

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

Materials mechanics: strength, durability, safety

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-47-54

УДК (UDC) 620.191.32:624.014

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ПОДКРАНОВЫХ БАЛКАХ

© Владимир Викторович Москвичев¹, Елена Анатольевна Чабан²

¹ Институт вычислительных технологий СО РАН, СКТБ «Наука», г. Красноярск, Россия; e-mail: krasn@ict.nsc.ru

² Красноярский институт железнодорожного транспорта, филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск, Россия; e-mail: chaban_tm@mail.ru

Статья поступила 12 июля 2017 г.

Представлены результаты анализа остаточного ресурса подкрановых балок с эксплуатационными дефектами, основой которого являются численные исследования напряжено-деформированного состояния, уравнения предельных состояний и кинетические зависимости развития усталостных трещин, сформулированные на базе критерииов механики деформирования и разрушения. Высокий уровень износа основных производственных фондов инженерных сооружений и металлоконструкций, а также эксплуатация объектов в запроектных сроках способствуют возникновению аварийных ситуаций, вызванных накоплением повреждений. Исследовали подкрановые балки, эксплуатируемые в условиях аварийных ситуаций, обусловленных наличием усталостных трещин разной длины в наиболее опасных зонах стенки балок при эксцентричном приложении крановой нагрузки. По результатам проведенного численного эксперимента получены линии влияния интенсивности напряжений в вершинах трещин, возникающих в верхней зоне стенки при различных величинах эксцентричности нагружения, обусловленного смещением рельса от вертикальной оси сечения балки. Установлена зависимость длины усталостной трещины и интенсивности напряжений в ее вершине от числа циклов нагружения балки. Для оценки несущей способности подкрановых балок, эксплуатируемых в условиях аварийных ситуаций, предложено использовать эффективные значения коэффициентов интенсивности напряжений, рассчитываемые для конкретных условий нагружения с учетом конструктивных особенностей балок, размеров возникших усталостных трещин и мест их расположения в подкрановой балке. По результатам проведенного анализа получены диаграммы, позволяющие прогнозировать остаточный ресурс подкрановой балки с трещиной. На основе традиционных методов расчета конструкций на циклическую трещиностойкость сформулирован и реализован алгоритм расчета индивидуального ресурса подкрановых балок, включающий обязательный анализ напряжено-деформированного состояния подкрановой балки с трещиной в верхней зоне стенки.

Ключевые слова: подкрановая балка; усталостная трещина; остаточный ресурс; коэффициент интенсивности напряжений; характеристики циклической трещиностойкости.

ANALYSIS OF THE FATIGUE CRACKS DEVELOPMENT IN CRANE GIRDERS AND ASSESSMENT OF THEIR RESIDUAL LIFE

© Vladimir V. Moskvichev¹, Elena A. Chaban²

¹ Institute of Computational Technologies SB RAS, Krasnoyarsk Branch Office, Krasnoyarsk, Russia;
e-mail: krasn@ict.nsc.ru

² Krasnoyarsk Institute of railway transport, Irkutsk state University of railway communications branch, Krasnoyarsk, Russia; e-mail: chaban_tm@mail.ru

Submitted July 12, 2017.

The results of analysis of the residual life of crane girders with operational defects based on numerical studies of the stress-strain state, equations of limiting states, and kinetic dependences of the fatigue crack development, based on the criteria of deformation and fracture mechanics are presented. High level of wear of the fixed capital assets of engineering constructions and metal structures as well as operation of the facilities in beyond-design-basis terms contribute to origination of the emergency situations caused by damage accumulation. Crane girders operated under emergency conditions due to the

fatigue cracks of different lengths present in the most dangerous zones of the beam wall with an eccentric application of crane load are studied. The results of the numerical experiment revealed the lines of tension intensity impact at the crack tip appeared at the upper zone of the wall at different values of the loading eccentricity attributed to the rail shift from the vertical axis of the beam. The dependence of the length of the fatigue crack and stress intensity in the crack tip on the number of load cycles of the beam is determined. To assess the bearing capacity of crane girders operated in emergency conditions, it is suggested to use the effective values of the stress intensity factors calculated for the specific loading conditions, taking into account the structural features of the beams, size of the fatigue cracks and their location in the crane girders. Proceeding from the results of analysis the diagrams which provide of the remaining residual life of crane girders with a crack are constructed. Using traditional methods of structure calculation for cyclic fracture toughness we developed and implemented the calculation algorithm for individual lifetime of the crane girders which includes the obligatory analysis of the stress-strain state of the crane girders with a crack at the upper zone of the wall.

Keywords: crane girder; fatigue crack; residual life; stress intensity factor; characteristics of cyclic crack resistance.

Результаты технического обследования подкрановых балок (ПБ) в цехах с тяжелым и весьма тяжелым режимами работы мостовых кранов показывают, что после 2 – 3 лет эксплуатации в верхних зонах стенки возникают продольные трещины усталостного характера значительной протяженности [1 – 7]. Появление первых трещин усталости в стенках ПБ фиксируется, как правило, при количестве циклов, соответствующем области малоцикловой усталости. Нормами проектирования [8] предусмотрена проверка выносливости подкрановых конструкций, однако усталостные трещины возникают уже на ранней стадии их эксплуатации. Появление усталостных трещин — одна из причин классификации балок как неработоспособных, поскольку согласно действующим нормам эксплуатация конструкций с подобными повреждениями недопустима [9]. Безусловное выполнение данных требований приведет к массовому выводу ПБ из эксплуатации при сохранении ими несущей способности. В этой ситуации необходим дополнительный анализ остаточного ресурса ПБ с эксплуатационными дефектами. Основой такого анализа являются обязательные численные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС), уравнения предельных состояний и кинетические зависимости развития усталостных трещин, сформулированные на базе критериев механики деформирования и разрушения [7, 10 – 12].

