

Влияние усталостных трещин в стенке на прочность подкрановых балок

Григорий Иванович Белый, Антон Евгеньевич Кубасевич

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. На промышленных производствах с мостовыми кранами тяжелого и весьма тяжелого режимов работы подкрановые балки эксплуатируются с повреждениями, значительную часть которых составляют усталостные трещины в стенке. При этом во многих случаях поврежденные подкрановые балки имеют запасы несущей способности, которые при начальной стадии развития трещин позволяют временно их эксплуатировать до ремонта или замены. Оценка влияния таких повреждений на прочность подкрановых балок в этих условиях становится актуальной.

Материалы и методы. Для исследования напряженно-деформированных и предельных состояний подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке применен метод численного моделирования с использованием конечно-элементного программного комплекса ANSYS. Анализ напряженно-деформированных состояний балок проведен в сечениях, соответствующих середине трещины, и в смежных с поврежденным отсеках.

Результаты. Выявлены качественные и количественные зависимости изменения напряженно-деформированных и предельных состояний подкрановых балок от длины трещины, ее положения в отсеке при раздельном действии изгибающего момента и поперечной силы, а также при их совместном действии. Показано, что такое ослабление стенки приводит к существенной перегрузке сжатого пояса. Даны рекомендации по торможению развития трещин, позволяющие повысить эксплуатационную пригодность конструкции.

Выводы. Предложены рекомендации по практическому расчету подкрановых балок на прочность с введением коэффициентов влияния трещины и алгоритм определения предельной длины трещины. Отмечена важность дальнейшего исследования влияния дефектов крепления рельса к поясу на несущую способность поврежденной балки. При этом необходима статистическая обработка величин отклонений геометрических несовершенств, приобретенных в процессе эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подкрановая балка, усталостная трещина, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, геометрические несовершенства, устойчивость стенки, прочность поврежденной балки

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Белый Г.И., Кубасевич А.Е. Влияние усталостных трещин в стенке на прочность подкрановых балок // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1780–1790. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1780-1790

Автор, ответственный за переписку: Антон Евгеньевич Кубасевич, antunemio@yandex.ru.

Effect of fatigue cracks in the wall on the strength of crane beams

Grigory I. Belyy, Anton E. Kubasevich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In industrial plants with overhead cranes of heavy and very heavy modes of operation, crane beams are operated with damage, a significant part of which are fatigue cracks in the wall. At the same time, in many cases, damaged crane beams have reserves of bearing capacity, which, at the initial stage of crack development, allow their temporary operation until repair or replacement. Assessment of the effect of fatigue cracks on the strength of crane beams under these conditions becomes actual.

Materials and methods. To study the stress-strain and limit states of crane beams with fatigue cracks in the wall, the method of numerical modelling using the finite element software complex ANSYS is used. The analysis of the stress-strain states of the beams was carried out in the sections corresponding to the crack centre and in the adjacent to the damaged compartments.

Results. Qualitative and quantitative dependences of changes in the stress-strain and limit states of crane beams on the crack length, its position in the compartment under separate action of bending moment and transverse force, as well as their joint action are revealed. It is shown that the weakening of the wall by a fatigue crack leads to significant overload of the compressed girdle. Recommendations on inhibition of crack development, allowing to increase serviceability of the structure.

Conclusions. Recommendations on practical calculation of crane beams for strength with the introduction of crack influence coefficients and an algorithm for determining the maximum crack length are proposed. The importance of further investigation of the effect of defects of rail to girder fastening on the bearing capacity of the damaged beam is noted. At the same time, statistical processing of deviation values of geometric imperfections acquired in the course of operation is necessary.

KEYWORDS: crane beam, fatigue crack, numerical modelling, stress-strain state, geometric imperfections, wall stability, strength of the damaged beam

FOR CITATION: Belyy G.I., Kubasevich A.E. Effect of fatigue cracks in the wall on the strength of crane beams. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1780-1790. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1780-1790 (rus.).

Corresponding author: Anton E. Kubasevich, antunemio@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ обследований производственных зданий с мостовыми кранами тяжелого и весьма тяжелого режимов работы показывает, что подкрановые балки эксплуатируются с повреждениями, значительную часть которых (90–95 % от общего количества) составляют усталостные трещины в стенке [1–3]. При этом следует заметить, что первые повреждения могут появиться в течение 2–5 лет после ввода конструкций в эксплуатацию.

Трещины в стенке у сжатого пояса могут возникнуть по ряду причин [4–6]:

- микродефекты в сварных швах;
- концентраторы напряжений в местах крепления конструктивных элементов;
- несовершенства геометрии элементов балок;
- значительные эксцентриситеты рельса, приводящие к увеличению крутящих моментов (рис. 1);
- перекосы кранов;
- повреждения креплений рельсов к подкрановым балкам и др.

Анализ исследований, посвященных таким конструкциям, позволяет выделить следующие группы подходов к оценке их эксплуатационной пригодности:

- вероятностный подход [7];
- определение остаточного ресурса подкрановой балки с использованием критериев механики разрушения [8];
- оценка эксплуатационной пригодности подкрановых балок с усталостными трещинами на основе их фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) [9].

Значительная часть исследований относится ко второй группе, из которых необходимо отметить: экспериментальное изучение циклической трещиностойкости [10–12], исследование усталостной долговечности [13, 14] и прочности подкрановых балок [15, 16].

Как указано в работах [7, 17, 18], во многих случаях поврежденные подкрановые балки имеют запасы несущей способности, которые при начальной стадии развития трещин дают возможность их временно эксплуатировать до ремонта или замены. Однако имеющиеся в литературе результаты исследования не позволяют достоверно принимать такие решения при выявленных длинах трещин. Таким образом, исследование влияния усталостных трещин в стенке на прочность подкрановых балок является актуальным.

