

УДК 621.86

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ВАЛОВ МЕХАНИЗМОВ МОСТОВЫХ КРАНОВ С УЧЕТОМ КОРРЕЛЯЦИИ ПАРАМЕТРОВ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Крутицкий М.Н.

Научно-производственное предприятие «Подъемстройналадка»

В работе методом статистических испытаний исследуется влияние корреляции параметров усталостного разрушения на долговечность вала механизма мостового крана общего назначения. Считается, что нормальные и касательные напряжения совместно влияют на общую долговечность вала. При этом может присутствовать корреляция пределов выносливости и коэффициентов подобия блоков нагружения. Для вычисления долговечности используется скорректированная линейная теория накопления усталостных повреждений. Параметры надежности вычисляются после построения функции вероятности безотказной работы напряжением или на основе частных функций вероятности безотказной работы для каждого вида напряжений. Выполнено моделирование в разработанном программном комплексе.

Ключевые слова: вал, механизм, грузоподъемная машина, усталость, долговечность, корреляция параметров, компьютерное моделирование, метод статистических испытаний.

Мостовые краны получили широкое распространение в качестве грузоподъемного оборудования промышленных предприятий. При проектировании мостовых кранов используются типовые подходы к расчету усталостной прочности.

Если объект расчета испытывает воздействие нормальных напряжений, то его долговечность можно вычислить на основе информации о величинах амплитуд напряжений σ_{ai} , возникающих в детали за период эксплуатации l_{σ} , и о количестве повторения этих амплитуд $\nu_{i\sigma}$ ($t_{i\sigma}$ в относительных числах). Совокупность такой информации называется блоком нагружения. Он характеризуют следующие величины: $\sigma_{a \max}^{пред}$ – максимальное напряжение в блоке нагружения; σ_{ai} – амплитуда напряжений в ступени блока действующих нагрузок; $\sigma_{a \max \sigma}$ – амплитуда напряжений в максимальной ступени блока нагружения; ν_{σ} – общая длина блока нагружения. Блок нагружения для элементов несущей металлоконструкции и механизмов мостового крана общего назначения можно построить с использованием методики, рассмотренной в работах [1, 2].

Если срок службы детали до отказа обозначить T , то количество циклов нагружения за срок службы детали равен

$$\lambda = T/l_{\sigma}.$$

Тогда общее количество циклов повторения амплитуд i -го уровня амплитуд σ_{ai} за срок службы равно

$$n_i = \nu_{i\sigma} \lambda,$$

а общее суммарное количество циклов повторения амплитуд всех уровней равно

$$N_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^r n_i = \lambda \nu_{\sigma}.$$

Таким образом, для расчета необходимо использовать какую-либо гипотезу суммирования усталостных повреждений от амплитуд различного уровня.

Наиболее простой гипотезой является линейная теория суммирования усталостных повреждений [3-5], которая предполагает, что разрушение наступает после того, как сумма относительных повреждений $\frac{n_i}{N}$ по всем уровням амплитуд достигает единицы:

$$\sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N} = 1,$$

где n_i – общее количество циклов повторения уровня амплитуд σ_{ai} за срок службы.

Однако вычисленное по линейной теории суммирования значение ресурса имеет большую погрешность. Различные исследования показали, что сумма относительных усталостных повреждений $a_p = \sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N}$ может сильно отличаться от единицы и колебаться в широких пределах от 0,01 до 10,0 в силу вероятностной природы усталости. Поэтому теорию линейного суммирования можно скорректировать следующим образом [4]:

$$L = \frac{l_0 a_p \sigma_{-1\delta}^m N_G}{v_{i0} \sum_{i=1}^r \sigma_{ai}^m t_{i0}},$$

где предельная повреждаемость

$$a_p = \frac{\sigma_{a\max} \xi - 0.5 \sigma_{-1\delta}}{\sigma_{a\max} - 0.5 \sigma_{-1\delta}},$$

коэффициент формы блока

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^{r_i} \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}} \cdot t_{i0}}{\sum_{i=1}^{r_i} t_{i0}},$$

r_i – число ступеней блока нагружения, полученное при отбрасывания ступеней с амплитудой напряжений $\sigma_{ai} < 0.5 \cdot \sigma_{-1\delta}$.

