

УДК 69.059.032

РАСЧЁТ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ СВАРНОГО ШВА В ПОДРЕЛЬСОВОЙ ЗОНЕ

Нежданов Кирилл Константинович,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции».

Гарькин Игорь Николаевич,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

*доцент кафедры «Управление качеством и технология строительного
производства».*

Аннотация

Приводится разработанный алгоритм расчета на выносливость сварного шва в подрельсовой зоны подкрановых балок как наиболее опасного элемента подкранового пути. Дается обоснование факта, что использование сварных соединений в подкрановых конструкциях негативно сказывается на эксплуатации крановых путей.

Ключевые слова: подкрановые конструкции, выносливость, строительные конструкции, сварной шов, технический ресурс, подкрановая балка

CALCULATION FOR THE ENDURANCE OF THE WELD IN THE UNDER RAIL AREA

Nezhdanov Kirill Konstantinovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Doctor of Sciences, Professor of the Department "Building constructions".

Garkin Igor Nikolaevich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Associate Professor of the department "Quality management and construction technologies".

Abstract

Developed algorithm for calculating the endurance of a welded seam in the under-rail zone of crane beams as the most dangerous element of a crane runway is presented. The substantiation of the fact that the use of welded joints in crane structures has a negative effect on the operation of crane tracks is given.

Keywords: crane structures, endurance, building structures, weld seam, technical resource, crane girder

При интенсивной эксплуатации и тяжёлом режиме работы мостовых кранов (8А,7А) накапливается 600...700 тысяч циклов в год прокатываний колёс. Минимальный срок службы при такой интенсивной работе по нормам – 10 лет. Циклические сдвиги приводят к преждевременному, через 2...3 года эксплуатации, появлению усталостных трещин в этой зоне [1].

Качественно выполненный поясной сварной шов имеет вогнутую поверхность с плавными переходами сплавления с основным металлом, а также К-образную разделку кромок. Проплавление обязательно на всю толщину стенки с минимальным количеством непроваров, подрезов, шлаковых включений, что ограничено нормами. Тем не менее, в настоящее время усталостные трещины в этой зоне неизбежно появляются и развиваются, и снижают ресурс сварного соединения.

Опасные дефекты шва (непровары) действующие нормы не допускают, так как происходит снижение выносливости более чем в четыре раза [2]. Работоспособность при подобных дефектах значительно снижается. Тем не менее, при обследовании действующих цехов непровары обнаруживаются [3]. Усталостные трещины всегда зарождаются от дефектов – подрезов, шлаковых включений, концов сварных швов, нахлесточных соединений.

При проектировании промышленных предприятий, основной упор делается на расчёт на прочность, расчёты же на выносливость практически не проводятся. Рассмотрим на реальном примере метод расчета сварного шва в подкрановой балке [4]. Требуется рассчитать на выносливость разрезные подкрановые балки для движения по ним мостовых кранов грузоподъёмностью $Q = 200/32$ т. Пролёт крана 28 м. Пролёт каждой подкрановой балки – 12 м. Расчёт на выносливость выполняем при воздействиях одного крана тяжёлого режима работы 7А. нормативная вертикальная сила от каждого колеса крана $P_H = 4050$ гН; масса тележки 70 т; рельс КР-120. Сталь балки малоуглеродистая – С255 ГОСТ 27772-88 (Вст3сп5). Сварочная проволока Св-08 А, ГОСТ 2246-70, флюс АН-348 А ГОСТ 9087-81. При прокатывании колёс кранов подрельсовая зона сварного шва подкрановой балки подвергается циклическим воздействиям колёс мостовых кранов.

Расчёт на выносливость подрельсовой зоны стенки балки произведём на воздействия катящихся по рельсам КР-120 колёс кранов.

Катящиеся по рельсам колёса кранов генерируют подвижные вертикальные силы P и горизонтальные силы T . По действующим нормам определяем коэффициенты локальной цикличности, динамичности воздействий $\gamma_{fl}^{loc} > 1$ и повторяемости циклов $\gamma_{II} < 1$.