В настоящей работе предложена методика расчета поврежденных балок на прочность; получены зависимости снижения несущей способности балок от длины трещины и ее положения в отсеке при чистом изгибе и сдвиге; представлены рекомендации по временной эксплуатации поврежденной конструкции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования представляет собой подкрановую балку симметричного двутаврового сечения, эксплуатируемую на производстве с кранами тяжелого и весьма тяжелого режимов работы, имеющую горизонтальные усталостные трещины в стенке у сжатого пояса.

По мере роста трещины в поврежденной части балки существенно изменяется характер НДС, который сопровождается изменением формы деформирования запредельно работающей стенки. Большое влияние оказывают и геометрические несовершенства стенки и сжатого пояса [19, 20]. Учитывая изложенное, исследование НДС таких конструкций проводилось методом численного моделирования с помощью конечно-элементного программного комплекса ANSYS.

Сварные подкрановые балки, как известно, относятся к 1-й группе стальных конструкций, расчет которых выполняется в упругой стадии работы материала. Подбор параметров сечений балок для выполнения численных исследований осуществлялся на основе анализа характеристик эксплуатируемых балок, при этом гибкости стенок были приняты трех типов $\lambda_w = \{100; 120; 140\}$, условные значения которых охватывают широкий спектр запроектированных балок. Принятые геометрические габариты

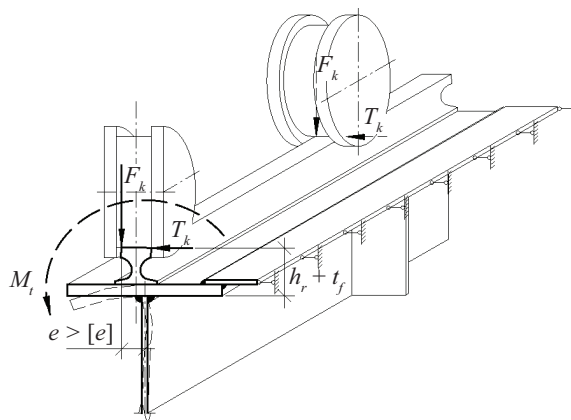


Рис. 1. Действительная схема локальных нагрузок на подкрановую балку

Fig. 1. Actual scheme of local loads on the crane beam

Табл. 1. Геометрические характеристики исследуемых подкрановых балок

Table 1. Geometric characteristics of the crane beams under study

Марка балки Beam grade	Размеры сечения, мм Cross-section dimensions, mm		$\lambda_w = h_w / t_w$	$\bar{\lambda}_w = \lambda_w \sqrt{R_y / E},$ $R_y = 350 \text{ МПа} / \text{МПа}$
	поясы girdles	стенки walls		
ПБ1 CB1	−280 × 14	−900 × 9	100	4,12
ПБ2 CB1	−300 × 14	−1080 × 9	120	4,95
ПБ3 CB1	−320 × 14	−1260 × 9	140	5,77

сечений имеют характеристики, близкие к типовым подкрановым балкам, которые приведены в табл. 1. Поперечные ребра жесткости установлены с шагом 1,5 м. Трещина моделировалась как «разрыв» между стенкой и сжатым поясом, позволяющий свободно перемещаться верхней грани стенки относительно сжатого пояса.

Трещины в стенке по их геометрическому расположению в отсеке можно разделить на несколько типов: внутри отсека балок, вблизи ребер жесткости, а также проходящие через них в нескольких отсеках (см. рис. 2). В настоящей работе рассматривались наиболее часто встречающиеся положения трещин: посередине отсека и у ребра жесткости.

С целью получения действительной картины НДС в рассматриваемой зоне нагрузка прикладывалась по краям фрагмента балки, состоящего из трех отсеков, средний из которых имел усталостную трещину. Общий вид расчетной модели, нагруженной распределенной по торцам нагрузкой по формам напряжений от действия изгибающего момента и поперечной силы, приведен на рис. 3.

Вид конечно-элементной расчетной модели фрагмента балки с трещиной показан на рис. 4. Для

более точного определения напряжений при расчете конструкций методом конечных элементов использовались восьмиузловые оболочечные конечные элементы (КЭ) типа SHELL281.

Алгоритм решения поставленной задачи разделяется на два этапа:

- определение форм начальных геометрических несовершенств поврежденной подкрановой балки (стенки и сжатой полки);
- решение деформационной задачи поврежденного фрагмента балки (с учетом геометрической нелинейности).

Изменение НДС поврежденных подкрановых балок устанавливалось в сечениях, соответствующих середине трещины, и в смежных с поврежденным отсеком. Выявленные в процессе обследования трещины имеют фиксированную длину, поэтому вопрос механизма их образования и кинетики развития в настоящей работе не рассматривался.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По разработанному алгоритму определялось снижение несущей способности поврежденных подкрановых балок с учетом геометрических несо-

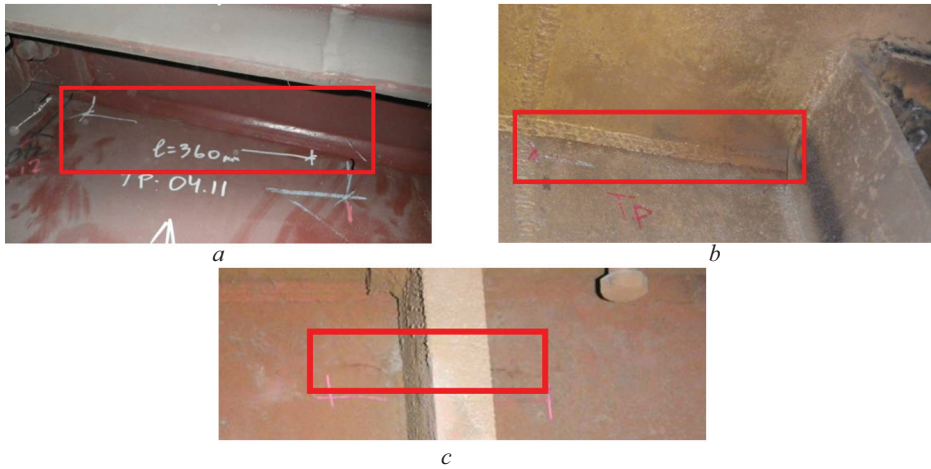


Рис. 2. Фотофиксация дефектов подкрановых балок в виде усталостных трещин: а — посередине отсека; б — по поясному шву у ребра жесткости; с — проходящей через ребро жесткости в двух соседних отсеках