Приведенные выше формулы справедливы и для воздействия на объект касательных напряжений τ (необходимо заменить в выражениях σ на τ).

Валы механизмов мостовых кранов работают в условиях сложного напряженно-деформированного состояния при одновременном воздействии нормальных и касательных напряжений. При этом при расчетах либо делается допущение о независимом воздействии данных напряжений на усталостную долговечность вала [6, 7], либо используются эквивалентные напряжения по одной из теорий прочности [4, 8].

В работе рассматривается случай, когда установлено совместное воздействие нормальных и касательных напряжений на долговечность вала (существует корреляция параметров усталостного разрушения). В качестве метода исследования усталостной долговечности выбран метод статистических испытаний [4, 5], реализованный в виде программы для ЭВМ (рис. 1).

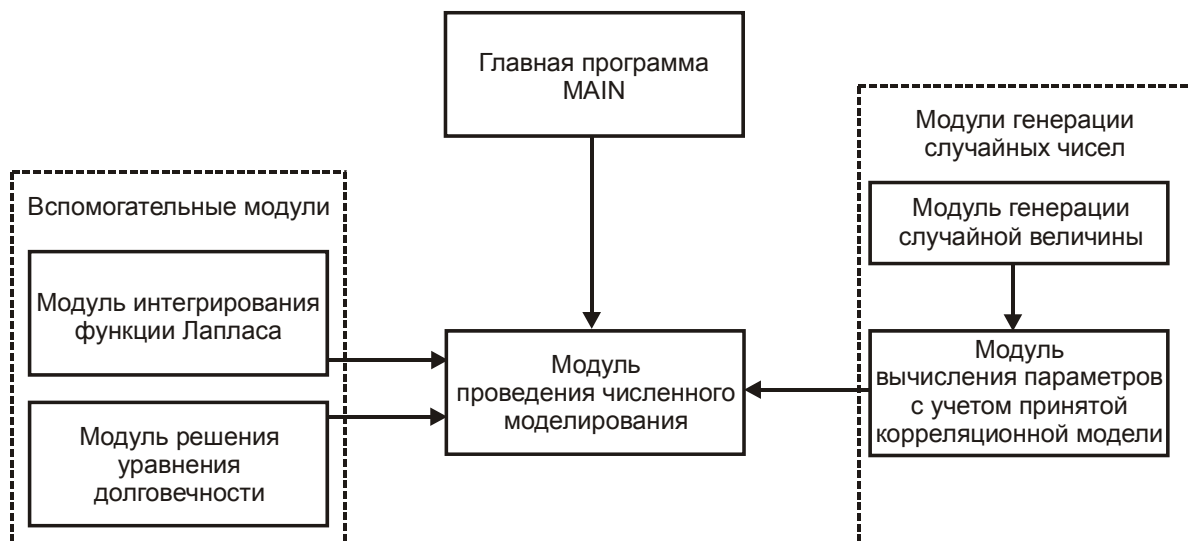


Рис. 1. Блок-схема модулей программы моделирования

В расчетную программу заложены следующие корреляционные модели.

Нулевая корреляция. Пределы выносливости $\sigma_{-1\partial j}$, $\tau_{-1\partial j}$ и коэффициенты подобия блоков нагружения $\varepsilon_{\sigma j}$ и $\varepsilon_{\tau j}$ разыгрываются независимо. Т.е. в каждом j -м вычислительном опыте значение каждого параметра получается с помощью описанного выше датчика распределенных по нормальному закону чисел.

Корреляция пределов выносливости. Параметры $\sigma_{-1\partial j}$, $\varepsilon_{\sigma j}$ и $\varepsilon_{\tau j}$ разыгрываются независимо. Задается явная функциональная связь параметра $\tau_{-1\partial}$ от параметра $\sigma_{-1\partial}$.

Значение пределов выносливости можно получить следующим образом

$$\begin{aligned}\overline{\sigma_{-1\partial j}} &= \overline{\sigma_{-1\partial}} + U_{\sigma_{-1\partial j}} S_{\sigma_{-1\partial}}, \\ \overline{\tau_{-1\partial j}} &= \overline{\tau_{-1\partial}} + U_{\tau_{-1\partial j}} S_{\tau_{-1\partial}},\end{aligned}$$

где $\overline{\sigma_{-1\partial j}}$, $\overline{\tau_{-1\partial j}}$ – медианные значения предела выносливости (с вероятностью 50%); $U_{\sigma_{-1\partial}}$, $U_{\tau_{-1\partial}}$ – квантили пределов выносливости; $S_{\sigma_{-1\partial}}$, $S_{\tau_{-1\partial}}$ – средние квадратические отклонения пределов выносливости.