Проверим выносливость двутавровой сварной балки. Сечение двутавровой сварной балки состоит из поясов: верхнего $75 \cdot 2,4 = 180$ см², нижнего $59 \cdot 2,4 = 141,6$ см² и стенки $180 \cdot 1,8 = 324$ см², с суммарной площадью $A = 645,6$ см². Применим рельс КР-120.

Характеристики сечения: высота сечения балки – $h = 184,8$ см; главный момент инерции – $J_x = 3530845,9$ см⁴; расстояние от центра стенки до главной оси X балки – $y_{II} = 5,425$ см.

Расстояние от главной оси X до центра тяжести полки – $a_{полки} = 0,5 \cdot h_{ст} - y_C + 0,5 t_B = 0,5 \cdot 180 - 5,4245 + 0,5 \cdot 2,4 = 85,78$ см;

статический момент верхнего пояса:

$$S_{X_{\text{полки}}} = A_{\text{полки}} \cdot a_{\text{полки}} = 180 \cdot 85,78 = 15440,4 \text{ см}^3.$$

Таблица 1 - Коэффициенты, учитывающие локальную цикличность, динамичность γ_{f1}^{loc} и повторяемость γ_{Π} воздействий колёс кранов

Режимы работы	Захват груза	Коэффициенты	
		динамичности γ_{f1}^{loc}	повторяемости γ_{Π}
8А	Жёсткий, клещами	1,6	0,7
8А	Гибкий	1,4	0,7
7А	Гибкий	1,3	0,6
6А...4А	Гибкий	1,1	0,5

Коэффициенты повторяемости γ_{Π} воздействий всегда меньше единицы и приближаются к ней с ужесточением режима работы кранов. Тогда сдвигающие

напряжения в зоне шва: $\tau_{xy} = \frac{Q \cdot S_{X_{\text{полки}}}}{J_x \cdot t_{\text{ст}}} = \frac{27346,1 \cdot 15440,4}{3530845,9 \cdot 1,6} = 74,74 \text{ МПа}.$

Собственные моменты инерции верхнего пояса равны:

при изгибе $J_{x_{\Pi}} = \frac{b \cdot t_n^3}{12} = \frac{75 \cdot 2,4^3}{12} = 86,4 \text{ см}^4;$

при кручении

$$J_{кр_{\Pi}} = \frac{1}{3} \left(\frac{b}{t_{\Pi}} - 0,63 \right) t_{\Pi}^4 = \frac{1}{3} \left(\frac{75}{2,4} - 0,63 \right) \cdot 2,4^4 = 338,6 \text{ см}^4.$$

Характеристики рельсов приведены в табл.2, а подвижные воздействия от колёс крана грузоподъёмностью 200/32т с режимом работы 7А (с гибким подвесом груза) в табл. 3.

Проверим выносливость подрельсовой зоны сварного шва, соединяющего верхний пояс и стенку подкрановой балки. Для этого определим возникающие колебания локальных напряжений в стенке при воздействиях каждого из колёс ($P_{\text{экр}} = 3159 \text{ гН}$) крана передаваемых через рельс КР-120.

Таблица 2 - Характеристики рельсов

Рельс	Площадь сечения см ²	Высота, см	Моменты инерции,			Масса, кг/м
			J_x	J_y	J	
КР-70	67,3	12	1081,1	327,2	253	52,8
КР-80	81,1	13	1547,4	482,4	387	63,7
КР-100	113,3	15	2864,7	941	765	89
КР-120	150,4	17	4923,8	1694,8	1310	118,1
КР-140	195,5	19	7427,2	2483,4	2130	153,5

Таблица 3 - Подвижные силы от каждого из колёс кранов, действующие циклически

Сила, гН	Нормативная P_H	Коэффициенты		$P_H \gamma_{II}$	Эквивалентная $P_{э\text{кв}} = P_H \gamma_{fl}^{\text{loc}} \gamma_{II}$
		динамичн ости γ_{fl}^{loc}	повторяем ости γ_{II}		
Вертикальная P	4100	1,3	0,6	2460	3198
Горизонтальная $T=0,1P$	410	1,3	0,6	246	319,8

Примечание: по эквивалентной силе $P_{э\text{кв}} = P_H \gamma_{fl}^{\text{loc}} \gamma_{II}$ $P_{э\text{кв}} = 1,3 \cdot 0,6 \cdot 4100 = 3198$ гН определяем колебания локальных напряжений (табл.4), а по нормативной силе $P_H \gamma_{II} = 2460$ гН определяем по формуле Журавского сдвигающие напряжения, возникающие при срезе сечения балки около опоры. В табл. 4 приведены вычисления колебания напряжений, возникающие в подрельсовой зоне стенки при качении колёс крана.