В верхней зоне стенки (ВЗС) ПБ при эксплуатации возникает сложное напряженное состояние, наиболее опасное с точки зрения усталости [12 – 15]. Возникающие в ВЗС при наличии эксцентричности нагружения ПБ повышенные уровни нормальных и касательных напряжений являются основной причиной образования и начального развития усталостных трещин [14 – 16]. При этом реализуется достаточно сложный кинетический механизм развития трещины в условиях смешанной модели разрушения (нормальный

отрыв + поперечный сдвиг), для описания которого могут быть использованы как силовые, так и энергетические локальные критерии разрушения. Напряженное состояние в вершине трещины характеризуется коэффициентом интенсивности напряжений (КИН), а энергетические затраты при развитии трещин описываются величиной J -интеграла.

Детальный анализ напряженно-деформированных состояний рассматриваемых ПБ, включая деформирование расчетных моделей, расположение и размеры трещин, технологию конечно-элементного моделирования, схемы приложения нагрузок, представлен в [15, 16] для штатных и аварийных режимов эксплуатаций.

Для проведения расчетов несущей способности ПБ с трещинами предложено использовать эффективные (условные) значения КИН, определяющие взаимосвязь между интенсивностью напряжений в вершине трещины σ_i и длиной трещины l [15, 16]:

$$K_{ief} = \sigma_i \sqrt{\pi l}, \quad (1)$$

где K_{ief} — эффективное значение коэффициента интенсивности напряжений, учитывающее конечные размеры элемента конструкции и условия его нагружения; σ_i — значение интенсивности напряжений для рассматриваемой длины трещины l в ее вершине.

Условные величины КИН используют в концепции предела трещиностойкости [17], при определении коэффициентов интенсивности деформаций в упругопластической области [18], при анализе развития трещин в зонах концентрации напряжений [18, 19], при расчетах на трещиностойкость конструкций с большим запасом потенциальной энергии [20]. Такой подход расширяет возможности инженерного анализа несущей способности конструкций. В данном слу-