Fig. 2. Photofixation of crane beam defects in the form of fatigue cracks: a — in the middle of the compartment; b — along the belt seam at the stiffening rib; c — passing through the stiffening rib in two adjacent compartments

вершенств при раздельном и совместном действии изгибающего момента и поперечной силы.

Прочность подкрановой балки с усталостной трещиной в стенке при действии изгибающего момента

В работах [9, 21] было показано, что при появлении усталостной трещины ослабление стенки приводит к существенной перегрузке сжатого пояса, усилие в котором возрастает до 15 %. При этом в растянутом — до 5 %, а момент, воспринимаемый стенкой, уменьшается до 20 %. Следовательно, общая несущая способность подкрановых балок с усталостными трещинами при воздействии изгибающего момента в большей степени определяется несущей способностью сжатого пояса. На рис. 5, а–с показаны соответственно схема поврежденного отсека, сечение с трещиной и характерная эпюра действующих нормальных напряжений.

Исследование проводилось с учетом геометрических несовершенств стенки и сжатого пояса, начальные значения которых принимались по техническим условиям на стальные конструкции¹.

¹ ГОСТ 23118–2019. Конструкции стальные строительные. Общие технические условия. М. : Стандартинформ, 2020. 40 с.

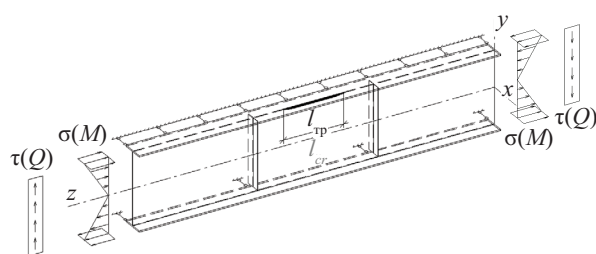


Рис. 3. Общий вид расчетной модели подкрановой балки с граничными условиями и нагрузкой

Fig. 3. General view of the crane beam design model with boundary conditions and loading

При этом следует заметить, что во многих случаях фактические значения отклонений поврежденных конструкций значительно превышают допустимые в ГОСТ [17], что необходимо учитывать при проверке прочности балок.

На первом этапе оценивалось влияние трещин на увеличение напряжений в сжатом поясе при действии изгибающего момента с учетом несовершенств. В табл. 2 показано возрастание относительных нормальных напряжений в сжатом поясе $\bar{\sigma}_{f,тр} = \sigma_{f,тр} / \sigma_f$ (σ_f — напряжение в поясе балки