Таблица 4 - Циклы колебаний локальных сдвигающих напряжений (МПа) в подрельсовой зоне поясного шва, от многократных прокатываний колёс крана, при $P_{\text{экр}} = 3198$ гН, рельс КР-120

Эффективная длина волны локальных напряжений (см)	45,7
$l_{\text{эф}} = 3,253 \sqrt{\frac{\sum J_x}{t_{\text{ст}}}} = 3,253 \sqrt{\frac{4923,8 + 86,4}{1,8}} = 45,7 \text{ см}$	
Циклические крутящие моменты $M_{\text{кр}} = \pm (P_{\text{экр}}e + Th_p)$ $M_{\text{кр}} = \pm (3198 \cdot 2 + 319,8 \cdot 17) = 11832,6$ гНсм	$\pm 11832,6$
Локальные колебания напряжений при движении колёс кранов МПа	
Минимум напряжений при отсутствии воздействий колёс	0
Циклы экстремумов сжимающих напряжений, эксцентриситет нет $e = 0$	
$\sigma_y^{\text{loc}} = \frac{P_{\text{экр}}}{l_{\text{эф}} t_{\text{ст}}} = \frac{-3198}{45,7 \cdot 1,8} = -38,9 \text{ МПа}$	-38,9
Циклы колебаний напряжений от крутящих моментов $\pm M_{\text{кр}}$ (гНсм)	
$\sigma_{y_{\text{кр}}} = \frac{\pm 2M_{\text{кр}} \cdot t_{\text{ст}}}{\sum J_{\text{кр рельс}} + J_{\text{кр пояс}}} = \frac{\pm 2 \cdot 11832,6 \cdot 1,8}{1031,1 + 338,6} = \pm 25,8$	25,8
Экстремумы отнулёвых циклов колебаний сжимающих напряжений	
$\sum \sigma_y^{\text{loc}} = \sigma_y^{\text{loc}} + \sigma_{y_{\text{кр}}}^{\text{loc}} = -38,9 - 25,8 = -64,7 \text{ МПа}$	-64,7
Амплитуды колебаний симметричных циклов сдвигающих напряжений	
$\sum \tau_{\text{axy}}^{\text{loc}} = \pm (0,3 \cdot \sigma_y^{\text{loc}} + 0,25 \cdot \sigma_{y_{\text{кр}}}^{\text{loc}}) = \pm (19,4 + 6,46) = \pm 25,86$	$\pm 25,86$
Экстремумы отнулёвых циклов колебаний сдвигающих напряжений	
$\tau_{2\text{max}} = 0,5 \sum \sigma_y^{\text{loc}} = 0,5 \cdot 64,7 = 32,35 \text{ МПа}$	32,35
Амплитуды отнулёвых циклов колебаний сдвигающих напряжений	
$\tau_a = 0,5 \tau_{2\text{max}} = 0,5 \cdot 32,35 = 16,18$	16,18
$\tau_{xy} = \frac{Q \cdot S_{X_{\text{полки}}}}{J_X \cdot t_{\text{ст}}} = \frac{27346,1 \cdot 15440,4}{3530845,9 \cdot 1,6} = 74,74 \text{ МПа}$	

