

Анализ местных напряжений в стенке подкрановой балки

Ольга Александровна ТУСНИНА, кандидат технических наук, доцент, tusninaoa@mgsu.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. Для подкрановых конструкций в цехах с кранами тяжелого и особо тяжелого режимов работы характерны повреждения и усталостные разрушения. Наиболее опасная зона, в которой возникают знакопеременные местные напряжения, — верхняя зона стенки подкрановой балки. На основе результатов численного расчета выполнен анализ местных напряжений, действующих в стенке подкрановой балки с фрикционным поясным соединением в двух сечениях: по верху стенки и под поясным уголком. Получено, что местные напряжения от сосредоточенного давления колеса распределяются неравномерно по толщине стенки балки с фрикционным поясным соединением, что связано с ее локальным изгибом. Однако это не учитывается в методике расчета, заложенной в отечественных нормативных документах. В связи с этим применение формул свода правил по стальным конструкциям для балок с фрикционным поясным соединением дает несколько заниженную величину местных напряжений в стенке в сечении под поясным уголком, которое является более нагруженным и опасным при проверке на усталость. Установлено, что эксплуатационный ресурс балки с фрикционным поясным соединением почти наполовину выше, чем у аналогичной сварной балки.

Ключевые слова: подкрановая балка, местные напряжения, стенка подкрановой балки, усталость стальных конструкций, фрикционное соединение

Для цитирования: Туснина О. А. Анализ местных напряжений в стенке подкрановой балки // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 10. С. 20–26. doi: 10.33622/0869-7019.2022.10.20-26

ANALYSIS OF LOCAL STRESSES IN THE WEB OF CRANE BEAM

Olga A. TUSNINA, tusninaoa@mgsu.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. For under crane structures and in workshops with cranes of heavy and especially heavy duty, damage and fatigue failure are typical. The most dangerous zone in which alternating local stresses occur is the upper zone of the web of the crane girder. Based on the results of a numerical calculation, the analyzes of the local stresses acting in the web of a crane girder with a friction belt connection in two sections - along the top of the wall and under the belt corner — was made. It was obtained that local stresses from the concentrated pressure of the wheel are distributed unevenly over the thickness of the beam wall with a friction belt connection, which is associated with its local bending. However, this is not taken into account in the calculation methodology laid down in domestic regulatory documents. In this regard, the application of the formulas of the set of rules for steel structures for beams with friction belt connection gives a somewhat underestimated value of local stresses in the wall in the section under the belt corner, which is more loaded and dangerous when tested for fatigue. It is established that the operational resource of a beam with a friction belt joint is almost half higher than a similar welded beam.

Keywords: under crane beam, local stresses, web of the crane girder, fatigue of steel structures, frictional connection

For citation: Tushina O. A. Analysis of Local Stresses in the Web of Crane Beam. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 10, pp. 20–26. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.10.20-26

В цехах черной и цветной металлургии подкрановые конструкции работают в весьма тяжелых условиях, воспринимая динамические знакопеременные подвижные нагрузки от кранов интенсивных режимов работы (7К, 8К). Подкрановые конструкции в таких цехах подвержены механическим повреждениям и усталостным разрушениям и, как

показывает анализ состояния каркасов, — это наиболее часто повреждаемые элементы [1, 2].

На напряженно-деформированное состояние (НДС) подкрановой балки кроме характера, направления и величины действующей нагрузки влияет множество факторов. В их числе состояние крана, кранового рельса и его креплений, наличие дефек-

тов и повреждений подкрановой балки, тормозной конструкции и их узлов, температура эксплуатации и пр.

В стенке подкрановой балки возникают местные напряжения. Они вызваны как вертикальным давлением кранового колеса, так и горизонтальной поперечной нагрузкой, которая действует на рельс от колеса при движении по

нему крана. Это обусловлено в первую очередь перекосом моста крана и непараллельностью крановых путей.

На значение местных напряжений в стенке подкрановой балки от сосредоточенного давления колеса крана влияет длина их распределения вдоль балки. Она зависит от жесткости рельса, конструктивного решения его крепления, наличия упругих прокладок или иных демпфирующих элементов между рельсом и полкой, податливости соединения пояса балки со стенкой [3–5]. Для определения условной длины распределения местных напряжений в стенке подкрановой балки от сосредоточенного давления колеса крана применяется теория расчета балок на упругом Винклеровском основании [6].