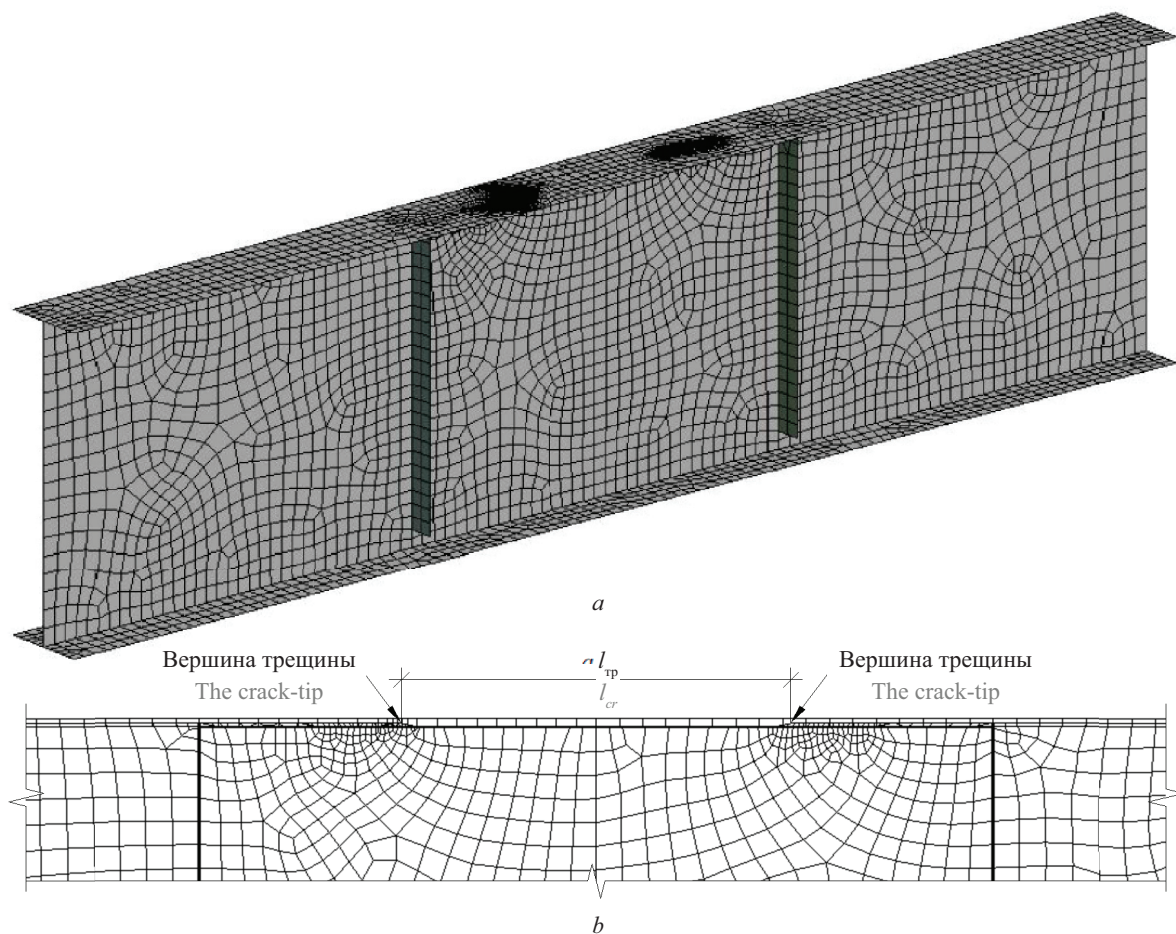


Рис. 4. Конечно-элементная модель балки: а — общий вид; б — фрагмент КЭ модели с утончением сетки в зоне трещины
Fig. 4. Finite element model of the beam: а — general view; б — fragment of the FE model with increasing mesh in the crack zone

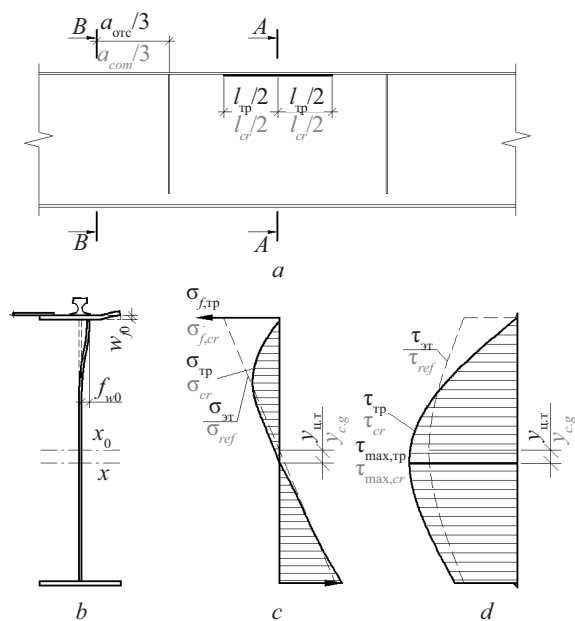


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние балки при изгибе: а — схема поврежденного отсека; б — сечение с трещиной; в — эпюра нормальных напряжений; д — эпюра касательных напряжений

Fig. 5. Stress-strain state of the beam during bending: а — diagram of the damaged compartment; б — section with a crack; в — epure of normal stresses; д — epure of tangential stresses

без трещины) в зависимости от условной гибкости стенки и длины трещины. При положении трещины посередине отсека $\bar{\sigma}_{f,тр}$ приведены в числителе, а у ребра жесткости — в знаменателе.

Прочность при действии поперечной силы

Влияние трещины на изменение напряженно-деформированных состояний, вызванных поперечной силой, определялось с учетом несовершенств в виде местных выпучиваний по форме потери устойчивости стенки с трещиной. Эпюра касатель-

ных напряжений в сечении А-А, соответствующем середине трещины, показана на рис. 5, д.

Результаты исследований сведены в табл. 3, в которой $\bar{\tau}_{max,тр} = \tau_{max,тр} / \tau_{max}$ (τ_{max} — максимальные касательные напряжения неповрежденной стенки).

Как видно из табл. 2, 3, по мере роста трещины в сечении А-А существенно возрастают нормальные напряжения в сжатых поясах и максимальные касательные в стенках, которые достигают 26,2 и 20,7 % соответственно. При этом с увеличением гибкости стенки нормальные напряжения в поясе возрастают, а касательные в стенке — уменьшаются.

Прочность при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы

Исследование проводилось выборочно для подкрановых балок со средним значением условной гибкости ($\bar{\lambda}_w = 4,95$) при различных соотношениях момента и поперечной силы. Было выявлено, что зависимости увеличения напряжений $\bar{\sigma}_{f,тр}$ и $\bar{\tau}_{max,тр}$ — линейные, увеличение нормальных напряжений в сжатом поясе до +4,4 %, максимальных касательных в стенке до +3,0 %, что учитывается при разработке практических рекомендаций.

Практические рекомендации по расчету подкрановых балок с усталостными трещинами

С целью удобства практического расчета полученные результаты увеличения относительных нормальных в сжатом поясе $\bar{\sigma}_{f,тр}$ и касательных в стенке $\bar{\tau}_{max,тр}$ напряжений с учетом взаимного влияния изгибающего момента и поперечной силы приведены в табл. 4, 5 к обратным их значениям в виде коэффициентов $c_{f,тр}$, $c_{w,тр}$.

Тогда проверку прочности можно выполнить по рекомендациям СП 16.13330² с введением новых

² СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81*. М. : ФГУП ЦПП, 2017. 147 с.

