

## О НАДЁЖНОСТИ УСТРОЙСТВ, СОЗДАЮЩИХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ В ПРОЛЁТНЫХ БАЛКАХ ГРУЗОПОДЪЁМНЫХ КРАНОВ С ИСТЕКШИМИ СРОКАМИ СЛУЖБЫ

**К**ак следует из определения надёжности машинного парка (по новому направлению в её теории) задачей расчетов является оценка будущего состояния исследуемого объекта, т.е. как долго он будет функционировать [1]. Ранее применяемая повсеместно статистика такой оценки дать не могла, т.к. в основном развивалось то направление в проблеме надёжности, которое рассматривало отказы, связанные с прочностью деталей и узлов, например кранов мостового типа, когда детали переставали функционировать из-за разрушения [2, 3]. При новом подходе рассматриваются отказы машин, связанные с выходом её технических характеристик за допустимые пределы и с постепенным снижением качества и эффективности работы машины.

Как известно, уровень надёжности крана должен быть таким, чтобы при его эксплуатации во всех оговоренных технических условиях (ТУ) ситуациях не возникали отказы. Кроме того, желательно, чтобы кран имел запас надёжности для повышения сопротивляемости экстремальным воздействиям, когда машина попадает в условия, не предусмотренные ТУ. Например, при необходимости повысить грузоподъёмность крана или увеличить скоростные характеристики. Известно также, что подъёмно-транспортные машины относятся к категории «транспортные» (здесь же и самолёты, автомобили, железнодорожный и водный транспорт), основными техническими характеристиками которых является скорость, безопасность, грузоподъёмность. Мостовые и козловые краны, в особенности когда кран один в технологическом пролете производственного предприятия, требуют больших затрат времени и средств для восстановления работоспособности в случае выхода их из строя, не говоря о потерях из-за остановки технологического цикла, в котором кран задействован. Исходя из вышеизложенного, оптимальным решением повышения уровня надёжности крана должно быть применение специальных методов, повышающих его надёжность, но имеющих минимальные затраты как по времени, так и по финансам. В противном



**В.А. Слободяник**  
ООО «ИВЦ «Мостокран», к.т.н.,  
г. Харьков



**Н.П. Сытник**  
директор ООО «НТЦ  
«Монтажспецтехника», д.т.н.,  
г. Киев

случае «сделанные затраты на эти мероприятия могут быть столь высоки, что эффект от повышенной надёжности объекта не возместит их, и суммарный результат от проведенных мероприятий будет отрицательным» [1].

В качестве примера рассмотрим решение производственной задачи, связанной с необходимостью повысить надёжность и техническую характеристику (грузоподъёмность) козлового крана грузоподъёмностью 20 т, отработавшего свой срок службы.

Основные технические характеристики крана следующие: пролет 32 м, вылеты консолей 8 м и 6 м, высота подъёма – 10 м (рис. 1).

Дефекты: установка подтележечного рельса одного из полумостов крана разнится по высоте от рельса, расположенного на противоположной стороне моста (по всей его длине) в среднем на 60 мм (при норме 18 мм); наличие предельного значения упругих прогибов как в пролете, так и на консолях.

При этом одной из консолей (большей длины и наиболее интенсивно работающей) требуется повышение жесткости.

Для решения указанной задачи была применена методика усиления моста крана при помощи устройства для создания предварительного напряжения в мосте металлоконструкции. Основные узлы и элементы устройства, а также принцип работы описаны в более ранних рабо-

тах авторов [4, 6, 7]. Основные отличия в применении метода предварительного напряжения, одним из преимуществ которого является возможность выполнить требуемое усиление крана без его демонтажа, без остановки крана в технологическом процессе, следующие.

1. После усиления моста крана выполнена установка подтележечных рельсов на одном уровне путём закрепления на цельных подкладках рельса, который располагался ниже по отношению к рельсу на втором полумосте (рис. 2).

2. Жёсткость одной из консолей увеличена путем установки предварительно напряженных канатных вант (рис. 1 и 3).

Испытания крана подтвердили соответствие технических параметров реконструированного крана расчётным значениям.

С точки зрения надежности крана рассмотрим показатель цены надёжности и релаксацию напряжения в канатных затяжках, как показатель соответствия технического параметра расчётному значению.

