

УДК 624.21.012.45

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

*kaf\_most@mail.ru*

*БОРОВИКОВ АЛЕКСАНДР ГЕОРГИЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
diamos@mail.ru*

*КАРТОПОЛЬЦЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
kaf\_most@mail.ru*

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

### **ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОСТОВ ПО КРИТЕРИЮ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ\***

В статье рассмотрены вопросы по оценке остаточного ресурса металлических мостов, базирующихся на анализе характера нагрузок и напряженно-деформированного состояния в стадии трещинообразования, а также величины коэффициента интенсивности напряжения и коэффициента трещиностойкости при статическом, динамическом и циклическом нагружениях и коррозионном растрескивании. Предложены зависимости параметров напряженно-деформированного состояния элементов в стадии зарождения и развития трещины в зависимости от их условий. Впервые установлены закономерности процесса развития трещин в зависимости от формы конструкции элемента и его предельного напряженно-деформированного состояния.

**Ключевые слова:** металлоконструкция; пролетное строение; напряженно-деформированное состояние; трещиностойкость.

*VLADIMIR M. KARTOPOLTSEV, DSc, Professor,*

*kaf\_most@mail.ru*

*ALEKSANDR G. BOROVIKOV, PhD, A/Professor,*

*diamos@mail.ru*

*ANDREI V. KARTOPOLTSEV, PhD, A/Professor,*

*kaf\_most@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

### **RESIDUAL LIFE OF METAL BRIDGE STRUCTURES ESTIMATED BY CRACK FORMATION**

The paper deals with the residual life of metal bridges estimated on the analysis of stresses and stress-strain state during crack propagation as well as the stress intensity and crack resistance factors under static, dynamic and cyclic loading and stress-corrosion fracture. The parameter dependencies are suggested for the stress-strain state of the bridge members at stages of crack birth and propagation. For the first time, the regularities of crack propagation are ascertained depending on the shape of the structural element and its limit state.

---

\* Работа подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ №13-01-98006.

**Keywords:** metal structure; bridge span; stress-strain state, crack resistance.

Методика расчета остаточного ресурса металлических мостов базируется на следующих направлениях: анализ характера нагрузок и напряженно-деформированного состояния в области трещины, определение коэффициента интенсивности напряжения (КИН) и коэффициента трещиностойкости (КТС), определение критериев трещиностойкости элементов конструкции при статическом ( $K_c$ ), динамическом ( $K_d$ ), циклическом ( $K_{fc}$ ,  $K_{fd}$ ) нагружении и при коррозионном растрескивании ( $K_{gce}$ ).

Оценка остаточного ресурса конструкций мостов основана на теории малых упругопластических деформаций, когда зона пластичности мала по сравнению с размерами трещины и разрушение происходит при напряжениях, существенно меньших предела текучести. В процессе эксплуатации мостов представляет интерес оценка результатов живучести элементов конструкций, полученных в рамках критерия Ирвина, с позиции нелинейной механики разрушения, когда зона пластичности в процессе деформирования и напряжения в сечении приближаются к пределу текучести. В таком случае мерой пластических деформаций в вершине трещины является критическое раскрытие трещины.

Деформационный критерий (критерий раскрытия трещин) (КРТ) является функцией приложения усилий и связан с геометрией элемента и трещины. Математической основой КРТ является модель Леонова – Панасюка, которая справедлива для идеально упругопластических тел.

Несмотря на явные преимущества рассматриваемой модели по сравнению с подходом Ирвина, она не получила широкого применения в экспериментальной и прикладной практике. Это связано с тем, что аналитические решения задач теории трещин в точной математической постановке достаточно сложны. В связи с этим практический интерес представляет следующая направленность оценки остаточного ресурса:

– в первом приближении для определения КИН используется обобщение Гриффитса в виде

$$\text{КИН} = P_i \sqrt{\pi l}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – интенсивность предельных усилий в вершине трещины, равная

$$P_i = \frac{6M_{np}}{La^2(1 + \varepsilon^2)}, \quad (2)$$

где  $M_{np}$  – предельно изгибающий момент в сечении с трещиной;  $L$  – длина трещины;  $\varepsilon$  – интенсивность деформаций;  $a$  – длина зоны упругопластического деформирования в зоне трещинообразования.