Табл. 2. Относительные нормальные напряжения в сжатом поясе при наличии трещины с учетом геометрических несовершенств поврежденной балки

Table 2. Relative normal stresses in the compressed girder in the presence of a crack, taking into account geometric imperfections of the damaged beam

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$ $\bar{l}_{cr} = l_{cr} / a_{ком}$	Значения $\bar{\sigma}_{f,тр}$ в сечениях А-А и В-В при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной Values $\bar{\sigma}_{f,cr}$ in sections А-А and В-В with $\bar{\lambda}_{w,cr}$, equal					
	4,12		4,95		5,77	
	А-А	В-В	А-А	В-В	А-А	В-В
0,25	<u>1,088</u> 1,080	<u>1,000</u> 0,999	<u>1,104</u> 1,084	<u>0,998</u> 0,989	<u>1,130</u> 1,088	<u>0,997</u> 0,998
0,50	<u>1,108</u> 1,096	<u>0,997</u> 0,999	<u>1,129</u> 1,110	<u>0,995</u> 0,998	<u>1,153</u> 1,126	<u>0,994</u> 0,999
0,75	<u>1,163</u> 1,151	<u>0,992</u> 0,998	<u>1,194</u> 1,175	<u>0,990</u> 0,995	<u>1,219</u> 1,199	<u>0,989</u> 0,997
1,00	1,206	0,994	1,238	0,990	1,262	0,991

Табл. 3. Относительные касательные напряжения стенки с трещиной с учетом геометрических несовершенств поврежденной балки

Table 3. Relative tangential stresses of the cracked wall taking into account geometric imperfections of the damaged beam

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$ $\bar{l}_{cr} = l_{cr} / a_{com}$	Значения $\bar{\tau}_{max,тр}$ в сечениях $A-A$ и $B-B$ при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной Values $\bar{\tau}_{max,cr}$ in sections $A-A$ and $B-B$ with $\bar{\lambda}_{w,cr}$, equal					
	4,12		4,95		5,77	
	$A-A$	$B-B$	$A-A$	$B-B$	$A-A$	$B-B$
0,25	<u>1,063</u> 1,106	<u>1,000</u> 1,023	<u>1,063</u> 1,138	<u>1,004</u> 1,004	<u>1,053</u> 1,162	<u>1,047</u> 1,002
0,50	<u>1,101</u> 1,110	<u>1,000</u> 1,026	<u>1,082</u> 1,139	<u>0,998</u> 1,009	<u>1,075</u> 1,170	<u>0,997</u> 0,991
0,75	<u>1,165</u> 1,149	<u>1,004</u> 1,034	<u>1,140</u> 1,160	<u>1,007</u> 1,018	<u>1,126</u> 1,171	<u>0,982</u> 0,983
1,00	1,207	1,043	1,190	1,038	1,179	0,992

данных о влиянии трещины:

$$\frac{M_x}{c_{f,тр} I_x R_y \gamma_c} y \pm \frac{M_y}{I_y R_y \gamma_c} x \leq 1; \tag{1}$$

$$\frac{QS}{c_{w,тр} I_x t_w R_s \gamma_c} \leq 1. \tag{2}$$

Зная фактические параметры поврежденных подкрановых балок и места возникновения трещин, с по-

мощью разработанной инженерной методики оценки прочности можно определить предельную длину трещины $[\bar{l}_{тр}]$ по алгоритму, показанному на рис. 6.

Методы повышения эксплуатационной пригодности подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке

Способом повышения эксплуатационной пригодности поврежденных подкрановых балок является локализация имеющихся трещин и снижение

Табл. 4. Значения понижающих коэффициентов влияния трещины $c_{f,тр}$

Table 4. Values of the reducing coefficients of the crack effect $c_{f,cr}$

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$ $\bar{l}_{cr} = l_{cr} / a_{com}$	Значения $c_{f,тр}$ при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной $c_{f,cr}$ values when $\bar{\lambda}_{w,cr}$ is equal to		
	4,12	4,95	5,77
0,00	1,000	1,000	1,000
0,25	<u>0,880</u> 0,887	<u>0,868</u> 0,883	<u>0,847</u> 0,880
0,50	<u>0,865</u> 0,874	<u>0,848</u> 0,863	<u>0,831</u> 0,851
0,75	<u>0,823</u> 0,832	<u>0,802</u> 0,815	<u>0,786</u> 0,799
1,00	0,794	0,774	0,759

Табл. 5. Значения понижающих коэффициентов влияния трещины $c_{w,тр}$

Table 5. Values of the reducing coefficients of the crack effect $c_{w,cr}$

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$ $\bar{l}_{cr} = l_{cr} / a_{com}$	Значения $c_{w,тр}$ при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной $c_{w,cr}$ values when $\bar{\lambda}_{w,cr}$ is equal to		
	4,12	4,95	5,77
0,00	1,000	1,000	1,000
0,25	<u>0,913</u> 0,878	<u>0,913</u> 0,853	<u>0,922</u> 0,836
0,50	<u>0,882</u> 0,875	<u>0,897</u> 0,852	<u>0,903</u> 0,830
0,75	<u>0,833</u> 0,845	<u>0,852</u> 0,837	<u>0,863</u> 0,829
1,00	0,804	0,816	0,823

