



УДК 539.3

**А.С. Яблоков**, к.т.н., доцент кафедры Подъемно-транспортных машин и машиноремонта  
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

E-mail: alex-vodnik@mail.ru

**А.В. Замятин**, магистрант кафедры Подъемно-транспортных машин и машиноремонта  
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

E-mail: [pmpmvgvat@yandex.ru](mailto:pmpmvgvat@yandex.ru)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИЧАЛЬНОГО ПЕРЕГРУЖАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВРЕЖДЕННОЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ

*Ключевые слова:* причальный перегружатель, металлоконструкция, многоцикловая усталость, механика поврежденной среды, микродефекты, макротрещина, прочность, ресурс

*Для оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса металлоконструкции причального перегружателя на базе варианта уравнений механики поврежденной среды, при деградации материала по механизму многоциклового усталости, проведена оценка кинетики напряженно-деформированного состояния опасной зоны металлоконструкции причального перегружателя и сделан прогноз остаточного ресурса по его фактической эксплуатационной нагруженности.*

В настоящей статье обсуждается возможность эксплуатации причальных перегружателей КК-26,0-33-10,65-17,5-17,5, изготовленных германской фирмой “Kranbau Eberswalde GmbH”, эксплуатируемых на лесной бирже бумажного комбината (см. рисунок 1).



Рис.1 Вид крана

Основной проблемой при определении возможной эксплуатации данных перегружателей является возникновение трещины в диафрагмах металлоконструкции переходящих в тело опор и их веерообразное распространение. Возникает необходимость в определении причин возникновения трещин и определения путей предотвращения дальнейшего появления трещин.

Характеристики перегружателей:

-режим работы	A7
-механизма подъёма	M7
-передвижения крана	M6
-передвижения грузовой тележки	M6
-температурный режим работы –	от +40 до -30
-грузоподъёмность на крюке	26т
-грузоподъёмность полезная грейферный режим	20т
-высота подъёма максимальная крюковой режим	14,5м
-высота подъёма максимальная грейферный режим	10м
-глубина опускания максимальная крюковой режим	10,5м
-глубина опускания максимальная грейферный режим	14,5м
-пролет крана	33м
-база	10м

Масса, т

- крана с грейфером, используемым в эксплуатации	263;
- тележки	24.4.

Максимальные ускорения, g:

- крана	0.05;
- тележки	0.07.

Механические характеристики стали, из которой изготовлены элементы крана, принимались следующими:

- модуль упругости стали	$E = 20000 \text{ кг/мм}^2$ ;
- коэффициент Пуассона	$\nu = 0.3$ ;
- предел прочности стали St 37	$\sigma_B = 37 \text{ кг/мм}^2$ ;
- предел пропорциональности стали St 37	$\sigma_{02} = 23.5 \text{ кг/мм}^2$

Этот кран изначально проектировался как конструкция с повышенной податливостью с присущими такому решению недостатками.

При составлении расчетных схем крана использовалась чертежно-конструкторская документация фирмы "KranbauEberswaldeGmbH".

Далее приняты следующие соглашения:

---

*Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов*

- направление оси координат  $X$  – вдоль перемещения опор крана;
- направление оси координат  $Y$  – вдоль перемещения грузовой тележки;
- направление оси координат  $Z$  – вверх;
- для упрощения расчета конструкцию крана считаем симметричной;
- жесткость конструкции крана такова, что не приводит к возникновению деформаций от собственного веса;
- собственный вес конструкции крана не учитываем (учитываются только веса грузовой тележки, поворотной подвески, грейфера и груза)

В качестве данных в процессе расчета могут быть использованы параметры:

$L_{тел}$  - вылет тележки по отношению к опорам 17,5м  
 $R_{тел}$  - вес тележки 24400 кг;

$R_{гр}$  - вес груза (с поворотной подвеской и грейфером) 12000 кг;

$A_y$  - ускорение (замедление) движения крана 0,5 м/с<sup>2</sup>;

$A_x$  - ускорение (замедление) движения тележки относительно крана 0,7 м/с<sup>2</sup>;

$V_z$  - скорость подъема/опускания груза; 0,67 м/с;

$\Delta y$  - взаимное смещение опор крана относительно друг друга по оси  $Y$  (вдоль рельсов);

$\Delta x$  - взаимное смещение опор крана относительно друг друга по оси  $X$  (вдоль пролета).

