

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 624.21.014

*КАРТОПОЛЬЦЕВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ, докт. техн. наук,
профессор,*

kaf_most@mail.ru

*КАРТОПОЛЬЦЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. техн. наук,
доцент,*

kaf_most@mail.ru

КОЛМАКОВ БОРИС ДМИТРИЕВИЧ, аспирант,

boriskolmakov@mail.ru

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОСТОВ ПО КРИТЕРИЮ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ*

В статье рассмотрены вопросы по оценке остаточного ресурса металлических мостов, базирующихся на анализе напряженно-деформированного состояния и критериев усталостной долговечности. Предложена концепция использования результатов испытания в области малоциклового усталости в оценке остаточного ресурса эксплуатируемых мостов. Разработана методика построения корреляционной зависимости между усталостной долговечностью в малоциклового и многоциклового областях усталости. Дается обоснование определения безопасного остаточного ресурса.

Ключевые слова: металлический мост; пролетное строение; напряженно-деформированное состояние; циклическое нагружение; долговечность; остаточный ресурс; трещинообразование; малоциклового и многоциклового нагружение.

VLADIMIR M. KARTOPOLTSEV, DSc, Professor,

kaf_most@mail.ru

ANDREI V. KARTOPOLTSEV, PhD, A/Professor,

* Материал статьи подготовлен при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-01-98006.

kaf_most@mail.ru

BORIS D. KOLMAKOV, Research Assistant,

boriskolmakov@mail.ru

Tomsk State University of Architecture and Building,

2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

CONCEPTUAL FRAMEWORK OF FATIGUE LIFE CRITERION ASSESSMENT OF STEEL BRIDGES RESIDUAL LIFE

The paper presents the stress-strain state analysis of the problems of assessment of residual life of steel bridges and fatigue life criteria. The concept is suggested for the use of test results obtained in the field of the low-cycle fatigue necessary for the assessment of the bridge residual life. The methodology is suggested for the construction of the correlation dependence between the fatigue life in the small- and multi-cycle fatigue areas. The rational for determination of the safety residual life is suggested in this paper.

Keywords: metal bridge; span; stress-strain state; cyclic loading; durability; residual life; cracking; low- and multicycle loading.

Ретроспективный анализ многочисленных обследований и испытаний автодорожных мостов в различных регионах Российской Федерации показал, что основой долговечности безопасной эксплуатации металлических мостов наряду с хрупким играют и усталостные разрушения. Определяющим фактором проявления разрушений является характер воздействия временных нагрузок [1].

Необходимость в разработке методов оценки остаточного ресурса и сопротивления хрупкому разрушению мостовых металлоконструкций непосредственно связана с проблемой реконструкции автодорожных мостов на предмет увеличения габарита проезда, а следовательно, пропускной способности. Это неизбежно приводит к увеличению размаха напряжений и повышению качества циклов нагружения в несущих элементах мостов, в конечном итоге к снижению остаточного ресурса пролетных строений. Поэтому при постановке вопроса о возможности использования металлоконструкций пролетного строения при реконструкции моста оказывается необходимой оценка как усталостного, так и остаточного ресурса его безопасной эксплуатации [2].

Подобная оценка оказывается совершенно необходимой также при решении вопроса о пропуске сверхнормативных нагрузок (приводящих в ряде случаев к значительным повреждениям или даже к разрушениям пролетного строения), а также при возникновении трещин в эксплуатируемых пролетных строениях.

Показатель остаточного ресурса элементов пролетных строений металлических мостов функционально связан коэффициентом интенсивности напряжений при циклическом нагружении $K_{ц}$, равным

$$K_{ц} = \frac{M_i}{J} \frac{\sqrt{(2y_1 + y_1 \cdot y_2) \ell \cdot \pi}}{6}, \quad (1)$$

где M_i – нормативный изгибающий момент в сечении элемента; J – момент инерции сечения несущей балки; y_1, y_2 – расстояние соответственно от нижнего, верхнего конца трещины до нейтральной оси сечения элемента; ℓ – длина трещины.

При условиях $y_2 \rightarrow \text{const}$, $\frac{d\ell}{dN} = f(K_y)$ количество циклов нагружения, при котором предельное нагружение характеризуется параметрами остаточного ресурса конструкции в зависимости от режима и параметров развития трещины и определяется из дифференциального уравнения вида

$$N_t = \int \frac{d\ell}{dy}. \quad (2)$$

Функция разрушения несущего элемента балки при развитии трещин запишется в виде [3]

$$\Phi(g) = D_p - D_t, \quad (3)$$

где D_p – повреждения элемента, способствующие разрушению балки; D_t – накопленные за время эксплуатации повреждения.