Полагая равными квантили $U_{\sigma_{-1\partial}}$ и $U_{\tau_{-1\partial}}$, из предпоследнего уравнения получаем $U_{\sigma_{-1\partial}}$ и, подставляя в последнее уравнение, получаем искомую корреляционную связь

$$\overline{\tau_{-1\partial j}} = \overline{\tau_{-1\partial}} + \left(\frac{\overline{\sigma_{-1\partial j}} - \overline{\sigma_{-1\partial}}}{V_{\sigma_{-1\partial}} \overline{\sigma_{-1\partial}}} \right) S_{\tau_{-1\partial}}$$

Возможно построение корреляционной зависимости исходя из следующего условия

$$\frac{\overline{\sigma_{-1\partial j}}}{\overline{\sigma_{-1\partial}}} = \frac{\overline{\tau_{-1\partial j}}}{\overline{\tau_{-1\partial}}},$$

однако, такая постановка может использоваться при равных коэффициентах вариации пределов выносливости по каждой из компонент напряжений.

Корреляция пределов выносливости и коэффициентов подобия блоков напряжений. Параметры $\sigma_{-1\partial j}$ и $\varepsilon_{\sigma j}$ разыгрываются независимо. Аналогично предыдущему случаю задается явная функциональная связь $\tau_{-1\partial}(\sigma_{-1\partial})$ и $\varepsilon_{\tau j}(\varepsilon_{\sigma j})$.

Функция вероятности безотказной работы вала (ФВБР) строится с помощью метода статистических испытаний либо напрямую, либо после перемножения частных ФВБР по каждому виду напряжений.

Алгоритм прямого построения ФВБР заключается в следующем. При ступенчатой функции распределения амплитуд напряжений выражение для усталостной долговечности L согласно скорректированной линейной теории накопления усталостных повреждений Серенсена-Когаева имеет вид [3, 4]

$$L_{\sigma} = \frac{l_{\sigma} a_p \sigma_{-1\partial}^m N_G}{\varepsilon^m v_{i\sigma} \sum_{i=1}^n \sigma_{ai}^m t_{i\sigma}}$$

По правилам метода статистических испытаний в j -м вычислительном опыте моделируются значения случайных величин $\sigma_{-1\partial j}$ и ε_j в соответствии с нормальным законом распределения и с учетом корреляционных связей по описанным выше моделям.

Случайные величины m_j и N_{Gj} моделируется согласно [4] на основе полученного случайного значения предела выносливости:

$$m = \frac{\overline{\sigma_{-1\partial j}}}{\overline{\sigma_{-1\partial}}} m,$$

$$\lg N_{Gj} = \lg \overline{N_G} \left(1 + \frac{\overline{\sigma_{-1dj}} - \overline{\sigma_{-1d}}}{\overline{\sigma_{-1d}} \overline{v_{\sigma_{-1d}}}} v_{\lg N_G} \right),$$

где $\overline{\sigma_{-1d}}$, \overline{m} , $\lg \overline{N_G}$ – медианные значения соответствующих величин.

Другие случайные величины считаем детерминированными. В расчете используем их медианные значения.

Далее вычисляем значения частных усталостных долговечностей по каждой компоненте напряжений для текущего вычислительного опыта по формуле

$$L_{\sigma j} = \frac{l_{\sigma} a_{pj} \overline{\sigma_{-1dj}}^m N_G}{\varepsilon_{\sigma j}^m v_{i\sigma} \sum_{i=1}^{r_i} \overline{\sigma_{ai}}^m t_{i\sigma}}$$

где предельная повреждаемость

$$a_{pj} = \frac{\overline{\sigma_{a \max j}} \xi_j - 0.5 \overline{\sigma_{-1dj}}}{\overline{\sigma_{a \max j}} - 0.5 \overline{\sigma_{-1dj}}},$$

максимальное напряжение блока

$$\overline{\sigma_{a \max j}} = \overline{\sigma_{a \max}} \cdot \varepsilon_{\sigma j},$$

коэффициент формы блока

$$\xi_j = \frac{\sum_{i=1}^{r_i} \frac{\overline{\sigma_{aij}}}{\overline{\sigma_{a \max j}}} \cdot t_{i\sigma}}{\sum_{i=1}^{r_i} t_{i\sigma}},$$

r_i – число ступеней блока нагружения, полученное при отбрасывания ступеней с $\overline{\sigma_{aij}} < \overline{\sigma_{-1dj}}$.

