
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 621.192(035)

**ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
ПО КРИТЕРИЮ КОРРОЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ**© 2019 г. Г. С. Чибухчян^{1,*}, М. Г. Стакян¹, О. С. Чибухчян¹¹*Национальный политехнический университет Армении (НПУА), г. Ереван, Армения***e-mail: armenpack@mail.ru*

Поступила в редакцию 17.05.2018 г.

Принята к публикации 08.08.2019 г.

В статье рассмотрены вопросы повышения точности определения показателей сопротивления коррозионной усталости валов передаточных механизмов, которые работают под воздействием атмосферных осадков и при переменном сложном нагружении (совместный циклический изгиб и кручение). По результатам испытаний на усталость получены уравнения семейств линий усталости для интервала вероятностей неразрушения $P(N) = 50...99.9\%$. Получены зависимости для определения коэффициентов прочности и долговечности в широком интервале многоциклового усталости. Составлена номограмма указанных коэффициентов для вероятностной оценки несущей способности валов при $N = 10^5...10^8$ циклах.

Ключевые слова: коррозионная усталость, валы, транспортные средства, вероятность неразрушения, циклическая долговечность

DOI: 10.1134/S0235711919060038

Введение. Сокращение сроков проектирования новых машин и полное использование резерва несущей способности и долговечности существующих конструкций предполагают наряду с уточнением характеристик сопротивления усталости и трещиностойкости также применение эффективных расчетных методик, реализуемых на персональных ЭВМ непосредственно на рабочем месте конструктора-расчетчика. Создание банка данных при использовании указанных методик позволяет выдавать оперативную расчетную информацию в виде фиксированных, дискретных и непрерывных значений интересующих параметров, не прибегая к традиционным справочникам и пособиям, возможности которых ограничены, и может стать одним из важнейших элементов при разработке САПР в машиностроении и проведении научных исследований [1–4].

Для технологического оборудования и транспортных средств, работающих в условиях атмосферного воздействия и коррозионных сред, характерно возникновение и развитие повреждений на поверхностях тяжело нагруженных и ответственных узлов и деталей (валы и их соединения), которые носят непрерывный характер и в значительной степени снижают их прочность, долговечность и надежность [5–8]. Наличие большого числа и разнохарактерного действия повреждающих факторов, а также широкий спектр изменения их количественных показателей диктуют необходимость применения принципа системного подхода – изучения механизма коррозионно-усталостного разрушения и принятия его оптимальной математической модели, разработ-

ки расчетного алгоритма и создания программного обеспечения для комплексного решения задач.

Методика решения задачи. Для оценки сопротивления усталости валов и их соединений принята расчетная схема “воздух – коррозионная среда”. Расчетно-графический анализ данных большого числа экспериментальных работ в качестве математической модели коррозионно-усталостного разрушения подтвердил вид двузвенной линии коррозионной усталости, представленной в координатах $(\lg \sigma, \lg N)$ и обеспечивающей высокую степень тесноты линейной корреляционной связи между σ и N ($|r| = 0.92, \dots, 0.95$). Согласно [9] и с учетом характера изменения дисперсий циклических долговечностей N_{ij} по уровням перенапряжений σ_i получены уравнения семейств квантильных линий усталости и координат точек перегиба $(\lg \sigma_R, \lg N_G)$ этих линий:

а) на воздухе – левая ветвь ($N \leq 5 \times 10^6$):

$$\lg N = (\overline{\lg N} + z_p s_{Nr}) - (\overline{m} + z_p s_m) \lg \sigma = C - m \lg \sigma, \quad (1)$$

правая ветвь ($N > 5 \times 10^6$):

$$\lg \sigma_R = \overline{\lg \sigma_R} (1 + z_p v_{\sigma R}), \quad \lg N_G = C - m \lg \sigma_R, \quad (2)$$

б) в коррозионной среде – левая ветвь ($N < N_{Gk}$):

$$\lg N = (\overline{\lg N}_k + z_p s_{Nr_k}) - \overline{m}_k \lg \sigma = C_k - \overline{m}_k \lg \sigma, \quad (3)$$

