

Е.В. Ошовская /к.т.н./, В.А. Сидоров /д.т.н./, Д.О. Прудченко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИЗУЧЕНИЯ УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ МОСТОВОГО КРАНА

В работе рассматривались упруго-демпфирующие свойства металлоконструкций литьевого мостового крана при затухании колебаний после силового воздействия как диагностический признак работоспособного состояния данного элемента. Приведены результаты математического моделирования, лабораторных и экспериментов на модели.

Ключевые слова: литьевой кран, металлоконструкции, демпфирование.

Металлоконструкции являются основным элементом мостового крана, выполняя роль подвижного основания. Воспринимая силовые нагрузки, в элементах металлоконструкции кранов возникают упругие, затухающие колебания, количество которых определяет число циклов усталостных нагрузений и возможность зарождения трещин. Обеспечение безопасности кранов производится в соответствии с нормативными документами [1,2] – применительно к приводам и системам управления выполняется дублирование, для стальных канатов и ходовых колёс применима периодическая замена. Наиболее ответственной частью крана, которая не подлежит дублированию или замене, является металлическая конструкция. Её разрушение приводит к авариям и материальному ущербу.

Причиной аварий и разрушений металлоконструкций мостовых кранов являются дефекты в её элементах. Приблизительно 90 % всех случаев разрушения металлоконструкций вызвано разрушением сварных соединений. Около трети аварий мостовых кранов происходят из-за усталостных повреждений несущих элементов металлоконструкций. Динамические нагрузки, возникающие в металлоконструкциях в мостовых кранах при передвижении ходовых колёс, рассматривались в работах [3...6]. Недоступность мест зарождения трещин в главных балках мостового крана для методов неразрушающего контроля требует разработки индикаторного метода диагностирования металлоконструкций. Способность демпфирования (поглощения) возникающих колебаний в упругой области определяет уровень безотказности крана в целом.

Это определяет актуальность исследования упруго-демпфирующих свойств, металлоконструкций литьевых кранов как метода раннего диагностирования.

Возникновение колебаний при подъёме груза с веса и с подхватом изучено достаточно глубоко в работах Руденко Н.Ф., Казака С.А., Иванченко Ф.К. и др. [7...9] и объясняется наличием упругого элемента – канатов полиспаста. Использование расчётных моделей двух и трёхмассовых упругих систем позволяет определить частоту собственных колебаний, коэффициент динамичности и др. В тоже время в данных работах отсутствуют данные о степени демпфирования колебаний. Существующие справочные данные [10], в настоящее время требуют уточнения и разработки методики определения упруго-демпфирующих параметров конкретных механизмов. Целью работы является разработка подходов к оценке степени затухания колебаний, как диагностического параметра работоспособности металлоконструкций мостового крана. Достижение цели определяется проведением ряда математических, лабораторных и экспериментов на модели литьевого крана. Выполнение измерений параметров колебаний на действующем оборудовании представляет одно из направлений дальнейших исследований.

При работе литьевого крана колебания возникают при каждом цикле подъёма и опускания груза, наиболее интенсивные колебания появляются при разгрузке лотка или бады (рис. 1). Металлоконструкции испытывают действие циклических нагрузок, приводящих к появлению усталостных трещин, в местах соединения главных и торцевых балок, в шарнирах балансиров и др. Безотказность применения литьевых кранов грузоподъёмностью 110...450 т, лимитируется состоянием металлоконструкций, являющихся невосстанавливаемым элементом.

В процессе работы мостовых кранов в их элементах возникают колебания, вызывающие динамические нагрузки. В качестве основных упруго-



Рис. 1. Бад'я перед загрузкой (а) и над электродуговой печью (б),
завалка металломолома в конвертер (в)

демпфирующих параметров элементов конструкций, влияющих на характер колебаний и величину нагрузок выступают коэффициент жёсткости и коэффициент демпфирования.

Предварительные исследования. Известным фактом является утверждение о том, что сталь – это весьма податливый материал и целостность стальных деталей оценивается по тональности звука после удара и времени затухания. Чистый высокий звук свидетельствует об отсутствии трещин и посторонних включений, а длительность

звука характеризует плотность материала и низкое сопротивление звуковым колебаниям. Это подтверждается проведенным экспериментом, получены временные диаграммы затухания (рис. 2):

1) стальное кольцо №1 – диаметры: внешний – 540 мм, внутренний – 515 мм; ширина – 48 мм, длительность звучания более 1,0 с;

2) стальное кольцо №2 – диаметры: внешний – 280 мм, внутренний – 236 мм; ширина – 95 мм, длительность звучания около 0,2 секунды;

3) стальные кольца и детали с трещиной.

