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 10.23968/1999-5571-2021-18-3-64-70

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

РАБОТА ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С УСТАЛОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ В ЗОНЕ СЖАТОГО ПОЯСА

LOAD-BEARING CAPACITY OF CRANE BEAMS WITH FATIGUE CRACKS IN THE COMPRESSED BELT ZONE

Кратко изложена методика определения критических параметров устойчивости стенок подкрановых балок с усталостными трещинами в зоне сжатого пояса. Показаны зависимости бифуркационных критических и предельных напряжений в стенке от длины трещины, ее положения в отсеке и от гибкости стенки. Приведены результаты численных исследований влияния трещин на возрастание нормальных напряжений в сжатом поясе. Предложена методика оценки местной устойчивости стенки балки с трещиной.

Ключевые слова: подкрановая балка, усталостная трещина, потеря местной устойчивости, начальные несовершенства, стенка стальной балки, напряженно-деформированное состояние балки.

The method of determining the critical parameters of stability of the crane beam walls with fatigue cracks in the compressed belt zone is briefly described. The dependences of the bifurcation critical and limit stresses in the wall on the crack length, the crack position in the section, and on the wall flexibility are shown. The results of numerical studies of the effect of cracks on the increase in normal stresses in the compressed belt are presented. A method for assessing the local stability of the beam wall with a crack is proposed.

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

Опыт эксплуатации подкрановых конструкций с мостовыми кранами тяжелого и весьма тяжелого режима работы показывает, что после относительно небольшого срока эксплуатации (от 2 до 5 лет) в них появляются первые повреждения [1–11]. Наиболее распространенными из них являются усталостные трещины в стенках балок у сжатого пояса [12, 13]. Согласно действующим нормам проектирования¹ эксплуатация балок с такими повреждениями недопустима. Однако, как показала практика обследования, подкрановые балки в большинстве случаев имеют запасы несущей способности, которые позволяют их временную эксплуатацию до ремонта или замены [12]. Для оценки влияния трещин на их несущую способность изложим предельные состояния, которые встречаются в практике эксплуатации. Они могут наступить в результате:

- потери местной устойчивости стенки;
- истощения несущей способности сжатого пояса;
- появления недопустимого вертикального прогиба.

Наиболее вероятной причиной непригодности к нормальной эксплуатации подкрановых балок с тяжелыми режимами работы кранов считается появление усталостных трещин, сопровождающееся потерей местной устойчивости стенки. В данной статье приводятся результаты исследований влияния усталостных трещин на местную устойчивость поврежденной стенки и на несущую способность сжатого пояса.

Для определения напряженно-деформированного состояния балки проводились численные исследования методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Общий алгоритм численных исследо-

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

ваний устойчивости стенок балок с трещинами приведен в работе [14]. Типовая расчетная схема фрагмента балки с нагрузками приведена на рис. 1.

На первом этапе в [14] по результатам линейного расчета местной устойчивости стенки по МКЭ (модуль Eigenvalue Buckling) определены бифуркационные критические напряжения и найдена первая форма потери местной устойчивости стенки, в соответствии с которой будут задаваться начальные геометрические несовершенства в виде погибей. На рис. 2 приведен пример решения бифуркационной задачи местной устойчивости стенки при чистом изгибе, ординаты изолиний — в безразмерных величинах, за 1 принята ордината точки с максимальным отклонением.

На втором этапе решается деформационная задача устойчивости с учетом геометрических несовершенств в виде начальных погибей стенки, принятых по первой форме потери местной устойчивости. Начальные погиби являются причиной того, что стенка начинает деформироваться сразу после приложения нагрузки. Для упругих систем, имеющих начальные несовершенства, до определенного уровня загрузки дополнительные деформации невелики, а после достижения этого уровня деформации начинают ускоренно расти (рис. 3).

