УДК 624.046.3:624.014

© А. Е. Кубасевич, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: aekubasevich@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-47-53

© А. Е. Kubasevich, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: aekubasevich@gmail.com

УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕНОК ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С УСТАЛОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ В ЗОНЕ СЖАТОГО ПОЯСА

STABILITY OF CRANE BEAM WALLS WITH FATIGUE CRACKS IN THE COMPRESSED BELT ZONE

Изложена методика определения несущей способности подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке. Разработан и реализован алгоритм по определению напряженно-деформированного и предельного состояния балки с трещиной в стенке под сжатым поясом. Установлена зависимость напряженно-деформированных и предельных состояний стенки балки от величин ее относительных начальной погиби и длины трещины в отсеке при действии изгибающего момента и поперечной силы. Представлены результаты численных исследований влияния трещин на несущую способность стенки. Выявлено влияние амплитуды начальных погибей стенки балки на критические параметры напряжений. Рассмотрена зависимость величин критических параметров напряжений от относительной длины трещины.

Ключевые слова: подкрановая балка, усталостная трещина, местная устойчивость, начальные несовершенства, напряженно-деформированное состояние стенки, стенка стальной балки.

The paper describes a method for assessing the bearing capacity of the crane beam walls with fatigue cracks. There has been developed and implemented an algorithm for evaluating the stress-strain and limit state of the beam with a crack in the wall under a compressed belt. There has been established the dependence of the stress-strain and limit states of the beam wall on the value of the initial relative beam bending and the crack length in the section under the action of the bending moment and transverse force. The author presents the results of numerical studies of the effect of cracks on the bearing capacity of the beam wall. The influence of the amplitude of the initial beam wall deflection on the critical stress parameters is revealed. The dependence of the values of critical stress parameters on the relative crack length is considered.

Keywords: crane runway beam, fatigue crack, local stability, initial imperfections, the stress-strain state of the beam wall, steel beam wall.

В настоящее время на металлургических комбинатах и других производствах с мостовыми кранами тяжелого или весьма тяжелого режима работы в подкрановых балках после относительно небольшого срока эксплуатации (от 2 до 5 лет) появляются и развиваются усталостные трещины [1–11], при этом в стенке их количество составляет 90–95 % [12, 13]. Оценка влияния этих повреждений на несущую способность балки имеет очень важное значение при определении ее срока эксплуатации, решения о ее ремонте или замене. Системная классификация и анализ характерных видов усталостных трещин отражены в работах [5, 12–16]. Согласно этим исследова-

ниям, все усталостные трещины, возникающие в подкрановых балках, по месту их геометрического расположения можно разделить:

- на опасные и недопустимые: трещины в растянутых поясах;
- допустимые: горизонтальные трещины в стенке в уровне сжатого пояса (доля этих трещин составляет около 90 % от общего количества трещин); наклонные трещины в стенке под поперечным ребром жесткости; трещины в швах крепления ребер жесткости к стенке и к верхнему поясу.

Подкрановая балка с усталостной трещиной в зоне сжатого пояса будет находиться в предельном состоянии, когда трещина достигнет та-

кой длины, при которой могут возникнуть одно или несколько из следующих видов исчерпания несущей способности балки:

- потеря местной устойчивости стенки, ведущая к перераспределению напряжений во всем сечении балки, перегрузке верхнего пояса и к общему снижению ее несущей способности;
- потеря местной устойчивости сжатого пояса;
- появление пластических деформаций в сечении балки, ведущих к ненормативным изменениям, затрудняющим эксплуатацию балки;
- появление недопустимого прогиба балки.

Наступление предельного состояния из-за потери местной устойчивости стенки является наиболее вероятным, что обусловливается изменением условий закрепления стенки в отсеке по мере роста трещины [2, 11–17]. В данной статье исследуется влияние усталостных трещин в зоне сжатого пояса на местную устойчивость стенки подкрановой балки с учетом несовершенств в виде начальных погибей стенки балки.

Предложен алгоритм численного исследования по нахождению критических параметров напряжений отсека балки, а именно:

- моделирование расчетной схемы трех отсеков подкрановой балки с горизонтальной трещиной в стенке для оценки ее влияния на характер распределения напряжений (длина трещины: $0,25a_{отс}$, $0,5a_{отс}$ и т. д.);
- решение бифуркационной задачи устойчивости стенки с усталостной трещиной в исследуемом отсеке (в зависимости от места ее расположения и длины) для определения возможной формы потери устойчивости стенки с трещиной;
- учет начальных несовершенств стенки балки в виде погибей по форме, соответствующей первой (как наихудшей) форме потери местной устойчивости стенки;
- определение критических параметров напряжений при чистом изгибе и сдвиге, а также при их совместном действии в различных соотношениях. Предельные параметры напряжений фиксируются при достижении геометрической неустойчивости конструкции.

