

УДК 621.873.12

Прудченко Д. О.,
к.т.н. Ошовская Е. В.,
д.т.н. Сидоров В. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, evo2008@bk.ru)

КОЛЕБАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЗАВАЛОЧНЫХ КРАНОВ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Показаны возможности оценки состояния металлоконструкций литейных, в частности завалочных кранов, электросталеплавильного производства на основе анализа колебаний главных балок, возникающих при разгрузке бады. Эксперименты выполнены на лабораторной модели.

Ключевые слова: металлоконструкции, завалочный кран, колебания, техническое состояние.

В настоящее время в промышленности наблюдается изношенность технологического оборудования, участились случаи техногенных аварий и катастроф, поэтому актуальным является обеспечение безопасной эксплуатации ответственных сварных конструкций. К технологическому оборудованию помимо станков и транспорта относят и мостовые краны, которые являются главным звеном в транспортной цепочке производства. От технического состояния мостового крана зависит не только нормальное осуществление технологических процессов, но и безопасность труда персонала. На долю мостовых кранов приходится приблизительно 38 % грузоподъемных механизмов. При работе кранов износу подвергаются силовое оборудование (двигатели, лебёдки, передачи) и сварные металлоконструкции, у большинства которых истек нормативный срок службы.

В соответствии с Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (от 20 июня 1997 года) к данной категории относят объекты, использующие стационарно установленные грузоподъемные механизмы. Обеспечение безопасности кранов производится разными средствами. Применительно к приводам и системам управления — дублирование, к стальным канатам и быстроизнашивающимся деталям — периодическая замена. Наиболее ответственной частью крана, которая не подлежит

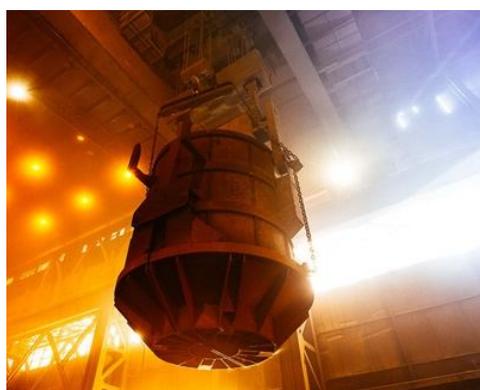
дублированию или замене, является металлическая конструкция крана. Её разрушение может привести к значительному материальному ущербу, т. е. она обеспечивает безопасность крана. Причиной аварий и разрушений металлоконструкций мостовых кранов являются дефекты в элементах конструкции. При этом разрушение сварных соединений приводит приблизительно к 90 % всех случаев разрушения машиностроительных конструкций.

Как показал опыт эксплуатации подъемно-транспортного оборудования, к окончанию нормативного срока службы примерно у 80 % всех кранов не исчерпан остаточный ресурс металлоконструкций. Можно заключить, что нормативный срок службы не ограничивает работоспособность грузоподъемного крана, а для его дальнейшей и безаварийной работы требуется решение задачи ремонта металлоконструкций. Около трети аварий мостовых кранов связаны с их техническим состоянием и происходят из-за усталостных повреждений (образования макроскопических трещин) несущих элементов металлоконструкций кранов.

Специфические условия работы завалочных (литейных) мостовых кранов электросталеплавильного производства связаны с загрузкой печи при раскрытии челюстей бады (рис. 1). Сложность данной операции заключается во временной ограниченности технологического цикла, не-

достаточной обзорности места выгрузки, воздействию высоких температур и восходящего пылевого потока. Выгрузка металлолома должна проводиться максимально быстро, при этом возникает динамическое воздействие от снижения нагрузки в канатах полиспаста, что вызывает колебания главных балок моста крана. Учитывая повышенные требования к надёжной работе литейных кранов, на что указывается в нормативных документах [1, 2] и работах [3–5 и др.], предлагается использовать выгрузку металлолома из бадьи как тестовое воздействие на металлоконструкции.

Металлоконструкции испытывают действие циклических нагрузок, приводящих к появлению усталостных трещин, в местах соединения главных и торцевых балок, в шарнирах балансиров и др. Безотказность применения литейных кранов грузоподъёмностью 110...450 т лимитируется состоянием металлоконструкций.