Предельные критические параметры устойчивости стенки, имеющей начальные несовершенства, определялись с помощью графика $\Delta f - \sigma(\tau)$ (зависимость критических параметров напряжений в стенке от ее деформаций из пло-

Рис. 1. Расчетная схема фрагмента подкрановой балки с приложенными нагрузками

Рис. 2. Формы потери местной устойчивости стенки: а — в изополях; б — в изолиниях

Рис. 3. Деформации из плоскости и соответствующие им критические напряжения стенки балки при ступенчатом нагружении

скости) по рис. 3. За критические принимались напряжения, при которых тангенс угла наклона касательной (α_{cr}) составлял не более 1–1,5 % от тангенса угла наклона касательной на первой ступени нагружения (α_0).

На графике (рис. 4) приведено сравнение бифуркационных критических и предельных деформационных критических напряжений стенок балок без трещины в зависимости от ее гибкости. Для того чтобы совместно оценить снижение критических параметров устойчивости, здесь и далее зависимости напряжений приводятся

в относительных величинах $\bar{\sigma}_{cr,bf} = \sigma_{cr,bf} / \sigma_{cr}^*$ и $\bar{\sigma}_{cr} = \sigma_{cr} / \sigma_{cr}^*$ (касательные напряжения τ — аналогично), где σ_{cr}^* и τ_{cr}^* — предельные деформационные критические напряжения стенки при гибкости $\lambda_w = 100$.

Заметно влияние начальных геометрических несовершенств на снижение критических параметров устойчивости стенки. При гибкости $\lambda_w = 100$ отличие между критическими параметрами нормальных напряжений составляет 7 %, между параметрами касательных напряжений — 11 %. При гибкости $\lambda_w = 140$ отличия составляют соответственно 8 и 10 %.

Покажем влияние трещин на снижение устойчивости стенки. Для этого решим бифуркационные и деформационные (с учетом геометрических несовершенств) задачи устойчивости стенок при различном положении и длине трещины в отсеке по аналогии с расчетом балок без трещины. На графиках (рис. 5–6) приведены зависимости бифуркационных и предельных деформационных критических параметров устойчивости стенки в зависимости от длины трещины, ее положения в отсеке и гибкости стенок. Сплошной линией показаны зависимости деформационных критических параметров, пунктирной — бифуркационных.

Видно, что трещины весьма существенно влияют на снижение критических параметров

Рис. 4. Зависимости критических параметров напряжений от гибкости стенки:
а — при чистом изгибе; б — при чистом сдвиге

Рис. 5. Зависимости бифуркационных и деформационных критических напряжений стенки при чистом изгибе с трещиной: а — посередине отсека; б — у ребра жесткости

Рис. 6. Зависимости бифуркационных и деформационных критических напряжений стенки при чистом сдвиге с трещиной: а — посередине отсека; б — у ребра жесткости

устойчивости стенки. Характер снижения критических напряжений при различном положении трещины однородный.

На примере расчета стенки с гибкостью $\lambda_w = 100$ покажем влияние трещин на снижение критических параметров устойчивости при совместном действии нормальных и касательных напряжений. Границы областей устойчивости

стенки в зависимости от длины трещины и ее положения в отсеке приведены на рис. 7.

Границы областей устойчивости при двухпараметрическом нагружении в целом соответствуют фрагментам эллипсов с центром в начале координат. Для оценки местной устойчивости стенки с усталостной трещиной предлагается пользоваться формулой (40) СП 16.13330.2017 с корректировкой критических параметров на

Рис. 7. Границы областей устойчивости стенки с гибкостью $\lambda_w = 100$ в зависимости от длины трещины при ее положении: а — посередине отсека; б — у ребра жесткости

пряжений коэффициентами устойчивости стенки $c_{\text{тр}1}$ и $c_{\text{тр}2}$ в зависимости от длины трещины. Тогда формула проверки устойчивости приобретает вид

$$\frac{1}{\gamma_c} \sqrt{\left(\frac{\sigma}{c_{\text{тр}1}\sigma_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{c_{\text{тр}2}\tau_{cr}}\right)^2} \leq 1. \quad (1)$$

Рассмотрим влияние трещин на увеличение нормальных напряжений в сжатом поясе из предположения его полной работы при восприятии изгибающих моментов. Характерные эпюры действующих напряжений в сечении с трещиной приведены на рис. 8, пунктирной линией обозначены аналогичные напряжения в эталонном сечении без трещины.