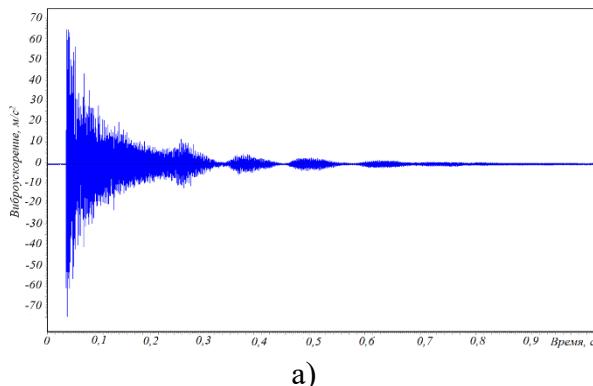
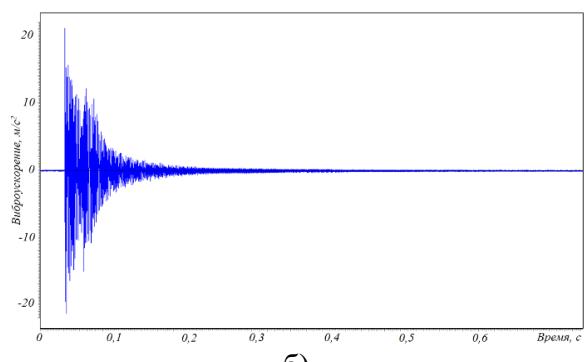


Рис. 2. Временные диаграммы затухания значений виброускорения для:
стального кольца №1 (а), стального кольца №2 (б)