В качестве исследования напряженно-деформированного состояния применялось конечно-элементное моделирование с использованием программного комплекса ANSYS. Исследование проводилось с учетом физической

нелинейности материала балки на переходе от предела пропорциональности до предела текучести по трехлинейной диаграмме — кривой ОАСД для высокопрочных сталей, аналогичных классу С345 (рис. 1), модуль упругости для стали был принят $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа.

Для моделирования фрагментов балки в виде трех отсеков применялись конечные элементы типа SHELL181, разбивка сетки конечных элементов осуществлялась автоматически препроцессорами расчетного комплекса с максимальным размером элемента 5×5 см (рис. 2, а). Трещина моделировалась как разрыв между стенкой и сжатым поясом, позволяющий свободно перемещаться верхней грани стенки относительно сжатого пояса, для избежания экстремумов напряжений в крайних точках трещин производилось учащение конечно-элементной (КЭ) сетки (рис. 2, б). Пластинчатые элементы поперечных ребер жесткости, поясов и стенка были жестко соединены в общих узлах. При этом общая упруго-податливая система оказывается зависимой от геометрических характеристик стенки и пояса. В расчетах рельс не моделировался, так как на практике соединение пояса с рельсом применяется на податливых связях (планки или крючья). Расчет производился в геометрически-нелинейной постановке.

В расчетах использовались модели реальных подкрановых балок с тяжелым режимом работы, эксплуатируемых на конвертерном производстве «Северсталь» [1].

В численных исследованиях была принята расчетная схема, состоящая из трех отсеков подкрановой балки, жестко зашумленных с одного

Рис. 1. Обобщенная диаграмма работы высокопрочной стали

Рис. 2. Формирование конечно-элементной модели: а — разбивка трех отсеков балки на КЭ; б — утащение КЭ сетки в зоне трещины

торца для обеспечения геометрической неизменяемости конструкции. При такой постановке задачи соблюдается полное равновесие нагруженного торца на закрепленном участке. Влияние сосредоточенных нагрузок на напряженно-деформированное состояние не учитывалось. Характерное сечение балки приведено на рис. 3, а.

Загружения принимаются в виде напряжений на незакрепленном торце:

$$\sigma(y) = \frac{M}{I_x} y; \quad (1)$$

$$\tau(y) = \frac{Q}{I_x t_w} \cdot S_x^{\text{отс}}(y). \quad (2)$$

При задании граничных условий, соответствующих тормозной балке по верхнему поясу и тормозной ферме по нижнему поясу балки, получаем итоговую расчетную схему, представленную на рис. 3, б.

Формы начальных погибей принимались в соответствии с первой (как наихудшей) формой потери устойчивости стенки, взятой из решения бифуркационной задачи устойчивости. Полученные формы масштабировались в зависимости от толщины стенки. Значения относительных погибей $\bar{f} = f_0/t_w$ принимались от 0,5 (соответствующих нормативам) до 3 (встречающихся в эксплуатируемых балках). На рис. 4, а представлен пример решения бифуркационной задачи устойчивости — деформации стенки центрального отсека f_w .

Критические параметры напряжений фиксировались в момент достижения геометрической неустойчивости конструкции при решении деформационной задачи. В соответствии с СП 16.13330.2017¹ критические нормальные напряжения $\sigma_{кр}$ приняты под сжатым поясом (σ^B), а критические касательные напряжения $\tau_{кр}$ — усредненные по всей высоте стенки, полученные при решении деформационной задачи. На

¹ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М.: ФГУП ЦПП, 2017. 147 с.

Рис. 3. К описанию расчетной модели: а — характерное сечение подкрановой балки; б — схема трех отсеков балки с нагрузкой в виде напряжений

рис. 4, б представлен пример решения деформационной задачи в виде распределения полей интенсивности напряжений по критерию Мизеса при действии изгибающего момента.