Если $\overline{\sigma_{a \max j}} < \overline{\sigma_{-1dj}}$, то разрушение детали не наблюдается.

Находим общую долговечность L из уравнения [4]

$$\left(\frac{L}{L_{\sigma}} \right)^{\frac{2}{m_{\sigma}}} + \left(\frac{L}{L_{\tau}} \right)^{\frac{2}{m_{\tau}}} = 1.$$

Решение уравнения производится численно методом Ньютона. Если разрушение наступает только по одной из компонент напряжений, то общая долговечность равна соответствующей частной долговечности.

Повторяя вычислительные опыты M раз, получаем выборку значений L размером $m^* < M$. Для получения устойчивых значений вероятности разрушения количество вычислительных опытов принимаем равным 100 000. При этом, если по данным численного испытания разрушилось менее 30 деталей, считаем выборку долговечности не представительной, а результаты эксперимента не точными.

Для заданной наработки L_{pi} вероятность неразрушения (безотказной работы) P определяется по формуле

$$P = 1 - n(L_{pi}) / M,$$

где $n(L_{pi})$ – число опытов, где отказ наступает за время меньше L_{pi} .

При программной реализации этого принципа вся расчетная долговечность L_p разделяется на несколько промежутков L_{pi} . Однако, как показали расчеты, такой подход к построению функции вероятности безотказной работы дает некорректные результаты. Для построенной таким образом функции наблюдается большой разброс и резкие скачки значений. Поэтому для построения функции вероятности безотказной работы используем гипотезы о нормальном распределении логарифма усталостной долговечности. В его основе лежит анализ вероятности двух событий.

1. Событие А, при котором в данном опыте в блоке нагружения содержатся ступени с напряжением, превышающим предел выносливости, т.е. долговечность конечна.

2. Событие В, при котором долговечность не превышает заданную L_{pi} .

Теоретическая оценка вероятности разрушения P за заданную наработку L_{pi} определяется как произведение вероятностей событий А и В:

$$P = P(A)P(B).$$

Вероятность события А определяем как

$$P(A) = \frac{m^*}{M}.$$

Вероятность события В определяем по формуле

$$P(B) = 0.5 + \Phi_0(z),$$

где $\Phi_0(z)$ – функция Лапласа

$$\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^z e^{-\frac{x^2}{2}} dx,$$

$$z = \frac{\lg L - \overline{\lg L}}{S_{\lg L}},$$

где $\overline{\lg L}$ и $S_{\lg L}$ вычисляются следующим образом:

$$\left(\frac{\overline{L}}{L_\sigma}\right)^{\frac{2}{m_\sigma}} + \left(\frac{\overline{L}}{L_\tau}\right)^{\frac{2}{m_\tau}} = 1 \Rightarrow \overline{\lg L},$$

где \overline{L}_σ и \overline{L}_τ – средние значения долговечности по каждой из компонент напряжений;

$$S_{\lg L}^2 = \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{\overline{L}_\tau}{\overline{L}_\sigma}\right)^m}\right] \cdot S_{\lg L_\sigma}^2 + \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{\overline{L}_\sigma}{\overline{L}_\tau}\right)^m}\right] \cdot S_{\lg L_\tau}^2,$$

где $S_{\lg L_\sigma}$ и $S_{\lg L_\tau}$ вычисляются как для случая построения ФВБР по частным ФВБР.

Построение ФВБР по частным ФВБР осуществляется следующим образом. Получив две вероятности безотказной работы: P_σ и P_τ , общую вероятность безотказной работы получаем по формуле

$$P = P_\sigma P_\tau.$$

Для использования последней формулы необходимо, чтобы ВБР были построены с одинаковым шагом по наработке.