Показатель цены надёжности определим по следующей зависимости [1]:

$$K = Q_{\text{мод}} + Q_{\text{экс}}^I / Q_{\text{изг}} + Q_{\text{дем}} + Q_{\text{монт}} + Q_{\text{пуск}} + Q_{\text{экс}} < 1, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{мод}} = 0,25Q_{\text{изг}}$  – стоимость модернизации крана;  $Q_{\text{экс}}^I = 0,1Q_{\text{изг}}$  – эксплуатационные затраты модернизированного крана;  $Q_{\text{изг}}$  – стоимость изготовления крана;  $Q_{\text{тран}} = 0,005Q_{\text{изг}}$  – стоимость работ по транспортировке крана;  $Q_{\text{дем}} = 0,05Q_{\text{изг}}$  – стоимость работ по демонтажу списанного крана;  $Q_{\text{монт}} = 0,1Q_{\text{изг}}$  – стоимость работ по монтажу нового крана;  $Q_{\text{пуск}} = 0,05Q_{\text{изг}}$  – стоимость пусконаладочных работ нового крана;  $Q_{\text{экс}} = 0,001Q_{\text{изг}}$  – затраты на эксплуатацию нового крана.

Здесь приняты следующие допущения: за единицу – стоимость изготовления крана, а в относительных единицах – стоимости остальных



Рис. 1. Общий вид модернизированного козлового крана грузоподъемностью 20 т пролетом 32 м



Рис. 2. Установка рельсов на подкладках (сторона полумоста, верхний пояс которого ниже на 60 мм)

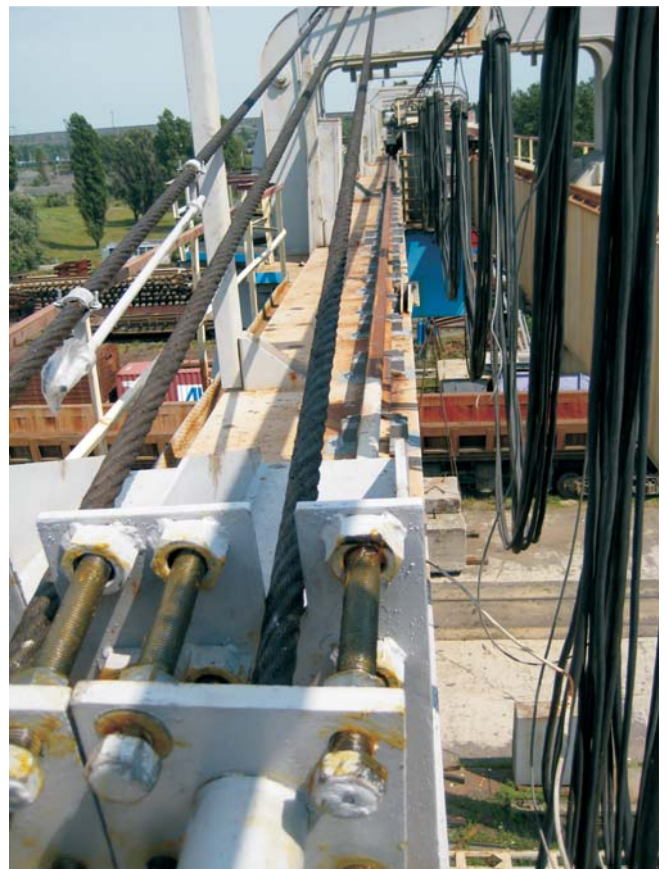


Рис. 3. Ужесточение консоли козлового крана с помощью канатных затяжек

затрат. Подставляя относительные значения в формулу (1), получим следующий результат:

$$K = 0,35Q/1,1Q = 0,318 < 1,0.$$

В качестве конкретного примера приведем расчет цены надёжности для козлового крана, о котором идёт речь в данной статье. Так стоимость изготовления крана на момент проведения его модернизации (лето 2010 г.) составляла  $Q_{изг} = 6,0$  млн. грн.;  $Q_{тран} = 39,0$  тыс. грн. – стоимость транспортных расходов, включая погрузку и разгрузку крана;  $Q_{дем} = 55,0$  тыс. грн. – демонтаж крана, запрещенного к эксплуатации;  $Q_{монт} = 110,0$  тыс. грн. – монтаж нового крана;  $Q_{пуск} = 25,0$  тыс. грн. – работы на кране, включая пусконаладочные;  $Q_{мод} = 600,0$  тыс. грн. – стоимость модернизации действующего крана;  $Q_{экс} = 80,0$  тыс. грн. – эксплуатационные затраты модернизированного крана;  $Q_{экс} = 5,0$  тыс. грн. – затраты по эксплуатации нового крана. Подставляя приведенные значения в формулу, получим:

$$K = 680 / 6237,0 = 0,109 \ll 1,0.$$

Низкое значение показателя объясняется тем, что затраты при модернизации были направлены только на то, чтобы обеспечить работоспособность крана. Таким образом, сэкономлено около 5 млн. грн.