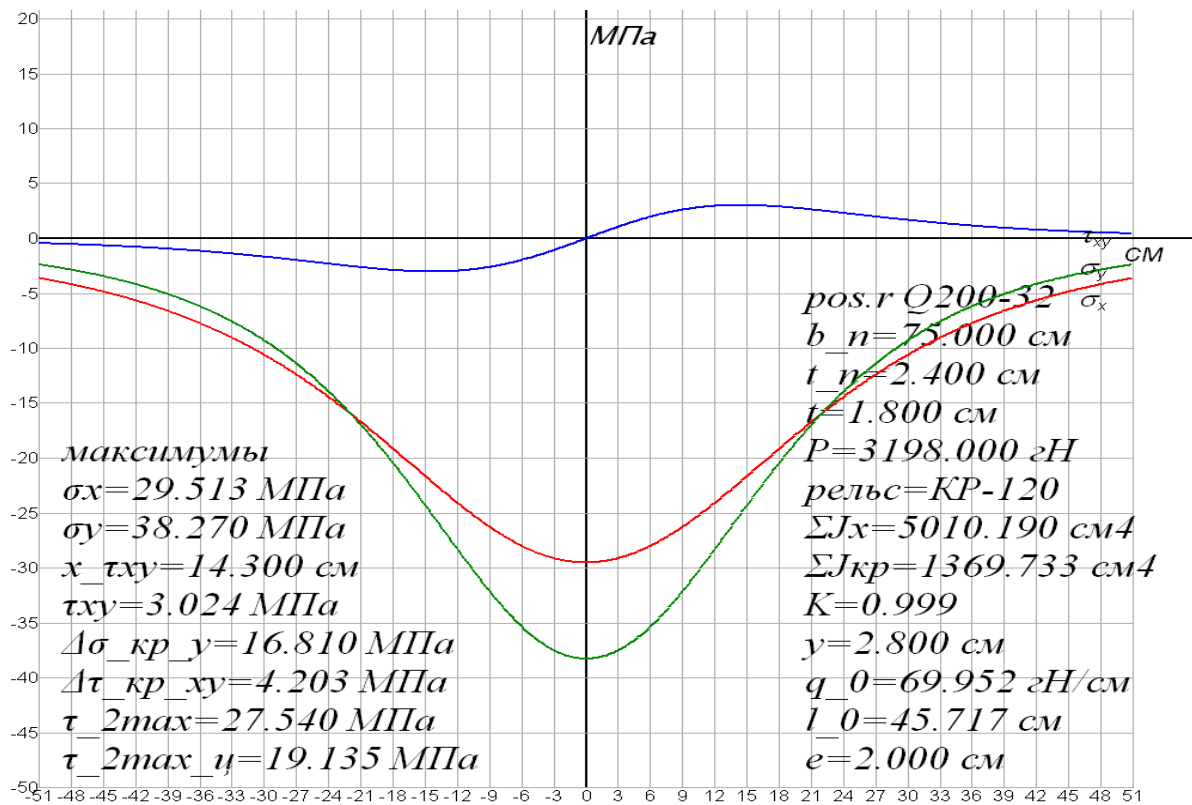


Рисунок 1 - Циклы колебаний локальных сдвигающих напряжений в подрельсовой зоне поясного шва

Определяем Q_{max} (рис.2) от нормативного воздействия одного крана с учётом коэффициента повторяемости γ_n : $Q_{max} = 10728,3 \text{ гН}$.

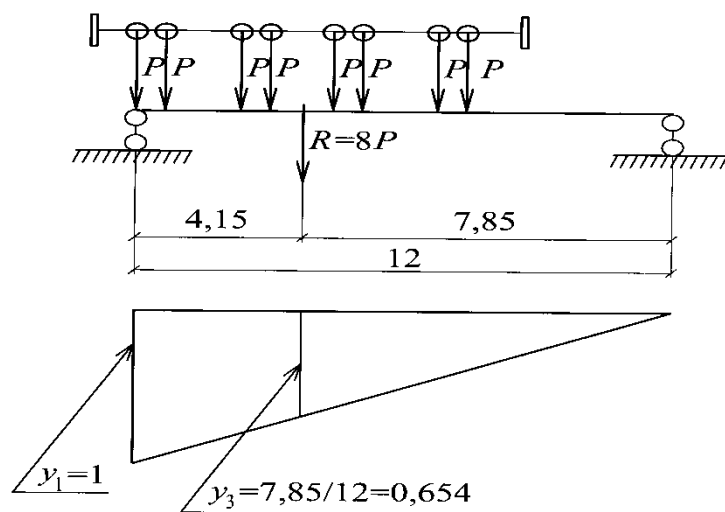


Рисунок 2 - Q_{max} от нормативного воздействия одного крана $P_H \gamma_{II} = 2460 \text{ гН}$ с учётом коэффициента повторяемости

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что выносимость верхней повреждаемой зоны балок следует проверять по площадкам, ориентированным следующим образом:

1. Площадка параллельна верхнему поясному шву и пересекает стенку под углом 45° .
2. Площадка параллельна поясному шву и перпендикулярна стенке балки (рис. 3.).