правая ветвь ($N \geq N_{Gk}$):

$$\lg N = (\overline{\lg N}'_k + z_p s'_{Nr_k}) - \overline{m}'_k \lg \sigma = C'_k - \overline{m}'_k \lg \sigma, \quad (4)$$

координаты точки перелома

$$\lg \sigma_{Rk} = (C_k - C'_k) / (m_k - m'_k), \quad \lg N_{Gk} = (C_k / m_k - C'_k / m'_k) / (1/m_k - 1/m'_k). \quad (5)$$

где

$$m = \overline{m} + z_p s_m, \quad m_{(k)}^{(i)} = \overline{m}_{(k)}^{(i)}, \quad C_{(k)}^{(i)} = \overline{C}_{(k)}^{(i)} + z_p s_{C_{(k)}^{(i)}}, \quad m_{(k)}^{(i)} = \overline{r}_{(k)}^{(i)} / s_{N_{(k)}^{(i)2}},$$

а также

$$\left. \begin{aligned} \overline{C}_{(k)}^{(i)} &= \overline{m}_{(k)}^{(i)} \lg \overline{\sigma}_{(k)}^{(i)} + \overline{\lg N}_{(k)}^{(i)}, & s_m &= (s_N / s_\sigma) \sqrt{(1 - r^2)(n-1)/(n-2)}, \\ s_{N_{r(k)}^{(i)}} &= s_{N_{(k)}^{(i)}} \sqrt{(1 - r_{(k)}^{(i)2})(n-1)/(n-2)}, & s_{C_{(k)}^{(i)}} &= s_{N_{r(k)}^{(i)}} + s_m \lg \overline{\sigma}_{(k)}^{(i)}, \\ \overline{r}_{(k)}^{(i)} &= \mu_{(k)}^{(i)} / s_{N_{(k)}^{(i)}} s_{\sigma_{(k)}^{(i)}}, & \overline{\lg N}_{(k)}^{(i)} &= \frac{1}{n} \sum_1^n \lg N_{i(k)}^{(i)}, & \overline{\lg \sigma}_{(k)}^{(i)} &= \frac{1}{n} \sum_1^n \lg \sigma_{i(k)}^{(i)}, \\ s_{N_{(k)}^{(i)}} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\lg N_{i(k)}^{(i)} - \overline{\lg N}_{(k)}^{(i)})^2}, & s_{\sigma_{(k)}^{(i)}} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\lg \sigma_{i(k)}^{(i)} - \overline{\lg \sigma}_{(k)}^{(i)})^2}, \\ \mu_{(k)}^{(i)} &= \frac{1}{n-1} \sum_1^n (\lg N_{i(k)}^{(i)} - \overline{\lg N}_{(k)}^{(i)}) (\lg \sigma_{i(k)}^{(i)} - \overline{\lg \sigma}_{(k)}^{(i)}), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$m_{(k)}^{(i)}$, $C_k^{(i)}$ – показатели наклона и параметры квантильных линий усталости; $\overline{(\lg \sigma_k^{(i)})}$, $\overline{\lg k^{(i)}}$ – координаты центров распределения циклических долговечностей; $S_{Nrk}^{(i)}$ – меры индивидуального рассеяния данных на уровнях центров распределения; $S_{mk}^{(i)}$ – среднее квадратичное отклонение показателей наклона; $\mu_k^{(i)}$ – корреляционные моменты; $r_k^{(i)}$ – коэффициенты линейной корреляции; $(\lg \sigma_k^{(i)}, \lg N_k^{(i)})$ – координаты экспериментальных точек; n – объем испытаний (в (6) принята краткая форма представления параметров, например: $\overline{m_k^{(i)}}$ означает $\overline{m_k}$ или $\overline{m_k'}$ для левой или правой ветвей квантильных линий усталости).