а



б

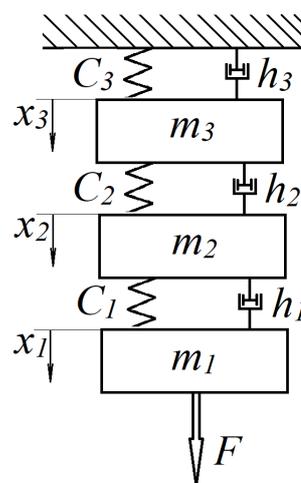
Рисунок 1 Бадья перед загрузкой (а) и над электродуговой печью (б)

Известно, что состояние объекта диагностирования можно оценить по результату выполнения возложенных на него функций (функциональное диагностирование) или по реакции создаваемого внешнего воздействия на объект диагностирования (тестовое диагностирование). Возможность использования такого тестового воздействия, как разгрузка бадьи, для измерения параметров колебаний и оценки состояния металлоконструкций литейного крана рассматривается в статье.

Общий вид крана и расчётная модель при поднятой траверсе бадьи с металлоломом показаны на рисунке 2.



а



б

Рисунок 2 Общий вид крана (а) и расчётная схема (б)

Колебательные процессы рассматриваемой системы (рис. 2) могут быть представлены уравнением движения:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + C_1 x_1 + \\ + m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + C_2 x_2 + \\ + m_3 \ddot{x}_3 + h_3 \dot{x}_3 + C_3 x_3 = F. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом приняты следующие обозначения:

m_1 — масса траверсы, бадьи и металлолома;

m_2 — масса тележки механизма главного подъёма;

m_3 — масса главных балок крана;

C_1 — жёсткость полиспаста, которая зависит от высоты подъёма:

$$C_1 = \frac{E_k F_k}{L_k} a^2 U^2,$$

где E_k — модуль упругости каната;

F_k — площадь поперечного сечения проволоки каната;

a — количество ветвей каната, навиваемых на барабан;

U — кратность полиспаста;

L_k — длина каната для данной высоты подъёма h , $L_k = haU$, м;

C_2 — жёсткость тележки механизма главного подъёма, установленной на балках моста;

C_3 — жёсткость главных балок моста, зависящая от положения тележки главного подъёма:

$$C_3 = 48EI \frac{c+b^2}{c^2 b^2},$$

где E — модуль упругости материала балки при растяжении, МПа;

I — момент инерции сечения, м⁴;

c, b — координаты положения тележки;

h_1, h_2, h_3 — соответствующие коэффициенты демпфирования;

$\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3$ — ускорение соответственно масс m_1, m_2, m_3 ;

$\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3$ — скорость соответственно масс m_1, m_2, m_3 ;

x_1, x_2, x_3 — перемещение соответственно масс m_1, m_2, m_3 ;

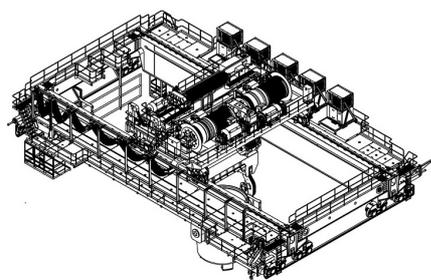
F — действующая сила.

Дополнительно каждая масса обладает частотой собственных колебаний:

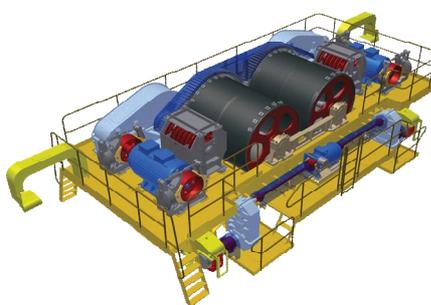
$$f_i = 2\pi \sqrt{\frac{C_i}{m_i}}.$$

Решение уравнения (1) при наличии трёх неизвестных, связанных с перемещением, практически невозможно. Точность расчёта упругодемпфирующих характеристик в конкретном проявлении состояния элементов также имеет большие допущения. Поэтому, одним из вариантов предварительного решения поставленной задачи является проведение экспериментальных исследований для определения упругодемпфирующих характеристик элементов расчетной модели (рис. 2).

Исследования были проведены на модели литейного крана грузоподъемностью 450/90/15 тонн (рис. 3).