Местные напряжения от вертикального давления колеса крана при центровке рельса на оси стенки в теории распределяются по толщине стенки равномерно. Однако на практике при эксплуатации крановых путей, особенно при интенсивной работе кранов тяжелых и особо тяжелых режимов работы, происходит смещение рельса от оси стенки. Это вызывает эксцентричное приложение вертикального давления колеса крана и, как следствие, неравномерное распределение местных напряжений по толщине стенки, что в сочетании с другими факторами приводит к образованию трещин в стенке [1].

Местные напряжения от поперечного давления колеса крана способствуют изгибу стенки и по ее толщине распределяются неравномерно по линейному закону. Одна грань стенки испытывает сжатие, другая — растяжение. Учитывая знакопеременный характер действия поперечной нагрузки от перекоса моста крана, эти напряжения также знакопеременны, что говорит о цикличности загрузки/разгрузки стенки, а также

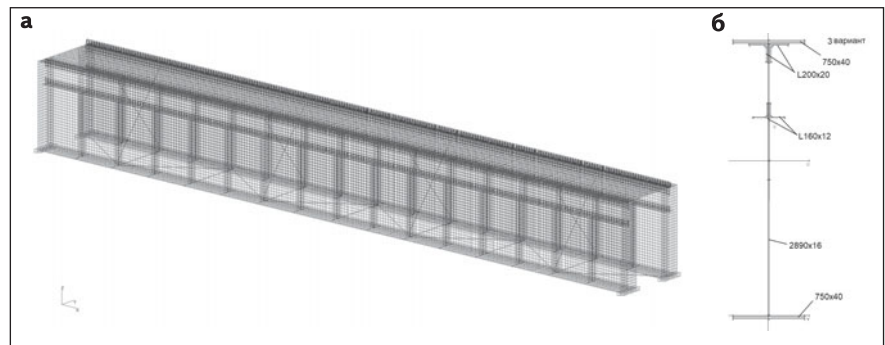


Рис. 1. Конечно-элементная модель подкрановой балки (а) и ее поперечное сечение (б)

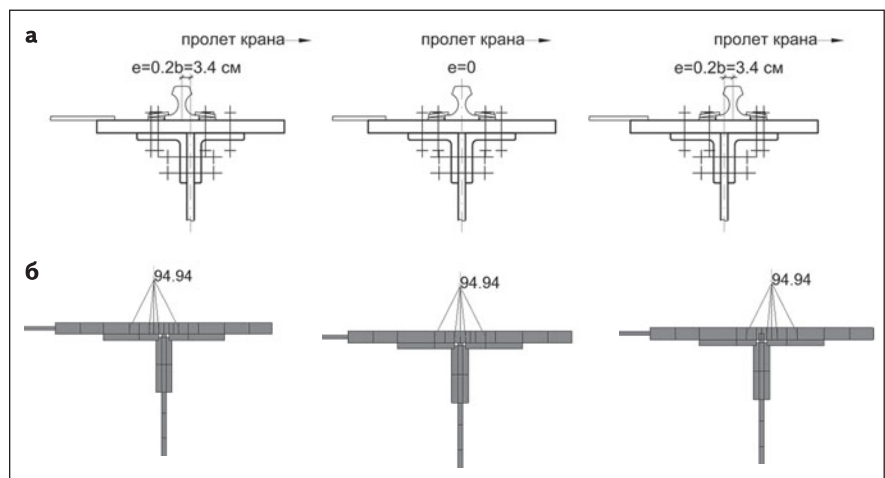


Рис. 2. Варианты расположения кранового рельса (а) и расчетные схемы (б)

о развитии усталостных повреждений стенки подкрановой балки.

Таким образом, местные напряжения в верхней зоне стенки подкрановой балки относятся к наиболее опасному фактору ее напряженного состояния, который влечет за собой усталостное разрушение балки.

Известно, что в сварных подкрановых балках трещины в верхней зоне стенки и пояском шве — наиболее распространенный дефект, выявляемый при обследовании [2, 7]. Связано это с действием знакопеременных местных напряжений в стенке и с тем, что околошовная зона стенки представляет собой концентратор сварочных напряжений.

С целью увеличения долговечности подкрановых балок разрабатываются и исследуются различные конструктивные реше-

ния, повышающие эксплуатационный ресурс балок [8, 9]. К одному из наиболее очевидных и простых способов повышения ресурса подкрановой балки относится применение фрикционного поясного соединения [10], что обеспечивает отсутствие концентратора напряжений в виде сварного шва.