Оценка прочности при этом производится согласно коэффициенту коррозионного воздействия (ГОСТ 20.504-82)

$$K_{\sigma k} = \sigma_{RNk} / \sigma_{RN}, \quad (7)$$

где σ_{RNk} и σ_{RN} – пределы ограниченной выносливости в среде и на воздухе при заданном значении циклической долговечности.

Применение коэффициента $K_{\sigma k}$ в расчетах на прочность дает лишь точечную оценку в окрестности точки перегиба кривой коррозионной усталости, которая имеет ниспадающий характер во всем интервале числа циклов $N = 10^5 \dots 10^8$. Поэтому важно проведение расчетов по долговечности, для определения обоснованных сроков службы транспортных средств с учетом вероятности безотказной работы. Для этого предлагается коэффициент

$$K_{Nk} = N_k / N, \quad (8)$$

где N и N_k – циклические долговечности, определенные из соответствующих уравнений квантильных линий усталости при заданном уровне циклических перенапряжений σ .

Параметры, включенные в (7) и (8) и коэффициенты $K_{\sigma k}$ и K_{Nk} являются случайными величинами и связаны со статистическими характеристиками (3)–(6), которые в свою очередь, зависят от единичных или совместно действующих факторов усталостного процесса. В результате, коэффициенты $K_{\sigma k}$ и K_{Nk} являются интегральными оценками вероятностных значений N_{ij} и σ_i . В координатной системе $(\lg \sigma, \lg N)$ значения N_{ij} и σ_i подчиняются логарифмически нормальному закону и можно записать, что

$$\left. \begin{aligned} \lg \sigma_{Rk} &= \overline{\lg \sigma_{Rk}} + z_p s_{\lg \sigma_{Rk}}, & \lg \sigma_R &= \overline{\lg \sigma_R} + z_p s_{\lg \sigma_R}, \\ \lg N_k &= \overline{\lg N_k} + z_p s_{\lg N_k}, & \lg N &= \overline{\lg N} + z_p s_{\lg N}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

откуда, согласно (7), (8)

$$\left. \begin{aligned} \lg K_{\sigma k} &= \lg \sigma_{Rk} - \lg \sigma_R = \left(\overline{\lg \sigma_{Rk}} - \overline{\lg \sigma_R} \right) + z_p \left(s_{\lg \sigma_{Rk}} - s_{\lg \sigma_R} \right) = \overline{\lg K_{\sigma k}} + z_p \lg A, \\ \lg K_{Nk} &= \lg N_k - \lg N = \left(\overline{\lg N_k} - \overline{\lg N} \right) + z_p \left(s_{\lg N_k} - s_{\lg N} \right) = \overline{\lg K_{Nk}} + z_p \lg B. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