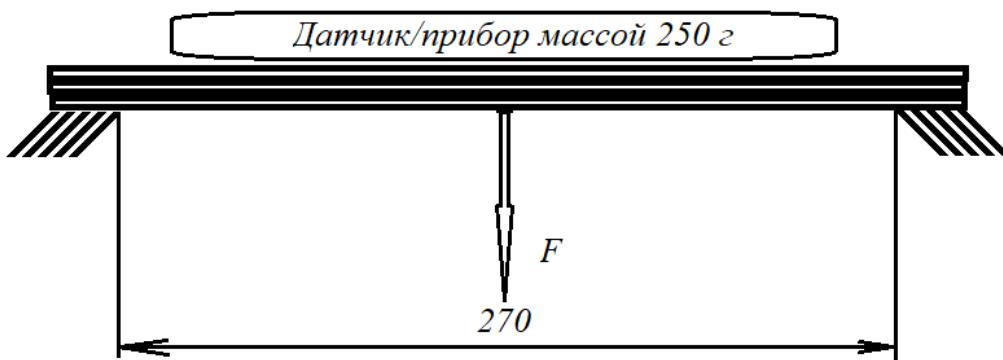


Рис. 3. Схема лабораторного стенда

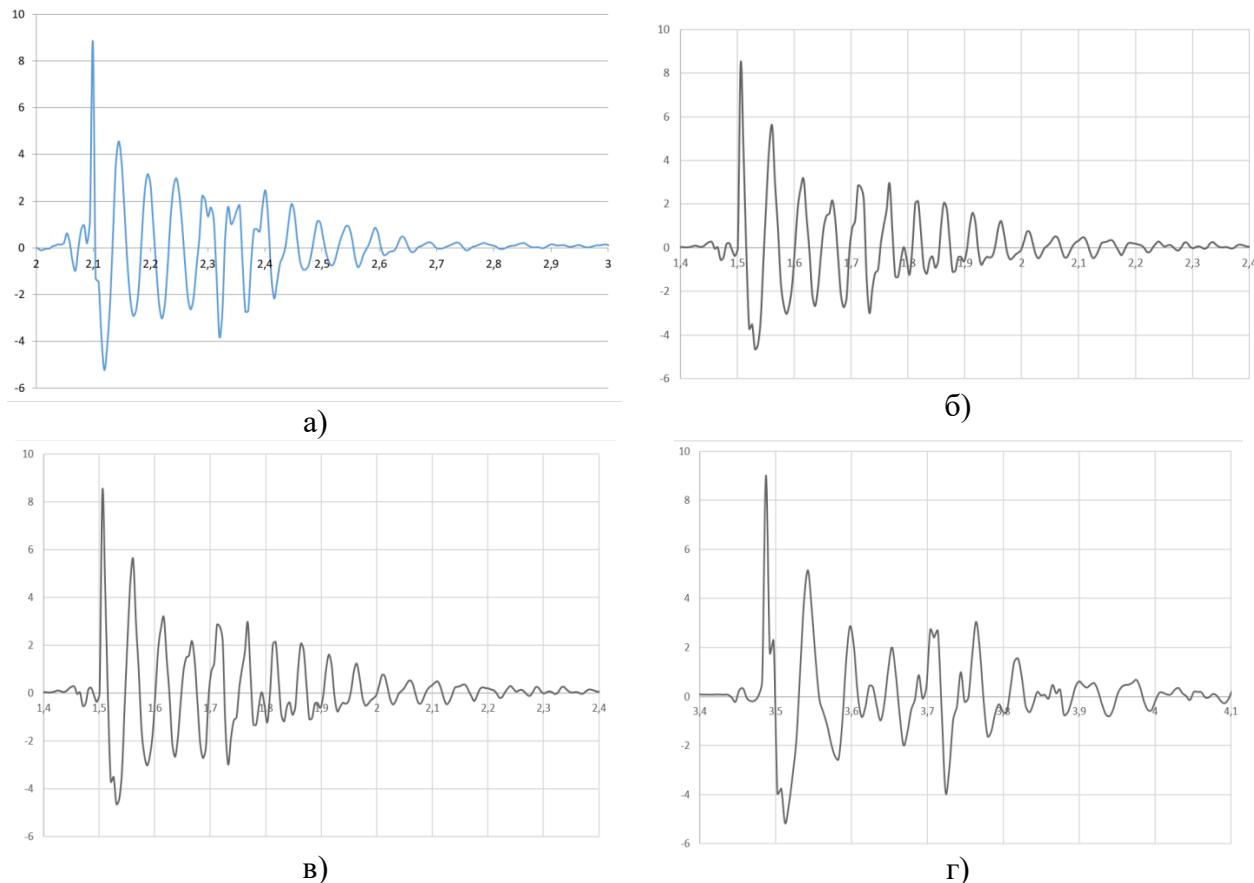


Рис. 4. Результаты лабораторного эксперимента:

- а) затухающие колебания пяти целых пластин; б) затухающие колебания четырёх целых пластин;
в) затухающие колебания трёх целых пластин; г) затухающие колебания при наличии трещины

Кольца с трещиной практически не имели времени затухания, отличались глухим звуком. Поглощение колебаний трещиной известная причина глухого звука.

Лабораторный эксперимент проводился для определения влияния момента инерции сечения и наличия трещины на возникающие колебания при резком снятии нагрузки – 2 Н. Лабораторный стенд (рис. 3) представлял собой жёстко защемлённые пластины (сечение $25,8 \times 0,74$ мм) с расстоянием между опорами 270 мм. Количество пластин менялось – 5, 4, 3. При экспериментах с 3-мя пластинами средняя имела трещину.

Измерения проводились при помощи программы *Accelerometer Meter*.

Результаты эксперимента показаны на рис. 4.

Таким образом, доказано, что наличие трещины уменьшает время затухания, так как энергия колебаний поглощается трещиной и приводит к искажению квазигармонических затухающих колебаний генерируя кратные и случайные гармоники.

Математическая модель 1.

Расчётная схема в случае лабораторного эксперимента может быть рассмотрена как двухмассовая с бесконечной второй массой (рис. 5).

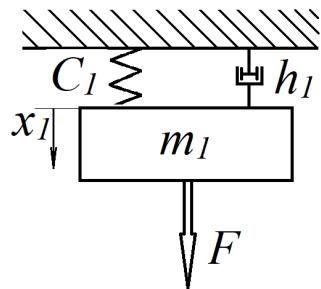


Рис. 5. Расчёчная схема лабораторного эксперимента

Известно [8], что свободные колебания двухмассовой системы (рис. 5) с бесконечной массой одного из элементов описывает дифференциальное уравнение движения вида:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + cx = F,$$

где m – масса; h – коэффициент демпфирования; c – жесткость упругого подвеса; x – перемещение.

Исходные данные:

$$F=2+m_1\times g; m_1=0,3 \text{ кг}; l=0,27 \text{ м}; b=25,8 \text{ мм}; h=0,74 \text{ мм}; c_1=48\cdot E\cdot I/l^3=1100 \text{ Н/м};$$

Решение (рис. 6) неоднородного уравнения состоит из двух этапов:

- 1) решение соответствующего однородного уравнения;
- 2) частное решение неоднородного уравнения.

$$x = e^{\alpha t} \times (F/c_1) \times \cos(\beta t),$$

$$\beta = (0,5 \times m_1) \times (-h^2 - 4 \times m_1 \times c_1)^{1/2}.$$

$$\alpha = -(h/2m_1),$$

$$F = 3 + 2 \times e^{-21 \times t}.$$

Планируемый эксперимент.

Главная балка мостового крана представляет собой жёсткую прямоугольную конструкцию, усиленную ребрами жёсткости и рельсами перемещения тележки механизма подъёма. Несмотря на это при расчёте выполняется проверка значения прогиба [11,12]. Так, например, для крана грузоподъёмностью 12,5 т, длиной пролёта 16,5 м, массой 21,5 т и сечением главной балки, допустимый прогиб составляет:

$$[f_{\max}] = \frac{L}{900} = \frac{16500}{900} = 18,333 \text{ мм.}$$

Фактический прогиб от подвижной статической нагрузки определяется для случая, когда наиболее нагруженное колесо тележки находится в середине пролёта:

– номинальные массы:

$$f_{\max} = \frac{0,5(Q + m_T)gL^3}{48EI_x} =$$

$$= \frac{0,5(12,5 + 4,5)9,8 \cdot 16,5^3}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 3347,6 \cdot 10^6} = 11,1$$