Повысить выносливость подкрановой балки можно в результате снижения местных напряжений в верхней зоне стенки путем уменьшения угла закручивания полки. Например, в статье [11] предлагается подкреплять полку продольными элементами, закрепленными на поперечных ребрах балки, а в работе [9] рассмотрено создание локального коробчатого сечения верхней полки.

Для корректного анализа остаточного ресурса существую-

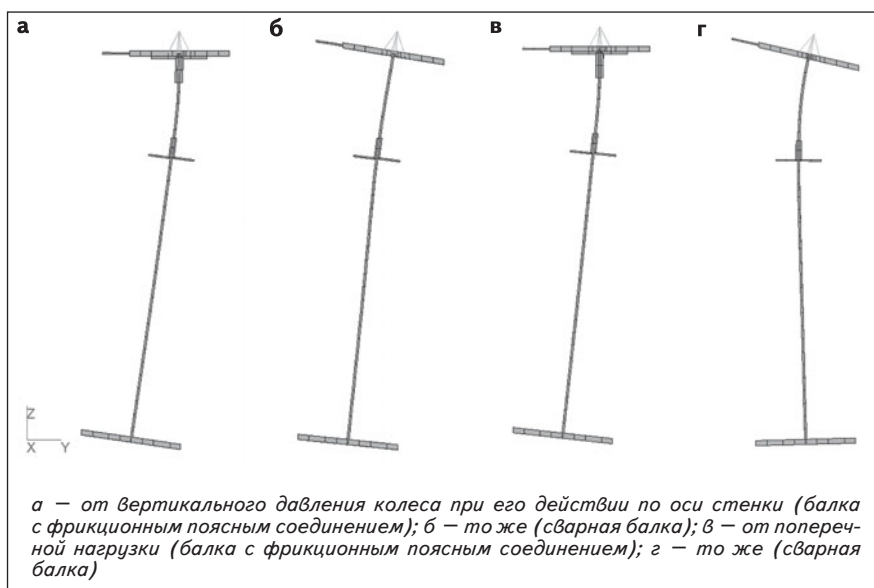


Рис. 3. Деформированная форма балки от крановой нагрузки

щих подкрановых балок и разработки балок повышенного ресурса необходимо наиболее точно определить действительное НДС балки.

В связи с этим актуальным представляется анализ местных напряжений в стенке подкрановой балки с учетом особенностей ее конструктивного решения. С целью проанализировать распределение местных нормальных напряжений в стенке подкрановой балки с фрикционным поясным соединением был выполнен численный конечно-элементный расчет с использованием программного комплекса SCAD Office 21.1.

Рассмотрена подкрановая балка двутаврового сечения с фрикционным поясным соединением из стали С355 (рис. 1). Балка разрезная, пролет 24 м, располагается по среднему ряду колонн.

При расчете численным методом для моделирования применялись плоские четырехугольные конечные элементы. По ширине полки балки принято восемь конечных элементов, по высоте стенки — 32 элемента. В расчетной схеме замоделирована подкрановая конструкция целиком, включая тормозной настил, сме-

жную балку соседнего пролета и связи между ними (см. рис. 1).

Кран режима 8К, грузоподъемность 120 т, нормативное вертикальное давление колеса крана $F_n = 423$ кН. Кран имеет восемь колес с одной стороны моста.

Для анализа влияния эксцентриситета кранового рельса выбрали три варианта его возможного расположения — по оси стенки, со смещением на величину 0,2 ширины подошвы рельса (для рельса КР-120 это составляет 3,4 см) в левую и правую стороны (рис. 2).

При численном расчете рассматривались загрузки вертикальной крановой нагрузкой при различном расположении рельса, а также поперечной нагрузкой от перекоса крана. Расчетные величины крановых нагрузок определены в соответствии с требованиями СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» (с изм. № 1–4).

В принятом в СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции» (с изм. № 1–4) расчетном подходе суммарные местные напряжения в стенке балки находят как сумму двух составляющих:

$$\sigma_{y, \text{sum}} = \sigma_{loc, y} + \sigma_{fy}, \quad (1)$$

где $\sigma_{loc, y}$ — местные напряжения от вертикального давления кранового колеса при его осевом действии на стенку; σ_{fy} — то же, от изгиба стенки, вызванного действием поперечной нагрузки от колеса крана, а также возможным смещением рельса от оси стенки.