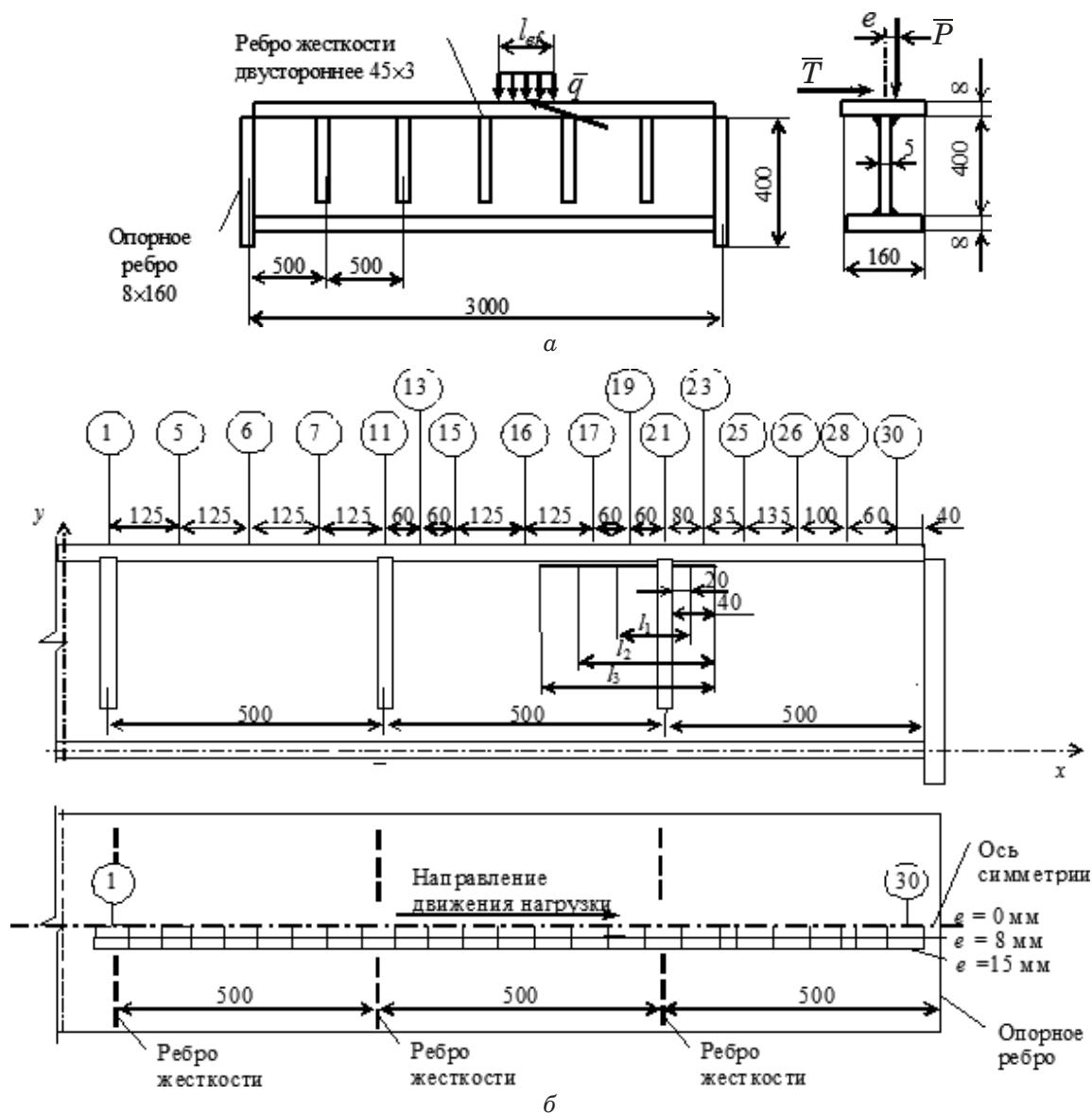


Рис. 1. Расчетная схема подкрановой балки: *а* — геометрические размеры и расчетные нагрузки; *б* — схема последовательных нагружений ПБ: $l_1 = 100$ мм; $l_2 = 200$ мм; $l_3 = 300$ мм; цифры в кружках — места приложения колеса крана

чае значения σ_i и $K_{i\text{ef}}$ рассчитывают для конкретных условий нагружения, размеров трещин и мест их расположения в ПБ. При проведении численного эксперимента ПБ моделировали с учетом ее конструктивных особенностей, геометрических размеров трещин, условий нагружения конструкции. При этом использовали максимальные значения σ_i для расчета $K_{i\text{ef}}$, что исключало необходимость определения традиционных поправочных функций для КИН.

Многочисленные исследования циклической трещиностойкости материалов и конструкций [21–25] базируются на различных модельных представлениях, описывающих зависимость скорости роста трещины (СРТ) от характеристик трещиностойкости. Для решения задач оценки показателей ресурса и живучести в ка-

честве модели СРТ с достаточной степенью точности может быть использована степенная зависимость, предложенная Пэрисом,

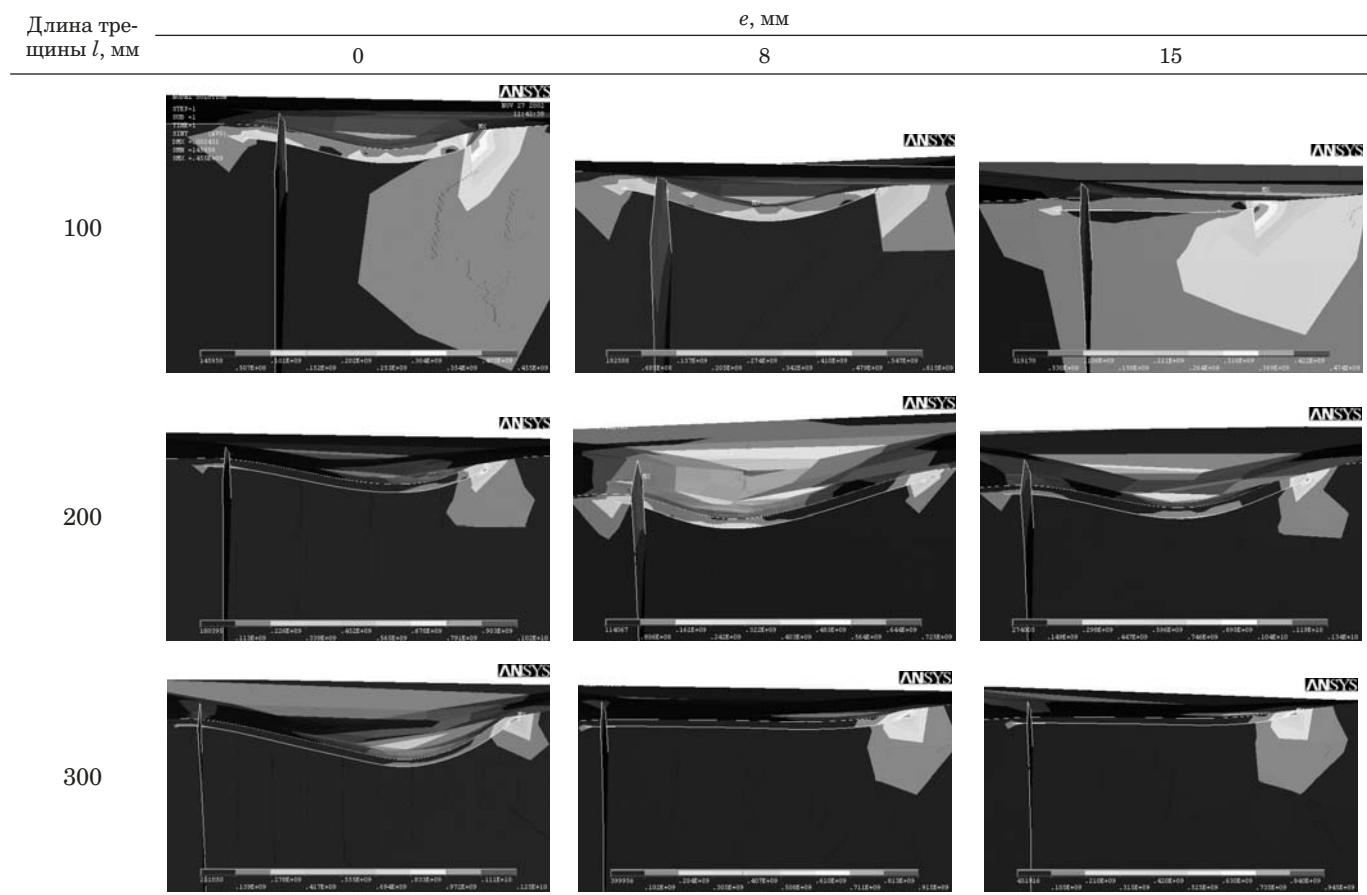
$$v = dl/dN = C(\Delta K)^n, \quad (2)$$

где C , n — характеристики циклической трещиностойкости; $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ — размах КИН в цикле нагружения [29].