При $D_t = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^{V_t} \sigma_i^3$ формула (3) приобретает вид

$$\Phi(g) = D_t - \frac{V_t \cdot t \left(\frac{\sigma_i}{W} \right) P_0}{N}, \quad (4)$$

где V_t – интенсивность движения автотранспорта на мосту; t – время эксплуатации моста; σ_i – напряжение, при котором раскрытие трещины равно критическому; W – момент сопротивления сечения; P_0 – величина временной нагрузки.

Таким образом, допускаемое число циклов заданной нагрузки указывает на остаточный ресурс конструкции моста и определяется из уравнения Майнера – Пальмгрена

$$N_t = C(\sigma_i)^{-m}, \quad (5)$$

где C – ордината точки пересечения кривой $\sigma - N$ на логарифмической кривой; m – параметр, характеризующий угол наклона кривой усталости металла в логарифмических координатах (таблица).

Таблица 1

Таблица наклона кривой усталости

| Марки стали | 09Г2С | 09Г2 | 15ХСНД | 10ХСНД | 16Г2АФ |
|-------------|-------|------|--------|--------|--------|
| m | 0,22 | 0,22 | 0,14 | 0,14 | 0,2 |

Тогда предельное напряжение, соответствующее уровню остаточного ресурса конструкции, равно

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{\gamma}{K_{\text{ц}}} R \left(\frac{N_t}{N} \right)^m, \quad (6)$$

где γ – коэффициент понижения расчетного сопротивления стали согласно СНиП 2.05.03–84*; R – расчетное сопротивление стали; $N = 2,1 \cdot 10^6$ циклов. Оценку остаточного ресурса эксплуатируемых мостовых металлоконструкций следует производить в такой последовательности:

1. Выявить спектр нагрузок за период эксплуатации рассматриваемого моста.

2. Выявить характерные командные концентраторы мостовых балок, определяющие циклическую остаточную долговечность.

3. Провести испытания образцов балок с характерными для мостовых балок конструктивными концентраторами (с близкими к натурным жесткостными характеристиками), в результате которых экспериментально оценить коэффициенты интенсивности напряжений (деформаций) в зоне концентраторов, циклическую долговечность.

4. На основании соотношений Майнера – Пальмгрена привести нестационарный спектр нагрузок напряжений $\sum \Delta\sigma_i$ к размаху $\Delta\sigma_{\text{пр}}$ приведенных (эквивалентных) интенсивностей напряжений с получением усталостной долговечности N_t элемента моста с типовым концентратором из соотношения $\Delta\sigma_R^m \cdot N = \Delta\sigma_{\text{пр}}^m \cdot N_t$, где $\Delta\sigma_R^m$ – допустимый размах напряжений на базе $2 \cdot 10^6$ циклов с наклоном кривой усталости характеризуемой параметром m (таблица);

5. Определить усталостную долговечность элемента эксплуатируемой мостовой конструкции с типовым концентратором как $N_A = N_{A1} + N_{A2}$, где N_{A1} – количество наработанных с начала эксплуатации моста циклов нагружения за время T_{A1} ; N_{A2} – расчетная остаточная наработка в циклах нагружения за время T_{A2} ;

6. Установить на основе данных по интенсивности движения по рассматриваемому мосту время остаточной его наработки с установленным командным концентратором, определяющим циклическую долговечность мостовой балки, вплоть до появления усталостной трещины.

Испытания образцов сварных балок с различными конструктивными концентраторами в области малоциклового усталости позволяют на основе излагаемой ниже концепции перейти к оценке усталостной долговечности групп сварных концентраторов в области многоциклового усталости [4].

Сущность концепции заключается в равенстве составляющих площадей петель гистерезиса деформаций (в наиболее напряженной точке концентраторов) при малоциклового и многоциклового нагружении, что свидетельствует о примерно равном накоплении микрповреждений. При этом уровень нагружения в обоих случаях должен соответствовать постоянному размаху (дефор-

маций) и верхнему уровню нагрузки, но различному для малоцикловой и многоцикловой областей. При этом при проведении испытаний в малоцикловой области на базе до 10^5 циклов при нагрузках $P_{\max}^{\text{МЛЦ}} = \text{const}$ и $P_{\min}^{\text{МЛЦ}} = \text{const}$ через каждые 10–20 тыс. циклов проводят цикл статических испытаний с регистрацией петли гистерезиса в наиболее напряженной точке в зоне исследуемого концентратора и вычисляем ее площади Ω_i , где $i = 10^4$ или $i = 2 \cdot 10^4$ циклов.

Для построения корреляционной зависимости между усталостной долговечностью в малоцикловой и многоцикловой областях для командных видов концентраторов проводятся испытания также и в области многоцикловой усталости при нагрузках $P_{\max}^{\text{МНЦ}} = \text{const}$ и $P_{\min}^{\text{МНЦ}} = \text{const}$, где соответственно $P_{\max}^{\text{МНЦ}} < P_{\max}^{\text{МЛЦ}}$ и $P_{\min}^{\text{МНЦ}} < P_{\min}^{\text{МЛЦ}}$.

