

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КРАНОВЫХ РЕЛЬСОВ ПРИ КОНТАКТЕ КОЛЕС МОСТОВОГО КРАНА

В.Ф. Сабуров, С.А. Паскин

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Крановые рельсы являются единственным конструктивным регулятором напряженно-деформированного состояния верхней, наиболее нагруженной зоны стенки сварных подкрановых балок. При перемещении колес мостовых кранов головки и боковые грани рельса подвергаются механическому и усталостному изнашиванию. В статье на примере рельса КР рассматриваются вопросы контактной прочности отечественных рельсов и рельсов по стандарту Германии. Также рассмотрены разработанные крановые рельсы нового сортамента для тяжелых условий эксплуатации. Моделирование НДС рельсов выполнено с использованием ПК «Autodesk Inventor». Показано, что рельсы типа КР не соответствуют современным условиям эксплуатации и требуют изменения геометрических параметров.

Ключевые слова: производственные здания, подкрановые пути, крановый рельс, напряженно-деформированное состояние, контактные напряжения.

Крановые рельсы входят в систему подкрановых путей одноэтажных производственных зданий и играют определяющую роль в обеспечении прочности и долговечности сварных подкрановых балок как конструктивный элемент, обеспечивающий распределение локальной крановой нагрузки на верхнюю зону стенки балки. Рельс при работе мостовых кранов находится в сложном напряженном состоянии, которое складывается из контактных напряжений в головке, напряжений от общего изгиба и кручения и местных напряжений в зоне перехода от головки рельса к шейке.

Как элемент системы крановый рельс должен отвечать условиям эксплуатации подкрановых путей. Напряженно-деформированное состояние (НДС) головки кранового рельса оценивается как объемное, о чем свидетельствуют различные по виду и характеру повреждения и разрушения рель-

сов [1]. Повреждения рельсов зависят от величины крановой нагрузки, уровня напряжений и распределением материала по поперечному сечению, т.е. геометрии рельса. В процессе эксплуатации контакт колеса с рельсом может быть точечным или линейным (рис. 1). В начале эксплуатации контакт точечный, а при износе головки рельса переходит в линейный (рис. 1, в).

Геометрия специальных крановых рельсов (тип КР) определена стандартом 1948 года [2] и во многом копирует геометрию железнодорожных рельсов, хотя их условия эксплуатации существенно отличаются. Косвенным показателем рациональности конструктивной формы рельсов их условиям эксплуатации является распределение металла по поперечному сечению (табл. 1). Из таблицы следует, что в специальных крановых рельсах основная доля металла сосредоточена в шейке

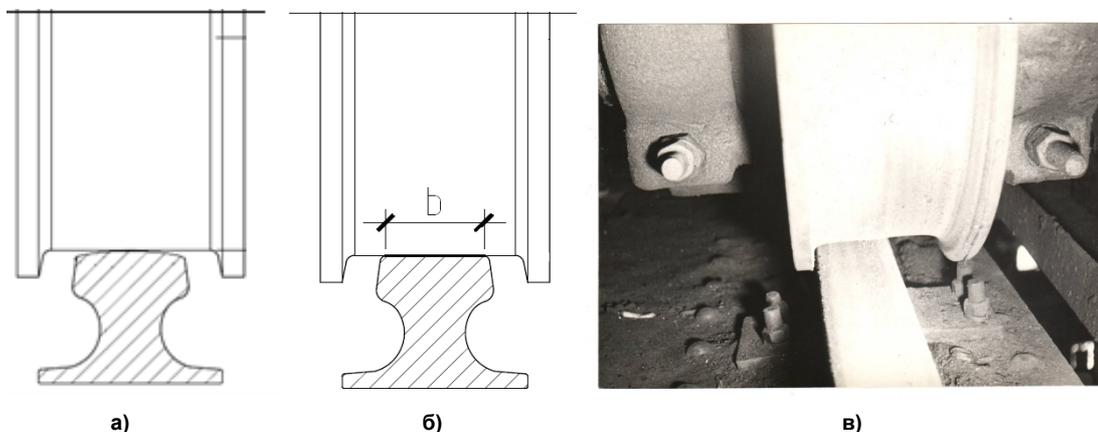


Рис. 1. Виды контакта колеса с рельсом:
а – точечный контакт; б – линейный контакт; в – контакт при эксплуатации

Таблица 1

Распределение металла по поперечному сечению рельсов, %*

Тип рельса	Головка	Шейка	Подошва	Расчетное давление колес крана, кН [3], не более	Рекомендуемый диаметр ходовых колес, мм
Крановые рельсы по ГОСТ 4121–9					
КР 70	29,3	35,8	34,9	350	500, 600
КР 80	28,3	37,2	34,5	500	500, 600
КР 100	27,2	37,3	35,5	600	700, 800
КР 120	27,5	36,6	35,9	800	800, 900

* Данные взяты из ГОСТ 4121–48.