Чтобы учесть условия нагружения ПБ при ее эксплуатации, а также ее конструктивные особенности, для оценки показателей ресурса и живучести предложено в формуле (2) вместо ΔK использовать $K_{i\text{ef}}$ — максимальные эффективные значения КИН в цикле нагружения:

$$v = dl/dN = C(K_{i\text{ef}})^n. \quad (3)$$

Поля интенсивности напряжений, возникающие в вершинах трещины при разных значениях эксцентрикитета нагружения



Число циклов до разрушения

$$N_c = \frac{2}{(n-2)C\sigma_i^n} \left(\frac{1}{l_0^{(n-2)/2} - l_c^{(n-2)/2}} \right) \text{ при } n \neq 2,$$

$$N_c = \frac{1}{C\sigma_i^2} \ln \frac{l_c}{l_0} \text{ при } n = 2, \quad (4)$$

где l_0 и l_c — начальная и критическая длины трещин.

Методы экспериментального определения параметров диаграммы циклического разрушения, определяемых на образцах, в настоящее время достаточно отработаны, прошли практическую апробацию и отражены в нормативно-технических документах [26, 27].

Кинетика усталостных трещин в подкрановых балках. Возможности построения диаграммы циклического разрушения для подкрановых балок ограничены следующими причинами:

1) сложностями интерпретации и сопоставления с результатами, полученными на образцах в виде пластин в соответствии с требованиями [26, 27];

2) отсутствием прямых измерений кинетики усталостных трещин в подкрановых балках в процессе эксплуатации;

3) отсутствием необходимого объема модельных испытаний элементов подкрановых балок, в процессе которых измеряли рост трещин.

Для анализа кинетики усталостных трещин в ПБ использовали экспериментальные данные, полученные [28] при проведении циклических испытаний модельных ПБ с регистрацией числа циклов нагружения и размеров трещин. Обработку результатов проводили в соответствии с РД 50-345-82 [26].

Геометрические параметры экспериментальных и расчетных моделей сварных балок соответствовали шестиметровой типовой ПБ в масштабе 1:2 (рис. 1, а). Материал моделей — сталь С255 по ГОСТ 27772-88 (предел текучести $\sigma_t = 245 \text{ Н/мм}^2$; временное сопротивление $\sigma_b = 370 \text{ Н/мм}^2$; относительное удлинение $\delta = 25 \%$). Поясные швы выполняли полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа сварочной проволокой Св08Г2 с катетом 6 мм. Сосредоточенное давление катков принимали равным 45 кН, рельс квадратного сечения — 25 × 25 мм. При

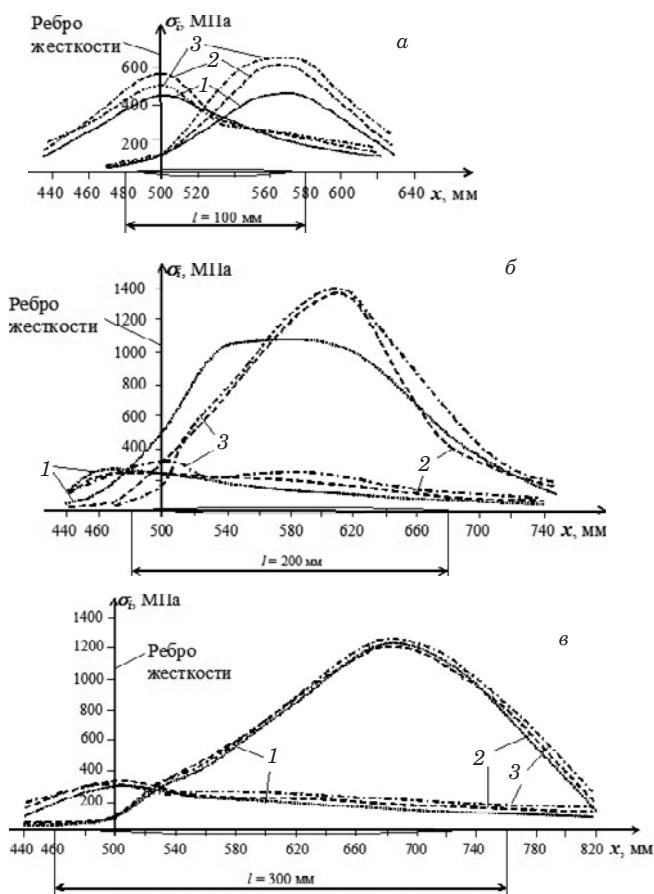


Рис. 2. Линии влияния интенсивности напряжения в вершинах трещин АСПБ-1 длиной l , равной 100 (а); 200 (б); 300 (в): 1 – 3 — e равно 0, 8, 15 мм соответственно

численном исследовании рассчитывали разрезную ПБ, при этом учитывали эффект распределения давления кранового рельса на ПБ по длине $l_{ef} = 64$ мм. Подкрановую балку последовательно статически нагружали в направлении от центра к ее опоре (рис. 1, б).