а



б

Рисунок 3 Трёхмерные виды крана (а) и тележки главного подъёма (б)

Это четырёхбалочный литейный 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 модели крана: высота подъёма — 270 мм; скорость подъёма — 1,3 см/с; скорость передвижения — 1,3 см/с; длина хода — 1800 мм. Количество ходовых колёс: крана — 16 шт.; тележки — 8 шт. Способ управления — электрический. Масса крана и его основных частей — 125 кг. Элементы крана показаны на рисунке 4.



а



б

Рисунок 4 Балансирная тележка (а), кабина и траверса главного подъёма (б) модели крана

Измерения параметров вибрации проводились на элементах модели крана при помощи анализатора вибрации 795М с пьезоэлектрическим датчиком С11. Крепление датчика осуществлялось при использовании магнита (рис. 5).

В ходе экспериментов измерялись составляющие спектра виброускорения и временные реализации вибрационного сигнала виброускорения. Параметры настройки прибора при измерениях приведены в таблице 1. Проведено две серии измерений, каждая из которых включала по три цикла.

В первой серии измерения выполнялись на тележке главного подъёма при её горизонтальном перемещении (цикл 1), а также при вертикальном перемещении груза массой 1,3 кг в режиме подъёма с подхватом (цикл 2) и опускании (цикл 3).



а



б

Рисунок 5 Расположение датчика и прибора при проведении измерений

Таблица 1

Параметры настройки прибора

Наименование параметра	Измеряемая характеристика	
	Спектр виброускорения	Временная реализация виброускорения
Единица измерения	м/с ²	м/с ²
Режим интегратора	линейный	линейный
Количество усреднений	4	выключены
Усреднение	частоты	-
Вид усреднения	линейное	-
Усилитель	автонастройка	ручной
Чувствительность датчика, пКл/м/с ²	7,75	7,75
Коэффициент усилителя	6	5
Режим запуска	свободный	свободный
Триггер	внешний	внешний
Тип окна	Хамминга	Хамминга
Диапазон	10...4027	10...4027
Количество точек	1600	16384
Общий уровень	СКЗ=0,7059	-
Период выборки, мкс	-	300
Длина выборки	-	16

На рисунке 6 представлен спектр виброускорения в частотном диапазоне 10...4000 Гц, зафиксированный при горизонтальном перемещении тележки без груза. Максимальное значение виброускорения 0,14 м/с² соответствует частоте 1000 Гц.

Графики временной реализации вибрационного сигнала для данной серии измерений приведены на рисунке 7, а основные характеристики — в таблице 2. Следует отметить стабильный характер сигнала с чётко выраженными амплитудами.