– массы с учетом коэффициентов перегрузки (комбинация нагрузок I.1a):

$$f_{\max} = \frac{0,5(k_Q\Psi Q + k_{GT}m_T)gL^3}{48EI_x} =$$

$$= \frac{0,5(1,5 \cdot 1,24 \cdot 12,5 + 1,1 \cdot 4,5)9,8 \cdot 16,5^3}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 3347,6 \cdot 10^6} =$$

$$= 18,395$$

– массы с учетом коэффициента толчков (комбинация нагрузок I.1b):

$$f_{\max} = k_T \frac{0,5(k_Q\Psi Q + k_{GT}m_T)gL^3}{48EI_x} =$$

$$= 1,0 \frac{0,5(1,5 \cdot 1,24 \cdot 15 + 1,1 \cdot 4,5)9,8 \cdot 16,5^3}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 3347,6 \cdot 10^6} =$$

$$= 18,395$$

Это послужило основанием для проведения планируемого эксперимента по определению коэффициентов влияния факторов (параметров главной балки) на функцию отклика (прогиб балки). Исходные данные для планируемого эксперимента приведены в табл. 1. Оценка степени влияния факторов на прогиб главной балки моста выполнена с использованием метода полного факторного эксперимента.

На основании полученных результатов вычислялись коэффициенты регрессии при факторах и их взаимодействии. Полученные значения коэффициентов регрессии приведены в табл. 2. Знак коэффициента указывает на характер влияния соответствующего фактора, а именно, при увеличении пролёта и грузоподъёмности прогиб будет расти, а увеличение геометрических параметров балки уменьшает прогиб, что соответствует физической сути данного вида деформации.

С учетом погрешностей и допусков на размеры была рассчитана остаточная дисперсия, значения критерия Стьюдента. Полученные значения представлены в виде диаграммы Парето.

Установлено, что максимальное влияние на прогиб главной балки моста оказывает пролёт

Табл. 1. Факторы и их уровни варьирования

Фактор	Кодированное обозначение	Единица измерения	Уровень	
			нижний -1	верхний +1
Ширина балки В	x_1	мм	400	1200
Высота балки Н	x_2	мм	800	1600
Толщина стенки δ	x_3	мм	10	20
Пролет крана L	x_4	м	16	32
Грузоподъемность Q	x_5	т	20	100

Табл. 2 Коэффициенты уравнения регрессии

b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
-62,3	-116	-53,3	131,2	112,5
b_1b_2	b_1b_3	b_1b_4	b_1b_5	b_4b_5
46,33	19,32	-48,5	-41,5	87,5
b_2b_3	b_2b_4	b_2b_5	b_3b_4	b_3b_5
36,33	-90,3	168,7	-41,4	-35,5

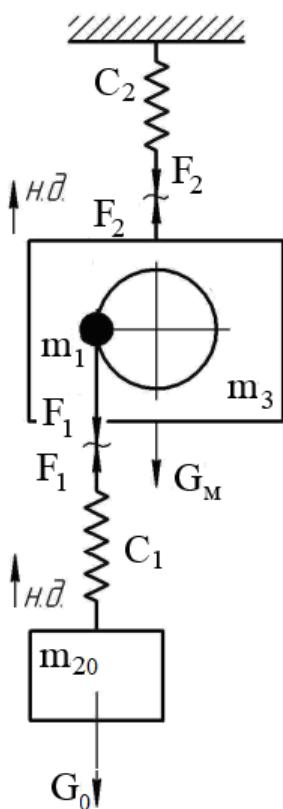


Рис. 7. Расчетная схема для модели мгновенной разгрузки

крана, высота сечения и грузоподъемность. Степень влияния ширины сечения балки и толщины стенки в 2...2,3 раза ниже. Так как высота сечения и пролет крана влияют на коэффициент жёсткости, то для её повышения для конкретного крана

следует увеличивать высоту сечения главных балок.

Математический эксперимент 2.

Теоретическое исследование нагружения металлоконструкции мостового крана при внезапной разгрузке выполнено на основе трёхмассовой модели двумя упругими связями (рис. 6) [7]. Расчетная схема включает:

m_1 – приведенная масса вращающихся частей подъемного механизма;

m_2, Q – масса и вес поднимаемого груза соответственно;

m_{20}, Q_0 – масса и вес грузозахватного органа;

m_3, G – масса и вес главных балок моста, приведенных к вертикальному перемещению поднимаемого груза (в середине пролета);

C_1 – суммарная жесткость подъемных канатов;

C_2 – жесткость моста в середине пролета;

F_1 – натяжение грузонесущих ветвей каната;

F_2 – нагрузка моста крана.