В теоретическом расчете местные напряжения от вертикального давления кранового колеса при его осевом действии на стенку $\sigma_{loc, y}$ распределяются равномерно по толщине стенки.

По результатам численного расчета получено, что местные напряжения действуют неравномерно. Это связано с особенностью работы поясного соединения с применением уголков и возникновением локального изгиба стенки балки, что видно на деформированной форме сечения балки (рис. 3). В связи с этим в общей величине напряжений $\sigma_{loc, y}$ можно выделить дополнительные напряжения в стенке от ее локального изгиба $\sigma_{loc, y, \text{изгиб}}$.

Таким образом, анализируя полученные результаты численного расчета, каждую из составляющих местных напряжений можно представить в виде суммы следующим образом:

- местные напряжения от вертикального давления кранового колеса при его осевом действии на стенку:

$$\sigma_{loc, y} = \sigma_{loc, y, \text{изгиб}} + \sigma_{loc, y, \text{сред}}; \quad (2)$$

- местные напряжения от изгиба стенки, вызванного действием поперечной нагрузки от колеса крана, а также возможным смещением рельса от оси стенки:

$$\sigma_{fy} = \sigma_{fy, Fv} + \sigma_{fy, Qt}, \quad (3)$$

где $\sigma_{loc, y, \text{изгиб}}$ — местные напряжения от вертикального давления колеса крана, приложенного по оси стенки, вызванные изгибом стенки; $\sigma_{loc, y, \text{сред}}$ — то же, действующие по срединной оси стенки и равномерно распределенные по ее толщине; $\sigma_{fy, Fv}$ — напряжения от местного крутящего момента, вызванного действием вертикальной нагрузки за

счет эксцентриситета кранового рельса; $\sigma_{fy,Qt}$ — то же, действием поперечной нагрузки от колеса крана.

Напряжения от изгиба стенки $\sigma_{loc,y,изгиб}$, полученные по результатам численного расчета, составляют 30–35 % максимального сжимающего напряжения, возникающего в стенке при загрузке ее по оси вертикальным давлением колеса крана (табл. 1). Более нагруженным этими напряжениями будет сечение стенки под поясным уголком.

В сечении по верху стенки доля местных напряжений от крутящего момента, вызванного действием вертикальной нагрузки за счет эксцентриситета кранового рельса $\sigma_{fy,Fv}$, составляет около 30 % (см. табл. 1). В сечении под уголком влияние напряжений $\sigma_{fy,Fv}$ существенно снижается (не более 7–10 %). При этом значение местных напряжений от поперечной силы $\sigma_{fy,Qt}$ в сечении по верху стенки и под уголком практически не изменяется.

Эпюры каждой составляющей местных напряжений по толщине стенки для двух наиболее опасных сечений стенки (по верху стенки и под поясным уголком) показаны на рис. 4.

Значения местных напряжений при расчете вручную с адаптацией формул СП 16.13330 даны в табл. 1

Применение формул СП 16.13330 для балки с фрикционным поясным соединением имеет сложности. Это вызвано отсутствием указаний по определению принимаемой в расчет части сечения балки при вычислении моментов инерции и кручения пояса балки, учитывая его совместную работу с поясными уголками. Кроме того, отсутствуют пояснения, в каком сечении стенки определяются местные напряжения и какую толщину стенки принимать в расчет.

Местные напряжения от вертикального давления кранового ко-

1. Составляющие местных напряжений в стенке подкрановой балки с фрикционным поясным соединением

Параметр		Местные напряжения стенки, кН/см ²		Разница результатов численного и ручного расчета, %
		Ручной расчет по СП 16.13330	Численный расчет	
<i>Сечение по верху стенки</i>				
$\sigma_{yloc,y}$	$\sigma_{loc,y,изгиб}$	—	1,82	—
	$\sigma_{loc,y,сред}$	5,26	4,5	16,89
	$\sigma_{loc,y}$	5,26	6,32	–16,77
σ_{fy}	$\sigma_{fy,Fv}$	1,21	0,36	236,11
	$\sigma_{fy,Qt}$	0,53	0,82	–35,37
	σ_{fy}	1,74	1,18	47,45
$\sigma_{y,sum} = \sigma_{loc,y} + \sigma_{fy}$		7	7,5	–6,67
<i>Сечение под поясным уголком</i>				
$\sigma_{loc,y}$	$\sigma_{loc,y,изгиб}$	—	4,34	—
	$\sigma_{loc,y,сред}$	8,76	7,74	13,18
	$\sigma_{loc,y}$	8,76	12,08	–27,48
σ_{fy}	$\sigma_{fy,Fv}$	1,21	0,06	1916,7
	$\sigma_{fy,Qt}$	0,53	0,8	–33,75
	σ_{fy}	1,74	0,86	102,33
$\sigma_{y,sum} = \sigma_{loc,y} + \sigma_{fy}$		10,5	12,94	–18,86