Исходные данные для определения скорости роста трещины: значения КИН K_{ief} , вычисленные по формуле (1) для рассматриваемой длины трещины l [15, 16]; соответствующее ей число циклов нагружения N . Значения K_{ief} определяли с использованием зависимостей $l - \sigma_i$, по которым находили максимальные σ_i , соответствующие длине трещины l . В данном случае рассматривали аварийную ситуацию (АСПБ), при которой усталостная трещина располагалась над ребром жесткости возле опорного отсека ПБ и имела продольное развитие в верхней зоне стенки балки в направлении ее секций. При создании расчетной модели поврежденной ПБ моделировали сквозную трещину в виде разреза в ВЗС балки заданных расположения и длины (см. рис. 1, б).

Значения интенсивности напряжений σ_i в вершинах трещины получены по результатам

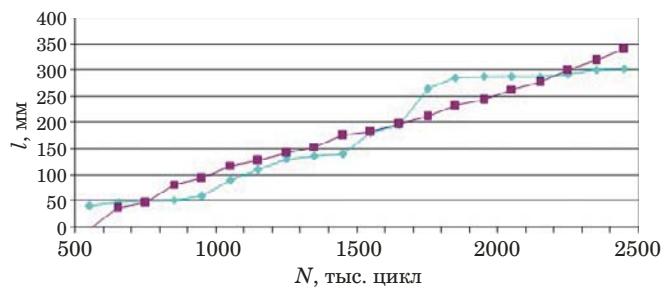


Рис. 3. Зависимость длины усталостной трещины от числа циклов нагружения: ■ — экспериментальные данные; ■ — метод наименьших квадратов

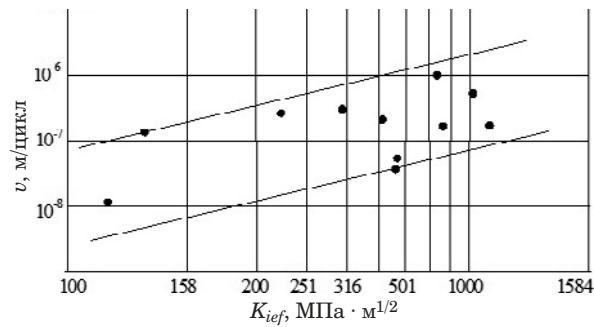


Рис. 4. Диаграмма усталостного разрушения

численного эксперимента, при котором ПБ нагружали с разными значениями эксцентриситета e , равного 0, 8, 15 мм относительно ее продольной оси [15, 16]. В таблице показаны поля интенсивности напряжений, возникающие в вершинах трещины при разных значениях эксцентриситета. На рис. 2 показаны полученные по результатам расчета линии влияния интенсивности напряжения в вершинах трещины для ее длин: $l_1 = 100$ мм; $l_2 = 200$ мм; $l_3 = 300$ мм.

Значения длины трещины l при каждом цикле нагружения ПБ N определяли по графику роста трещины при АСПБ (рис. 3), полученному в результате обработки данных натурного эксперимента, проведенного в лаборатории кафедры стальных конструкций НГАСУ [28]. Диаграмма циклического разрушения для трещины, развивающейся в верхней зоне стенки подкрановой балки, построена в координатах $v - K_{ief}$ (рис. 4).

Характеристики циклической трещиностойкости n и C , описывающие диаграмму усталостного разрушения, определяли в соответствии с требованиями [26, 27]. Для ПБ, в верхней зоне стенки которой в ходе эксплуатации развивается продольная усталостная трещина, характеристики трещиностойкости имеют следующие значения: $n = 2$; $C = 1,24 \cdot 10^{-12}$ (Па · м $^{1/2}$) $^{-n}$ · м/цикл. Они коррелируют со значениями, определенными в ходе других экспериментов для данной марки стали [29].

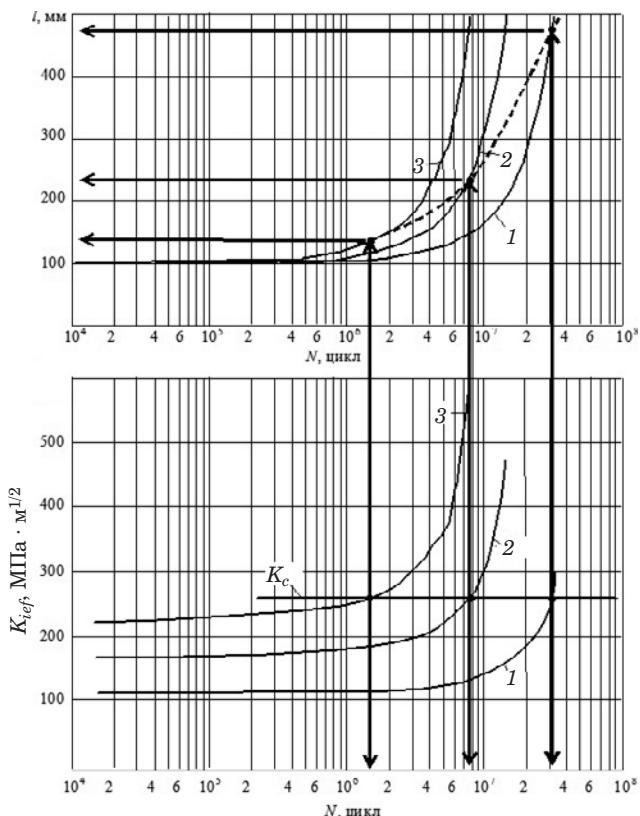


Рис. 5. Расчетные зависимости l и K_{ief} от N для подкрановой балки с трещиной $l_0 = 100$ мм при σ_i , равных 200 (1), 300 (2), 400 МПа (3) и эксцентриситете e , равном 0 (1), 8 (2), 15 мм (3)