В качестве расчетной нагрузки, далее НАГРУЗКА, принимаем сумму весов грузовой тележки (24400 кг) с поворотной подвеской, грейфером и грузом (12000 кг), что составляет 36400 кг.

Для оценки деформации крана рассмотрим следующие случаи:

1. НАГРУЗКА находятся на проектном вылете  $L_{тел} = 17,5\text{м}$  со стороны шарнирной опоры крана.
2. НАГРУЗКА находятся над шарнирной опорой крана.
3. НАГРУЗКА находятся на середине пролета крана.
4. НАГРУЗКА находятся над жесткой опорой крана.
5. НАГРУЗКА находятся на проектном вылете  $L_{тел} = 17,5\text{м}$  со стороны жесткой опоры крана.

На Рис.2 представлена схема конструкции крана с расчетной нагрузкой. Для упрощения разрезаем пространственный каркас плоскостью  $S$ , приводя ее к плоской схеме Рис.3

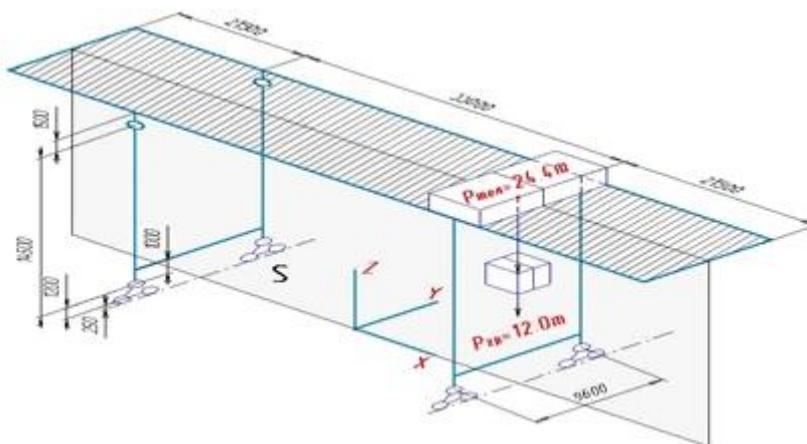


Рис. 2. Пространственная схема

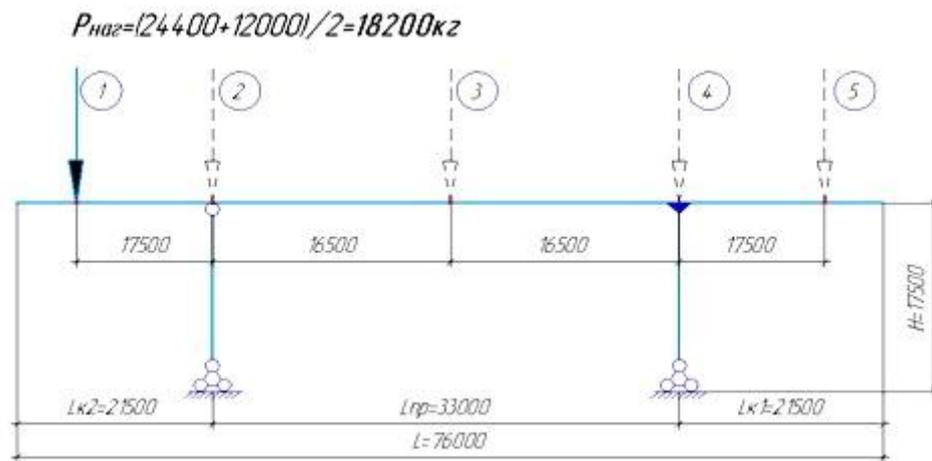


Рис.3. Плоская схема

На рисунках 4-8 показаны варианты деформации металлоконструкции при нагружении крана согласно схеме, указанной на рисунке 3.



Рис. 4. Деформации крана (случай 1).



Рис. 5. Деформации крана (случай 2).

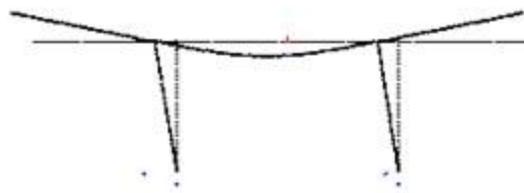


Рис. 6. Деформации крана (случай 3).



Рис. 7. Деформации крана (случай 4).