При этом:

$$\overline{\lg L} = \frac{1}{m^*} \sum_{j=1}^{m^*} Lg L_j,$$

$$S_{\lg L} = \sqrt{\frac{1}{m^* - 1} \sum_{j=1}^{m^*} (Lg L_j - \overline{\lg L})^2}.$$

Для того, чтобы сравнить влияние корреляционной модели на результаты численного моделирования в областях как низкой, так и высокой надежности, при прочих равных параметрах варьировались блоки нагружения. При этом блок касательных напряжений оставался постоянным, а блок нормальных напряжений домножался на требуемый коэффициент (от 0,55 до 1,45). При коэффициенте 1,0 блок нормальных совпадал с блоком касательных напряжений.

Задача решалась для следующих исходных данных:

- Число степеней блоков нагружения $k_\sigma = 7, k_\tau = 7$.
- Медианное значение числа циклов $v_{\sigma\sigma} = 1 \cdot 10^6, v_{\sigma\tau} = 575 \cdot 10^3$.
- Коэффициенты вариации числа циклов $V_{\lg v_{\sigma\sigma}} = 0, V_{\lg v_{\sigma\tau}} = 0$.
- Длительности блоков l_σ и l_τ принимается равной одному году.
- Блок нагружения:

σ_{ai}	$t_{\sigma ai}$
55.0	0.01739
48.2	0.02609
41.2	0.60870
33.4	0.13043
27.5	0.16522
20.6	0.34783
13.8	0.25217

- Коэффициенты вариации амплитуд напряжений $V_{\sigma_{ai}} = 0.1, V_{\tau_{ai}} = 0.1$.
- Медианные значения пределов выносливости (МПа) $\overline{\sigma_{-1\sigma}} = 44, \overline{\tau_{-1\sigma}} = 44$.
- Коэффициенты вариации пределов выносливости $V_{\sigma_{-1\sigma}} = 0.1, V_{\tau_{-1\sigma}} = 0.1$.
- Абсциссы точки перелома медианной кривой усталости $N_{G\sigma} = 1 \cdot 10^6, N_{G\tau} = 1 \cdot 10^6$.
- Коэффициенты вариации логарифма абсциссы точки перелома медианной кривой усталости $V_{\lg N_{G\sigma}} = 0.04, V_{\lg N_{G\tau}} = 0.04$.
- Показатели наклона медианной кривой усталости $m_\sigma = 10, m_\tau = 10$.
- Расчетная наработка $L_p = 1$.
- Шаг изменения наработки $\Delta L_p = 0.1$.

На рис. 2 приведена сетка из кривых вероятности безотказной работы при отсутствии корреляции, построенных для различной надежности. Видно, что в окрестности 0 и 1 наблюдается сгущение сетки.

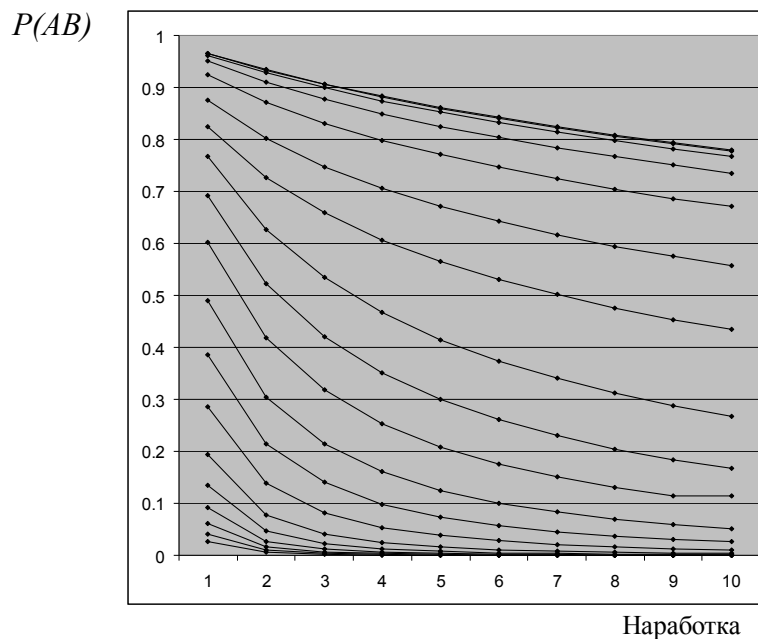


Рис. 2. Сетка ФВБР при разной надежности (нет корреляции)

На рис. 3 приведена такая же сетка для случая корреляции пределов выносливости.