Оценка остаточного ресурса. Поскольку параметры C и n , полученные при совместной обработке натурного и численного экспериментов, являются характеристиками материала и условий нагружения элемента конструкции, то их значения можно использовать при расчете остаточного ресурса подкрановых балок других типо-размеров и при других эксцентриситетах нагружения при реализации рассмотренной аварийной ситуации — развитие усталостной трещины в верхней зоне стенки в области ребра жесткости, близайшего к опорному отсеку.

На основе формул (1) и (4) установили связь между эффективным коэффициентом интенсивности напряжений K_{ief} числом циклов нагружения N , уровнем нагруженности σ_i и длиной трещины:

$$K_{ief} = F(N, \sigma_i, l, C, n). \quad (5)$$

Это позволило получить расчетные зависимости $l - N$ и $K_{ief} - N$ при $l_0 = 100$ мм и максимальных уровнях σ_i , равных 200, 300, 400 МПа (рис. 5), возникающих при различных эксцентриситетах нагружения e (0, 8, 15 мм). Согласно полученным зависимостям при увеличении интенсивности напряжений в вершине трещины

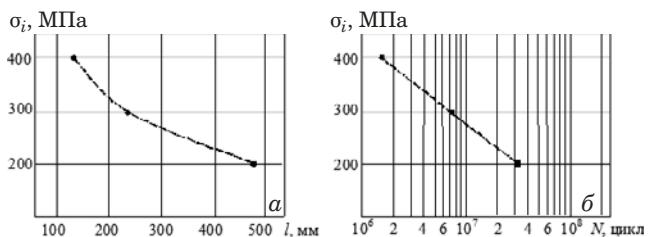


Рис. 6. Зависимости интенсивности напряжений в вершине трещины от критической длины трещины (а) и числа циклов нагружения (б)

уменьшается количество циклов нагружения до разрушения. Повышение уровня интенсивности напряжений в вершине трещины происходит при увеличении эксцентриситета нагружения, т.е. наличие эксцентриситета нагружения ПБ способствует возникновению отказа при длине усталостной трещины, гораздо меньшей, чем при его отсутствии. В вершине усталостной трещины первоначальной длины 100 мм при наличии эксцентриситета нагружения $e = 15$ мм возникает интенсивность напряжений порядка 400 МПа, что резко снижает долговечность ПБ по сравнению с той, что не имеет эксцентриситета нагружения. Увеличение эксцентриситета нагружения ПБ ведет к ускоренному развитию аварийной ситуации с резким падением несущей способности ПБ более чем на порядок по числу циклов нагружения. Усталостная долговечность ПБ, как правило, зависит от эксцентриситета нагружения, длины усталостной трещины, уровня интенсивности напряжений в вершине трещины.

Если уровень роста K_{ief} ограничить некоторым критическим значением КИН K_c , то можно определить критическое число циклов нагружения и длину трещины (см. рис. 5). Для исследованной стали $K_c = 280$ МПа · м^{1/2}. При понижении интенсивности напряжений в вершине трещины критическая длина трещины и число циклов нагружения увеличиваются (рис. 6).

Алгоритм оценки остаточного ресурса ПБ включает следующие этапы: 1) техническое освидетельствование балок, в ходе которого выявляют основные дефекты и повреждения, а также их местоположение в конструкции [7]; 2) расчет НДС ПБ с учетом выявленных в ней повреждений — усталостных трещин (результат расчета — построение по длине балки линий влияния интенсивности напряжений σ_i в вершинах трещин [15, 16]); 3) определение эффективных значений КИН K_{ief} по формуле (1) и N по формуле (4) с использованием максимальных значений интенсивности напряжений, возникающих в вершине трещин; 4) построение зависимостей $l - N$ и $K_{ief} - N$, по которым определяют либо предель-

ную длину трещины, либо количество циклов нагружения балки до полной потери ее несущей способности (результат — заключение о сроках дальнейшей эксплуатации, усилении или замене ПБ).

Таким образом, для оценки несущей способности подкрановых балок в аварийных ситуациях предложено использовать эффективные значения коэффициентов интенсивности напряжений, рассчитываемые по максимальным величинам интенсивности напряжений в вершинах трещин для конкретных условий нагружения с учетом конструктивных особенностей, размеров трещин и мест их расположения в подкрановой балке.

На основе традиционных методов расчета конструкций на циклическую трещиностойкость сформулирован и реализован алгоритм расчета индивидуального ресурса подкрановых балок, включающий анализ напряженно-деформированного состояния подкрановой балки с трещиной для расчета эффективных значений коэффициентов интенсивности напряжений и построение кинетических зависимостей для скоростей роста трещин.