Таблица 2

Геометрические характеристики исследуемых крановых рельсов

Стандарт	Тип рельса	Площадь сечения, см ²	Масса, кг/м	Геометрические характеристики			
				J _x , см ⁴	J _y , см ⁴	J _p , см ⁴	J _d , см ⁴
ГОСТ 4121-96 [7]	КР80	76,19	59,81	1504,57	438,96	1943,53	387,0
	КР100	105,85	83,09	2768,43	858,99	3627,42	765,0
	КР120	144,54	113,47	6350,91	1596,08	6350,91	1310,0
DIN 536 (Германия)*	A75	71,60	56,20	531,0	1011,0	1542,0	354,0
	A100	94,70	74,30	856,0	1345,0	2201,0	537,0
	A120	127,40	100,00	1361,0	2350,0	3711,0	888,0
Новые «ГУ» [6]	КР80 т	82,0	64,4	882,0	675,0	1557,0	–
	КР100 т	113,0	88,7	1802,0	1104,0	2906,0	–
	КР120 т	144,0	113,04	3986,0	1799,0	5785,0	–

* Здесь и далее DIN 536. Крановый рельс (burback).

и подошве (более 70 %), в то время как головка рельса имеет минимальный объем металла. При этом видно, что с увеличением мощности рельса и, следовательно, нагрузки на него, доля металла в головке уменьшается. Очевидно, что это противоречит условиям эксплуатации крановых рельсов, так как они опираются на жесткое малодеформируемое основание – пояс подкрановой балки. Кроме того, произошли конструктивные усовершенствования ходовой части кранов, негативно влияющие на эксплуатационные качества рельсов – замена подшипников скольжения на подшипники качения, что увеличивает боковую силу при контакте реборды колеса с головкой рельса.

В статье анализируются закономерности распределения контактных напряжений по поперечному сечению рельсов. Величина контактных напряжений определяет срок их службы, так как они, согласно [3, 4], определяют контактно-усталостное разрушение головки рельса и его вертикальный износ. При этом уменьшаются важные служебные геометрические характеристики рельса – моменты инерции на изгиб и кручение.

Особую актуальность совершенствование геометрии крановых рельсов приобретает в связи с переходом на новую актуализированную редакцию норм по расчету стальных конструкций [5, 9].

В табл. 2 приведен перечень исследованных отечественных крановых рельсов, их зарубежные аналоги и их начальные геометрические характеристики. Кроме того приведены характеристики отечественных крановых рельсов для тяжелых условий эксплуатации (индекс «т»), технические условия на которые разработаны в [6].

Отечественные крановые рельсы прокатываются из углеродистой стали К63 и имеют минимальный предел прочности 75,0 кН/см² и предел текучести 38 кН/см² [7]. Минимальный предел прочности крановых рельсов по DIN 536, которые также изготавливаются из углеродистой стали с содержанием углерода 0,40–0,60 %, составляет 69,0 кН/см².

На сегодняшний день существует несколько методик оценки контактного взаимодействия системы колесо-рельс. Наиболее близки для численного решения задачи зависимости, приведенные в [4]. Для точечного контакта рекомендуется формула:

$$\sigma_{\max} = 7500 \cdot k \cdot k_f \cdot \sqrt[3]{\frac{k_d \cdot k_n P}{D^2}}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от отношения радиуса закругления головки рельса к диаметру колеса, k_f – коэффициент, учитывающий влияние касательной нагрузки (сил трения) на напряжения в контакте, зависит от скорости перемещения крана; $k_d = 1 + av$ – коэффициент динамичности, зависящий от типа кранового пути, для стальных подкрановых балок $a = 0,15$; v – номинальная скорость перемещения крана, м/с; k_n – коэффициент неравномерности нагрузки по ширине рельса, P – давление колеса на рельс, D – диаметр колеса. Для линейного контакта:

$$\sigma_{\max} = 340k \cdot k_f \cdot \sqrt[3]{\frac{k_d \cdot k_n P}{b \cdot D}}. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) следует, что величина контактных напряжений зависит от диаметра ходовых колес мостового крана. Для рельсов типа КР соот-

Теория расчета строительных конструкций

ношение «тип рельса – диаметр колеса» приведены в табл. 1 на основании исследований [6].