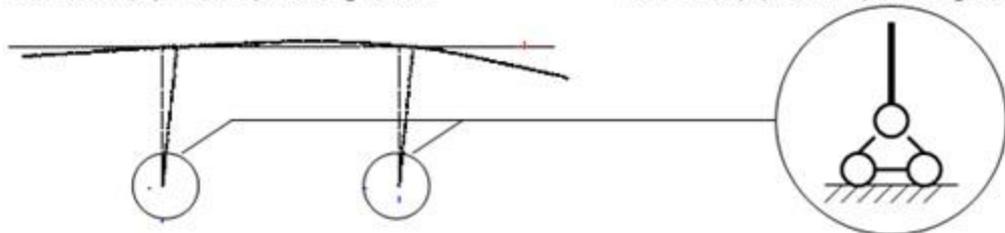


Рис. 8. Деформации крана (случай 5).

Все нижние точки опор крана на схемах (Рис.4 – Рис. 8) представляют собой неподвижные шарниры (Рис. 8).

Как видно из результатов, на опоры крана (в случаях 2 и 4) действуют только вертикальные силы (нагрузка и опорная реакция). Изгибающие моменты в опорах отсутствуют, следовательно, нет предпосылок для возникновения областей концентрации напряжений в опорах.

Заметим, что изгибающие моменты в опорах крана отсутствуют во всех рассмотренных случаях. Деформации, возникающие от нагружения, воспринимают

верхние пролетные балки, а опоры не изгибаются, а поворачиваются в плоскости осей XZ на шарнирах. Шарнирами здесь являются шарнир опоры и места контакта колесо – рельс.

Все это справедливо, когда кран находится в неподвижном состоянии, но при работе, вследствие неравномерного хода крана, возникает опережение одной опоры относительно другой. Появляется перекося опор с предполагаемой величиной  $\Delta y = 400$  мм. Следствием этого перекося является разворот конструкции крана, но только в плоскости верхних балок, а развороту нижних точек опор препятствуют реборды колес (опоры как бы защемляются). В верхнем поясе балок возникает крутящий момент, вызванный парой сил  $F-F_c$  плечом  $9600\text{мм} / 2 = 4800\text{мм}$ .

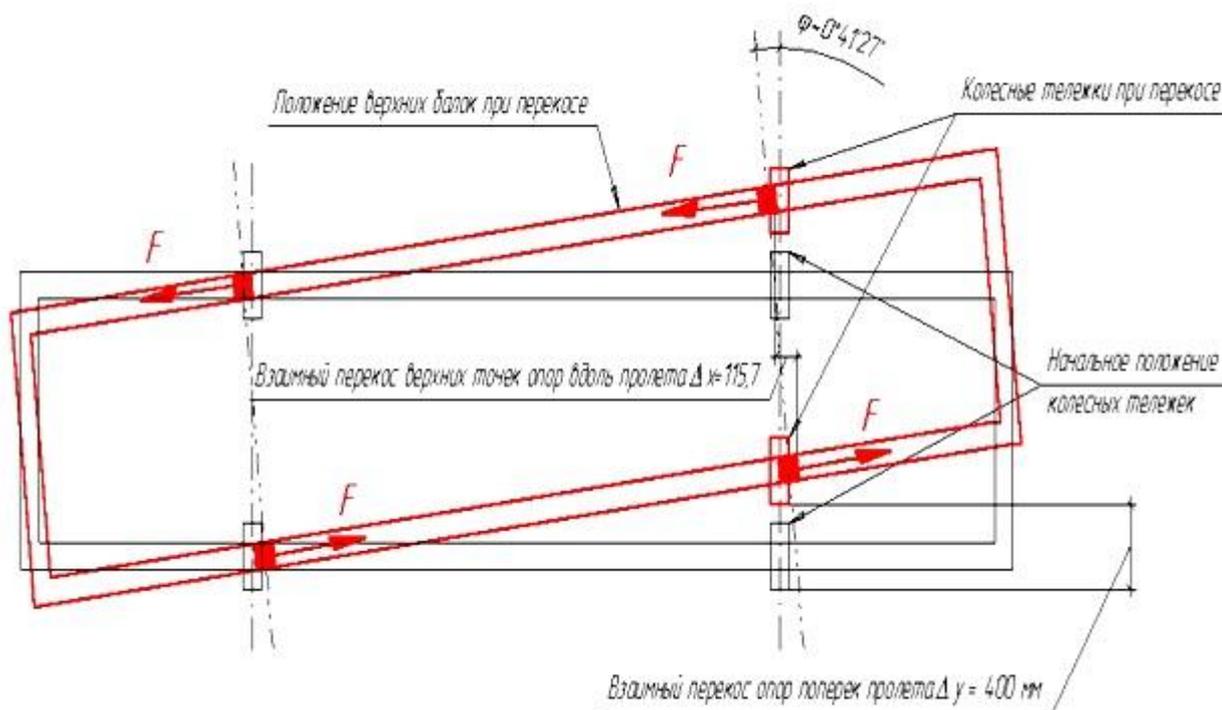


Рис. 9 Деформации крана при перекося опор

Используем формулу

$$\varphi = (M_k * l) / (\beta * b * c * G);$$

где:  $\varphi$  – угол закручивания, рад;