Рассмотрим вторую составляющую показателя надёжности, связанную с обеспечением технического параметра крана (жесткостей пролетной балки и консоли). В нашем случае необходимо рассмотреть статический закон состояния (закон Гука), устанавливающий прямую пропорциональность между напряжением и деформацией упругого твердого тела, каким является канатная затяжка (элемент устройства для создания предварительного напряжения). Последняя (в начальный период работы крана) подвержена такому явлению, как релаксация напряжения, что приводит к снижению расчётных характеристик.

При внедрении авторского свидетельства [4] в разработку уникального козлового крана УКП-100-81 (грузоподъёмность 100 т, пролёт – 81 м) предварительное напряжение создавалось с помощью поднимаемого и постоянного грузов (рис. 4) [5]. Указанные схемы имели преимущество, так как вытяжка стального каната не отражалась на снижении в нём расчётных усилий натяжения. Однако применение таких схем в действующих кранах в большинстве случаев оказывалось неоптимальным вариантом. Поэтому во всех внедренных примерах применялась схема, когда усилия в канатах создавались в жестко закреплённых кронштейнах (см. рис. 1).

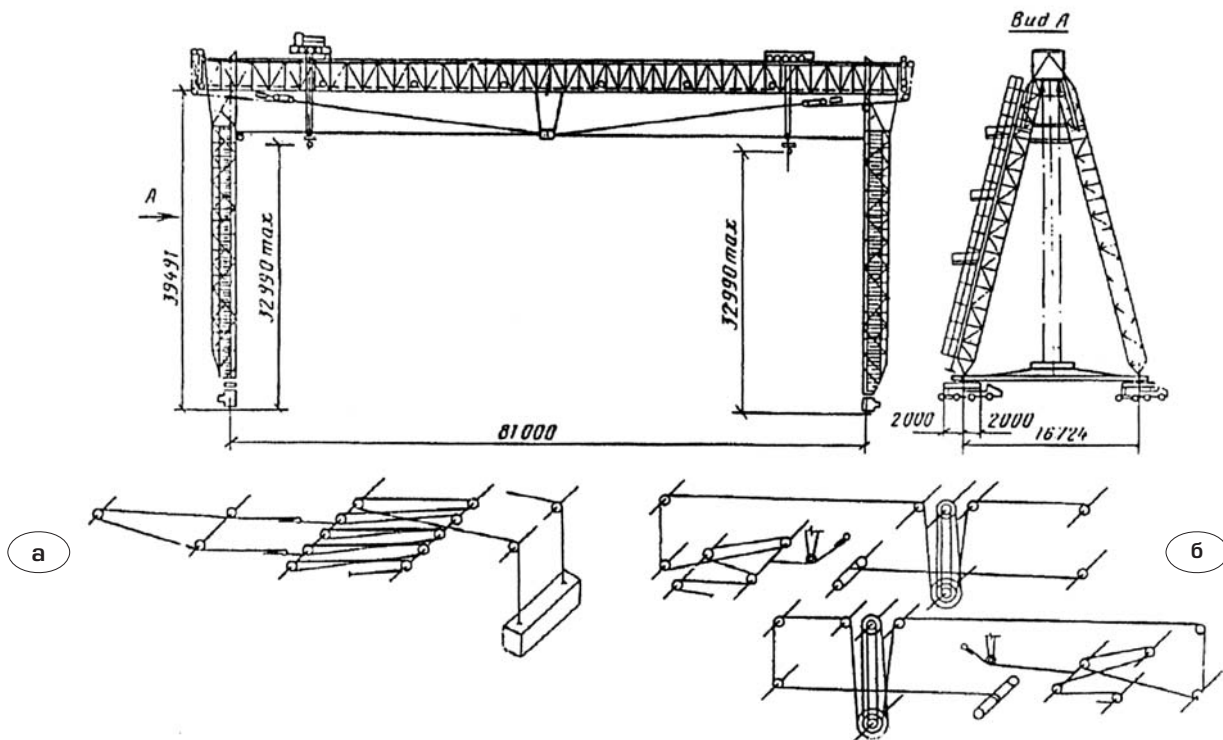


Рис. 4. Уникальный козловой кран УКП-100-81; а – система предварительного напряжения с помощью постоянного груза; б – то же, с помощью поднимаемого груза

В начальный период работы устройства вытяжка каната приводила к снижению в нем расчетных усилий.

