорожной инфраструктуры и телекоммуникаций.

В таких условиях приоритетным стали задачи высокой производительности, рабочих скоростей, надежности и безотказности работы указанных классов машин, обеспечивающих круглосуточную работу при резких изменениях природно-климатических условий и температур, воздействии солнечной радиации, атмосферных осадков, влажности, различных газовых и жидких сред и др. Эти воздействия совместно с переменной нагруженностью элементов конструкции на рабочих поверхностях вызывают сложные и совместно протекающие адсорбционные и электрохимические процессы, приводящие к возникновению и развитию коррозионно-усталостных повреждений, а в итоге к возможной потере несущей способности и разрушению [1–3].

Согласно адсорбционно-

электрохимической гипотезе коррозионно-усталостного разрушения стальных деталей, первичное воздействие коррозионной среды с деформируемым металлом происходит при адсорбции молекул среды в поверхностные слои, которая приводит к изменению поверхностной энергии граничной зоны «металл – среда». В местах выхода дислокаций на поверхности детали происходит активизация адсорбционных и электрохимических процессов, градиент которых зависит от рН – показателя среды. В результате совместного действия указанных процессов и переменного деформирования поверхностных слоев происходит непрерывное возникновение и отслаивание созданных коррозионных пленок. Процесс коррозионно-усталостного разрушения имеет непрерывный характер, при этом не обнаруживается постоянного физического предела выносливости [3, 4].

Известно, что в зоне  $N \leq 5 \cdot 10^6$  циклов в механизме разрушения преобладает адсорбционный процесс за счет микроструктурных сдвигов и дефектов поверхностного слоя, что в итоге приводит к возникновению субмикроструктурных повреждений и появлению первых микротрещин. Электрохимические (анодные) процессы в этой зоне незначительны, но способствуют появлению микротрещин.

В зоне  $N \leq 5 \cdot 10^6$  циклов градиент адсорбционных процессов низкий и преобладающими становятся электрохимические процессы, которые на дне поверхностных микронеровностей и уже возникших микротрещин стимулируют микротоки в галанической паре «вершина – дно» микроповерхностей и микротрещин. Указанные процессы, непрерывно разрушающие дно этих микроповреждений, происходят в зонах ограниченной и длительной выносливости ( $10^5 \leq N \leq 10^9$ ), имеют разные градиенты и плавно переходят от одного к другому [2, 3]. Большинство исследователей математическую модель коррозионно-усталостного разрушения в логарифмических координатах ( $\lg \sigma$ ,  $\lg N$ ) представляют в виде двух семейств уравнений квантильных линий усталости, параметром которых является уровень вероятности неразрушения  $P(N)$ , представленный квантилем  $z_p$  нормированной функции нормального распределения  $P(z)$  [5, 6]:

для зоны  $N \leq N_{Gk}$  (левая ветвь) –  
 $N \leq N_{Gk}$ ;  
 $\lg N = (\overline{\lg N_k} + z_p s_{Nrk}) -$   
 $-(\overline{m\sigma_k} + z_p s_m)(\overline{\lg \sigma_k} - \overline{\lg k}) =$   
 $= C_k - m_k \lg \sigma;$  (1)

для зоны  $N > 5 \cdot 10^6$  (правая ветвь) –  
 $N > N_{Gk}$ ;  
 $\lg N = (\overline{\lg N'_k} + z_p s'_{Nrk}) -$   
 $-(\overline{m'\sigma_k} + z_p s'_m)(\overline{\lg k} - \overline{\lg \sigma'_k}) =$   
 $= C'_k - m'_k \lg \sigma;$  (2)

координаты точки перегиба ветвей –  
 $\lg \sigma_{Rk} = (C_k - C'_k) / (m_k - m'_k),$   
 $\lg N_{Gk} = (C_k / m_k - C'_k / m'_k) / (1 / m_k - 1 / m'_k).$  (3)

В (1)...(3) приняты следующие величины:

$$\left. \begin{aligned} m_k^{(0)} &= \overline{m_k^{(0)}} + z_p s_{m_k}^{(0)}; C_k^{(0)} = \overline{C_k^{(0)}} + z_p s_{C_k}^{(0)}; \\ \overline{m_k^{(0)}} &= \overline{r_k^{(0)}} / s_{Nk}^{(0)}; \overline{\sigma_k^{(0)}} = \overline{m_k^{(0)}} \overline{\lg k^{(0)}} + \overline{\lg N_k^{(0)}}; \\ s_{Nrk}^{(0)} &= s_{Nk}^{(0)} \sqrt{(1 - r_k^{(0)2})(n-1)/(n-2)}; s_{mk}^{(0)} = \\ &= (s_{Nk}^{(0)} / s^{(0)}) \sqrt{(1 - r_k^{(0)2})(n-1)/(n-2)}; \\ s_{Ck}^{(0)} &= s_{Nrk}^{(0)} + s_{mk}^{(0)} \overline{\lg \sigma_k^{(0)}}; r_k^{(0)} = \mu_k^{(0)} / s_{Nk}^{(0)} s^{(0)}; \\ \overline{\lg N_k^{(0)}} &= \frac{1}{n} \sum_1^n \lg N_{ik}^{(0)}; \overline{\sigma_k^{(0)}} = \frac{1}{n} \sum_1^n \lg \sigma_{ik}^{(0)}; \\ s_{Nk}^{(0)} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\lg N_{ik}^{(0)} - \overline{\lg N_k^{(0)}})^2}; \\ s_{\sigma k}^{(0)} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\lg \sigma_{ik}^{(0)} - \overline{\lg \sigma_k^{(0)}})^2}; \\ \mu_k^{(0)} &= \frac{1}{n-1} \sum_1^n (\lg N_{ik}^{(0)} - \overline{\lg N_k^{(0)}})(\lg \sigma_{ik}^{(0)} - \overline{\lg \sigma_k^{(0)}}), \end{aligned} \right\} (4)$$

где  $m_{(k)}^{(0)}$ ,  $C_k^{(0)}$  – показатели наклона и параметры квантильных линий усталости;  $(\overline{\lg \sigma_k^{(0)}})$ ,  $\overline{\lg N_k^{(0)}}$  – координаты центров распределения циклических долговечностей;  $s_{Nrk}^{(0)}$  – меры индивидуального рассеяния данных на уровнях центров распределения;  $s_{mk}^{(0)}$  – с.к.о. показателей наклона;  $\mu_k^{(0)}$  – корреляционные моменты;  $r_k^{(0)}$  – коэффициенты линейной корреляции;  $\overline{\lg \sigma_k^{(0)}}$ ,  $\overline{\lg N_k^{(0)}}$  – координаты экспериментальных точек;  $n$  – объем испытаний (в (4) принята краткая форма представления параметров, например:  $\overline{m_k^{(0)}}$  означает  $m_k$  или  $m'_k$  для левой или правой ветвей квантильных линий).

Отметим, что при использовании математической модели (1)...(3) наблюдается высокая степень тесноты линейной корреляционной связи между  $\lg \sigma_{ik}^{(0)}$  и  $\lg N_{ik}^{(0)}$  ( $r_k^{(0)} = 0,92...0,96$ ).

Ранее проведенный большой объем

испытаний в основном был направлен на изучение физико-химических процессов коррозионно-усталостного разрушения или решение конкретных инженерных задач, продиктованных совершенствованием конструкций или технологии изготовления их деталей и узлов, работающих в коррозионных средах. Сравнительная сложность реализации этих экспериментов, трудности воспроизводства реальных режимов работы валов и соединений, а также большая длительность по отношению к другим видам испытаний на усталость (примерно на 2 порядка выше) ограничили возможности расширения исследований в данной области, которые в наше время стали актуальными.

Проведенные исследования в этой области носят частный характер, и в них отсутствует системный подход к решению задач. Несмотря на наличие большого числа и разнохарактерного действия повреждающих факторов, можно выделить основные признаки процесса – отсутствие длительного предела выносливости, неодинаковая степень воздействия адсорбционного и электрохимического механизмов повреждения поверхностных слоев деталей, приводящих к разному наклону и дисперсии долговечностей в области многоциклового усталости. Это требует уточнения методов определения показателей сопротивления коррозионной усталости путем организации оптимальных экспериментов, сокращающих объем и продолжительность испытаний на коррозионную усталость.

Для получения достоверных выводов использованы результаты массовых испытаний на коррозионную усталость гладких образцов ( $d = 10$  мм, сталь 45 в нормализованном состоянии, НВ = 190...210 МПа) на специальном стенде, работающем по принципу замкнутого силового контура и нагружающем образцы совместным круговым изгибом и кручением с постоянным отношением касательных и нормальных напряжений  $\tau/\sigma = 0,6$ , который моделирует реальный режим нагружения валов передаточных механизмов [7]. Стенд снабжен специальной коррозионной камерой для непрерывного орошения рабочей зоны образца чистой водой [8]. Испытания проведены на 8 уровнях напряжений:  $\sigma_j = 100, 120, 140, 160, 200, 230, 270$  и  $300$  МПа, а на каждом уровне  $\sigma_j$  испытано

$n_i = 20$  образцов ( $n = 160$ ), охватывающих зону долговечностей  $N = 10^5 \dots 10^9$  циклов. Результаты экспериментов обработаны согласно (1)...(4) в [6]. Получены параметры уравнений семейств квантильных

линий коррозионной усталости для левой и правой ветвей при уровнях вероятностей неразрушения  $P(N) = 10, 50, 90, 95, 99$  и  $99,9\%$  ( $z_p = 1,28; 0; -1,28; -1,64; -2,33; -3,09$ ) (табл. 1).