Мгновенная разгрузка происходит от полного веса груза Q до веса грузозахватного органа Q_0 . Перед этим система находилась в состоянии покоя, а упругие связи были подвержены действию статической нагрузки. Поведение элементов системы после разгрузки описывается уравнениями:

$$\begin{cases} m_{20}\ddot{x}_{20} = F_1 - Q_0; \\ m_3\ddot{x}_3 = F_2 - G - F_1. \end{cases}$$

Упругие нагрузки представляют собой двухчастотные функции вида:

$$F_1 = A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t + D_1 ,$$

$$F_2 = A_3 \cos \omega_1 t + A_4 \cos \omega_2 t + D_2 ,$$

где ω_1, ω_2 – круговые частоты собственных колебаний, определяемые по выражению:

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{C_1 + C_2 + C_1}{m_3 + m_{20}} \right) \mp \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{C_1 + C_2 + C_1}{m_3 + m_{20}} \right)^2 - \frac{4C_1 C_2}{m_{20} m_3}}} ;$$

A_1, A_2, A_3, A_4 – амплитуды, значения которых определяются по формулам:

$$A_1 = \frac{(Q - Q_0) \left(\omega_2^2 - \frac{C_1}{m_{20}} \right)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad A_2 = \frac{(Q - Q_0) \left(\frac{C_1}{m_{20}} - \omega_1^2 \right)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

$$A_3 = \frac{(Q - Q_0) \omega_2^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad A_4 = -\frac{(Q - Q_0) \omega_1^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

D_1, D_2 – конечные статические нагрузки равные:

$$D_1 = Q_0 ; \quad D_2 = G + Q_0 .$$

С учетом того, что упругие нагрузки могут быть представлены как:

$$F_1 = Q - C_1(x_{20} - x_3) , \quad F_2 = Q + G - C_2 x_3 ,$$

получим выражения для вычисления перемещений грузозахватного органа и моста:

$$x_3 = \frac{Q + G - F_2}{C_2} ; \quad x_{20} = \frac{Q - F_1}{C_1} + x_3 .$$

На основании представленного математического описания выполнена программная реализация в пакете MathCad, которая использована для моделирования процесса мгновенной разгрузки крана.

Результаты моделирования и их анализ.

Моделирование выполнено для следующих исходных данных: $m_1=22500$ кг – приведенная масса вращающихся частей подъемного механизма; $m_2=2650$ кг – масса поднимаемого груза; $Q=26500$ Н – вес поднимаемого груза соответственно; $m_{20}=53$ кг – масса грузозахватного органа; $Q_0=520$ Н – масса и вес грузозахватного органа; $m_3=2151720$ кг – масса главных балок моста, приведенных к вертикальному перемещению поднимаемого груза (в середине пролета); $G=1497000$ Н – вес главных балок моста, приведенных к вертикальному перемещению поднимаемого груза (в середине пролета); $C_1=51000000$ Н/м – суммарная жесткость подъемных канатов; $C_2=46250000$ Н/м – жесткость моста в середине пролета.

Круговые частоты собственных колебаний равны $\omega_1=4,6$, $\omega_2=980,9$. Графики изменения нагрузки на мост F_2 и в ветвях каната F_1 показаны на рис. 8, получены зависимости перемещения моста и грузозахватного органа. Следует отметить, что нагрузки на мост в 5...7 раз выше, чем в канатах, а период колебаний – почти в 200 раз