$M_k$  – момент кручения, кг\*см;

$l$  – длина стержня, см;

$\beta$  – коэффициент,  $\beta=0,25$ ;

$b, c$  – габариты сечения,  $b=135,3$  см,  $c=59$  см;

$G$  – модуль упругости, принимается  $G=8*10^5$  кг/см<sup>2</sup>

Из этой формулы находим момент  $M_k$ :

$$M_k = \frac{\varphi * \beta * b * c^3 * G}{l} = \frac{0,012057 * 0,25 * 135,3 * 59^3 * 8 * 10^5}{1750} \approx 38300000 \text{ кг} * \text{см}$$

а, зная плечо (4800 мм) – находим силу  $F$ .

$$F = \frac{38300000 \text{ кг} * \text{см}}{480 \text{ см}} = 79800 \text{ кг}$$

Таким образом, на конструкцию крана при перекося опор действует горизонтальная сила вдоль пролета, вызывающая деформации скручивания и изгиба опор.

Для оценки напряжений, возникающих в опоре крана, строим эпюру моментов для случая 5 (НАГРУЗКА находится на проектном вылете 17,5м со стороны жесткой опоры крана), учитывая действие силы F.

Находим величину напряжения:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{63840000 \text{ кг} \cdot \text{см}}{13905 \text{ см}^3} = 4590 \text{ кг} / \text{см}^2$$

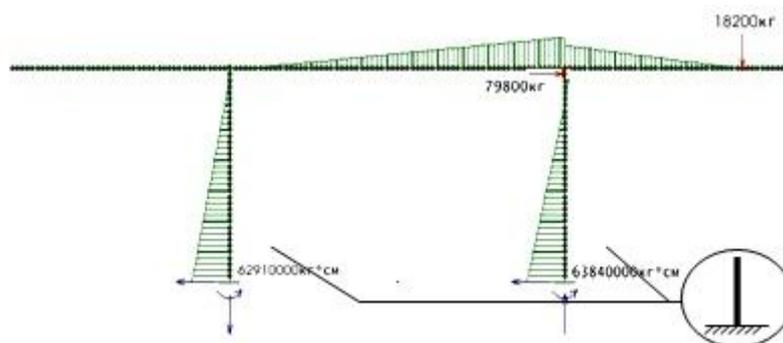


Рис. 10. Эпюра моментов

Найденная величина существенно превосходит предел прочности стали St 37, равный  $3700 \text{ кг/см}^2$ , что и вызывает появление трещин в элементах конструкции.

Основной причиной появления трещин в металлоконструкции является конструктивная недоработка при конструировании перегружателей, при этом для выявления возможности их дальнейшей эксплуатации необходимо проанализировать места появления трещин и при каких условиях их можно избежать.

Наибольшие проблемы проявились в узле сопряжения стойки жесткой опоры со стяжкой (см. рисунок 11). Конструкция жесткой опоры выполнена из трех сварных корыччатых частей, соединенных чистыми болтами.



Рис. 11 Место образования трещин в жёсткой опоре

На третьем году эксплуатации трещины, образовавшиеся на диафрагмах (см. рисунок 12), вышли на стенки стойки и разошлись на них веерообразно. Основная причина образования трещин - высокий уровень концентрации напряжений в

*Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов*

*Секция IV Техническая диагностика и ресурс подъемно-транспортной техники портов и транспортных терминалов*

ослабленных зонах диафрагмы. Неудовлетворительное качество материала стенок в этом месте дополнительно способствовало развитию усталостных трещин.