Тогда остаточный ресурс конструкций моста будет соответствовать такому значению КИН, который равен пороговому значению коэффициента интенсивности напряжения  $K_m$ , определенному с достаточной точностью в работе [1]. Когда мы используем критерий раскрытия трещины КРТ, остаточный

ресурс конструкции моста соответствует значению  $N$  циклов нагружения, при котором КИН достигает своего порогового  $K_m$ .

Интегрируя  $N = \int_{l_0}^{lk} \phi(\varepsilon) dl$  при  $\varepsilon = 1 - \sqrt{\frac{\text{КИН}}{K_m}}$ , получим остаточный ресурс

в абсолютных числах. Так, для металлического моста, выполненного из стали 10 ХСНД с характеристиками  $K_m = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{м}$ ,  $\text{КИН} = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{м}$ ,  $M_{\text{пр}} = 0,95 \text{ тм}$ ,  $\sigma_{\text{max}} = 475 \text{ МПа}$ , остаточный ресурс составил 0,27, что соответствует 14 годам безопасной эксплуатации [2].

Расчет остаточной прочности металлоконструкции мостов с коррозионным повреждением следует проводить в зависимости от локализации повреждения двумя различными подходами: при общей коррозии; при локальной коррозии.

Общая коррозия металлоконструкции мостов предполагает поверхностное, относительно равномерное разрушение металла, что приводит к равномерной потере сечений в элементах конструкций. Такая коррозия не создает локальной концепции напряжений в зависимости от равномерной потери сечения, поэтому происходит равномерное повышение напряжения в элементах конструкции. К такому «идеализированному» представлению коррозионного разрушения можно отнести широко распространенную химическую коррозию, основанную на взаимодействии атмосферы и поверхности металла. Средняя скорость распределения атмосферной коррозии составляет 0,03–0,05 мм/г.

Сложной является методика учета остаточной прочности и ресурса металлоконструкции мостов в случае локализованного воздействия коррозии, в результате которого образуются глубокие или сквозные пятинги, раковины, коррозионные язвы. Они могут располагаться далеко друг от друга или покрывать всю поверхность. Такие повреждения следует моделировать типовыми расчетами с силовыми схемами конечных размеров, с типовым расположением локальных коррозионных областей.

В процессе коррозионного растрескивания определение КИН для расчета остаточного ресурса элементов металлоконструкций усложняется в связи с необходимостью учета конечности размеров элементов с трещинами по длине и ширине. Учитывая, что нагрузка по сечению элемента распределена равномерно, в приближенных расчетах приведенные силовые схемы можно свести к полосе с краевой трещиной, относительная длина которой

$$\lambda_1 = 1 - F_{\text{нт}}/F_{\text{бр}} = F_{\text{тр}}/F_{\text{бр}}, \quad (3)$$

где  $F_{\text{нт}}$  – сечение перешейка трещины;  $F_{\text{бр}}$  – сечение бездефектного элемента;  $F_{\text{тр}}$  – площадь сечения по длине трещины.

В этом случае относительная длина трещины будет определяться не общепринятой зависимостью  $L/2$ , применимой для элементов с сечениями равномерной толщины, а как отношение площади сечения, занятой трещиной, и общей площади сечения элемента. Такой подход позволяет учитывать геометрию прокатного элемента конструкции с его толщиной [3].

Таким образом, на первом этапе расчета определяется период  $N_3$  зарождения макротрещины возле вершины исходного концентратора, на котором исследуется кинетика развития этой макротрещины до критического значения. Решение этой задачи осуществляется путем численного интегрирования дифференциального уравнения

$$\Phi(\lambda) \frac{dR}{dN} \left[ R^{-2} \left( \frac{dR}{d\varphi} \right)^2 + 1 \right]^{-1/2} = 1. \quad (4)$$

На неизвестную функцию  $R(N, \varphi)$ , описывающую подвижный контур трещины, при начальном условии накладываются ограничения вида

$$R/N = C = R_0(\varphi) + l_p(\varphi), \quad (5)$$

где  $R_0(\varphi)$  – контур исходного концентратора;  $l_p$  – величина пластической зоны в вершине трещины.