ЛИТЕРАТУРА

- Балдин В. А. О причинах преждевременного выхода из строя подкрановых балок и вопросы их улучшения их конструкции / Промышленное строительство. 1966. № 10. С. 20 – 22.
- Кикин А. И., Эглескалн Ю. С. Результаты обследования подкрановых конструкций, запроектированных по действующим нормам / Промышленное строительство. 1968. № 12. С. 38 – 39.
- Беляев Б. И., Корниенко В. С. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения — М.: Стройиздат, 1986. — 67 с.
- Фын Сю-Цзюнь, Линь Синь-Шань, Фан Тиан. Исследование усталостных повреждений верхней зоны стенок стальных подкрановых балок / Промышленное и гражданское строительство. 1994. № 11 – 12. С. 33 – 35.
- Артиков В. Н., Щербаков Е. А., Горицкий В. М., Шнейдеров Г. Р. О состоянии подкрановых конструкций корпуса конверторного производства ОАО «Северсталь» / Промышленное и гражданское строительство. 2001. № 6. С. 31 – 34.
- Складнев А. И., Сердюк В. В. Усталостная долговечность и мера повреждаемости верхней зоны стенок сварных подкрановых балок / Безопасность труда в промышленности. 2004. № 11. С. 34 – 36.
- Закревский М. П., Москвичев В. В., Котельников В. С., Черняев А. П., Чабан Е. А. Анализ предельных состояний подкрановых балок / Безопасность труда в промышленности. 2004. № 3. С. 31 – 33.
- СНиП II-23-81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. — М.: ЦИТИП Госстроя СССР, 1990. — 96 с.
- РД 10-138-97. Комплексное обследование крановых путей грузоподъемных машин. Ч. 1. Общие положения. Методические указания. — М.: НПО ОБТ, 1998. — 36 с.
- Крылов И. И., Тарасевич В. В. Живучесть эксплуатируемых сварных подкрановых балок с усталостными повреждениями / Изв. вузов. Строительство. 1998. № 2. С. 17 – 25.
- Чабан Е. А., Цыплюк А. Н. Оценка ресурса подкрановых балок по данным технической диагностики / Труды научных мероприятий. Природно-техногенная безопасность Сибири: В 2-х т. Т. 2. Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Проблемы промышленной безопасности. — Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001. С. 300 – 303.
- Сергеев А. В., Шафрай С. Д. Влияние особенностей напряженного состояния в подкрановых балках на их прочность и выносивость / Изв. вузов. Строительство. 1997. № 7. С. 9 – 12.
- Васюта Б. Н. К вопросу об определении напряжений в стеке от местного кручения пояса балки / Изв. вузов. Строительство. 2006. № 3 – 4. С. 12 – 17.
- Тимашев С. А. Инфраструктуры. Ч. 1. Надежность. Долговечность. — Екатеринбург: Изд. НИСО УрО РАН, 2016. — 530 с.
- Москвичев В. В., Чабан Е. А. Исследование напряженно-деформированного состояния подкрановых балок в штатных режимах эксплуатации / Журнал СФУ. Техника и технологии. 2016. № 4. С. 572 – 584.
- Москвичев В. В., Чабан Е. А. Исследование напряженно-деформированного состояния подкрановых балок в условиях аварийных ситуаций / Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2016. № 5. С. 3 – 15.
- Партон В. З., Морозов Е. М. Механика упругопластического разрушения. — М.: Наука, 1985. — 504 с.
- Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. — М.: Машиностроение, 1981. — 272 с.
- Махутов Н. А., Москвичев В. В., Козлов А. Г., Сухоруков С. В. Расчет на трещиностойкость плоских элементов конструкций с использованием J-интеграла. Сообщение 1. Обоснование метода. Сообщение 2. Учет концентрации напряжений / Проблемы прочности. 1988. № 8. С. 3 – 14.
- Махутов Н. А., Лыгдаев А. В., Больщаков А. М. Хладостойкость (метод инженерной оценки). — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. — 195 с.
- Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов — М.: Металлургия, 1976. — 456 с.
- Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974. — 640 с.
- Ларионов В. В. Исследование работы строительных конструкций в условиях малоциклового нагружения: автореф. дис. ... докт. техн. наук. — М., 1979. — 40 с.
- Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие в 4-х т. Т. 4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. — Киев: Наукова думка, 1990. — 679 с.
- Троценко В. Т., Покровский В. В., Прокопенко А. В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. — Киев: Наукова думка, 1987. — 256 с.
- РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 95 с.
- Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. Методические рекомендации. — М.: МИБ СТС, 1995. — 360 с.
- Васюта Б. Н. Некоторые особенности развития усталостных трещин в верхней зоне стенки сварных подкрановых балок / Изв. вузов. 2003. № 10. С. 4 – 13.
- Москвичев В. В., Махутов Н. А., Черняев А. П. и др. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем. — Новосибирск: Наука, 2002. — 334 с.

REFERENCES

- Baldin V. A. The reasons of premature failure of the crane beams and their improve their design / Promyshl. Stroit. 1966. N 10. P. 20 – 22 [in Russian].
- Kikin A. I., Egleskaln Yu. S. The results of the survey of the crane structures designed according to current regulations / Promyshl. Stroit. 1968. N 12. P. 38 – 39 [in Russian].
- Belyayev B. I., Korniyenko V. S. Causes of accidents of steel structures and methods of their elimination. — Moscow: Stroiiidat, 1986. — 67 p. [in Russian].