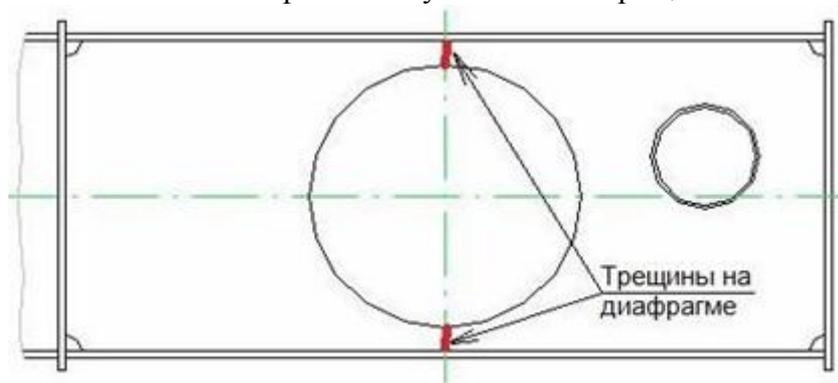


Рис.12 места образования трещин в диафрагмах

Исходя из этого, было принято решение выявить общий уровень напряжений в опоре и места концентрации напряжений, что показано на рисунке 13.

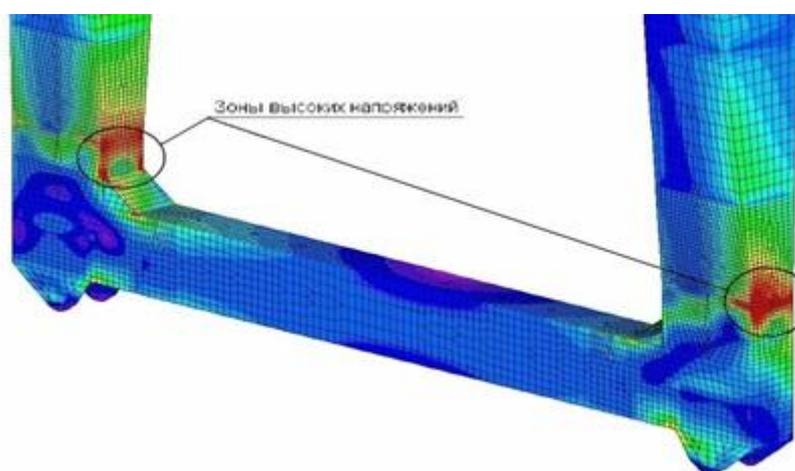


Рис.13 Места концентрации напряжений

Для снижения напряжения в месте радиусного сопряжения поясов было принято решение установить накладку. Желая существенно снизить напряжения в проблемных местах, установили усиливающие элементы. В результате этого участок высокой концентрации напряжений сместился на концы ребер элемента усиления и стал в скором времени, источником новых трещин.

Согласно эскизу, представленному на рис. 14, проведено КЭ (конечно-элементное) моделирование и расчет НДС (напряженно-деформированного состояния) крана в том состоянии, в котором он находится в данный момент. Т.е. к неподвижной опоре с обеих сторон приварены стальные косынки, скрепленные между собой пластиной, с тыльных сторон неподвижной опоры приварены стальные Т – образные ребра жесткости.

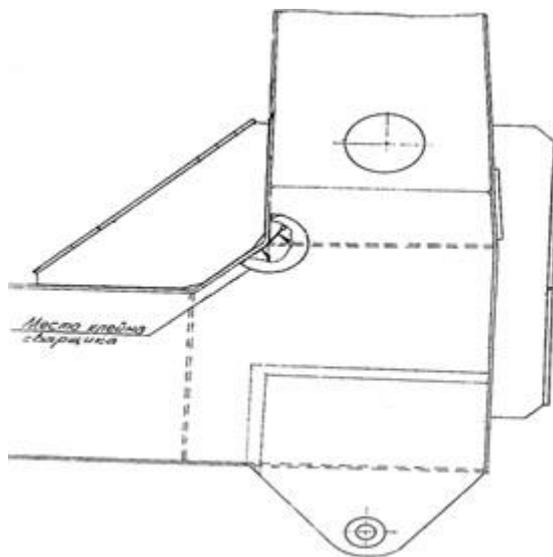


Рис. 14. Эскиз углового усиления крана с дополнительной пластиной

На рисунках 15а и 15б представлена объемная и КЭ модели углового усиления.