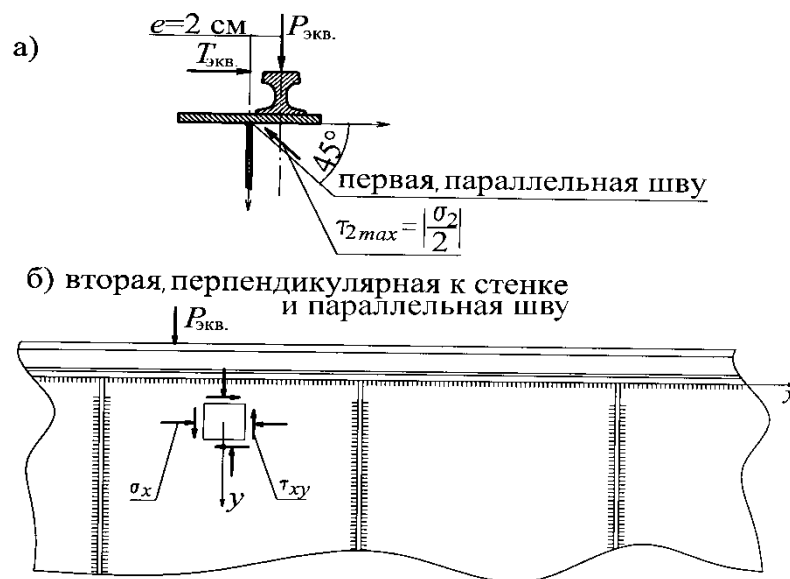


Рисунок 3 - Опасные площадки, по которым локальные напряжения, действующие динамически, могут достигать опасной величины

Таблица 5 - Циклы колебаний локальных сдвигающих напряжений (МПа), возникающих при качении колёс кранов

Колебания напряжений	Средние τ_m	Амплитуды τ_a	Экстремум $\tau_{\text{Экстр.}} = \tau_m + \tau_a$
Симметричные $A\tau = 1$	$\tau_m = 0$	$\tau_a = 0,25 \sum \sigma_y$	τ_a
Отнулёвые $A\tau = 0,5$	$\tau_m = \delta_{xy}$	$\tau_a = 0,25 \sum \sigma_y$	$\delta_{xy} + \tau_a$
Около опоры балки $A\tau < 0,5$	$\delta_{xy} = 74,74$	$\tau_a = 0,25 \sum \sigma_y$	$\delta_{xy} + \tau_a$

Таблица 6 - Циклы колебаний локальных сдвигающих напряжений (МПа), возникающих при качении колёс кранов

Колебания напряжений	Средние τ_m	Амплитуды τ_a	Экстремум $\tau_{\text{Экстр.}} = \tau_m + \tau_a$
Симметричные $A\tau = 1$	$\tau_m = 0$	$\tau_a = 25,86 > 22,5$	$\tau_a = 25,86$
Отнулёвые $A\tau = 0,5$	$\tau_m = \delta_{xy} = 0$	$\tau_a = 16,18 < 22,5$	$\tau_a = 16,18$
Около опоры балки $A\tau = 16,18/80,92 < 0,2$	$\delta_{xy} = 74,74$	$\tau_a = 16,18$	$74,74 + 16,18 = 80,92$ $80,92 < 100,2$

Выносливость при симметричных циклах не обеспечена. Пределы выносливости по сдвигающим напряжениям около опор подкрановых балок

Нижняя линия диаграммы выносливости

$$\tau_{\text{Пред.вын.}}^{\text{loc}} = \tau_{A=1K}^{\text{loc}} + |\tau_m| \cdot \text{tg}\psi_H.$$