4. **Fyn Su-Tsun, Lin Sin-Shan, Fan-Tian.** A study of the fatigue damage of the upper zone of the walls of steel crane beams / Promyshl. Grazhd. Stroit. 1994. N 11 – 12. P. 33 – 35 [in Russian].
5. **Artyukhov V. N., Shcherbakov E. A., Goritskiy V. M., Shneyderov G. R.** About the condition of crane structures housing BOF production of JSC “Severstal” / Promyshl. Grazhd. Stroit. 2001. N 6. P. 31 – 34 [in Russian].
6. **Skladnev A. I., Serduk V. V.** Fatigue life and the measure of damage to the upper zone of the wall of welded crane beams / Bezopasn. Truda Promyshl. 2004. N 11. P. 34 – 36 [in Russian].
7. **Zakrevskiy M. P., Moskvichev V. V., Kotelnikov V. S., Chernayev A. P., Chaban E. A.** Analysis of limit states of the crane beams / Bezopasn. Truda Promyshl. 2004. N 3. P. 31 – 33 [in Russian].
8. **SNiP II-23-81***. Steel construction / Gosstroy SSSR. — Moscow: ZITP Gosstroya SSSR, 1990. — 96 p. [in Russian].
9. **RD 10-138-97.** Thorough Inspection of Rail Crane Tracks of Hoisting Machinery. Part 1. General Provisions — Procedural Guidelines. — Moscow: NPO OBT, 1998. — 36 p. [in Russian].
10. **Krylov I. I., Tarasevich V. V.** The persistence of exploited welded crane beams with fatigue damage / Izv. Vuzov. Stroit. 1998. N 2. P. 17 – 25 [in Russian].
11. **Chaban E. A., Tsyplyuk A. N.** Assessment of service life of crane beams according to technical diagnostics / Proceedings of scientific events. Natural and technogenic security of Siberia: In 2 volumes. Volp 2. Problems of protection of the population and territories from emergency situations. Problems of industrial safety. — Krasnoyarsk: IPZ KGTU, 2001. P. 300 – 303 [in Russian].
12. **Sergyev A. V., Shafrazi S. D.** The influence of the stress state in the beams of the crane in their strength and endurance / Izv. Vuzov. Stroit. 1997. N 7. P. 9 – 12 [in Russian].
13. **Vasyuta B. N.** To the question about the determination of stresses in the wall of the local torsion of beams belt / Izv. Vuzov. Stroit. 2006. N 3 – 4. P. 12 – 17 [in Russian].
14. **Timashev S. A.** Infrastructure. Part 1. Reliability. Durability. — Yekaterinburg: Izd. NISO UrO RAN, 2016. — 530 p. [in Russian].
15. **Moskvichev V. V., Chaban E. A.** Investigation of the stress-strain state of crane beams in normal operating modes / Zh. SFU. Tekh. Tekhnol. 2016. N 4. P. 572 – 584 [in Russian].
16. **Moskvichev V. V., Chaban E. A.** Investigation of the stress-strain state of crane beams in the conditions of emergency situations / Probl. Bezopasn. Chrezvych. Sit. 2016. N 5. P. 3 – 15 [in Russian].
17. **Parton V. Z., Morozov E. M.** Mechanics of elastic-plastic fracture. — Moscow: Nauka, 1985. — 504 p. [in Russian].
18. **Makhutov N. A.** Deformation criteria of destruction and calculation of construction elements for durability. — Moscow: Mashinostroenie, 1981. — 272 p. [in Russian].
19. **Makhutov N. A., Moskvichev V. V., Kozlov A. G., Sukhorukov S. V.** Calculation for crack resistance of plane structural elements using the J -integral. Message 1. Justification of the method. Message 2. Account of stress concentration / Probl. Prochn. 1988. N 8. P. 3 – 14 [in Russian].
20. **Makhutov N. A., Lyglayev A. V., Bol'shakov A. M.** Cold-resistance. Engineering evaluation method. — Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2011. — 195 p. [in Russian].
21. **Kotsan'da S.** Fatigue failure of metals. — Moscow: Metallurgiya, 1976. — 456 p. [in Russian].
22. **Cherepanov G. P.** Mechanics of brittle fracture. — Moscow: Nauka, 1974. — 640 p. [in Russian].
23. **Larionov V. V.** The study of the building structures work under the conditions of low cycle loading: author's abstract of Doctoral thesis. — Moscow, 1979. — 40 p. [in Russian].
24. **Fracture mechanics and strength of materials: Ref. the manual. In 4 vols. Vol. 4. Fatigue and cyclic crack resistance of structural materials.** — Kiev: Nauk. dumka, 1990. — 679 p. [in Russian].
25. **Troshchenko V. T., Pokrovskiy V. V., Prokopenko A. V.** The fracture toughness of metals under cyclic loading. — Kiev: Naukova dumka, 1987. — 256 p. [in Russian].
26. **RD 50-345-82.** Methodology instructions. Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of metals. The determination of crack resistance characteristics (fracture toughness) under cyclic loading. — Moscow: Izd. standartov, 1983. — 95 p. [in Russian].
27. **The mechanics of disasters.** Determination of characteristics of crack resistance of structural materials. Guidelines. — Moscow: MIB STS, 1995. — 360 p. [in Russian].
28. **Vasyuta B. N.** Some peculiarities of the development of fatigue cracks in the wall upper zone of welded crane girders / Izv. vuzov. 2003. N 10. P. 4 – 13.
29. **Moskvichev V. V., Makhutov N. A., Chernyaev A. P., et al.** Fracture toughness and mechanical properties of structural materials technical systems. — Novosibirsk: Nauka, 2002. — 334 p. [in Russian].