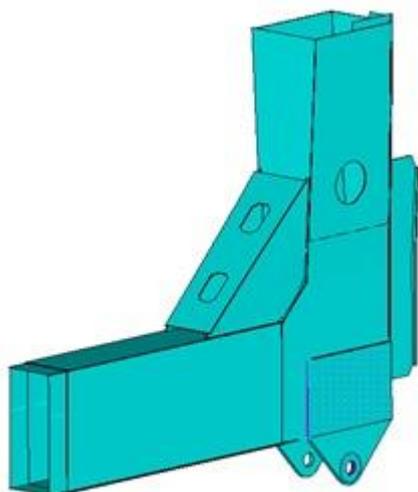


Рис. 15а

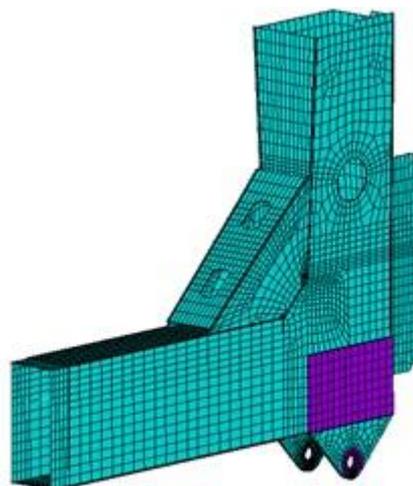


Рис. 15б

В результате расчетов при действии нагрузок получены поля НДС и перемещений крана.

На рисунке 16 представлено распределение суммарных перемещений при действии рабочей нагрузки. На рисунках 17, 18 показаны поля интенсивности напряжений при действии рабочих нагрузок.