При этом через каждые 200–300 тыс. циклов проводят цикл статических испытаний с регистрацией петли гистерезиса (в той же наиболее напряженной точке в зоне концентратора, что и для образца, исследованного в зоне малой цикловой усталости) и вычисление ее площади Ω_j , где $j = 2 \cdot 10^5$ циклов.

После проведения усталостных испытаний в малоцикловой и многоцикловой областях данного командного концентратора с последовательной ступенчатой фиксацией площадей петель гистерезиса Ω_i и Ω_j может быть построена зависимость

зависимость $N_j^{\text{МНЦ}} / M_i^{\text{МЛЦ}}$ от $\Omega = \Omega_i = \Omega_j$.

Таким образом, проведение испытаний в области малоцикловой прочности элемента с концентратором, который может быть идентифицирован с тем или иным командным концентратором, можно обеспечить переход от малоцикловой ($N^{\text{МЛЦ}}$) к многоцикловой ($N^{\text{МНЦ}}$) долговечности, верхний предел долговечности которой ограничивается величиной измеренной площади петли гистерезиса в наиболее напряженной точке несущего элемента конструкции пролетного строения.

Правомерность описанного подхода обосновывается тем, что, во-первых, деформации различного вида в зоне концентрации напряжений развиваются в области как малоцикловой, так и многоцикловой прочности при разных уровнях нагружения, различаясь только размерами зоны деформирования, и, во-вторых, в обоих случаях усталостная трещина возникает в одном и том же месте вне зависимости от величины нагрузки в рассматриваемом диапазоне.

Разработанные методы оценки усталостной долговечности до появления усталостной трещины (или трещин) в зонах конструктивных концентраторов, а также учет дополнительного ресурса на стадии циклического подрачивания трещины до критической длины в зависимости от климатической зоны эксплуатации мостового объекта позволяют получать достаточно достоверные данные по безопасному остаточному ресурсу пролетных строений мостов без проведения натурных испытаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Быстров, В.А.* Режимы нагружения сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов с целью оценки надежности их элементов / В.А. Быстров // Вопросы надежности мостовых конструкций: межвуз. темат. сб. тр. – Л., 1984. – С. 16–23.
2. *Оценка надежности* остаточного ресурса несущих конструкций автодорожных мостов. Оценка усталостной прочности конструкций мостов с концентратами / В.М. Картопольцев : отчет НИР (заключительный). – Томск, 1996. – 18 с. – № ГР 01950001253.
3. *Новожилова, Н.И.* Прогнозирование надежности конструкций стальных и сталежелезобетонных мостов : учебное пособие с элементами УИРС / Н.И. Новожилова, В.А. Быстров, В.Л. Шайкевич. – Л., 1989. – С. 96.
4. *Бродский, В.* Возникновение усталостных трещин сварных сплошностенчатых пролетных строений мостов / В. Бродский // Исследование долговечности и экономичности искусственных сооружений. – Л. : ЛИИЖТ, 1992. – С. 16–21.

REFERENCES

1. *Bystrov V.A.* Rezhimy nagruzheniya stalezhelezobetonnykh proletrykh stroenii avtodorozhnykh mostov s tsel'yu otsenki nadezhnosti ikh elementov [Load conditions for steel bridge spans to evaluate their safety]. Voprosy nadezhnosti mostovykh konstruksii: mezhvuz. temat. sb. tr. Leningrad, 1984. Pp. 16–23. (rus)
2. *Otsenka nadezhnosti* ostatochnogo resursa nesushchikh konstruksii avtodorozhnykh mostov [Reliability estimation of the residual life of bridge bearing structures]. Otsenka ustalostnoi prochnosti konstruksii mostov s kontsentratami: otchet o NIR. Tomsk : TGASA Publ., 1996. 18 p. (rus).
3. *Novozhilova N.I. Bystrov V.A., Shaikevich V.L.* Prognozirovaniye nadezhnosti konstruksii stal'nykh i stalezhelezobetonnykh mostov : uchebnoye posobie s elementami UIRS [Structural safety forecast for steel bridges]. Leningrad, 1989. P. 96. (rus)
4. *Brodskii V.* Vozniknoveniye ustalostnykh treshchin svarnykh sploshnostenchatykh proletrykh stroenii mostov [Fatigue cracks in welded bridge spans]. Issledovaniye dolgovechnosti i ekonomichnosti iskusstvennykh sooruzhenii. Leningrad : LIIZhT Publ., 1992. Pp. 16–21. (rus)