леса $\sigma_{loc,y}$, рассчитанные вручную, распределены равномерно по толщине стенки и не учитывают ее изгиб. Несмотря на то, что их значение получилось несколько больше (на 15–20 %), чем значение местных напряжений $\sigma_{loc,y,сред}$ по срединной оси стенки по результатам численного расчета, этого запаса оказывается недостаточно. Суммарные напряжения $\sigma_{loc,y}$ по формулам данного СП в сечении по верху стенки на 17 %, а под уголком почти на 28 % меньше, чем полученные при численном расчете.

Суммарные местные напряжения $\sigma_{y,sum}$ в сечении стенки под поясным уголком при ручном расчете занижены почти на 20 % по сравнению с результатами численного расчета, что может быть критичным, так как сечение стенки под уголком более нагруженное.

Для сравнения был выполнен

численный расчет сварной подкрановой балки, обладающей такими же геометрическими характеристиками. Составляющие местных напряжений в стенке сварной подкрановой балки представлены в табл. 2. Эпюры напряжений по толщине стенки показаны на рис. 5.

Для сварной балки влияние местного изгиба стенки при действии вертикального кранового давления по оси стенки невелико (менее 1 %) и рассматривать в этом случае равномерное распределение местных напряжений по толщине стенки вполне правомерно.

Напряжения от местного крутящего момента σ_{fy} по методике СП 16.13330 для сварной балки и балки с фрикционным поясным соединением одинаковые, что не совсем корректно отражает действительное НДС.

Для балки с фрикционным поясным соединением эти напряже-

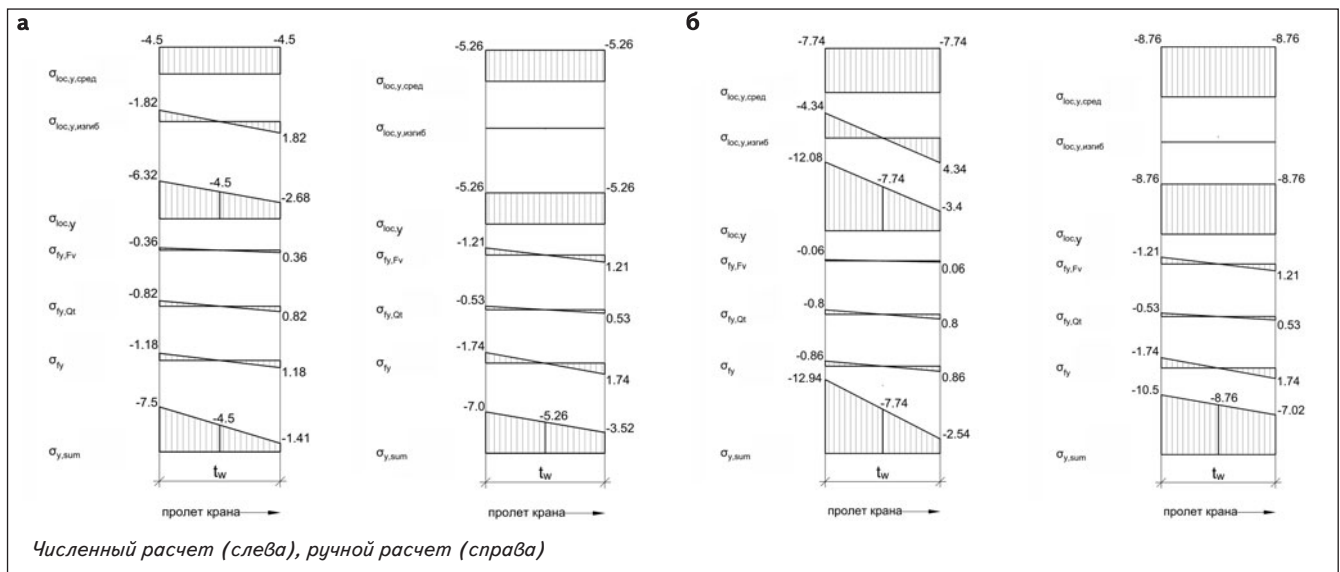


Рис. 4. Эпюры составляющих нормальных местных напряжений, кН/см^2 , по толщине стенки балки в сечениях по верху стенки (а) и под поясным уголком (б)

ния, полученные при ручном расчете, завышены по сравнению с результатами численного расчета, а для сварной балки занижены, причем существенно (до 2 раз).