На примере расчета устойчивости стенки с начальной погибью $\bar{f} = 0,5$, находящейся в рамках отсека высотой $h_{\text{отс}} \approx 1,35a_{\text{отс}}$, покажем влияние длины трещины $\bar{l}_{\text{тр}} = l_{\text{тр}}/a_{\text{отс}}$ на критические напряжения. Для удобства анализа характера снижения устойчивости стенки в зависимости от длины трещины $\bar{l}_{\text{тр}}$, в таблице критические напряжения приведены в относительных параметрах $\bar{\sigma}_{\text{кр}} = \sigma_{\text{кр}}/\sigma_{\text{кр}}^*$ и $\bar{\tau}_{\text{кр}} = \tau_{\text{кр}}/\tau_{\text{кр}}^*$ ($\sigma_{\text{кр}}^*$, $\tau_{\text{кр}}^*$ — критические напряжения в стенке без трещины с той же начальной погибью).

Из таблицы видно, что трещина с длиной, охватывающей большую часть отсека, весьма существенно снижает критические параметры устойчивости стенки.

Аналогичные зависимости можно наблюдать при других погибях стенки, которые иллюстрируются графиками на рис. 5.

Результаты расчетов устойчивости стенки при двухпараметрическом нагружении, имею-

Критические параметры при относительных погибях $\bar{f} = 0,5$; $\sigma_{\text{кр}}^* = 341,1$ МПа, $\tau_{\text{кр}}^* = 93,4$ МПа

$\bar{l}_{\text{тр}}$	0	0,25	0,50	0,75	1
$\bar{\sigma}_{\text{кр}}$	1	0,918	0,780	0,676	0,643
$\bar{\tau}_{\text{кр}}$	1	0,987	0,854	0,741	0,703

щей различные начальные погиби и длину трещины $\bar{l}_{\text{тр}}$, приведены на графиках рис. 6. Полученные результаты свидетельствуют также о весьма существенном влиянии длины трещины на границы области устойчивости стенки.

Границы области устойчивости при двухпараметрическом нагружении (см. рис. 6, а), определенные для балки без трещины при нормативных погибях $\bar{f} = 0,5$, в целом соответствуют окружности с центром в начале координат, что согласуется с СП 16.13330.2017 (см. пунктирную линию), и определяются по формуле

$$\sqrt{\bar{\sigma}_{\text{кр}}^2 + \bar{\tau}_{\text{кр}}^2} = 1, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}_{\text{кр}} = \sigma_{\text{кр}}/\sigma_{\text{кр}}^*$ и $\bar{\tau}_{\text{кр}} = \tau_{\text{кр}}/\tau_{\text{кр}}^*$.

Кривые, характеризующие границы области устойчивости стенки с трещинами при $\bar{f} = 0,5$ и $\bar{f} = 1$, приблизительно соответствуют эллипсу с центром в начале координат, с малым радиусом по оси нормальных напряжений, с большим — по оси касательных напряжений. В таких случаях критические параметры можно связать зависимостью

$$\sqrt{\left(\frac{\bar{\sigma}_{\text{кр}}}{A}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\tau}_{\text{кр}}}{B}\right)^2} = 1, \quad (4)$$

где параметры A , B зависят от длины трещины и изменяются от 0,65 до 1 при различных относительных длинах трещин и относительных погибях. За $\sigma_{\text{кр}}^*$ и $\tau_{\text{кр}}^*$ в формуле (4) приняты критические напряжения, определяемые для балок без трещины при погибях $\bar{f} = 0,5$ (в этом случае $A = 1$, $B = 1$). Расхождение критических параметров, определяемых по предложенной формуле (4), и полученных численных результатов составляет не более 5 % при $\bar{f} = 1$.

С увеличением погибей кривые, характеризующие области устойчивости при двухпараметрическом нагружении, становятся более пологими. Стандартные зависимости критических параметров напряжений по формулам (3) и (4), соот-

Рис. 4. Пример расчета балки с трещиной:

- а — решение бифуркационной задачи устойчивости;
б — распределение полей интенсивности напряжений по критерию Мизеса в исследуемом отсеке балки

Рис. 5. Графики зависимости относительных значений критических параметров напряжений при чистом изгибе и чистом сдвиге от длины трещины при погибах:
а — $\bar{f} = 0,5$; б — $\bar{f} = 1$; в — $\bar{f} = 2$; г — $\bar{f} = 3$

Рис. 6. Границы области устойчивости стенки в зависимости от длины трещины при погибах:
а — $\bar{f} = 0,5$; б — $\bar{f} = 1$; в — $\bar{f} = 2$; г — $\bar{f} = 3$

ветствующие методам теории упругой устойчивости, при больших погибях неприменимы. Для случаев больших погибей в формулу (4) в показатель степени критических параметров напряжений предлагается ввести коэффициент k :

$$\sqrt{\left(\frac{\bar{\sigma}_{кр}}{A}\right)^k + \left(\frac{\bar{\tau}_{кр}}{B}\right)^k} = 1, \quad (5)$$

который зависит от величин погибей и изменяется от 1,3 до 1,7.