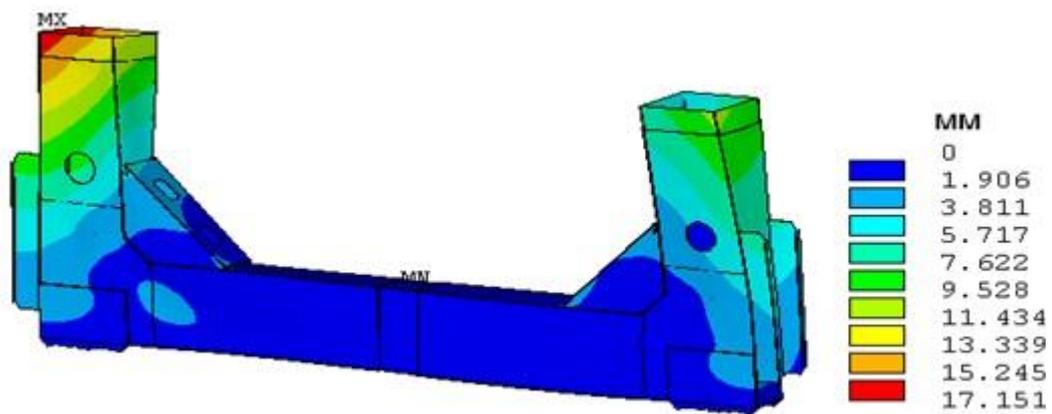


Рис. 16 Поля суммарных перемещений при действии эксплуатационной нагрузки

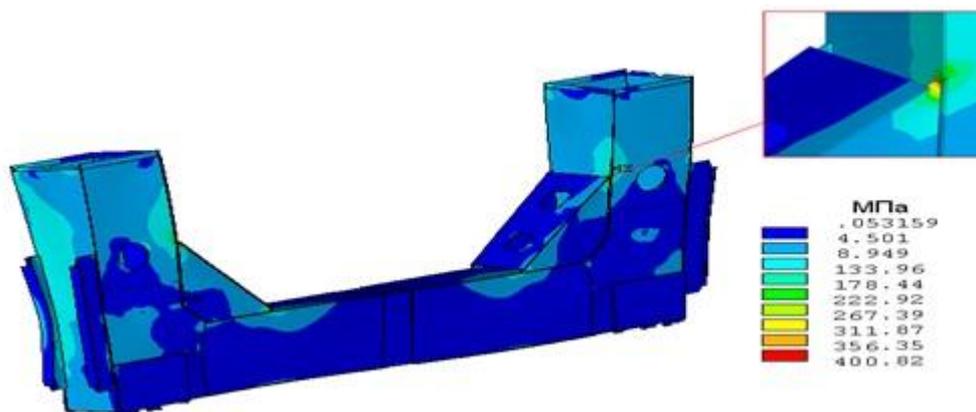


Рис. 17 Интенсивность напряжений в косынке при действии нагрузки

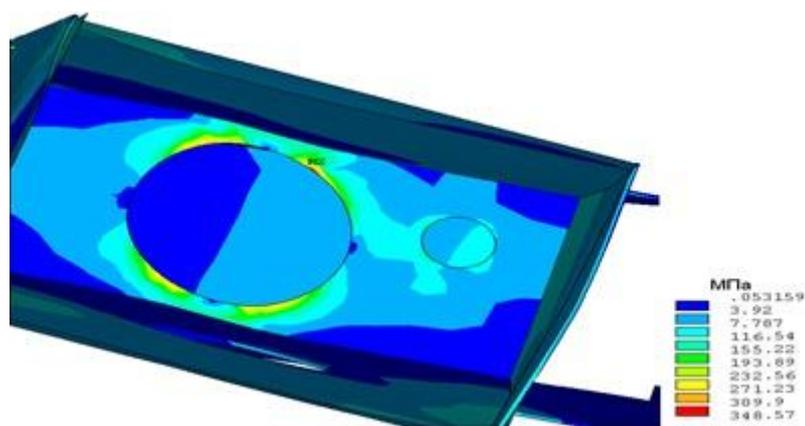


Рис. 18. Интенсивность напряжений в диафрагме при действии нагрузки

Полученные коэффициенты запаса прочности позволяют сделать вывод, что при действии на опоры крана переменных циклических нагрузок, к которым можно отнести эксплуатационные нагрузки, введение пластины, соединяющей косынки неподвижных опор, приводит к ухудшению вибропрочности конструкции.

Для того, чтобы обеспечить работу опор крана без возникновения трещин необходимо провести мероприятия по модернизации углового усиления опор, приводящие к тому, чтобы напряжения в деталях были ниже, чем предел усталости материалов деталей опор.

Еще одним проблемным местом при эксплуатации перегружателей стало место крепления балансирных тележек к жесткой опоре. На рисунке 19 показаны места концентрации напряжения в местах крепления балансирной тележки при передвижении перегружателя перемещением груза.

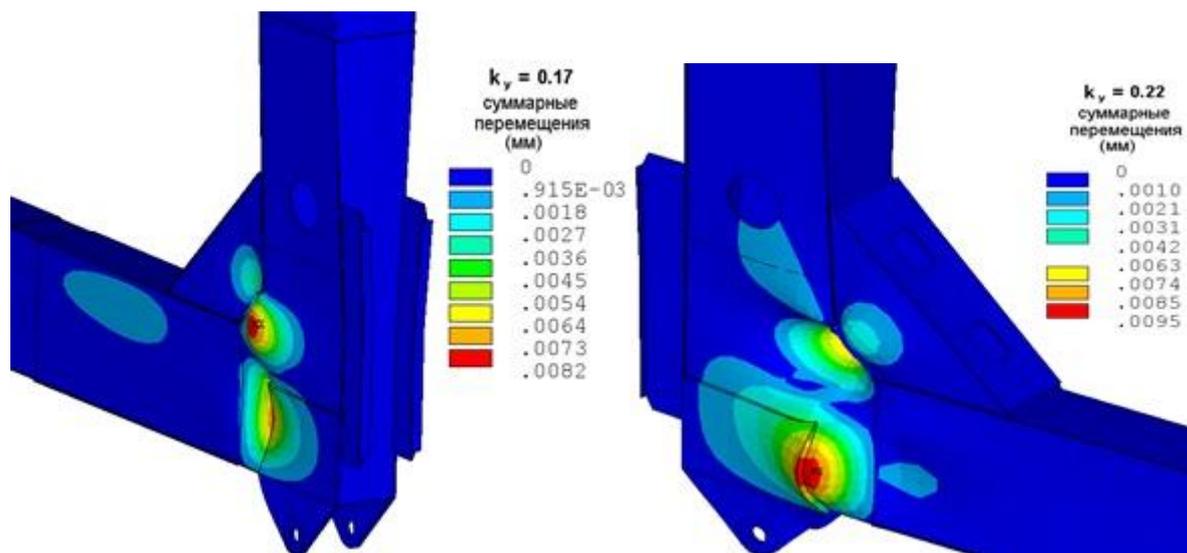


Рис. 19 Места концентрации напряжения

Выявленные проблемы в металлоконструкции перегружателя заставляют задуматься о целесообразности дальнейшего использования этих перегружателей, так как существующая конструкция жестких опор и возможные варианты их усиления не обеспечивают безопасную эксплуатацию. Владельцами перегружателей было принято решение о дальнейшей эксплуатации причальных перегружателей. Единственным возможным вариантом дальнейшей эксплуатации перегружателей является проектирование и изготовление новой жесткой опоры. Существенной проблемой данного варианта решения проблем являлось согласование в изменении в конструкцию с заводом-изготовителем.