Из-за небольшого вклада напряжений от местного крутящего момента σ_{fy} , (до 25 %, табл. 3) в общую величину напряжений $\sigma_{y,sum}$ эти неточности ручного расчета оказываются несущественными. Так, суммарные напряжения в стенке сварной балки $\sigma_{y,sum}$, рассчитанные вручную, отличаются в меньшую сторону на 6 % по сравнению с численным расчетом, что допустимо для инженерных расчетов.

Для оценки эффективности балки с фрикционным поясным соединением был выполнен расчет на усталость согласно СП 16.13330 (табл. 4). Усталостные напряжения $\sigma_{уст}$ определяются по формуле (173) этого СП

$$\sigma_{уст} = 0,5\sqrt{\sigma_x^2 + 0,36\tau_{xy}^2} + 0,46\sigma_{loc,y} + 0,5\sigma_{fy} \quad (4)$$

Проверка выполняется путем сравнения усталостных напряжений с расчетным сопротивлением усталости R_u , которое зависит от групп элементов и соединений

2. Составляющие местных напряжений в сечении по верху стенки сварной подкрановой балки

Параметр	Местные напряжения стенки, кН/см^2		Разница результатов численного и ручного расчета, %	
	Ручной расчет по СП 16.13330	Численный расчет		
$\sigma_{loc,y}$	$\sigma_{loc,y,изгиб}$	—	0,02	—
	$\sigma_{loc,y,сред}$	12,13	11,05	9,77
	$\sigma_{loc,y}$	12,13	11,07	-9,58
σ_{fy}	$\sigma_{fy,Fv}$	1,21	2,29	-47,16
	$\sigma_{fy,Qt}$	0,53	1,36	-61,29
	σ_{fy}	1,74	3,65	52,33
$\sigma_{y,sum} = \sigma_{loc,y} + \sigma_{fy}$		13,87	14,72	-5,77

3. Напряжения в сварной балке и балке с фрикционным поясным соединением по результатам численного расчета

Параметр	Сварная балка, сечение по верху стенки	Балка с фрикционным поясным соединением		
		Сечение по верху стенки	Сечение под поясным уголком	
$\sigma_{loc,y}$	$\sigma_{loc,y,изгиб}$	0,02/0,14	1,82/24,27	4,34/33,54
	$\sigma_{loc,y,сред}$	11,05/75,07	4,5/60	7,74/59,81
	$\sigma_{loc,y}$	11,07/75,21	6,32/84,27	12,08/93,35
σ_{fy}	$\sigma_{fy,Fv}$	2,29/15,56	0,36/4,8	0,06/0,47
	$\sigma_{fy,Qt}$	1,36/9,23	0,82/10,93	0,8/6,18
	σ_{fy}	3,65/24,79	1,18/15,73	0,86/6,65
$\sigma_{y,sum} = \sigma_{loc,y} + \sigma_{fy}$		14,72/100	7,5/100	12,94/100

Примечание. Значения напряжений в числителе, кН/см^2 , в знаменателе — доля в общей величине $\sigma_{y,sum}$, %

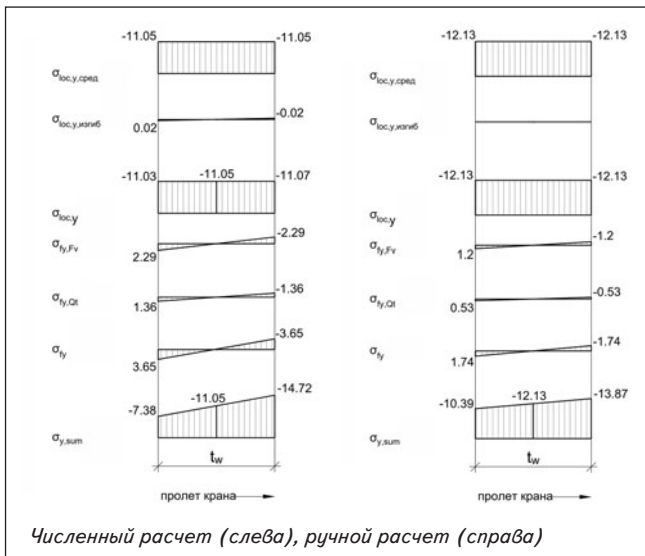


Рис. 5. Эпюры распределения составляющих нормальных местных напряжений, $\text{кН}/\text{см}^2$, по толщине стенки сварной балки

конструкций, выделяемых при расчете на усталость и приведенных в прил. К СП 16.13330.