Таблица 1  
**Параметры уравнений семейств квантильных линий коррозионной усталости, согласно (1)...(4), для базовых испытаний ( $n = 160$ )**

N	Ветвь	$ r ^{(i)}$	$\overline{\lg \sigma_k}^{(i)}$	$\overline{\lg N_k}^{(i)}$	$s_{Nrk}^{(i)}$	$P(N), \%$	$C_k^{(i)}$	$\overline{m_k}^{(i)}$
1	Левая	0,9271	2,3552	5,9561	0,1341	10	14,1196	3,3941
2						50	13,9480	
3						90	13,7764	
4						95	13,7281	
5						99	13,6355	
6						99,9	13,5336	
7	Правая	0,9364	2,0751	7,1492	0,1494	10	20,8843	6,5271
8						50	20,6931	
9						90	20,5019	
10						95	20,4481	
11						99	20,3450	
12						99,9	20,2315	

На рисунке даны результаты экспериментов и расчетов согласно (1)...(4). Для получения достоверных результатов и выполнения вероятностных оценок необходимо проверить «нулевую» гипотезу соответствия вариационных рядов  $\lg N_k^{(i)}$  ( $n_i = 20$  образцов) логарифмически нормальному закону распределения, так как расчеты показателей сопротивления усталости, согласно (1)...(4), базируются на предположении, что эти ряды подчиняются указанному закону. С этой целью выполнена комплексная расчетная проверка нормальности распределения рядов по критериям согласия:  $\chi^2$  – Пирсона;  $\lambda$  – Колмогорова – Смирнова и  $w$  – Шапиро–Уилка [9]:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^6 (n_j - np_j)^2 / np_j \leq \chi_{\alpha}^2; \quad (5)$$

$$\lambda = \max [D_n^+; D_n^-] (\sqrt{n} - 0,01 + 0,85/\sqrt{n}) \leq \lambda_{\alpha}; \quad (6)$$

$$D_n^+ = \max [i/n - \Phi(z_i)];$$

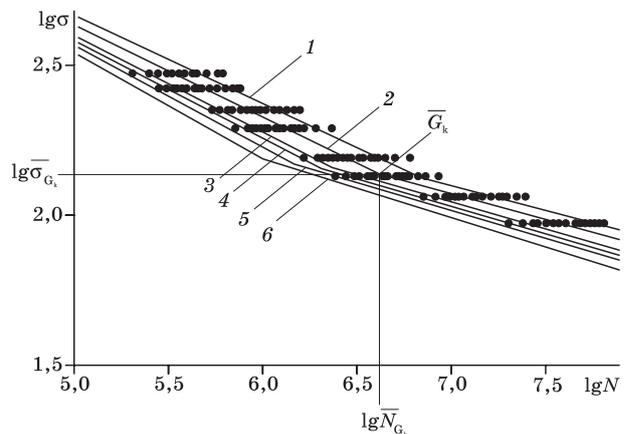
$$D_n^- = \max [\Phi(z_j) - (i-1)/n,];$$

$$\Phi(z_j) = (\sqrt{2\pi})^{-1} \int_{-\infty}^{z_j} \exp(-z^2/2) dz;$$

$$w = b^2/S^2 \geq w_{\alpha}; \quad (7)$$

$$b = \sum_{i=1}^K a_{n-(i-1)} [x_{n-(i-1)} - x_i], \quad S^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / n,$$

где  $\chi_{\alpha}^2, \lambda_{\alpha}, w_{\alpha}$  – соответствующие критериальные значения при  $n_i$  и уровне надежности вывода  $\alpha = 0,05$ .



**Семейства квантильных линий коррозионной усталости для левой ( $N < N_{Gk}$ ) и правой ( $N > N_{Gk}$ ) ветвей. Линии 1...6 соответствуют уровням вероятностей неразрушения:  $P(N) = 10, 50, 90, 95, 99$  и  $99,9\%$**

При обеспечении условий (5)...(7) определяются 90%-ные доверительные границы генеральных средних и дисперсий:

$$\begin{cases} \bar{x} - s_x t_{\alpha,k} / \sqrt{n} < a < \bar{x} + s_x t_{\alpha,k} / \sqrt{n}; \\ s_x^2 (n-1) / \chi_{p_1}^2 < \sigma^2 < s_x^2 (n-1) / \chi_{p_2}^2, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\chi_{p_1}^2, \chi_{p_2}^2$  – значения функции распределения Пирсона для вероятностей  $P_1 = \alpha = 0,05; P_2 = (1-\alpha) = 0,95; t_{\alpha,k}$  – критерий Стьюдента при  $\alpha = 0,05$  и  $k = n_i - 1$ .