Таким образом, по результатам проведенных численных исследований подкрановой балки с трещинами можно сделать следующие выводы:

1. С помощью метода конечно-элементного моделирования разработан алгоритм, который удобно использовать при исследовании влияния трещины и несовершенств в виде погибей на устойчивость стенки. В данном алгоритме учитываются упругопластические свойства материала балки, а в расчетной схеме отражаются реальные условия закрепления подкрановых балок.

2. Трещина весьма существенно влияет на устойчивость стенки балки. Зависимость относительных критических параметров напряжений стенки от длины трещины нелинейная. Характер снижения критических нормальных и касательных напряжений стенки при различных погибях однородный. С возрастанием погиби при одной и той же длине трещины происходит незначительное снижение критических параметров устойчивости. При одинаковых погибях существует тенденция к сохранению формы границы области устойчивости стенок балок как с трещиной, так и без нее.

3. С помощью разработанного алгоритма определены зависимости критических параметров устойчивости от относительных погибей и длины трещины. Предложены коэффициенты, учитывающие длину трещины в отсеке и погиби стенки, которые удобно применять при инженерной оценке работоспособности поврежденных балок.

Библиографический список

1. Артюхов 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.
2. Балдин В. А. О причинах преждевременного выхода из строя подкрановых балок и вопросы улучшения их конструкции // Промышленное строительство. 1966. № 10. С. 20–22.
3. Беляев Б. И., Корниенко В. С. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения. М.: Стройиздат, 1986. 206 с.
4. 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.
5. Кикин А. И., Васильев А. А., Кошутин Б. Н., Уваров Б. Ю., Зольберг Ю. Л. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1984. 302 с.
6. Кикин А. И., Эглескалн Ю. С. Результаты обследования подкрановых конструкций, запроектированных по действующим нормам // Промышленное строительство. 1968. № 12. С. 38–39.
7. Москвичев В. В., Чабан Е. А. Анализ развития усталостных трещин в подкрановых балках // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84, № 7. С. 47–54.
8. Сергеев А. В., Шафрай С. Д. Влияние особенностей напряженного состояния в подкрановых балках на их прочность и выносливость // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1997. № 7 (463). С. 9–12.
9. Складнев А. И., Сердюк В. В. Усталостная долговечность и мера повреждаемости верхней зоны стенки сварных подкрановых балок // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 11. С. 34–36.
10. 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.
11. Хяутин И. Л. О недостатках подкрановых балок // Промышленное строительство. 1966. № 9. С. 13–15.
12. Железнов А. А. Местная устойчивость стенок сварных подкрановых балок с трещинами: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1996. 144 с.
13. Патрикеев А. Б. О механизме разрушения верхних участков стальных подкрановых балок // Промышленное строительство. 1971. № 5. С. 38–43.
14. Бабкин В. И. Оценка циклической трещиностойкости сварных подкрановых балок тяжелого режима работы: дис. ... канд. техн. наук. М., 1986. 164 с.
15. Бабкин В. И., Жидков К. Е., Капырин Н. В., Мерзликин А. В. К вопросу долговечности сварных подкрановых балок // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2016. № 1 (27). С. 46–49.

16. Патрикеев А. Б. Некоторые закономерности усталостных повреждений сварных подкрановых балок // Проблемы прочности. 1983. № 7. С. 19–24.

17. Васюта Б. Н. Некоторые особенности развития усталостных трещин в верхней зоне стенки сварных подкрановых балок // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2003. № 10. С. 4–13.

References

1. Artyukhov V. N., Shcherbakov E. A., Goritskiy V. M., Shneyderov G. R. *O sostoyanii podkranovykh konstruktsey korpusa konvertornogo proizvodstva OAO «Severstal»* [About the state of crane beam structures of the converter production site of JSC “Severstal”]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Construction*, 2001, no. 6, pp. 31–34.

2. Baldin V. A. *O prichinakh prezhdvremennogo vykhoda iz stroya podkranovykh balok i voprosy uluchsheniya ikh konstruktsey* [About the reasons for premature failure of crane beams and issues of improving their design]. *Promyshlennoe stroitel'stvo – Industrial Construction*, 1966, no. 10, pp. 20–22.