Для верхней зоны стенок подкрановых балок значения расчетного сопротивления усталости принимаются согласно п. 12.2 СП 16.13330.

Коэффициент использования, приведенный в табл. 4, представляет собой отношение усталостного напряжения к расчетному сопротивлению усталости:

$$K_{исп} = \sigma_{уст} / R_y \quad (5)$$

Как видно по данным табл. 4, балка с фрикционным поясным соединением обладает на 40 % большим эксплуатационным ресурсом, чем сварная балка, которая не прошла проверку на усталость ($K_{исп} = 1,11 > 1$).

Выводы

1. В балке с фрикционным поясным соединением местные напряжения от вертикального давления кранового колеса, приложенного по оси стенки, распределяются неравномерно по толщине стенки из-за ее локального изгиба. Доля дополнительных напряжений от изгиба стенки в полной величине местного на-

пряжения по результатам численного расчета составила 25–35 %.

2. Вклад местных напряжений от вертикального давления кранового колеса, приложенного по оси стенки, в суммарную величину местных напряжений в стенке балки с фрикционным поясным соединением значителен и равен 85–90 %.

Недоучет изгиба стенки привел к тому, что суммарные местные напряжения в сечении стенки под уголком, рассчитанные вручную, оказались занижены почти на 20 % по сравнению с полученными в результате численного расчета, что является критичным, так как сечение стенки под уголком более нагруженное.

В связи с этим необходимо уточнение методики СП 16.13330 для определения местных напряжений $\sigma_{loc,y}$ в стенке балки с фрикционным поясным соединением с учетом изгиба стенки с возможностью определения напряжений в двух опасных сечениях: по верху стенки и под поясным уголком.

3. В балке с фрикционным поясным соединением смещение рельса не вызывает значитель-

ных напряжений в верху стенки (до 5 % полной величины) и практически обнуляется под поясным уголком, в то время как в сварной балке вклад напряжений от смещения рельса составляет около 16 % напряжений, вызванных местным крутящим моментом.

4. Напряжения от местного крутящего момента, рассчитанные в соответствии с СП 16.13330 для сварной балки и балки с фрикционным поясным соединением, одинаковые, что не совсем корректно отражает действительное НДС стенки.

При этом для балки с фрикционным поясным соединением напряжения, полученные вручную, завышены по сравнению с результатами численного расчета, а для сварной балки существенно занижены (до 2 раз).

Несмотря на небольшой (до 25 %) вклад напряжений от местного крутящего момента в общую величину местных напряжений, необходимо уточнение методики СП 16.13330 для определения местных напряжений σ_{fy} в стенке балки как с фрикционным поясным соединением, так и сварной.

4. Расчет подкрановой балки на усталость, $\text{кН}/\text{см}^2$

Параметр	Сварная балка, сечение по верху стенки	Балка с фрикционным поясным соединением	
		Сечение по верху стенки	Сечение под поясным уголком
σ_x	9,07	9,07	7,6
τ_{xy}	0,58	0,58	0,58
$\sigma_{loc,y}$	6,44	3,35	6,55
σ_{fy}	2,47	0,8	0,54
$\sigma_{loc,y} + \sigma_{fy}$	8,91	4,15	7,09
$\sigma_{уст}$	8,35	6,28	6,69
R_y	7,5	9,6	9,6
$K_{исп}$	1,11	0,65	0,7