При чистом изгибе в сечении с трещиной существенно снижаются нормальные напряжения по высоте сжатой части стенки, в месте трещины нормальные напряжения нулевые, нейтральная ось балки смещается в сторону растянутого пояса, увеличиваются напряжения в сжатом поясе. Для оценки влияния трещин на изменение НДС балки при чистом изгибе фиксировались средние нормальные напряжения, действующие в сжатом поясе, $\sigma_{f, \text{тр}}$.

Во всех случаях напряжения в поясе и стенке фиксируются в среднем сечении отсека с трещиной. На графиках (рис. 9) приведены зависимости относительных параметров напряжений

от длины трещины. Для удобства анализа зависимости приведены в относительных параметрах $\bar{\sigma}_{f, \text{тр}} = \sigma_{f, \text{тр}}/\sigma_f$, где σ_f — средние напряжения в сжатом поясе.

По мере развития трещины в сжатом поясе растут нормальные напряжения, общий характер полученных зависимостей мало зависит от гибкости и положения трещины в отсеке. Необходимо учитывать эти изменения при оценке местной устойчивости стенки. Общий вид формулы оценки местной устойчивости приобретает следующий вид:

Рис. 8. Эпюры напряжений в сечении с трещиной: а — нормальных; б — касательных

Рис. 9. Зависимости нормальных напряжений в поясе при чистом изгибе с трещиной: а — посередине отска; б — у ребра жесткости

$$\frac{1}{\gamma_c} \sqrt{\left(\frac{\sigma}{c_{f1} c_{tr1} \sigma_{cr}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{c_{tr2} \tau_{cr}} \right)^2} \leq 1, \quad (2)$$

где c_f — понижающий коэффициент к критическим нормальным напряжениям, учитывающий увеличение воспринимаемой нагрузки сжатым поясом (обратный $\sigma_{f,тр}/\sigma_f$ по рис. 9).

Выводы

Полученные результаты могут быть использованы при оценке местной устойчивости стенок балок с усталостной трещиной в зоне сжатого пояса. Однако они являются предварительными, поскольку в действительной работе отделяющегося от стенки сжатого пояса длиной $l_{тр}$ должны учитываться несовершенства крепления поддерживающего его рельса, влияние изгибных усилий из плоскости пояса и крутящих моментов, возникающих вследствие эксцентрисичности рельса.

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 // Про-

мышленное и гражданское строительство. 1994. № 11–12. С. 33–35.

11. Хаяутин 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. Кубасевич А. Е. Устойчивость стенок подкрановых балок с усталостными трещинами в зоне сжатого пояса // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 47–53.

References

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

2. Baldin V. A. *O prichinakh prezhdavremennogo vykhoda iz stroya podkranovykh balok i voprosy uluchsheniya ikh konstruktсий* [Regarding the causes of 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 avariystal'nykh konstruktсий i sposoby ikh ustraneniya* [The causes of accidents in steel structures and ways to eliminate them]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 206 p.

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

5. Kikin A. I., et al. *Povyshenie dolgovechnosti metallicheskiy konstruktсий promyshlennykh zdaniy* [Improving 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 konstruktсий, zaproektirovannykh po deystvuyushchim normam* [Results of the survey of

crane structures designed according to currently valid standards]. *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 fatigue crack propagation 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. *Vliyaniye osobennostey napryazhennogo sostoyaniya v podkranovykh balkakh na ikh prochnost' i vyнослиvost'* [The influence of stress state features in crane beams on their strength and endurance]. *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 durability and the measure of damage to the upper zone of the wall of welded crane beams]. *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 in the upper zone of the walls of steel crane beams]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 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 the walls of welded crane beams with cracks. PhD in Sci. Tech. diss.]. Novosibirsk, 1996, 144 p.

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

14. Kubasevich A. E. *Ustoychivost' stenok podkranovykh balok s ustalostnymi treshchinami v zone szhatogo poyasa* [Stability of the crane beam walls with fatigue cracks in the zone of the compressed belt]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 4 (81), pp. 47–53.