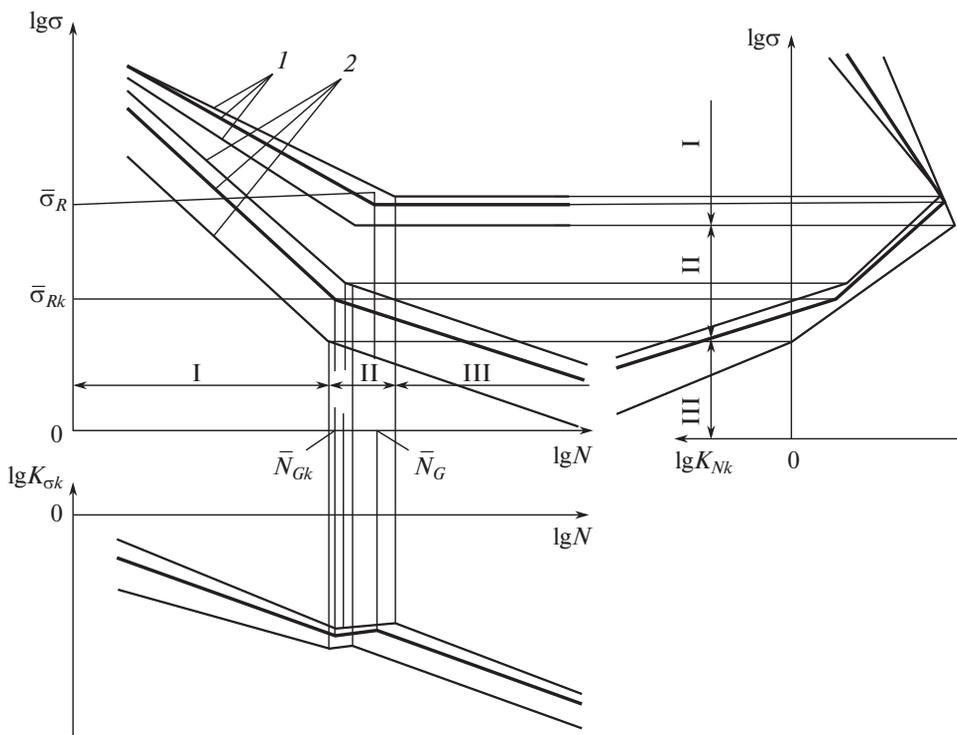


Рис. 1. Расчетная схема для вывода функций $K_{\sigma k} = f(N, z_p)$, $K_{Nk} = \phi(\sigma, z_p)$: 1, 2 – соответственно, семейства квантильных линий усталости на воздухе и в коррозионной среде при $P(N)_1 < P(N)_2 < P(N)_3$.

где $A = (s_{\lg \sigma_{Rk}} - s_{\lg \sigma_R})$ и $B = (s_{\lg N_k} - s_{\lg N})$.

В общем случае $s_{\lg \sigma_{Rk}} \neq s_{\lg \sigma_k}$, $s_{\lg N_k} \neq s_{\lg N}$, следовательно, (7) и (8) являются случайными функциями, параметром которых является квантиль нормированной функции Лапласа z_p . Функции $K_{\sigma k} = f(N, z_p)$, $K_{Nk} = \phi(\sigma, z_p)$ выводятся совместным решением уравнений семейств квантильных линий усталости (3)–(6), полученных в результате испытаний на усталость деталей на воздухе и в коррозионной среде, используя геометрические соотношения на рис. 1.

$$\lg K_{\sigma k} = \lg \sigma_{ik} - \lg \sigma_i \quad (N_i = \text{const}), \quad \lg K_{Nk} = \lg N_{ik} - \lg N_i \quad (\sigma_i = \text{const}), \quad (11)$$

где σ_{ik} , σ_i и N_{ik} , N_i – вероятностные значения циклических перенапряжений и долговечностей при фиксированных значениях N_i и σ_i .

Наметим зоны I–III для N и σ , в пределах которых параметры функций $K_{\sigma k} = f(N, z_p)$, $K_{Nk} = \phi(\sigma, z_p)$ остаются постоянными (табл. 1).

В табл. 1 σ_R , N_G и σ_{Rk} , N_{Gk} – вероятностные значения координат точек перегиба сравниваемых квантильных линий усталости (в скобках указаны возможные варианты изменения этих значений), а остальные

Таблица 1. Функции $K_{\sigma k} = f(N, z_p)$, $K_{Nk} = \phi(\sigma, z_p)$ для зон I–III

N	Зоны N и σ		Функции $K_{\sigma k} = f(N, z_p)$, $K_{Nk} = \phi(\sigma, z_p)$
1	N	I	$N < N_{Gk} (N < N_G)$ $\lg K_{\sigma k} = S_1 - M_1 \lg N$
2		II	$N_{Gk} \leq N \leq N_G (N_G \leq N \leq N_{Gk})$ $\lg K_{\sigma k} = S'_1 - M'_1 \lg N (=S_2 - M_2 \lg N)$
3		III	$N > N_G (N > N_{Gk})$ $\lg K_{\sigma k} = S'_2 - M'_2 \lg N$
4	σ	I	$\sigma > \sigma_R$ $\lg K_{Nk} = \Delta C_1 - \Delta m \lg \sigma$
5		II	$\sigma_R \geq \sigma \geq \sigma_{Rk}$ $\lg K_{Nk} = \Delta C_2 - \Delta m_k \lg \sigma$
6		III	$\sigma < \sigma_{Rk}$ $\lg K_{Nk} = \Delta C'_2 - \Delta m'_k \lg \sigma$