Численное моделирование взаимодействия колеса крана и рельса выполнено в программном комплексе «Autodesk Inventor». Модель содержит деталь с геометрическими параметрами крановых рельсов КР по ГОСТ 4121-96 [7], рельсов типа А по DIN 536 и рельсов КР-«т» по ТУ [6]. Для каждого типа рельса выбирался соответствующий диаметр ходового колеса (см. табл. 1). На модель наложены следующие граничные условия и зависимости: рельс является неподвижной деталью с жестко закрепленным основанием; колесо – подвижная деталь, основанием которой является верхняя поверхность головки рельса. Рассмотрены два варианта взаимодействия: первый – статическое положение колеса на рельсе; второй – движение колеса по рельсу с различными скоростями.

Для верификации программы выполнен расчет рельса КР100 при диаметре колеса 700 мм и давлении колеса $P = 470$ кН по аналитическим формулам контактных напряжений методики Герца – Беляева [8] и по программе «Autodesk Inventor». Результаты сравнения представлены в табл. 3, из которой следует, что программа удовлетворительно описывает НДС головки рельса.

В процессе качения колеса силы, воспринимаемые рельсом, изменяются по величине, что существенно усложняет описание его напряженно-деформированного состояния. При этом пятно контакта перемещается и возникает эксцентриситет приложения вертикального давления.

Результаты расчета при статическом положении колеса представлены в табл. 4 при осевой нагрузке, а также при эксцентриситете пятна контакта. В качестве примера на рис. 2–4 представлены эпюры распределения контактных напряжений по сечению рельсов КР100 и его аналогов в соответствии с данными табл. 4.

На примере рис. 2 и табл. 4 выполним анализ закономерностей изменения контактных напряжений в рельсах КР100, КР100т и А100. За «эталон» примем значения напряжений в рельсе КР100. При центральном приложении вертикальной нагрузки имеем:

- для рельса КР100т $\sigma_x <$ на 12 %; $\sigma_y <$ на 29 %; $\sigma_z <$ на 3 %; $\sigma_{np} <$ на 8 %;
- для рельса А100 $\sigma_x <$ на 15 %; $\sigma_y <$ на 30 %; $\sigma_z <$ на 30 %; $\sigma_{np} <$ на 54 %;

Из приведенных данных следует, что наиболее рациональным сечением для распределения контактных напряжений является крановый рельс А100. В то же время рельс КР100 имеет поперечное сечение по расходу стали на 12 % больше рельса А100.

Влияние эксцентриситета на величину контактных напряжений можно оценить на рис. 3 и рис. 4. Анализ распределения максимальных напряжений по сечению крановых рельсов при $e = 30$ мм (рис. 3) показывает, что в рельсе КР100 вертикальную нагрузку воспринимает не все сечение, а только головка и, следовательно, это свидетельствует о том, что рельс КР100 более чувствителен к неравномерному нагружению, чем рельсы КР100т и А100.

Таблица 3
Результаты сравнения контактных напряжений по ПК «Autodesk Inventor» и аналитическим расчетам

Решение	Контактные напряжения, МПа							
	σ_x	Ошибка, %	σ_y	Ошибка, %	σ_z	Ошибка, %	τ_{zy}	Ошибка, %
Аналитическое КР100 (точечный контакт)	-1590	–	-1610	–	-2560	–	600 ($t=5$ мм)	–
ПК «Autodesk Inventor»	-1348	15,2	-1438	10,7	-2436	4,8	610	1,6

Таблица 4
Напряженное состояние головки рельсов в зависимости от эксцентриситета приложения вертикальной нагрузки