Места концентрации напряжения, выявленные при расчетах и подтвержденные результатами эксплуатации, были усилены, а концентрация напряжений снижена. Это выразилось в увеличении толщины стенок и поясов на 2 мм. Вместо перехода от горизонтального участка пояса к вертикальному с изломом и двумя участками радиусом 25 мм сделали одно радиусное сопряжение радиусом 1380 мм. Толщина пояса на этом участке была увеличена с 12 мм до 20 мм.

Для обеспечения провозного габарита и технологичности конструкции стыки были перенесены на горизонтальный участок и выполнены на высокопрочных болтах, рисунок 20



Рис. 20 Вид новых опор

Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов

Секция IV Техническая диагностика и ресурс подъемно-транспортной техники портов и транспортных терминалов



Рис. 21 - Соединение опоры с балансиrom



Рис. 22 - Соединение опоры с балансиrom

Для повышения технологичности при изготовлении и монтаже шарниры соединения опоры с балансирами изменены. Вместо прежней конструкции шарнира (см. рисунок 21) применена принципиально иная, указанная на рисунке 22.

Таким образом, обеспечение дальнейшей безопасной эксплуатации причальных перегружателей возможно в случае изготовления и замены крупногабаритных узлов с помощью внесения конструктивных изменений в оригинальные конструкции.

### **Список литературы:**

- [1]. Александров, М. П. Подъёмно-транспортные машины/М.П. Александров.- М.: Высш. шк., 1985.- 520 с.
- [2]. Гохберг М.М. Справочник по кранам/М.М. Гохберг.- Д.: Машиностроение, 1988.-Т.1-336 с., Т.2-559 с.
- [3]. Кузьмин А. В., Марон Ф. Л. Справочник по расчётам механизмов подъёмно-транспортных машин/А.В. Кузьмин.-М.:Высш. шк., 1983.- 350 с.
- [4]. Дукельский А.И. Портовые грузоподъемные машины/А. И. Дукельский- М.: Транспорт, 1970. -438 с.
- [5]. Анурьев В.И. Справочник конструктора- машиностроителя/ И.Н. Жесткова - М.: 2006,- 928 с.
- [6]. Соколов С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин/ С.А. Соколов -Л.: 2005.-423 с.
- [7]. Гладышев А.Н., Веселов Ю.Б. и др. Технология и организация перегрузочных работ/А.Н. Гладышев - Горький.: 1988.- 84 с.
- [8]. Гладышев А.Н., Веселов Ю.Б., Матреничев Е.И. Техничко-экономические обоснования схем механизации перегрузки грузов/Ю.Б. Веселов.- Горький. 1988. -71 с.
- [9]. Саломатников М.Е. Механизация портовых перегрузочных работ/М.Е. Саломатников. - Горький: 1987.-14 с.
- [10]. Шерле З.П., Каракулин Г.Г. Справочник механизатора речного порта/З.П. Шерле-М.: Транспорт, 1980.- 392 с.
- [11]. Федосеев В.В. Приборы и устройства безопасности грузоподъемных машин. -М.: Транспорт, 1990. 313 с.
- [12]. 116-ФЗ. О промышленной безопасности опасных производственных объектов.

**DETERMINATION OF THE POSSIBILITY OF EXPLOITATION OF THE  
BERTHING RELOADER ON THE BASIS OF ANALYSIS OF THE STRESSED-  
DEFORMED STATE OF DAMAGED METAL STRUCTURES "**

A.S. Yablokov

candidate of technical sciences, associate professor  
Department of Hoisting-and-transport machines and machinery repair  
Volga State University of Water Transport  
E-mail: alex-vodnik@mail.ru

A.V. Zamyatin

master of the chair of Hoisting-and-transport machines and machine-repair  
Volga State University of Water Transport  
E-mail: pmptmvgvat@yandex.ru

*Keywords: berthing re-loader, metalwork, multi-cycle fatigue, mechanics of damaged environment, microdefects, macro-crack, strength, resource.*

*To assess the worked out and forecast of the residual life of the steelwork of the mooring reloader on the basis of the variant of the equations of mechanics of the damaged environment, the degradation of the material by the mechanism of the multicyclic fatigue, the kinetics of the stressed-deformed state of the hazardous zone of the steel structure of the mooring crane was made and the forecast of the residual resource was made based on its actual operating load.*