$$\left. \begin{aligned}
 S_1 &= (C_k/m_k - C/m), & S'_1 &= (C'_k/m'_k - C/m), \\
 S_2 &= S_1 + \lg N_G/m, & S'_2 &= S'_1 + \lg N_G/m, \\
 M_1 &= (1/m_k - 1/m), & M'_1 &= (1/m'_k - 1/m), \\
 M_2 &= 1/m_k, & M'_2 &= 1/m'_k, & \Delta C_1 &= C_k - C, \\
 \Delta C'_1 &= C'_k - C, & \Delta C_2 &= \Delta C_1 + m \lg \sigma_R, \\
 \Delta C'_2 &= \Delta C'_1 + m \lg \sigma_{Rk}, & \Delta m &= m_k - m.
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Экспериментальная часть. Для получения достоверных результатов использованы данные испытаний на усталость образцов 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 [10]. Стенд снабжен специальной коррозионной камерой для непрерывного орошения рабочей зоны образца жидкостью [11]. Результаты экспериментов обработаны согласно (3)–(5) и получены параметры уравнений семейств квантильных линий усталости на воздухе и в коррозионной среде для левой и правой ветвей при уровнях вероятностей неразрушения $P(N) = 10, 50, 90, 95, 99$ и 99.9% ($z_p = 1.28, 0, -1.28, -1.64, -2.33, -3.09$).

Для повышения коррозионной прочности образцов в местах концентрации напряжений (галтель) нанесен слой сверхпрочного эпоксидного полимерного клея марки ГИПК 11-11, обладающего высокой адгезией и замедляющего процесс коррозионно-усталостного разрушения. Данный клей широко применяется в силовых схемах транспортных средств, а также на наружных поверхностях емкостей и магистральных трубопроводов, работающих на открытой местности.

Проведены три серии испытаний с числом образцов n внутри каждой серии, $n = 20, \dots, 25$. ($d = 12$ мм, сталь 45, нормализация, $\sigma_B = 680$ МПа, $\sigma_T = 427$ МПа, $HV = 190, \dots, 210$). Приняты условные обозначения: Гл – гладкие образцы, испытанные на воздухе; Г, ГП – соответственно образцы с галтелью и защитным покрытием, испытанные в воде.