Тип рельса	Эксцентр. e , мм	Контактные напряжения, МПа							
		σ_x	σ_y	σ_z	τ_{zy}	σ_1	σ_2	σ_3	σ_{np} (Мизес)
КР100	0	-1475	-1733	-2695	942	-1406	-1406	-2955	1485
КР100т	0	-1297	-1237	-2618	612	-1216	-1216	-2632	1374
А100	0	-1253	-1221	-1899	461	-1199	-1199	-1917	691
КР100	15	-1330	-1638	-3194	802	-1310	-1310	-3222	1774
КР100т	15	-1374	-1303	-2665	612	-1264	-1264	-2666	1335
А100	15	-1142	-1113	-2021	471	-1111	-1111	-2029	906
КР100	30	-1628	-1627	-2808	567	-1569	-1569	-2859	1260
КР100т	30	-1429	-1241	-2496	697	-1160	-1160	-2575	1301
А100	30	-1160	-1197	-1961	491	-1119	-1119	-1986	824
КР100 линейный контакт	–	-150	-290	-270	–	–	–	–	–

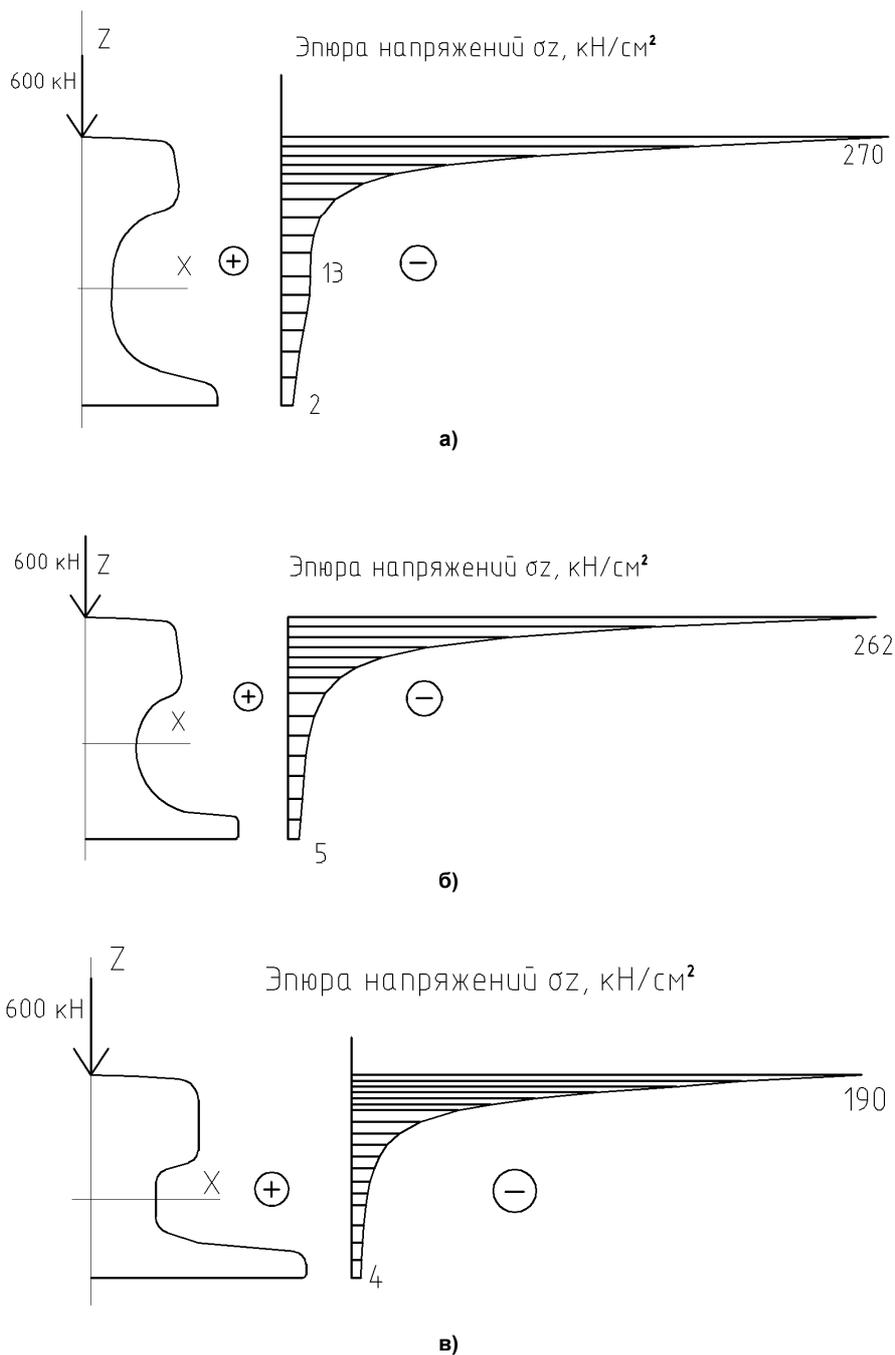


Рис. 2. Эпюры максимальных контактных напряжений в крановых рельсах при осевой нагрузке: а – КР100; б – КР100т; в – А100

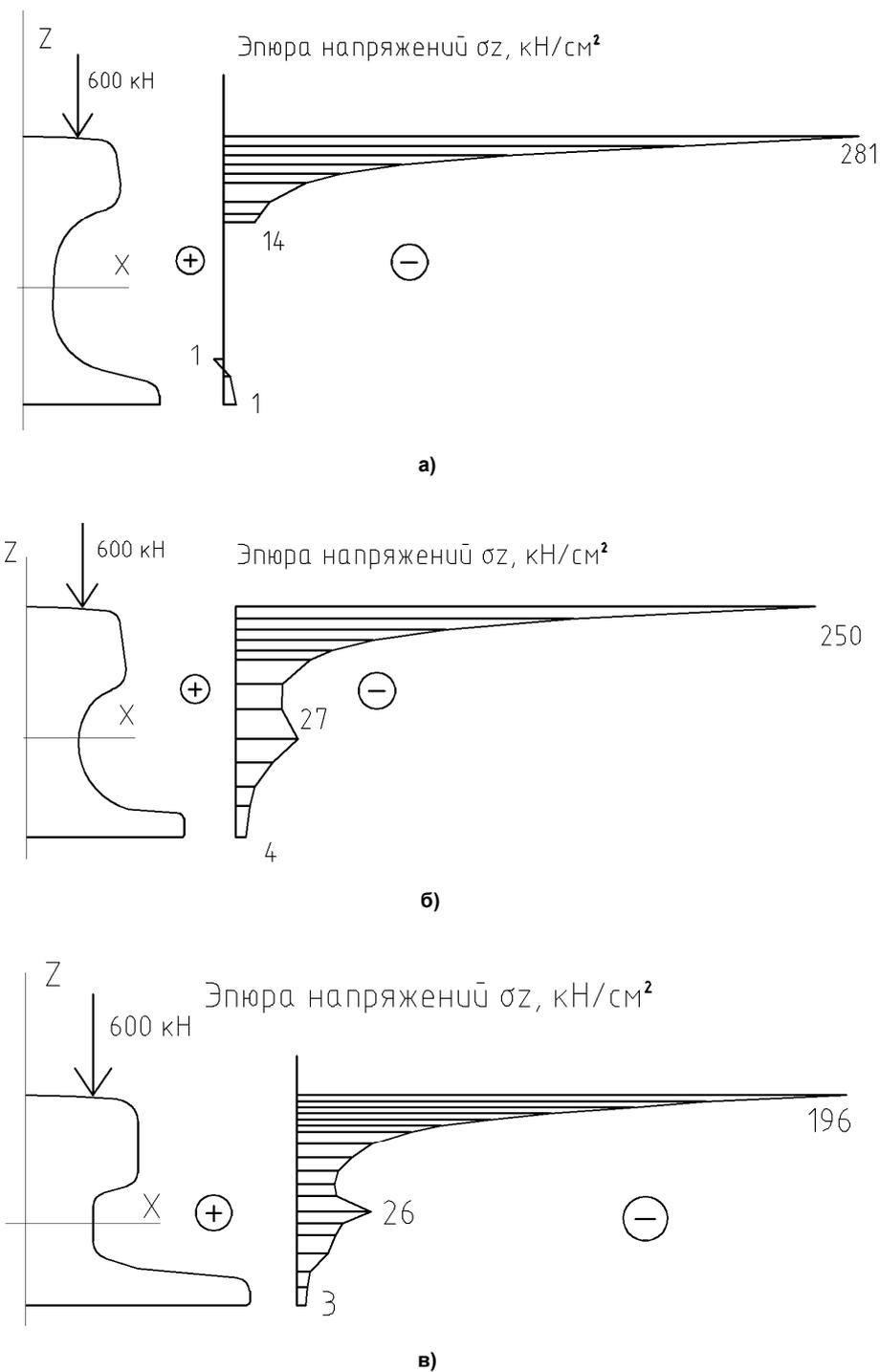


Рис. 3. Эпюры максимальных контактных напряжений в крановых рельсах при нагрузке с эксцентриситетом $e = 30$ мм: а – КР100; б – КР100Т; в – А100