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Скаков В. А., Жидков К. Е., Капырин Н. В. Эксплуатационный ресурс сварных подкрановых балок // Евразийский научный журнал. 2016. № 2. С. 122–124.
2. Выдрин В. Н., Зубко О. В. Наиболее характерные дефекты и повреждения металлических эксплуатируемых подкрановых балок при проведении экспертизы промышленной безопасности // Символ науки. 2015. № 10. С. 102–109.
3. Сабуров В. Ф. Использование моделей упругого основания для анализа распределения локальных напряжений в стенке стальных составных балок // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. Т. 14. № 4. С. 15–20.
4. Genshu T., Zejun X. Revisiting the bearing stresses in webs of crane runway girders under wheel loads [Анализ напряжений в стенках подкрановых балок под действием колесных нагрузок] // Advances in Structural Engineering. 2018. Vol. 21. Iss. 12. Pp. 1792–1801.
5. Kettler M., Kamplleitner A., Novak F. et al. Local stresses in webs of crane runway girders: Tests and numerical calculations [Местные напряжения в стенках подкрановых балок: испытания и численные расчеты] // Journal of Constructional Steel Research. 2017. Vol. 139. Pp. 188–201. doi: 10.1016/j.jcsr.2017.09.016
6. Броуде Б. М. Распределение сосредоточенного давления в металлических балках. М.: Стройиздат, 1950. 84 с.
7. Shuryn A., Mukhin A., Bryantsev A. Defects of steel crane beams and methods of their strengthening [Дефекты стальных подкрановых балок и способы их усиления] // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 212. P. 02016. doi: 10.1051/e3sconf/202021202016
8. Васюта Б. Н. Экспериментальное исследование подкрановой балки со сменной подрельсовой частью при местном кручении // Известия вузов. Строительство. 2005. № 3. С. 12–18.
9. Нежданов К. К., Гарькин И. Н. Конструирование эффективных подкрановых конструкций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2020. № 1(31). С. 5–8.
10. 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
11. Danilov A., Tushnina O. Non-disruptive method to decrease stresses in the web of the crane beam [Неповреждающий метод снижения напряжений в стенке подкрановой балки] // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 02022. doi: 10.1051/e3sconf/202126302022
12. Kettler M., Kiem F., Unterwegwer H. Local stresses in retrofitted crane runway girders with boxed upper flange due to eccentric wheel loading [Местные напряжения в модернизированных подкрановых балках с коробчатой верхней полкой, вызванные внецентренной передачей нагрузки от колеса] // Structures. 2020. Vol. 25. Pp. 646–659. doi: 10.1016/j.istruc.2020.03.024

REFERENCES

1. Skakov V. A., Zhidkov K. E., Kapyrin N. V. Service life of welded crane beams. *Evrasiyskiy nauchnyy zhurnal*, 2016, no. 2, pp. 122–124. (In Russ.).
2. Vydrin V. N., Zubko O. V. The most characteristic defects and damages of metal operated crane beams during the examination of industrial safety. *Simvol nauki*, 2015, no. 1, pp. 102–109. (In Russ.).
3. Saburov V. F. Using elastic foundation models to analyze the distribution of local stresses in the web of steel composite beams. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 15–20. (In Russ.).
4. Genshu T., Zejun X. Revisiting the bearing stresses in webs of crane runway girders under wheel loads. *Advances in Structural Engineering*, 2018, vol. 21, iss. 12, pp. 1792–1801.
5. Kettler M., Kamplleitner A., Novak F. et al. Local stresses in webs of crane runway girders: Tests and numerical calculations. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, vol. 139, pp. 188–201. doi: 10.1016/j.jcsr.2017.09.016
6. Broude B. M. *Raspredelenie sosredotochennogo davleniya v metallicheskih balkakh* [Distribution of concentrated pressure in metal beams]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1950. 84 p. (In Russ.).
7. Shuryn A., Mukhin A., Bryantsev A. Defects of steel crane beams and methods of their strengthening. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 212, p. 02016. doi: 10.1051/e3sconf/202021202016
8. Vasyuta B. N. Experimental study of a crane beam with a replaceable sub-rail part under local torsion. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*, 2005, no. 3, pp. 12–18. (In Russ.).
9. Nezhdanov K. K., Gar'kin I. N. Designing effective crane structures. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Priskaspiya*, 2020, no. 1(31), pp. 5–8. (In Russ.).
10. Takki V. F., Egorov I. F., Tushnina O. A. Increasing the operational life of crane beams. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2020, no. 12, pp. 61–67. doi: 10.33622/0869-7019.2020.12.61-67 (In Russ.).
11. Danilov A., Tushnina O. Non-disruptive method to decrease stresses in the web of the crane beam. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 263, p. 02022. doi: 10.1051/e3sconf/202126302022
12. Kettler M., Kiem F., Unterwegwer H. Local stresses in retrofitted crane runway girders with boxed upper flange due to eccentric wheel loading. *Structures*, 2020, vol. 25, pp. 646–659. doi: 10.1016/j.istruc.2020.03.024