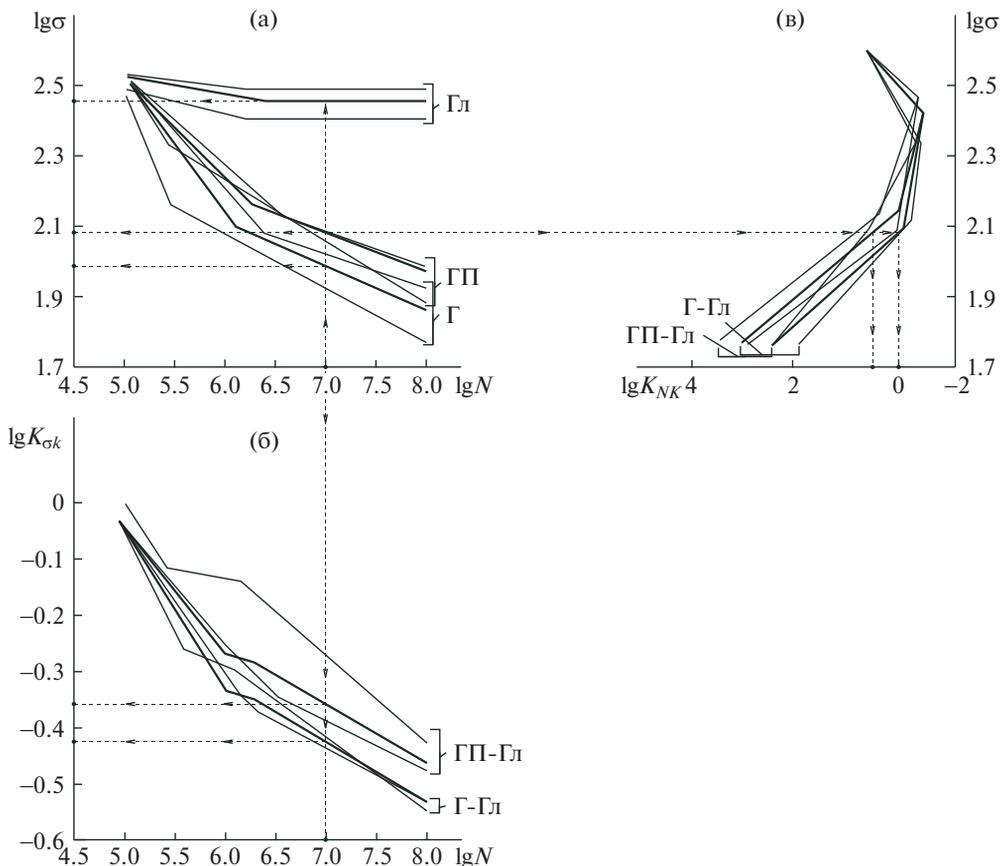


Рис. 2. Номограмма для сравнительных испытаний (Гл-Г) и (Гл-ГП). Семейства квантильных линий: (а) – линии усталости для серий испытаний Гл, Г, ГП; (б), (в) – функции $K_{\sigma k} = f(N, z_p)$ и $K_{Nk} = \phi(\sigma, z_p)$ для сравнительных серий испытаний (Г-Гл) и (Гл-ГП). Квантильные линии соответствуют уровням вероятности неразрушения $P(N) = 10.50, \dots, 9.9\%$.

Результаты исследования. Получена номограмма для количественной оценки влияния среды (вода), концентрации напряжений, защитного покрытия и режима нагружения (рис. 2).

Несмотря на наличие различных вариантов воздействия факторов, основной особенностью функции $K_{\sigma k} = f(N, z_p)$ является монотонное снижение значений $\overline{K_{\sigma k}}$ в интервале долговечностей $N = 10^5 \dots 10^8$, которое составляет $\overline{K_{\sigma k}} = 0.951, \dots, 0.289$.

Для функций $K_{Nk} = \phi(\sigma, z_p)$ изменение $\overline{K_{Nk}}$ носит убывающе-возрастающий характер с минимальным значением $\overline{K_{Nk \min}}$ на уровне предела выносливости гладких образцов на воздухе σ_R . Для интервала рабочих напряжений $0.75\sigma_{Rk} \leq \sigma \leq \sigma_{Rk}$ значения $\overline{K_{Nk}}$ меняются в интервале $\overline{K_{Nk}} = 0.821, \dots, 15.562$. Указанные интервальные значения $\overline{K_{\sigma k}}, \overline{K_{Nk}}$ в справочной литературе отсутствуют и с учетом вероятностной коррекции

имеют существенное значение при проектировании транспортных средств и технологического оборудования, работающего в условиях воздействия коррозионных сред и обладающих высокой надежностью за заданный срок службы. Совместное влияние факторов α_σ , рН является наиболее значимым из всех рассмотренных вариантов воздействия (рис. 2, Гл-Г). При воздействии трех факторов (рН, α_σ , покрытие) переменность указанных функций проявляется лишь на левой ветви линий коррозионной усталости (рис. 2) – при высоких уровнях перенапряжений ($\sigma > \sigma_{Rk}$) из-за растрескивания защитного полимерного покрытия и непосредственного контакта коррозионной жидкости с металлом значения $K_{\sigma k}$ и K_{Nk} для серий испытаний Г и ГП приравняются. Только в интервалах $\sigma < \sigma_{Rk}$ и $N > 10^6$ существенным становится положительное влияние полимерного покрытия, и относительный рост коэффициентов составляет: $\delta K_{\sigma k} = 1.192$, $\delta K_{Nk} = 3.913$.