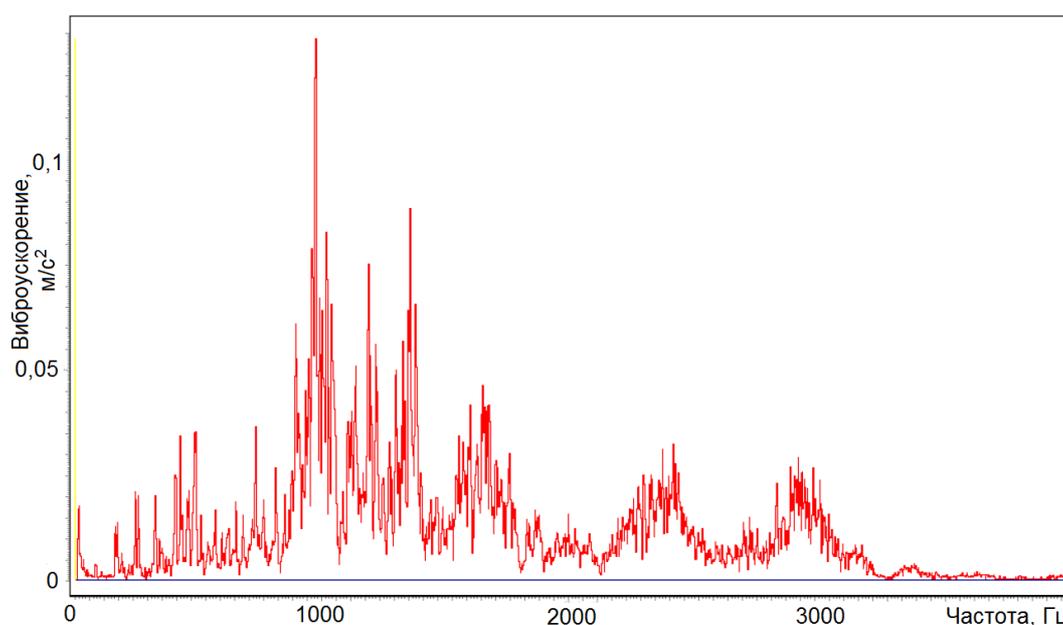


Рисунок 6 Спектр виброускорения при горизонтальном перемещении главной тележки

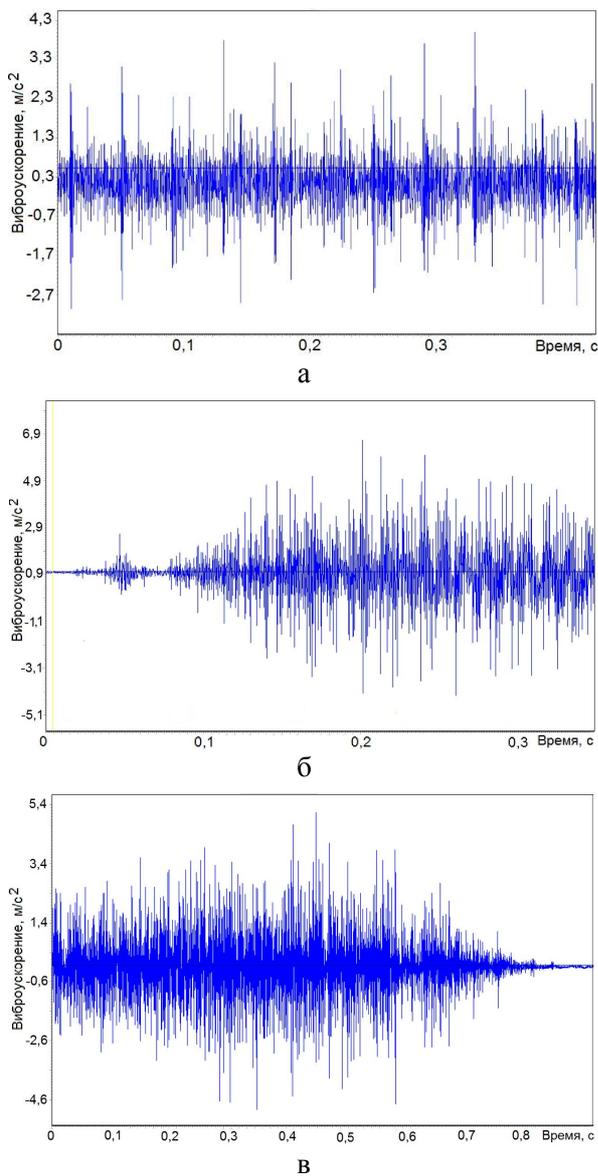


Рисунок 7 Временная реализация виброускорения при горизонтальном перемещении главной тележки (а), подъёме груза с подхватом (б), опускании груза (в)

Таблица 2

Характеристики временной реализации сигнала виброускорения для 1-й серии измерений

№ цикла измерений	Виброускорение, m/s^2		
	min значение	max значение	размах
1	-3,23	+3,53	6,75
2	-7,98	+9,00	16,98
3	-5,0	+5,15	10,15

В ходе второй серии экспериментов моделировалась ситуация резкой разгрузки с использованием груза массой 1,7 кг. При этом измерения виброускорения выполнялись на главной тележке (цикл 4), балке моста (цикл 5) и траверсе (цикл 6). Типичные графики временной реализации вибросигнала, зафиксированные для данной серии измерений, приведены на рисунке 8, а основные числовые характеристики — в таблице 3. Сигналы имеют затухающий характер. Момент разгрузки характеризуется максимальным размахом виброускорения.