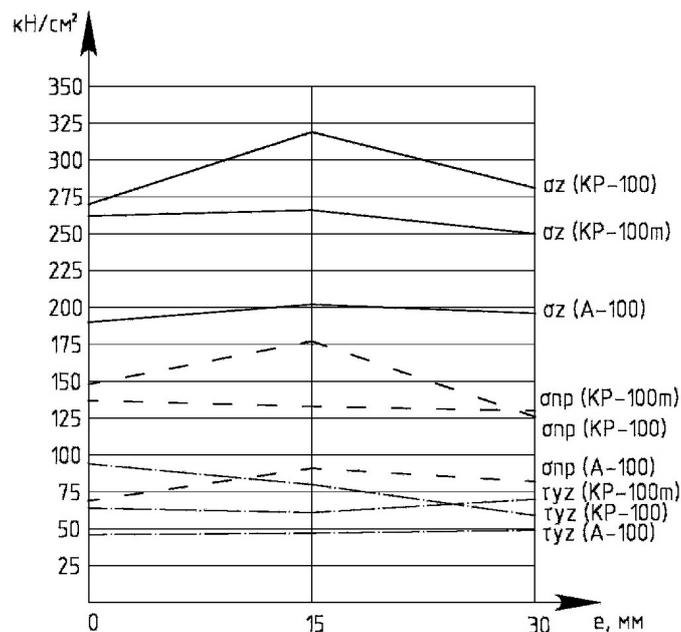


Рис. 4. Зависимости напряжений σ_z и $\sigma_{пр}$ по Мизесу в рельсах от эксцентриситета вертикальной нагрузки

Выводы

1. Отечественные крановые рельсы, прокатываемые по ГОСТ 4121-96, не отвечают современным требованиям к условиям эксплуатации и требуют изменения конструктивной формы.

2. Геометрия головки крановых рельсов должна обеспечивать линейный контакт с ободом колеса, что значительно снизит ее нагруженность (см. табл. 4) и, следовательно, повысит износостойчивость.

Литература

1. Сабуров, В.Ф. Закономерности износа и особенности напряженного состояния крановых рельсов подкрановых путей промзданий / В.Ф. Сабуров // Сб. Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее: материалы VIII Украинской научно-технической конференции. – Киев, 2004. – С. 624–630.

2. Сабуров, В.Ф. Эволюция профиля крановых рельсов для подкрановых путей производственных зданий / В.Ф. Сабуров, Н.Е. Крупнова // Институциональные проблемы саморазвития территориальных систем инновационной России. Международная конференция с элементами научной школы для молодежи: сб. науч. трудов. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2010. – С. 77–87.

3. Справочник по кранам: в 2 т. Т. 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы

расчета кранов, их приводов и металлическая конструкция / В.И. Брауде, М.М. Гохберг, И.Е. Заягин и др.; под. общ. ред. М. М. Гохберга. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.

4. Александров, М.П. Грузоподъемные машины. – Изд-во МГТУ им. Баумана: Изд-во «Высшая школа», 2000. – 550 с.

5. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – М., 2011.

6. Сабуров, В.Ф. Закономерности усталостных повреждений и разработка метода расчетной оценки долговечности подкрановых путей производственных зданий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.Ф. Сабуров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 42 с.

7. ГОСТ 4121–96. Рельсы крановые. Технические условия. – Взамен ГОСТ 4121–76; введ. 01.07.02.

8. Писаренко, Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Наук. Думка, 1988. – 736 с.

9. Сабуров, В.Ф. Обеспечение усталостной прочности подкрановых балок в связи с переходом на актуализированные нормативные документы / В.Ф. Сабуров // Материалы Международного конгресса «Актуальные проблемы современного строительства и пути их эффективного решения». – СПб.: СПбГАСУ, 2012. – Ч. I. – С. 101–103.