Заключение. Предложенный метод позволяет в реальном диапазоне N и σ вести системный анализ и количественный учет влияния разнородных по характеру воздействия факторов, группируя их по степени повреждающего или упрочняющего эффекта, который в конечном итоге интегрально проявляется в изменении расположения семейств квантильных линий усталости для сравнительных испытаний. Доступность расчетного алгоритма и применение в нем общеизвестных статистических параметров двумерной задачи облегчают его применение в уточненных расчетах на прочность и долговечность с использованием вероятностных значений показателей сопротивления усталости. Метод пригоден также для сравнительного анализа и выбора оптимальных конструкторских, технологических и эксплуатационных параметров с целью повышения сопротивления усталости ответственных и тяжелонагруженных деталей машин [11–14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов Р.Д. Вероятностно-детерминическая механика усталости. М.: Наука, 2003. С. 256.
2. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 2003. С. 232.
3. Платонова Е.С. Повышение коррозионной стойкости деталей машиностроения // Вестник ПНИПУ: Машиностр. материаловедение. 2015. Т. 17. № 3. С. 41.
4. Старостина Ж.А. Создание комплекса условий развития отечественного производства строительного-дорожной техники [Текст] / Ж.А. Старостина // Сб. мат. VIII Межд. науч.-практ. конф.: Europe Research: Innovation in Science, Education and Technology. М.: Изд-во журнала МЭСХ, 2015. С. 5.
5. Шадрин А.И., Орхон Л. Зависимость показателей надежности экскаваторов разреза “Баганурский” от срока эксплуатации. Известия СО РАН. 2013. № 2 (43). С. 120.
6. Олейник Н.В., Вольев А.В., Бершак С.Б. и др. Расчет деталей машин на коррозионную усталость. Киев: Техника, 1990. С. 150.
7. Stakyan M.G., Sogomonyan V.K. Diagnostics of fatigue fracture of construction machinery structural elements // Proc. of Conf. on Cont. Problems of Archit. and Constr., Yerevan, Oct. 26–28, 2016. P. 254.
8. Korolov V., Vysotskiy Y., Filatov Y. Design criteria of reliability and safety in the design of corrosion protection of structural steel // EUROCORR-2014. The European Corrosion Congress: “Improving materials durability: from cultural heritage to industrial applications”. Pisa, Book of Abstracts. 2014. P. 88.
9. Стакян М.Г., Миракян Г.Г., Маргарян Э.А. Уравнения кривых коррозионной усталости валов с учетом дисперсионного анализа циклических долговечностей // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2010. Т. 63. № 1. С. 12.

10. *Олейник Н.В., Стакян М.Г., Вольчев Л.В., Манукян Г.А.* А. с. 1317329 СССР, А1 G01 N17/00. Устройство для испытаний на усталость в коррозионных средах (СССР). N3848578/25-28; Заявл. 01.02.85; Заявитель Мин. высш. обр. Арм ССР. Опубл. 15.06.87. Бюл. N22. С. 3.
11. *Чибухчян С.С., Стакян М.Г.* Эксплуатационная надежность микроавтобуса модели “ГАЗЕЛЬ” // Ж. Механизация строительства. 2017. № 3 (873). С. 57.
12. *Houshyar A.* Reliability and Maintainability of Machinery and Equipment, Part 1: Accessibility and Assessing Machine Tool R&M Performance // Published online.-15 Jul. 2015. P. 201.
13. *Praca M., Uehara S., Ferreira M.* New polymeric coating on sputtered bearings for heavy-duty diesel engines // SAE Inter. Journ. Engines. 2013. № 6. P. 623.
14. *Кушнарев Л.И., Чепурина Е.Л. и др.* Качество и надежность отечественной техники – основа ее конкурентоспособности // Ж. Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 11. С. 35.