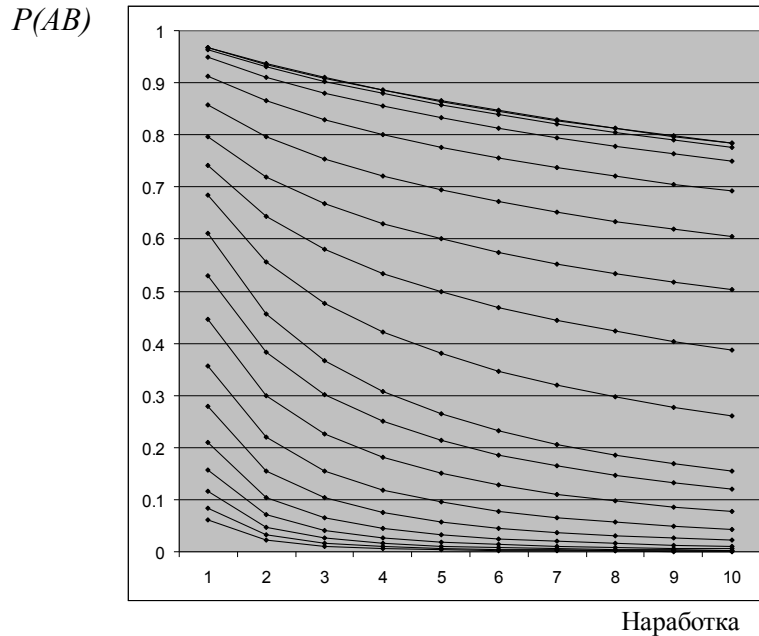


Рис. 3. Сетка ВБР при разной надежности (корреляция ПВ)

На основе анализа влияния корреляционной модели на результаты расчета усталостной долговечности можно сделать следующие выводы.

1. Моделирование случайных величин, определяющих сопротивление усталости деталей машин и элементов конструкций, подвергающихся действию нормальных и касательных напряжений, с учетом корреляции между ними ведет к повышению вероятности безотказной работы. Наиболее сильно (15... 25 %) это проявляется в области низкой надежности, т.е. при наличии большого числа ступеней соответствующих блоков нагружения, существенно превосходящих по своей амплитуде соответствующие пределы выносливости.

2. В целом, в областях низкой надежности по значениям вероятности безотказной работы корреляционные модели расположены так: модель без учета корреляции параметров; модель с учетом корреляции только пределов выносливости; модель с учетом корреляции как пределов выносливости, так и коэффициентов подобия блоков.

3. В области высокой надежности учет корреляционных связей не дает заметного изменения вероятности безотказной работы. Разница составляет (0,5 ... 2,0 %). При этом для малых временных интервалах (приблизительно 5...20% от максимальной расчетной наработки) вероятность безотказной работы, вычисленная без учета корреляционных связей, несколько превосходит вероятности, вычисленные с учетом корреляционных связей).

4. В целом, в областях высокой надежности по значениям вероятности безотказной работы корреляционные модели расположены так: модель с учетом корреляции как пределов выносливости, так и коэффициентов подобия блоков; модель без учета корреляции параметров; модель с учетом корреляции только пределов выносливости.

5. В областях низкой надежности при учете корреляции пределов выносливости и коэффициентов подобия блоков по компонентам напряжений вероятность безотказной работы несколько выше (0,1... 2,0 %), чем при учете корреляции только пределов выносливости.

6. Наблюдается сгущение сетки функций вероятности безотказной работы в областях 0 и 1. Ширина зон повышенной густоты примерно 0,1... 0,2.

Наиболее точной представляется модель, учитывающая корреляцию пределов выносливости детали. Однако, следует признать, что точные зависимости пока не установлены в силу сложности и дороговизны соответствующих исследований. Взаимосвязь блоков нагружения явно наблюдается только для валов и валоподобных (как по геометрическим, так и по силовым соображениям) деталей и элементов конструкций.