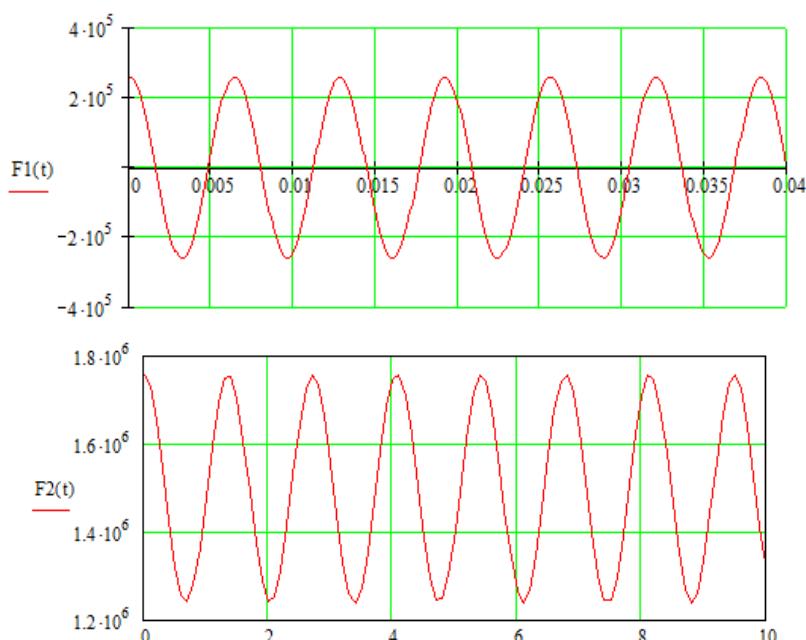


Рис. 8. Графики изменения нагрузки (Н) в ветвях каната F_1 и на мост F_2

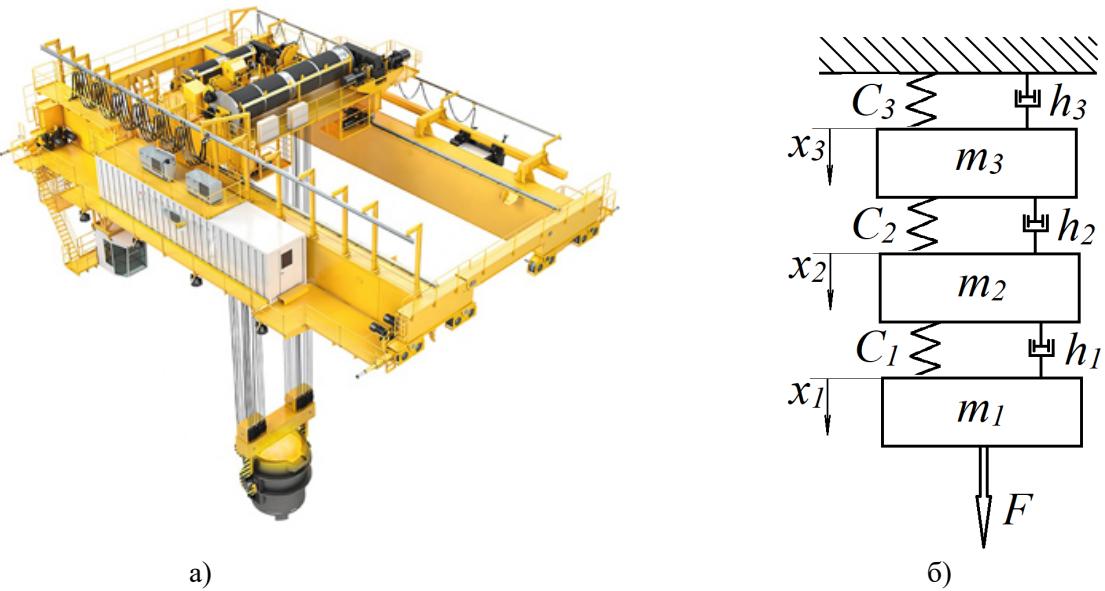


Рис. 9. Общий вид крана (а) и расчётная схема (б)

больше и составляет 1,4 с. Максимальное перемещение моста – около 11 мм.

Исследования на модели.

Общий вид крана и расчётная модель при поднятой траверсой бадье с металлом показаны на рис. 9. При этом предполагается следующее: m_1 – масса траверсы, бадьи и металлом; m_2 – масса тележки механизма главного подъёма; m_3 – масса главных балок крана; c_1 – жёсткость полиспаста, меняется при изменении высоты подъёма:

$$C_n = (E_k \cdot F_k / L_k) \cdot a^2 \cdot U^2,$$

где E_k – модуль упругости каната; F_k – площадь поперечного сечения проволок каната; L_k – длина каната для данной высоты подъёма h , $L_k = h \times a \times U_n$ м; a – количество ветвей каната, навиваемых на барабан; U – кратность полиспаста; c_2 – жёсткость тележки механизма главного подъёма,

установленной на балках моста; c_3 – жёсткость главных балок моста зависит от положения тележки главного подъёма:

$$C = 48 \cdot E \cdot I \cdot (a+b) / (a \cdot b)^2;$$

где E – модуль упругости материала балки при растяжении, МПа; I – момент инерции сечения, м^4 ; a, b – координаты положения тележки; h_1, h_2, h_3 – соответствующие коэффициенты демпфирования; \ddot{x} – ускорение; \dot{x} – скорость; x – перемещение соответственно масс m_1, m_2, m_3 . Дополнительно, каждая масса обладает частотой собственных колебаний:

$$f_i = 2\pi \sqrt{\frac{c_i}{m_i}},$$



Рис. 10. Расположение датчика и прибора при проведении измерений

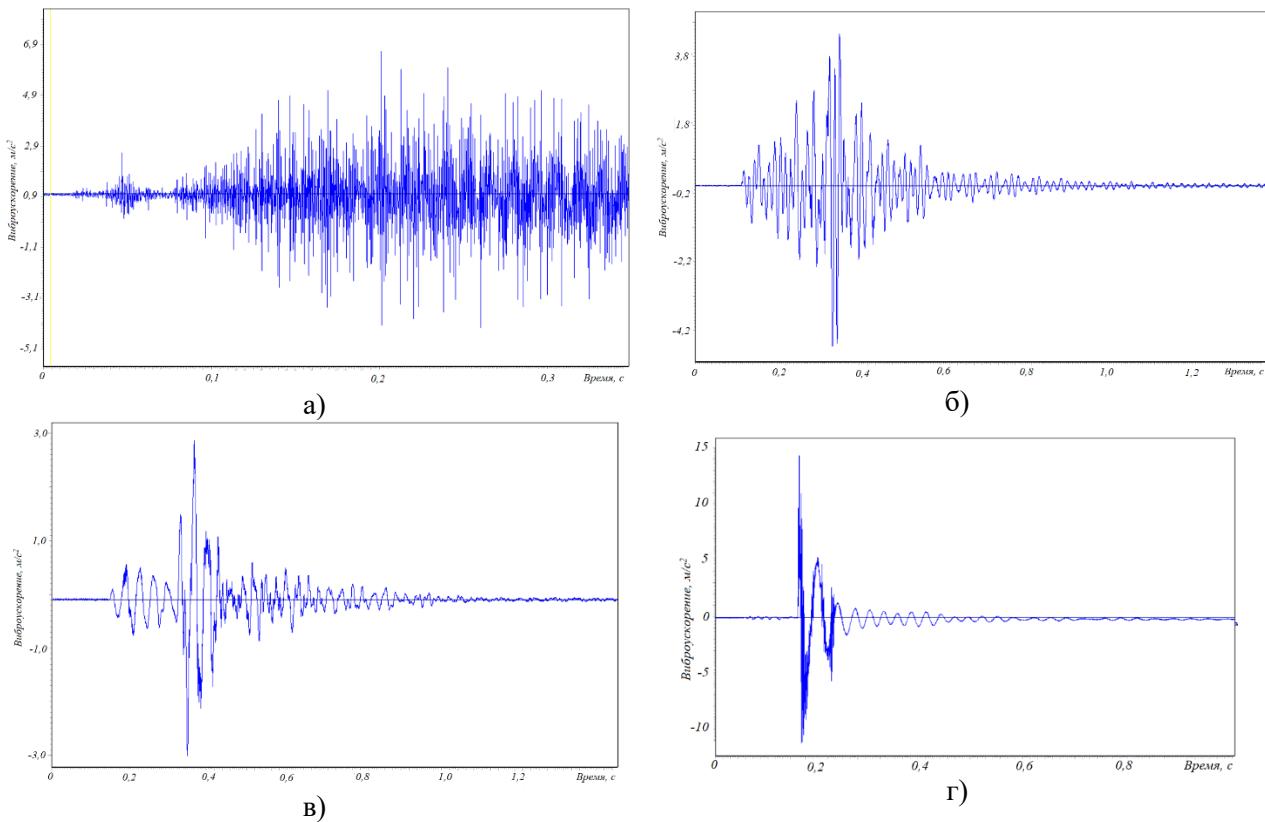


Рис. 11. Временная реализация виброускорения:

а) при подъёме с подхватом – мин $-7,98$, макс. $+9,00$, размах $-16,98$; б) при резкой разгрузке на тележке – мин $-4,69$, макс. $+4,41$, размах $-9,10$; в) при резкой разгрузке на балке моста – мин $-2,95$, макс. $+2,92$, размах $-5,87$; г) при резкой разгрузке на траверсе – мин $-4,7$, макс. $+4,54$, размах $-9,24$

Исследования были проведены на модели литьевого крана грузоподъемностью 450/90/15 тонн. Это четырёхбалочный литьевый кран с главной и вспомогательной тележками, которые параллельно перемещаются по своим пролётным балкам моста на разных высотных уровнях (вспомогательная тележка имеет возможность проезда под главной тележкой). Масштаб модели – 1:35.

Основные характеристики крана (рис. 10): высота подъёма – 270 мм; скорость подъёма – 1,3 см/с; скорость передвижения – 1,3 см/с; длинный ход – 1800 мм. Количество ходовых колес: крана – 16 шт.; тележки – 8 шт. Способ управления – электрический. Масса крана и его основных частей – 125 кг.

Измерения параметров вибрации проводились на элементах крана при использовании анализатора вибрации 795М и пьезоэлектрического датчика С11. Крепление датчика осуществлялось при помощи магнита (рис. 10). Проведено несколько циклов измерений.

Цикл 1. Подъём с подхватом. Проведено измерение временной реализации вибрационного сигнала виброускорения на тележке главного подъёма при подъёме груза массой 1,3 кг с подхватом. Временная реализация сигнала виброускорения получена при следующих установках прибора:

единица измерения – м/с^2 ; режим интегратора – линейный; усреднения – выключены; усилитель – ручной; чувствительность датчика – 7,75 пКл/м/с²; коэффициент усилителя – 5; режим запуска – свободный; триггер – внешний; тип окна – Хамминга; диапазон 10...4027; количество точек – 16384; период выборки – 300 мкс; длина выборки – 16.

Цикл 2. Опускание груза. Измерение временной реализации вибрационного сигнала виброускорения на тележке главного подъёма при опускании груза массой 1,3 кг. Получены значения виброускорения – мин $-5,0$, макс. $+5,15$, размах $-10,15$.

Цикл 3. Резкая разгрузка (рис. 11). Проведено измерение временной реализации вибрационного сигнала виброускорения на тележке, мосте и траверсе главного подъёма при резкой разгрузке груза массой 1,7 кг.

Измерения на тележке – время воздействия – 944 мс, время затухания – 717 мс, период собственных колебаний – 14 мс, частота собственных колебаний – 71,4 Гц.

Измерения на мосте крана – время воздействия – 838 мс, время затухания – 623 мс, период собственных колебаний – 25 мс, частота собственных колебаний – 40,0 Гц.

Измерения на траверсе – время воздействия – 417 мс, период собственных колебаний – 29 мс, частота собственных колебаний – 34,5 Гц.

Проведенные эксперименты подтвердили возможность определения частоты собственных колебаний элементов металлоконструкций крана при резкой разгрузке бадьи с металлом. Возможная практическая реализация – установка пьезоэлектрических датчиков измерительной системы вибрационных колебаний в главных балках завалочного крана.