Параметр

$$\lambda = 1 - \sqrt{\frac{\delta}{\delta_{fc}} + \varepsilon}, \quad (6)$$

где  $\delta_{fc}$  – предельная величина раскрытия трещины;  $\delta$  – величина раскрытия трещины.

Решение уравнения (5) задает положение контура трещины в различные моменты времени. Остаточный ресурс конструкции соответствует такому значению  $N^*$  циклов нагружения, при котором раскрытие в вершине трещины достигает практического значения  $\delta = \delta_{fc}$ .

Дефекты, для которых значение  $N^*$  не превышает расчетный ресурс работы конструкции, не приведут к ее преждевременному разрушению и, следовательно, являются безопасными.

В рамках механики хрупкого разрушения расчет можно разбить на следующие этапы:

- определение форм, размера и местоположения наиболее опасного трещиноподобного дефекта;
- выбор критерия локального разрушения в зависимости от типа материала, конструкции и характера нагружения;
- установление закономерности усталостного (докритического) распределения трещин в заданном материале;
- определение напряженно-деформированного состояния элемента конструкции, ослабленного дефектом заданной конструкции;
- экспериментальное установление характеристик трещиностойкости заданного материала при внезапном (спонтанном и усталостном) распространении трещины;
- вычисление критического размера трещины (или критической нагрузки), а также долговечности работы конструкции при нагрузках ниже критической.

При циклическом нагружении в условиях эксплуатации возможно медленное развитие дефектов, размеры которых значительно меньше критиче-

ских. В этом случае расчет по предельному состоянию является недостаточным, и работоспособность конструкции может быть более полно охарактеризована ее остаточным ресурсом – времени и эксплуатации, по истечении которого исходный дефект достигнет критических размеров, и элемент полностью разрушится. Необходимые исходные данные для расчета: геометрические параметры исходных дефектов, их тип, конфигурация, размеры и т. д. Тогда для граничных условий полигональное напряжение в вершине трещины описывается выражением

$$\sigma_n^n = (\sigma_n^0)^n + (\sigma_n^i)^n - (\sigma_n^1)^n = 0, \quad (7)$$

где  $\sigma_n^i$  ( $i = 0 \dots 1$ ) – номинальное напряжение, вычисленное для глубокой и мелкой трещины;  $n$  – показатель степени;  $\sigma_n^n$  – номинальное напряжение в вершине трещины.

Как показывает анализ выражения (7), при стремлении (отношение длины трещины к характерному линейному размеру тела) к своему предельному значению получим  $\sigma_n^n = \sigma_n^1$ . Согласно экспериментальным исследованиям показатель степени  $n$  дает наилучшее приближение результатов, полученных по формуле (7) при  $n = 0,5$ .

Таким образом, решение задачи о нахождении КИН для тела с производной длиной трещины сводится к нахождению величин  $\sigma_n^i$  ( $i = 0 \dots 1$ ) для граничных значений параметра  $\varepsilon$ .

Применение современных методов контроля качества металлоконструкций, обеспечивающих существенное повышение разрешающей способности при выявлении дефектов, создает условия, при которых внедрение методов оценки допустимых и критических параметров трещин является одной из первоочередных задач практики эксплуатации мостов [4].

Рассматриваемый метод расчета остаточного ресурса стержневых и пластинчатых металлических элементов с центральными и краевыми трещинами, которые широко распространены в ферменных металлоконструкциях, учитывает конечность размеров элементов по длине и ширине; толщины элементов от 6 до 10 мм и соответствия их условиям автотельности (трещины сквозные, большой длины).

На рисунке приведены типовые элементы металлоконструкций конечных размеров с трещинами.

Методика расчета включает следующие основные этапы: анализ характера нагрузок; исследование напряженно-деформированного состояния в области трещины; выбор типовой силовой схемы, определение КИН; построение диаграммы усталостного разрушения; расчет диаграмм живучести и определение остаточного ресурса.