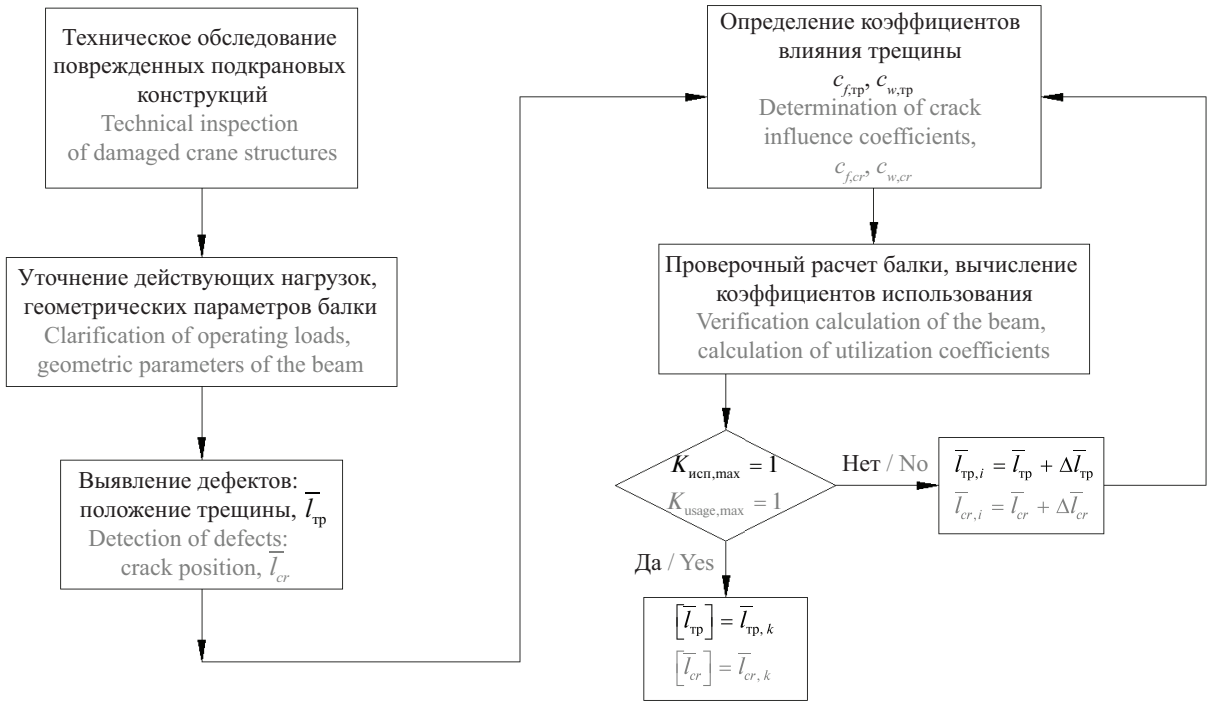


Рис. 6. Алгоритм определения предельной длины трещины
Fig. 6. Algorithm for determining the ultimate crack length

скорости их развития, для замедления которой можно выделить следующие методы³ [9]:

1. Эксплуатационно-технический. Метод заключается в систематическом снижении нагрузок на подкрановые балки. Некоторые из принимаемых мероприятий: ограничение грузоподъемности кранов, изменение технологической схемы работы тележки и кранов в пролете и др.

³ СТО 22-15-06. Временные методические указания по техническому надзору за эксплуатацией подкрановых балок с усталостными трещинами в верхней зоне стенки. Новосибирск : НГАСУ Сибстрин, 2007. 81 с.

2. Технологический, в рамках которого осуществляется обработка зоны трещины с целью устранения самой трещины и/или уменьшения концентрации напряжений в области ее вершин. При этом необходимо избегать простую заварку трещин. Варианты технологических мероприятий могут также включать: поверхностный наклеп стенки балки вблизи трещины (рис. 7, а), рассверловку вершин трещин с последующей постановкой высокопрочных болтов (рис. 7, б) и др.

3. Конструктивный метод предполагает устройство новых элементов в подкрановые балки с целью снижения напряжений в месте трещины. Примеры

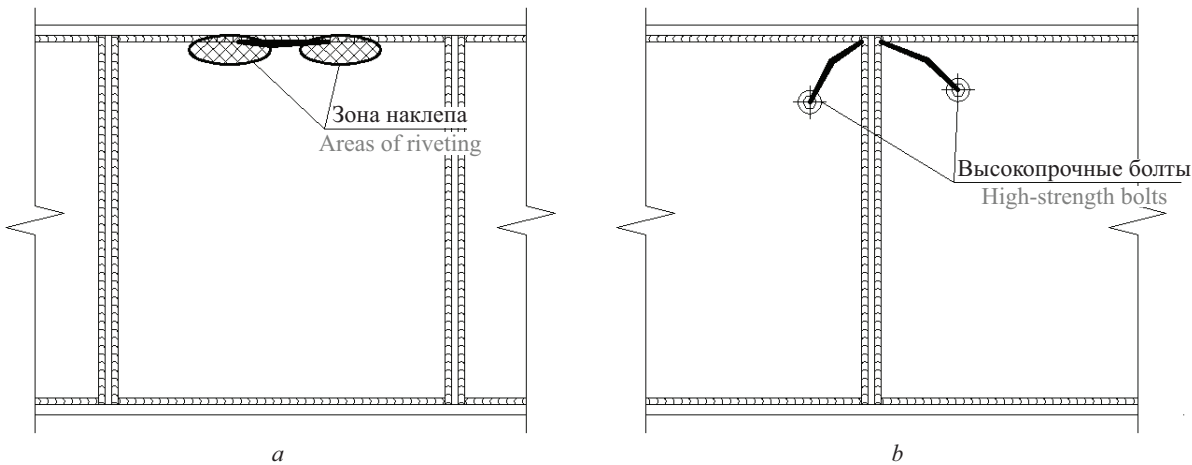


Рис. 7. Технологическое торможение развития усталостных трещин в стенке: а — методом наклепа сварного шва; б — засверловкой трещины с постановкой высокопрочного болта

Fig. 7. Technological inhibition of fatigue cracks development in the wall: а — by weld riveting method; б — by drilling out the crack with high-strength bolt placement

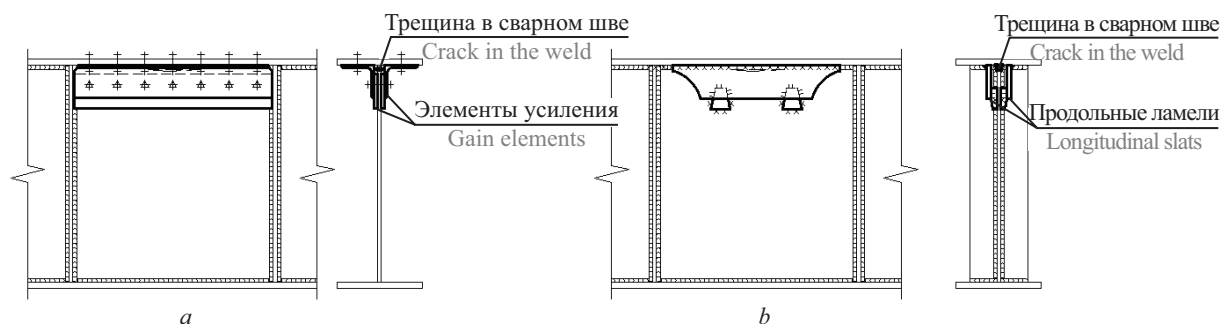


Рис. 8. Конструктивное торможение развития усталостных трещин в стенке с установкой: *a* — усиливающих угловых элементов с креплением высокопрочными болтами; *b* — продольных ламелей и элементов, связывающих ламели со стенкой