Список литературы

1. Лагерев, И.А. Анализ динамической нагруженности мостового крана общего назначения / И.А. Лагерев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2015. – № 1. – С. 49-54. – Режим доступа: <http://ntv-brgu.ru/index.php/ntv-bgu-2015-01-09>.
2. Лагерев, И.А. Влияние подкрановой конструкции на динамическую нагруженность мостового крана / И.А. Лагерев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2011. – № 5-3. – С. 3-10.
3. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / Руководство и справочное пособие под ред. С.В. Серенсена, 3-е изд. / С.В. Серенсен, В.П. Кобаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение., 1975. – 488 с.
4. Шлющенко, А.П. Нагруженность и расчеты деталей машин и элементов конструкций на прочность и долговечность / А.П. Шлющенко. – Брянск: БИТМ, 1991. – 156 с.
5. Лагерев, А.В. Нагруженность подъемно-транспортной техники / А.В. Лагерев. – Брянск: БГТУ, 2010. – 180 с.
6. Лагерев, А.В. Оптимальное проектирование валов барабанов грузоподъемных кранов мостового типа на основе моделирования усталостного отказа / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2008. – №2. – С. 57-65.
7. Лагерев, А.В. Оптимальное проектирование вала барабана грузоподъемных кранов общего назначения / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – №4. – С. 14-21.
8. Лагерев, А.В. Оптимизация конструкции крана-манипулятора машины для сварки магистральных трубопроводов при модернизации / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Подъемно-транспортное дело. – 2013. – № 1. – С. 4-7.

Сведения об авторе

Крутицкий Михаил Наумович – кандидат технических наук, технический директор Научно-производственного предприятия «Подъемстройналадка» (г. Санкт-Петербург), mn_krut010@yandex.ru.

THE BRIDGE CRANE MECHANISM SHAFT RELIABILITY CALCULATING IN CASE OF THE FATIGUE FRACTURE PARAMETERS CORRELATION

M.N. Krutitskiy

Scientific production enterprise «Podemstroynaladka»

The method of statistical tests examines the impact of the correlation of the parameters of fatigue-such as the durability of the shaft mechanism of an overhead traveling crane for General use is under consideration in this article. It is believed that the normal and shear stresses together affect the overall durability of the shaft. There may be a correlation between endurance limits and coefficients of block similarity of loading. To calculate resource used corrected linear theory of fatigue damage accumulation. Parameters on the reliability are computed after building the function, the reliability function directly or through private functions the reliability function for each type of stress.

Keywords: *shaft, mechanism, hoisting machine, fatigue, durability, correlation of parameters, computer simulation, method of statistical tests.*

References

1. Lagerev I.A. Overhead crane dynamics simulation, *Nauchno-tekhnikheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No.1, pp. 49-54. – Available: <http://ntv-brgu.ru/index.php/ntv-bgu-2015-01-09>.

2. Lagerev I.A. Dynamic forces in a bridge crane metal construction under the influence of crane track construction, *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2011, No. 5-3, pp. 3-10.

3. Serensen S.V., Kogaev V.P., Shneyderovich R.M. *Nesuchshaya sposobnost i raschety mashin na prochnost* [Bearing capacity and calculations of machine parts for strength]. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 488 p.

4. Shlyushenkov A.P. *Nagruzhennost i raschety detaley mashin i elementov konstruktsiy na prochnost i dolgovechnost* [Loading and calculations of machine parts and structural elements for strength and durability]. Bryansk, BITM, 1991. 156 p.

5. Lagerev A.V. *Nagruzhennost podemno-transportnoy tekhniki* [Load lifting and transport equipment]. Bryansk, BGTU, 2010. 180 p.

6. Lagerev A.V., Lagerev I.A. An optimum design of the common crane roll shaft based on simulation of fatigue fault, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, No.2, pp. 57-65.

7. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimum design of the common crane roll shaft, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, No.4, pp. 14-21.

8. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Trunk pipeline welding machine crane-manipulator optimization during its modernization, *Podyemno-transportnoe delo*, 2013, No.1, pp. 4-7.

Author' information

Mikhail N. Krutitskiy - Candidate of technical Sciences, technical Director of Scientific production enterprise «Podemstroynaladka» (St. Petersburg), mn_krut010@yandex.ru.