Задача определения КИН в широком диапазоне длин трещины с учетом всех конечных размеров достаточно сложная, если решать ее точными аналитическими подходами. В последнее время получили развитие приближенные численные и интерполяционные методы решения, которые могут быть использованы для задач инженерной практики.

Элемент конструкции (рисунок) в виде пластины, ослабленной трещиной, представляет собой 2-параметрическое тело с параметрами  $\alpha$  и  $\beta$ , поэтому  $K_I$  (КИН) можно представить в виде

$$K_I = P\sqrt{\pi \cdot l}\Phi(\lambda_1, \lambda_2), \quad (8)$$

где  $P$  – параметр нагрузки;  $l$  – длина трещины.

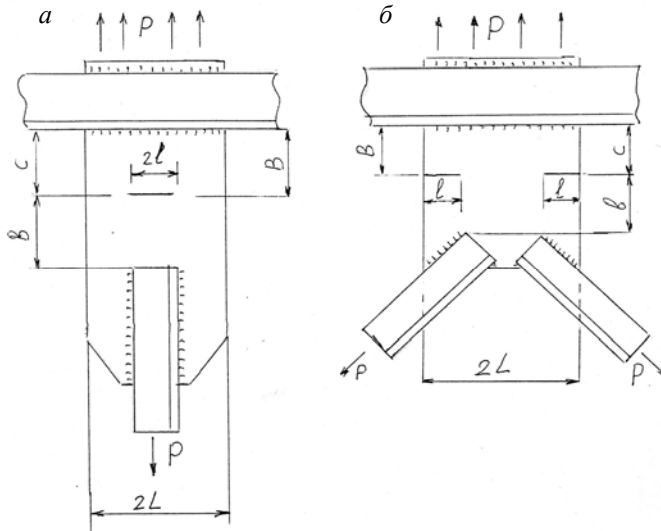


Рис. 1. Элементы металлических конструкций с трещинами:  
а – центральными; б – краевыми, симметричными

Используя метод граничной интерполяции, КИН можно представить в виде

$$K_I = \sigma_n \alpha, \quad (9)$$

где  $\sigma_n$  – номинальное напряжение в нетто-сечении перешейка трещины;  $\alpha$  – геометрическая часть  $K_I$  для трещины.

Величины  $\sigma_n$  и  $\alpha$  для трещины произвольной длины определяют из интерполяционных соотношений

$$\sigma_n \sqrt{\sigma_n^{(0)}} + \sqrt{\sigma_n^{(1)}} - \sqrt{(\sigma_n)^{(2)}}, \quad (10)$$

где  $\sigma_n^{(0)}$ ,  $\sigma_n^{(1)}$  – номинальное напряжение в упругопластической части соответственно для малой и длинной трещины;

$$\alpha = \alpha_0 \alpha_1 / (\sigma_0^2 + \sigma_{0,1}^2)^{-1/2}, \quad (11)$$

где  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  – геометрические части  $K_I$  соответственно для малой и длинной трещины.

Задачу определения  $K_I$  с учетом многообразия типовых силовых схем можно свести к нахождению  $K_I$  с краевой трещиной, появившейся в результате проявления растягивающей нагрузки  $P$ , приложенной на расстоянии от трещины. Если нагрузка  $P$  приложена на бесконечность, то можно воспользоваться формулой для полосы с краевой трещиной [2]

$$K_I = P_\infty \sqrt{\pi \cdot l} (1/12 - 0,23\lambda + 10,6\lambda^2 - 21,7\lambda^3 - 30,4\lambda^4). \quad (12)$$

При определении  $K_I$  для коротких пластин за базовую задачу берем пластину с центральной трещиной, тогда КИН для пластины с краевой трещиной,  $b/L > 3$ , вычислим так:

$$K_I = \text{КИН}_\infty (\text{КИН}_{1p} / \text{КИН}_\infty), \quad (13)$$

где  $\text{КИН}_{1p}$  – значение КИН для ограниченной пластины с трещиной;  $\text{КИН}_\infty$  – значение КИН для полосы с трещиной.