Fig. 8. Constructive inhibition of the development of fatigue cracks in the wall with the installation: *a* — reinforcing corner elements with fastening with high-strength bolts; *b* — longitudinal lamellae and elements connecting the lamellae to the wall

конструктивных мероприятий: устройство угловых усиливающих элементов с креплением их высокопрочными болтами или на сварке к поясу и стенке (рис. 8), увеличение сечений элементов [22], введение дополнительных промежуточных опор [23] и др.

4. Комбинированный заключается в совместном использовании упомянутых ранее методов, что обеспечивает наиболее эффективный результат. При обосновании возможности временной эксплуатации поврежденных подкрановых балок желательно применять указанный метод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выявлены качественные и количественные зависимости снижения несущей способности поврежденных балок в зависимости от гибкости стенки, длины усталостной трещины и ее положения при совместном действии изгибающего момента и попе-

речной силы, и показано, что ослабление приводит к весьма существенной перегрузке сжатого пояса. Нормальные напряжения в сжатых поясах увеличиваются до 26,2 %, а максимальные касательные в стенках до 20,7 %. Полученные результаты дали возможность разработать рекомендации по расчету поврежденных подкрановых балок на прочность. Даны рекомендации по торможению развития трещин, позволяющие повысить эксплуатационную пригодность конструкции.

Перспективой дальнейшей разработки темы может являться исследование влияния дефектов крепления рельса к сжатому поясу на несущую способность поврежденной балки со статистической обработкой величин отклонений при эксплуатации. Данное направление актуально, поскольку указанные величины прямым образом влияют на снижение несущей способности поврежденной подкрановой балки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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. 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. EDN VSSNKT.
3. Еремин К.И., Нащекин М.В., Марков К.В., Горбунов А.Г. Повреждаемость подкрановых балок предприятий металлургической и горнорудной промышленности // Наука и безопасность. 2015. № 3 (16). С. 59–77. EDN TYNUTT.
4. 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. EDN JVVWQP.
5. Такки В.Ф., Егоров И.Ф., Туснина О.А. Повышение эксплуатационного ресурса подкрановых балок // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 12. С. 61–67. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.61-67. EDN UIUJGJ.
6. 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.
7. Васюта Б.Н., Крылов И.И., Кукушко С.С. К вопросу определения параметров остаточного ресурса сварных подкрановых балок с усталостными повреждениями // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2006. № 6 (570). С. 114–120. EDN GZQGFV.

8. Москвичев В.В., Чабан Е.А. Анализ развития усталостных трещин в подкрановых балках // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 7. С. 47–54. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-47-54

9. Кубасевич А.Е. Напряженно-деформированные и предельные состояния подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2023. 165 с.

10. Dong S.E., Chen Q. Probe on the stress of the support crack of welded crane beams // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 501–504. Pp. 710–716. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.710

11. Rettenmeier P., Roos E., Weihe S. Fatigue analysis of multiaxially loaded crane runway structures including welding residual stress effects // International Journal of Fatigue. 2016. Vol. 82. Pp. 179–187. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.04.009

12. Wardenier J., de Vries P., Timmerman G. Fatigue behaviour of a welded I-section under a concentrated compression (wheel) load // Journal of Constructional Steel Research. 2018. Vol. 140. Pp. 163–173. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.10.027

13. Ávila G., Palma E., De Paula R. Crane girder fatigue life determination using SN and LEFM methods // Engineering Failure Analysis. 2017. Vol. 79. Pp. 812–819. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.05.027

14. Rykaluk K., Marcinczak K., Rowicki S. Fatigue hazards in welded plate crane runway girders — locations, causes and calculations // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018. Vol. 18. Issue 1. Pp. 69–82. DOI: 10.1016/j.acme.2017.05.003

15. Xu B., Wu Q. Stress fatigue crack propagation analysis of crane structure based on acoustic emission // Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 109. P. 104206. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104206

16. Zai J., Cao J., Bell A.J. The fatigue strength of box girders in overhead travelling cranes // Journal of the Institution of Structural Engineers. 1994. Vol. 72. Issue 23. Pp. 401–405.

17. Веселов В.В. Оценка работоспособности эксплуатируемых стальных подкрановых балок : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2005. 267 с.

18. Маркеев В.С., Борков П.В. Прогнозирование остаточного ресурса металлических подкрановых балок промышленных зданий длительного срока эксплуатации // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. № 10. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-10-8-16. EDN KBOFRU.

19. Graciano C., Casanova E., Martínez J. Imperfection sensitivity of plate girder webs subjected to patch loading // Journal of Constructional Steel Research. 2011. Vol. 67. Issue 7. Pp. 1128–1133. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.02.006

20. Kulka J., Mantic M., Fedorko G., Molnar V. Analysis of crane track degradation due to operation // Engineering Failure Analysis. 2016. Vol. 59. Pp. 384–395. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.009

21. Белый Г.И., Кубасевич А.Е. Несущая способность подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 2 (91). С. 24–29. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-24-29. EDN WCKLTW.

22. Рафиев А.К., Марамоу Ф.Б. Усиление подкрановых балок методом увеличения сечений // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2020. № 1 (49). С. 143–150. EDN CXCLUX.

23. Рафиев А.К., Ашууров И.Ш. Усиление подкрановых балок методом изменения конструктивной схемы // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2020. № 3 (51). С. 99–107. EDN IBHRWU.