Выполненные расчеты подтвердили соответствие вариационных рядов  $\lg N_k^{(i)}$  указанному распределению (табл. 2).

Полный охват полей рассеяния циклических долговечностей  $N_k^{(i)}$ , учет их размеров и характера расположения в зонах ограниченной и длительной выносли-

Проверка нормального распределения вариационных рядов  $\lg N_{jv}$

N		$\alpha_{\max}$	$\chi^2$	$\lambda$	w	a		σ	
						Нижний	Верхний	Нижний	Верхний
1	100	0,4013	1,8356	0,456	0,981	7,5585	7,7015	0,0147	0,0438
2	120	0,4896	1,4256	0,602	0,984	7,0726	7,2150	0,0145	0,0434
3	140	0,2666	0,9220	0,583	0,966	6,6063	6,7427	0,0134	0,0398
4	160	0,4224	0,9368	0,607	0,976	6,4204	6,5557	0,0133	0,0397
5	200	0,6208	0,5295	0,450	0,962	6,0333	6,1539	0,0104	0,0311
6	230	0,4193	1,3135	0,327	0,976	5,9022	6,0222	0,0103	0,0308
7	270	0,2154	2,2256	0,568	0,936	5,6124	5,7366	0,0111	0,0330
8	300	0,4475	0,6573	0,686	0,990	5,4998	5,6186	0,0101	0,0302

Примечание: при  $n = 20$ ;  $\alpha = 0,05$ ;  $\chi_{\alpha}^2 = 5,99$ ;  $\lambda_{\alpha} = 0,89$ ;  $w_{\alpha} = 0,905$ .

ности, где действуют разные механизмы коррозионно-усталостного разрушения, а также комплексная проверка нормальности распределения значений  $\lg N_k^{(i)}$  позволяют в координатной системе  $(\lg \sigma, \lg N)$  кривые коррозионной усталости представить в виде уравнений двузвенных семейств линий регрессии, имеющих точку перегиба в зоне  $(2...6) \times 10^6$  и соответствующих заданному уровню вероятности неразрушения  $P(N)$ . Это позволяет на стадии проектирования указанных машин и оборудования за счет использования достоверных вероятностных значений пределов выносливости, соответствующих заданному сроку службы, добиться снижения их материалоемкости, а для действующих машин – назначения обоснованных сроков ремонтно-восстановительных работ.

**1. Астафьев В. И., Ширяев Л. К.** Накопление поврежденности и коррозионное растрескивание металлов под напряжением. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 1998. – 123 с.

**2. Карпенко Г. В.** Физико-химическая механика конструкционных материалов: Избр. труды. – Киев: Наукова думка, 1985. – Т. 1. – 228 с.

**3. Похмурский В. И.** Коррозионная усталость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 207 с.

**4. Олейник Н. В., Магденко А. Н.** Расчет деталей машин на коррозионную усталость – Киев: Техника, 1990. – 150 с.

**5. Стакян М. Г., Манукян Г. А.** Об одном методе расчетной оценки сопротивления коррозионной усталости валов // Известия вузов. Машиностроение. – 1990. – № 4. – С. 11–16.

**6. Стакян М. Г., Миракян Г. Г., Маргарян Э. А.** Уравнения кривых коррозион-

ной усталости валов с учетом дисперсионного анализа циклических долговечностей // Известия НАН РА и ГИУА. – Сер. ТН. – 2010. – № 1 (Т. 63). – С. 12–18.

**7. Нагружающее устройство к стендам замкнутого контура для испытания валов на усталость: А. с. 1559269 СССР, А1 G01 N3/34 / М. Г. Стакян, Г. А. Манукян, Л. Г. Оганесян, А. С. Мнацакян (СССР). – № 4338023/25-28; заявл. 7.12.87; заявитель Министерство высшего образования Армянской ССР; опубл. 24.04.90; бюл. № 15. – 4 с.**

**8. Устройство для испытаний на усталость в коррозионных средах: А. с. 1317329 СССР, А1 G01 N17/00 / Н. В. Олейник, М. Г. Стакян, Л. В. Вольчев, Г. А. Манукян (СССР). – № 3848578/25-28; заявл. 01.02.85; заявитель Министерство высшего образования Армянской ССР; опубл. 15.06.1987; бюл. № 22. – 3 с.**

**9. Степнов М.Н., Шаврин А. Я** Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. – М.: Машиностроение, 2005. – 332 с.

Материал поступил в редакцию 12.11.12.

**Чибухчян Сурен Смеилович**, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Наземные транспортные средства»

Тел. 8 (37493) 22-35-04

E-mail: armenpack@mail.ru

**Стакян Мигран Григорьевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Машиноведение»

Тел. 8 (34710) 55-43-62

**Выбрик Евгений Иванович**, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Тракторы и автомобили»

Тел. 8 (499) 408-78-31