Она наклонена к горизонтали под углом ψ_H . Угол наклона ψ_H нижней линии диаграммы выносливости легко найден из уравнения

$$\text{tg}\psi_H = \frac{\tau_{A=0,5K}^{\text{loc}} - \tau_{A=1K}^{\text{loc}}}{0,5 \cdot \tau_{A=0,5K}^{\text{loc}}} \Rightarrow \text{tg}\psi_H = 2 \cdot \left(1 - \frac{\tau_{A=1K}^{\text{loc}}}{\tau_{A=0,5K}^{\text{loc}}} \right) = 2 \cdot \left(1 - \frac{22,5}{46,9} \right) = 1,04.$$

Тангенс угла наклона ψ_H зависит от отношения пределов выносливости при симметричных $A_\tau = 1$ циклах колебаний $\pm \tau_{A=1K}^{\text{loc}} = \pm 22,5$ МПа и отнулёвых $A_\tau = 0,5$ циклах $\tau_{A=0,5}^{\text{loc}} = 46,9$ МПа, полученных статистической обработкой. Это отношение равно 1,04. Для сварных балок угол наклона $\psi_H = 46,12^\circ$.

Получена новая линия пределов выносливости по сдвигающим напряжениям:

$$\tau_{\text{Пред.вын.}}^{\text{loc}} = \tau_{A=1K}^{\text{loc}} + |\tau_m| \cdot \text{tg}\psi_H \Rightarrow \tau_{\text{Пред.вын.}}^{\text{loc}} = \tau_{A=1K}^{\text{loc}} + 1,04 \tau_{xy}$$

Тогда при средних напряжениях циклов 74,74 МПа. Предел выносливости около опоры: $\tau_{\text{Пред.вын.}}^{\text{loc}} = 22,5 + 1,04 \cdot 74,74 = 100,2$ МПа. Действующие напряжения $74,74 + 16,18 = 80,92 < 100,2$

Выносливость около опоры **обеспечена**.

Таблица 7 - Значения пределов выносливости R_v в зависимости от амплитудного коэффициента $A_t = \tau_a^{loc} / \tau_{экстр}^{loc}$, (где $\tau_{экстр}^{loc} = \tau_m + \tau_a^{loc}$)

$\pm \tau_a^{loc}$	22,5	23,3	23,46	23,7	24,1	24,9	25,7	26,6	26,7
A_t	1	0,54	0,5	0,44	0,38	0,29	0,24	0,21	0,21
$ \tau_m $	0	20	23,46	30	40	60	80	100	103,3
	22,5	43,3	46,92	53,7	64,1	84,9	105,7	126,6	130
R_v	22,5	43,3	46,92	53,7	64,1	84,9	105,7	126,6	130

Авторы считают, что подобные расчеты на выносливость не только сварного шва, но и всех частей подкрановых конструкций крановых путей необходимо учитывать при проектировании вновь возводимых промышленных предприятий (с тяжелым режимом работы кранового оборудования). Помимо этого для повышения безопасности при эксплуатации кранового оборудования рекомендуется переходить на неразрезные подкрановые балки [5,6] и новые эффективные профили крановых рельсов [7].

Библиографический список:

1. Нежданов К.К., Гарькин И.Н. Подкрановая балка с повышенным техническим ресурсом эксплуатации // Региональная архитектура и строительство. 2017. –№ 3 (32). – С. 119-122.
2. Туманов В.А. Повышение выносливости стальных подкрановых балок // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 1. С. 75-82
3. Шеин А.И., Бакушев С.В., Зернов В.В., Зайцев М.Б. Опыт обследования зданий и сооружений [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2017. №5. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/5.16/at_download/file.
4. Нежданов К.К., Лаштанкин А.А., Курткезов Д.Х. Решение проблемы обеспечения достаточной выносливости и ресурса интенсивно

эксплуатирующихся подкрановых балок // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. № 5 (250). С. 41-47

5. Гарькин И.Н. Теоретические исследования составных неразрезных подкрановых балок // Региональная архитектура и строительство. 2018. № 2 (35). С. 100-104.

6. 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. –№ 4. Т. 14. –С. 15-20.

7. Нежданов К.К., Кузьмишкин А.А., Гарькин И.Н. Применение толстостенных двутавровых крановых рельсов // Региональная архитектура и строительство. –2012. – № 3.– С. 79-84.