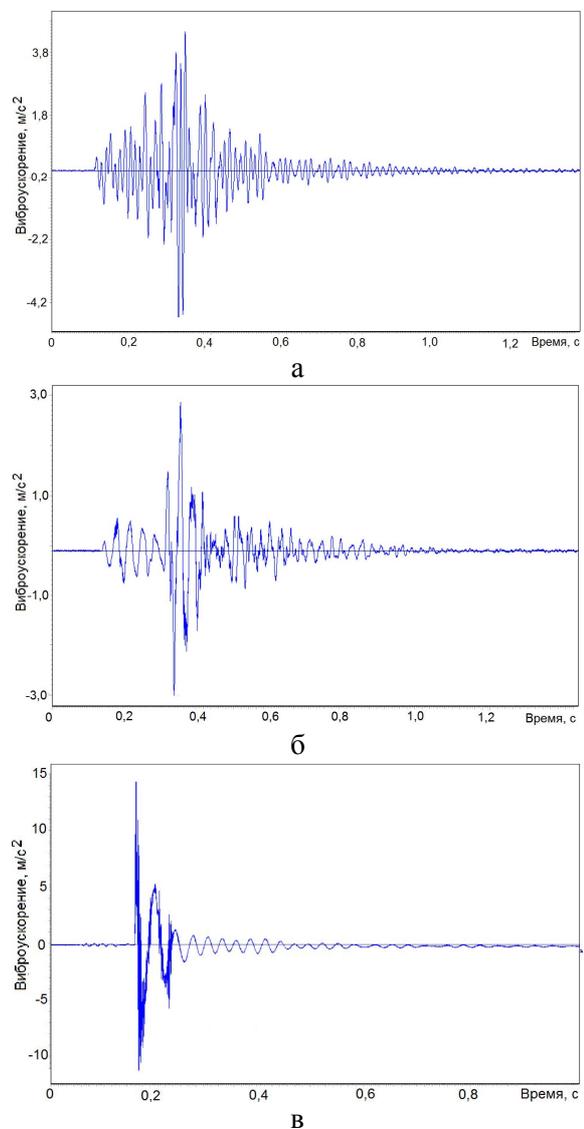


Рисунок 8 Временная реализация виброускорения на тележке (а), балке моста (б), траверсе (в) при резкой разгрузке

Таблица 3

Характеристики временной реализации сигнала виброускорения для 2-й серии измерений

№ цикла измерений	Виброускорение, м/с ²			Длительность воздействия, мс	Продолжительность затухания, мс	Период собственных колебаний, мс	Частота собственных колебаний, Гц
	min значение	max значение	размах				
4	-4,69	+4,41	9,10	944	717	14	71,4
5	-2,95	+2,92	5,87	838	623	25	40,0
6	-4,7	+4,54	9,24	417	422	29	34,5

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили возможность определения частоты собственных колебаний элементов металлоконструкций крана при резкой разгрузке бады с металлоломом.

Возможной практической реализацией метода контроля состояния элементов крана в производственных условиях явля-

ется установка пьезоэлектрических датчиков и измерительной системы в главных балках крана.

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

Библиографический список

1. РД 10-112-5-97. Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 5. Краны мостовые и козловые [Текст] / АОО «ВНИИПТМАШ» // Сборник документов. — М. : ОАО «НТЦ „Промышленная безопасность“», 2006. — 404 с.
2. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов [Текст] : ПБ-10-382-00 : [утв. Госгортехнадзор России 31.12.1999]. — СПб. : Изд-во ДЕАН, 2003. — 272 с.
3. Иванов, В. Н. Техническое диагностирование подъёмно-транспортных машин и оборудования [Текст] : монография / В. Н. Иванов. — Х. : Индустрия, 2009. — 204 с.
4. Зарецкий, А. А. Стратегия определения остаточного ресурса грузоподъемных кранов [Текст] / А. А. Зарецкий // Подъемные сооружения. Специальная техника. — 2002. — № 11. — С. 21–23.
5. Концепция оценки остаточного ресурса металлических конструкций грузоподъемных кранов, отработавших нормативный срок [Текст] / В. С. Котельников, А. Ю. Еремин, А. А. Зарецкий, А. А. Короткий // Безопасность труда в промышленности. — 2000. — № 10. — С. 41–46.

© Прудченко Д. О.

© Ошовская Е. В.

© Сидоров В. А.

Рекомендована к печати д.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТИ Вишневым Д. А., д.т.н., доц., зав. каф. УК ДонНТУ Ченцовым Н. А.

Статья поступила в редакцию 15.04.2022.

Prudchenko D. O., PhD in Engineering Oshovskaia E. V., Doctor of Technical Sciences

Sidorov V. A. (DonNTU, Donetsk, DPR, evo2008@bk.ru)

OSCILLATIONS OF METAL CHARGING CRANES OF ELECTRIC STEELMAKING

There have been given the possibilities of assessing the state of metal foundries, in particular charging cranes, electric steelmaking based on the analysis of the main beams oscillations that occur during the bailer unloading. The experiments were performed on a laboratory model.

Key words: metalworks, charging crane, oscillations, condition.