Поступила в редакцию 28 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 17 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 17 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Григорий Иванович Белый — доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры железобетонных и каменных конструкций; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 272945; office@erkon.ru;

Антон Евгеньевич Кубасевич — старший преподаватель кафедры металлических и деревянных конструкций; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 1060856, ORCID: 0000-0002-5186-8518, Publons: AAZ-6056-2021; antunemio@yandex.ru.

Вклад авторов:

Белый Г.И. — идея, научное руководство, научное редактирование текста.

Кубасевич А.Е. — сбор и обработка данных, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Artyukhov V.N., Shcherbakov E.A., Goritskiy V.M., Shneyderov G.R. On the condition of under-crane structures of converter production at OAO “Severstal”. *Industrial and Civil Engineering*. 2001; 6:31-34. (rus.).
2. Babkin V.I., Zhidkov K.E., Kapyrin N.V., Merzlikin A.V. On the issue of durability of welded under-crane beams. *Bulletin of Lipetsk State Technical University*. 2016; 1(27):46-49. EDN VSSNKT. (rus.).
3. Eremin K.I., Nashchekin M.V., Markov K.V., Gorbunov A.G. Damageability of under-crane beams of metallurgical and mining industry enterprises. *Science and Safety*. 2015; 3(16):59-77. EDN TYNUTT. (rus.).
4. Sklyadnev A.I., Serdyuk V.V. Fatigue durability and damage measure of the upper zone of the wall of welded under-crane beams. *Occupational Safety in Industry*. 2004; 11:34-36. EDN JVVWQP. (rus.).
5. Takki V.F., Egorov I.F., Tusnina O.A. Increasing the operational life of crane beams. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 12:61-67. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.61-67. EDN UIUJGJ. (rus.).
6. Feng Xiu-Jun, Lin Xin-Shan, Fan Tian. Research of fatigue damages of the upper zone of steel under-crane beam walls. *Industrial and Civil Engineering*. 1994; 11-12:33-35. (rus.).
7. Vasyuta B.N., Krylov I.I., Kukushko S.S. Towards the problem of determination of the residual resource of welded crane beams with fatigue failure. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2006; 6(570):114-120. EDN GZQGFV. (rus.).
8. Moskvichev V.V., Chaban E.A. Analysis of the fatigue cracks development in crane girders and assessment of their residual life. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2018; 84(7):47-54. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-47-54 (rus.).
9. Kubasevich A.E. *Stress-strain and ultimate states of under-crane beams with fatigue cracks in the wall : thesis of candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2023; 165. (rus.).
10. Dong S.E., Chen Q. Probe on the stress of the support crack of welded crane beams. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 501-504:710-716. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.710
11. Rettenmeier P., Roos E., Weihe S. Fatigue analysis of multiaxially loaded crane runway structures including welding residual stress effects. *International Journal of Fatigue*. 2016; 82:179-187. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.04.009
12. Wardenier J., de Vries P., Timmerman G. Fatigue behaviour of a welded I-section under a concentrated compression (wheel) load. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018; 140:163-173. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.10.027
13. Ávila G., Palma E., De Paula R. Crane girder fatigue life determination using SN and LEFM methods. *Engineering Failure Analysis*. 2017; 79:812-819. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.05.027
14. Rykaluk K., Marcinczak K., Rowicki S. Fatigue hazards in welded plate crane runway girders — locations, causes and calculations. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018; 18(1):69-82. DOI: 10.1016/j.acme.2017.05.003
15. Xu B., Wu Q. Stress fatigue crack propagation analysis of crane structure based on acoustic emission. *Engineering Failure Analysis*. 2020; 109:104206. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104206
16. Zai J., Cao J., Bell A.J. The fatigue strength of box girders in overhead travelling cranes. *Journal of the Institution of Structural Engineers*. 1994; 72(23):401-405.
17. Veselov V.V. *Evaluation of operability of used steel under-crane beams : thesis of candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2005; 267. (rus.).
18. Markeev V., Borkov P. Forecasting of the residual life of metal beams sub-crane of industrial buildings of long service life. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021; 10:8-16. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-10-8-16. EDN: KBOFRU. (rus.).
19. Graciano C., Casanova E., Martínez J. Imperfection sensitivity of plate girder webs subjected to patch loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011; 67(7):1128-1133. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.02.006
20. Kulka J., Mantic M., Fedorko G., Molnar V. Analysis of crane track degradation due to operation. *Engineering Failure Analysis*. 2016; 59:384-395. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.009
21. Belyy G.I., Kubasevich A.E. Bearing capacity of crane beams with fatigue cracks in the wall. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 2(91):24-29. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-24-29. EDN WCKLTW. (rus.).
22. Rafiev A.K., Maramov F.B. Strengthening of crane runway beams with the method of increase in thicknesses. *Polytechnic Herald. Series: Engineering Research*. 2020; 1(49):143-150. EDN CXCLUX. (rus.).
23. Rafiev A.K., Ashurov I.S.H. Building strengthening of crane runway beams with the method of structural scheme alteration. *Polytechnic Herald. Series: Engineering Research*. 2020; 3(51):99-107. EDN IBHRWU. (rus.).

Received August 28, 2023.

Adopted in revised form on September 17, 2023.

Approved for publication on September 17, 2023.

B I O N O T E S: **Grigory I. Belyy** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor-consultant of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 272945; office@erkon.ru;

Anton E. Kubasevich — senior lecturer of the Department of Metal and Wooden Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 1060856, ORCID: 0000-0002-5186-8518, Publons: AAZ-6056-2021; antunemio@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Grigory I. Belyy — idea, scientific guidance, scientific editing of the text.

Anton E. Kubasevich — data gathering, data processing, writing of the article.

The authors declare no conflicts of interest.