Стабильность частот собственных колебаний элементов служит подтверждением неизменности технического состояния металлоконструкций.

Выводы

1. Существующие представления об упруго-демпфирующих характеристиках металлоконструкций мостовых кранов определяют коэффициент жёсткости и коэффициент демпфирования как параметры, влияющие на характер колебаний элементов конструкций.

2. Математическое моделирование динамических процессов в металлоконструкции мостового крана на основании 2-х и 3-х массовых расчётных схем показывает необходимость уточнения значений упруго-демпфирующих параметров конкретных механизмов

3. Проведенный лабораторный эксперимент и эксперимент на модели литьевого крана показывают возможность оценки степени затухания колебаний, как диагностического параметра работоспособности металлоконструкций мостового крана.

4. Предложенная последовательность изучения упруго-демпфирующих свойств металлоконструкций мостового крана требует выполнения измерений параметров колебаний на действующем оборудовании, представляет одно из направлений дальнейших исследований.

5. Практическая реализация предлагаемого подхода позволяет получить индикаторный метод оценки состояния металлоконструкций мостового крана, предваряющий проведение экспертного обследования с использованием методов неразрушающего контроля.

Список литературы

- РД 10-112-5-97 Методические указания по проведению обследования кранов мостового типа с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации. Часть 5. Краны мостовые и козловые
- ПБ-10-382-00. Правила устройства и безопасности эксплуатации грузоподъемных кранов. – СПб.: Издательство ДЕАН, 2003. – 272 с.
- Бондаренко В.А. Теоретическое исследование спектров вибрации и шума рельс при движении мостовых кранов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том8, – №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/23TVN316.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., КиберЛенинка: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskoe-issledovanie-spektrov-vibratsii-i-shuma-rels-pri-dvizhenii-mostovyh-kranov>
- Haniszewski T., Gaska D. Overhead traveling crane vibration research using experimental wireless measuring system / TRANSPORT PROBLEMS 2013 Vol.8 Issue 1, P. 57-66.
- Фидровская Н.Н., Слепужников Е.Д., Чернышенко А.В., Варченко И.С. Новая конструкция ходовых колес мостовых кранов [Текст] // Современные тенденции технических наук: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Казань, октябрь 2015 г.). – Казань: Бук, 2015. – С. 66-70. – URL <https://moluch.ru/conf/tech/archive/163/8878/> (дата обращения: 06.11.2019).
- Лобов Н.А. Динамика передвижения кранов по рельсовому пути / Н.А. Лобов – М. Из-во МГТУ, 2003. – 232с.
- Курсовое проектирование грузоподъемных машин [Учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов / Казак С.А. и др.]; Под ред. С.А. Казака. – Москва: Высш. шк., 1989. – 318 с., ил.; 24 см.; ISBN 5-06-000143-1
- Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин [Текст]: [Учеб. пособие для техн. вузов] / Ф.К. Иванченко, В.С. Бондарев, Н.П. Колесник, В.Я. Барабанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1978. – 574 с.
- Руденко, Н.Ф. Курсовое проектирование грузоподъемных машин [Текст]: [Учеб. пособие для машиностроит. специальностей вузов] / Н.Ф. Руденко, М.П. Александров, А.Г. Лысяков. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1971. – 463 с.
- Характеристики и конструктивные схемы. Крановые механизмы, их детали и узлы. Техническая эксплуатация кранов. Т.2 / [М.П. Александров и др.]. – Ленинград: Машиностроение: Ленингр. Отд., 1988. – 559,[1] с.: ил. – (Справочник по кранам. В 2 т. Под общ. ред. М.М. Гохберга.); ISBN 5-217-00289-1
- Майзель В.С. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. Учеб. пособ. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд., 1966. – 182 с.
- Эльяш Н.Н. Металлоконструкции подъемно-транспортных машин: Электронное учебное пособие (конспект лекций). Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед.-ун-та, 2015. – 62 с.

**THE SEQUENCE OF STUDYING THE ELASTIC-DAMPING PROPERTIES
OF BRIDGE CRANE METAL STRUCTURES**

Annotation. The paper considered the elastic-damping properties of metal structures of a foundry bridge crane with damping of vibrations after force exposure as a diagnostic sign of the operable state of this element. The results of mathematical modeling, laboratory and model experiments are presented.

Keywords: foundry crane, metal structures, damping.

Сведения об авторах

Е.В. Ошовская

SPIN-код: 6249-3730

Телефон: +7 (949) 358-53-34

Эл. почта: evo2008@bk.ru

Д.О. Прудченко

SPIN-код: 1025-0586

Телефон: +7 (949) 372-14-39

Эл. почта: dimoon8695@gmail.com

В.А. Сидоров

SPIN-код: 2618-4815

Телефон: +7 (949) 312-79-13

Эл. почта: sidorov_va58@mail.ru

Статья поступила 13.09.2022 г.

© Е.В. Ошовская, В.А. Сидоров, Д.О. Прудченко, 2022

Рецензент д.т.н., проф. А.В. Яковченко