Сабуров Валерий Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), saburov_skiis@mail.ru

Паскин Сергей Александрович, аспирант кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), paskinsa@gmail.com

Поступила в редакцию 27 декабря 2016 г.

STRESS-STRAIN STATE OF CRANE RAILS UPON THE CONTACT OF TRAVELLING CRANE WHEELS

V.F. Saburov, saburov_skiis@mail.ru

S.A. Paskin, paskinsa@gmail.com

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Crane rails are the only constructive controller of the stress-strain state of the upper, most loaded zone of the wall of welded crane girders. When moving the wheels of travelling cranes, the head and side faces of the rail are subjected to mechanical and fatigue wear. Using the example of crane rail, the article deals with the issues of contact strength of domestic rails and rails made by the German standards. The developed crane rails of a new assortment for severe operating conditions are also considered. The simulation of the stress-strain state of rails is carried out using the PC "Autodesk Inventor". It is shown that the crane rails do not correspond to contemporary operating conditions and require changes in geometric parameters.

Keywords: industrial buildings, crane runways, crane rails, stress-strain state, contact stress.

References

1. Saburov V.F. [Regularities of Wear and Stress Conditions of Crane Rails of Crane Tracks of Industrial Buildings]. *Sbornik statey: Metallicheskie konstruksii: vzglyad v proshloe i budushchee. Materialy VIII Ukrainskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Collection of Scientific Papers: Metal Constructions: a Look into the Past and the Future. Materials of the VIII Ukrainian Scientific and Technical Conference]. Kiev, 2004. pp. 624–630. (in Russ.).
2. Saburov V.F. Krupnova N.E. [Evolution of the Profile of Crane Rails for Crane Tracks of Industrial Buildings]. *Institutsionalnye problemy samorazvitiya territorialnykh sistem innovatsionnoy Rossii. Mezhdunarodnaya konferentsiya s elementami nauchnoy shkoly dlya molodezhi* [Institutional Problems of Self-Development of Territorial Systems of Innovative Russia. International Conference with Elements of a Scientific School for Young People. Collection of Scientific Papers]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2010, pp. 77–87. (in Russ.).
3. Braude V.I., Gokhberg M.M., Zayagin I.E. *Spravochnik po kranam* [Directory on Cranes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. vol. 1. 536 p.
4. Aleksandrov, M.P. *Gruzopod"emnye mashiny* [Load-Lifting Machines]. Moscow, «Vysshaya shkola» Publ., 2000. 550 p.
5. *SP 16.13330.2011. Stal'nye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP II-23-81** [Steel Structures. Updated Version II-23-81*]. Moscow, 2011. (in Russ.).
6. Saburov V.F. *Zakonomernosti ustalostnykh povrezhdeniy i razrabotka metoda raschetnoy otsenki dolgovechnosti podkranovykh putey proizvodstvennykh zdaniy*. Avtoref. dokt. diss. [Regularities of Fatigue Damage and the Development of a Method for Calculating the Longevity of Crane Runways in Industrial Buildings. Abstract of doct. diss.]. Chelyabinsk, 2002. 42 p.
7. GOST 4121-96. *Rel'sy kranovye. Tekhnicheskie usloviya*. [Crane Rails. Specifications]. Moscow, 2002. (in Russ.).
8. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Directory on the Resistance of Materials]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1988. 736 p.
9. Saburov V.F. [Ensuring the Fatigue Strength of Crane Girders in Connection with the Transition to Updated Normative Documents]. *Materialy Mezhdunarodnogo kongressa «Aktual'nye problemy sovremennogo stroitel'stva i puti ikh effektivnogo resheniya»* [Materials of the International Congress "Actual Problems of Modern Construction and Ways to Effectively Solve them"]. St. Petersburg, 2012, pp. 101–103. (in Russ.).

Received 27 December 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сабуров, В.Ф. Напряженно-деформированное состояние крановых рельсов при контакте колес мостового крана / В.Ф. Сабуров, С.А. Паскин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 20–26. DOI: 10.14529/build170203

FOR CITATION

Saburov V.F., Paskin S.A. Stress-Strain State of Crane Rails upon the Contact of Travelling Crane Wheels. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2017, vol. 17, no. 2, pp. 20–26 (in Russ.). DOI: 10.14529/build170203