Известно, что значение релаксации напряжения в циклически работающей канатной затыжке определяется по эмпирической зависимости [6]

$$\text{Рел} = 1,25 \cdot 10^3 z^{0,55} / E_k < [\text{Рел}], \quad (2)$$

где  $z$  – число циклов работы крана;  $E_k$  – модуль упругости стального каната;  $[\text{Рел}] = 5\text{--}10\%$  – допустимое значение релаксации.

Как видно из формулы, для релаксации основным параметром, влияющим на её значение, является модуль упругости каната. Большие значения модуля минимизируют релаксацию, а значит – увеличивают параметрическую надежность модернизированного крана.

Проведём анализ значений модулей упругости стальных канатов, которые приведены в работах ряда исследователей и обобщены в работе [8]. Так для новых канатов модуль упругости составляет  $E_k = 0,8 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup>, а для отработанных, т.е. обтянутых в процессе эксплуатации,  $E_k = 1,2 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup>. Однако, указанные значения определены при усилиях, составляющих 80 % от разрывного усилия каната, в то время как канаты в качестве затыжек в устройстве для создания предварительного напряжения подвергнуты усилиям всего 10–15 % от разрывного. Анализ большого объёма проведенных работ, в т.ч. и авторами, указывает на зависимость модуля упругости от усилия в канате, действующего при эксплуатации устройства. Однако предложенная Б.С. Ковальским формула, по которой определяется модуль упругости [9]:

$$E_k = E_0 + c\sigma, \quad (3)$$

(где  $E_0$  – начальное значение модуля упругости;  $c$  – опытный коэффициент, в зависимости от действующего напряжения в канате;  $\sigma$  – средние напряжения в канате), содержит большой разброс коэффициента  $c$  по данным экспериментов и не учитывает конструктивные особенности стальных канатов.

В работе [6] приведена формула, учитывающая именно конструкцию каната рядом коэффициентов, значения которых определялись экспериментально при напряжениях в канатах, близких к действующим:

$$E_k = 0,47 \cdot 10^{-6} k_c k_n k_{кр} (F Y/g)^2 E_{пр}, \quad (4)$$

где  $k_c$ ,  $k_n$ ,  $k_{кр}$  – коэффициенты, зависящие от типа сердечника, направления свивки, кратности свивки соответственно;  $F$  – площадь сечения всех проволок;  $Y$  – плотность материала проволок;  $g$  – масса одного метра длины каната;  $E_{пр}$  – модуль упругости материала проволоки ( $2,1 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup>). Первые замеры фактического значения модулей канатов, работавших в различных механизмах, указывают на меньшие значения модуля ( $0,6\text{--}0,8 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup>), чем принятые в справочной и нормативной литературе. Таким образом, определённость в вопросе фактического значения модуля упругости повысит надёжность расчётов, а значит – и надёжность эксплуатации модернизированных кранов.

Проведенный анализ свидетельствует о целесообразности более глубокого изучения влияния действующего напряжения в работающей канатной затыжке на модуль упругости стального каната, как и зависимой от него (модуля) надёжности устройства для создания предварительного напряжения.

- |  |   |
|--|---|
| <p>[1] Проников А.С. Параметрическая надёжность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 560 с.</p> <p>[2] ГОСТ 27584-88. Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия.</p> <p>[3] Станиславская В.Э., Слободяник В.А. О надёжности мостовых кранов // Подъёмно-транспортная техника и склады. – 1991. – № 3. – С. 34–35.</p> <p>[4] А.с. СССР № 1318508, кл. В 66 С 19/00, Козловой кран / Н.П. Сытник, В.В. Белецкий и И.В. Иванов; опубл. 23.06.1987, Бюл. № 23.</p> <p>[5] Торкатюк В.И. Монтаж конструкций большепролетных зданий. – М.: Стройиздат, 1985. – 170 с.</p> <p>[6] Слободяник В.А. Обоснование рациональных параметров предварительно – напряжённых крановых конструкций / Автор. дисс. канд. техн. наук. – Харьков, 1992. – 18 с.</p> | <p>[7] Слободяник В.А. О практике применения предварительно напряжения при восстановлении работоспособности кранов мостового типа / Машинобудування. Збірник наукових праць. Випуск 10. – Харків, Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), 2012. – С. 40–48.</p> <p>[8] Правила устройства и безопасной эксплуатации пассажирских подвесных канатных дорог. – К.: Изд-во «Сталь», 2014. – 352 с.</p> <p>[9] Ковальский Б.С., Жиряков А.И. Модуль упругости каната двойной свивки. – В кн.: Стальные канаты. – Вып. 7. – К.: Техника, 1970. С. 61–64.</p> |
|--|---|

Надійшла 06.10.2015 р.