3. Belyaev B. I., Kornienko V. S. *Prichiny avariyy stal'nykh konstruktsey i sposoby ikh ustraneniya* [Causes of accidents of steel structures and ways of eliminating them]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 206 p.

4. Zakrevskiy M. P., et al. *Analiz predel'nykh sostoyaniy podkranovykh balok* [Analysis of limit states of crane beams]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Labor safety in industry*, 2004, no. 3, pp. 31–33.

5. Kikin A. I., et al. *Povyshenie dolgovechnosti metallicheskiykh konstruktsey promyshlennykh zdaniy* [Increasing the durability of metal structures of industrial buildings]. 2-nd ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, 302 p.

6. Kikin A. I., Egleskaln Yu. S. *Rezul'taty obsledovaniya podkranovykh konstruktsey, zaproektirovannykh po deystvuyushchim normam* [The results of the survey of the crane structures designed according to current regulations]. *Promyshlennoe stroitel'stvo – Industrial Construction*, 1968, no. 12, pp. 38–39.

7. Moskvichev V. V., Chaban E. A. *Analiz razvitiya ustalostnykh treshchin v podkranovykh balkakh* [Analysis of the development of fatigue cracks in crane beams]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 2018, vol. 84, no. 7, pp. 47–54.

8. Sergeev A. V., Shafray S. D. *Vliyanie osobennostey napryazhennogo sostoyaniya v podkranovykh balkakh na ikh prochnost' i vynoslivost'* [The influence of stress state characteristics of crane beams on their strength and

fatigue strength]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo – News of higher educational institutions. Construction*, 1997, no. 7 (463), pp. 9–12.

9. Sklyadnev A. I., Serdyuk V. V. *Ustalostnaya dolgovechnost' i mera povrezhdaemosti verkhney zony stenki svarnykh podkranovykh balok* [Fatigue strength and extent of damage to the upper zone of the welded crane beam wall]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Occupational safety in industry*, 2004, no. 11, pp. 34–36.

10. Fyn Syu-Tszyun, Lin' Sin'-Shan, Fan Tian. *Issledovanie ustalostnykh povrezhdeniy verkhney zony stenok stal'nykh podkranovykh balok* [Investigation of fatigue damage to the upper zone of the walls of steel crane beams]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Construction*, 1994, no. 11–12, pp. 33–35.

11. Khayutin I. L. *O nedostatkakh podkranovykh balok* [On the disadvantages of crane beams]. *Promyshlennoe stroitel'stvo – Industrial Construction*, 1966, no. 9, pp. 13–15.

12. Zheleznov A. A. *Mestnaya ustoychivost' stenok svarnykh podkranovykh balok s treshchinami. Diss. kand. tekhn. nauk* [Local stability of walls of welded crane beams with cracks. PhD in Sci. Tech. diss.]. Novosibirsk, 1996, 144 p.

13. Patrikeev A. B. *O mekhanizme razrusheniya verkhnykh uchastkov stal'nykh podkranovykh balok* [About the mechanism of destruction of the upper sections of steel crane beams]. *Promyshlennoe stroitel'stvo – Industrial Construction*, 1971, no. 5, pp. 38–43.

14. Babkin V. I. *Otsenkatsiklicheskoystreshchinostoykosti svarnykh podkranovykh balok tyazhelogo rezhima raboty. Diss. kand. tekhn. nauk* [Assessment of cyclic crack resistance of welded crane beams of heavy operating mode. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1986, 164 p.

15. Babkin V. I., Zhidkov K. E., Kapyrin N. V., Merzlikin A. V. *K voprosu dolgovechnosti svarnykh podkranovykh balok* [Regarding the durability of welded crane beams]. *Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Lipetsk State Technical University*, 2016, no. 1 (27), pp. 46–49.

16. Patrikeev A. B. *Nekotorye zakonomernosti ustalostnykh povrezhdeniy svarnykh podkranovykh balok* [Some regularities of fatigue failure of welded crane beams]. *Problemy prochnosti – Problems of strength*, 1983, no. 7, pp. 19–24.

17. Vasyuta B. N. *Nekotorye osobennosti razvitiya ustalostnykh treshchin v verkhney zone stenki svarnykh podkranovykh balok* [Some features of the development of fatigue cracks in the upper zone of the wall of welded crane beams]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo – News of higher educational institutions. Construction*, 2003, no. 10, pp. 4–13.