Подставляя выражения для  $\text{КИН}_{1p}$  и  $\text{КИН}_\infty$ , получим окончательное значение  $K_I$  в виде

$$K_I = P \sqrt{\pi l} (1,12 - 0,23\lambda + 10,6\lambda^2 + 21,7\lambda^3 - 30,4\lambda^4) \times \\ \times \varphi(\lambda_1, \lambda_2) [(1 - \lambda_1)(1 + 1,4674\lambda_1)]^{1,2}, \quad (14)$$

где  $\lambda_2 = \lambda_1/\eta$  (здесь  $\eta = b/L$ );  $\varphi(\lambda_1, \lambda_1)$  для  $0 < \lambda \leq 0,5$ ,  $\lambda_1 \geq 0,5$ .

Как известно, элементы конструкций прокатного профиля с краевыми трещинами, работающие на изгиб, имеют широкое распространение в металлоконструкциях мостов. Такие элементы конструкций, рассчитываемые на режим живучести с учетом конечности размеров и сложности геометрических форм сечений, имеют отличительные особенности. Некоторые исследователи при определении  $K_I$  сложных элементов конструкций пролетных строений строят градуированную функцию по результатам испытаний натуральных образцов металлоконструкций с трещинами, доведенных до разрушения, что позволяет учитывать особенности геометрии элемента при определении напряженного состояния в вершине трещины [5]. Такой способ является дорогостоящим, трудоемким и неприменим для крупногабаритных конструкций.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бродский, В. Возникновение усталостных трещин сварных сплошностенчатых пролетных строений мостов / В. Бродский // Исследование долговечности и экономичности искусственных сооружений. – Л. : ЛИИЖТ, 1992. – С. 16–21.
2. Оценка надежности остаточного ресурса несущих конструкций автодорожных мостов. Оценка усталостной прочности конструкций мостов с концентратами: отчет о НИР (заключительный). – Томск : ТГАСА, 1996. – 18 с. № ГР 01950001253.
3. Бродский, В. Расчетно-экспериментальная оценка остаточной долговечности конструкции с усталостной трещиной / В. Бродский // Вопросы надежности мостовых конструкций. – Л. : ЛИСИ, 1984. – С. 23–33 с.
4. Toprac A.A. Fatigue strength of hybrid plate girders / Toprac A.A., Murugesam Natarajan // J. St. Div. proc. A.S.C.E. St. 4 ap. 1971. – 1214 p.

5. Ярема, С. Методология определения характеристик сопротивления развитию трещин (трещиностойкости материалов) при циклическом нагружении / С. Ярема // Физико-химическая механика материалов. – 1981. – № 4. – С. 100–110.

## REFERENCES

1. Brodskii V. Vozniknovenie ustalostnykh treshchin svarnykh sploshnostenchatykh proletrykh stroenii mostov [Fatigue cracks in welded bridge spans]. Issledovanie dolgovechnosti i ekonomichnosti iskusstvennykh sooruzhenii. Leningrad : LIIZhT Publ., 1992. Pp. 16–21. (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 kontsentratsiyami: otchet o NIR. Tomsk : TGASA Publ., 1996. 18 p. (rus)
3. Brodskii V. Raschetno-eksperimental'naya otsenka ostatochnoi dolgovechnosti konstruksii s ustalostnoi treshchiny [Design and experimental evaluation of residual life design with a fatigue crack]. Voprosy nadezhnosti mostovykh konstruksii. Leningrad : LISI Publ., 1984. Pp. 23–33. (rus)
4. Toprac A.A., Murugesam Natarajan. Fatigue strength of hybrid plate girders. *Proc. A.S.C.E. Journal of the Structural Division*, 1971. 1214 p.
5. Yarema S. Metodologiya otsenivaniya kharakteristik soprotivleniya razvitiyu treshchin (treshchinostoikosti materialov) pri tsiklicheskom nagruzhении. Moscow : FKhMM Publ., 1981. No. 4. Pp. 100–110. (rus)