

М. А. Зайцев, О. В. Ченчевич, Э. М. Ватралик*

ПАО «ММК им. Ильича», Мариуполь

ПАО «Азовсталь», Мариуполь

Вибродиагностика опорных подшипников кислородных конвертеров

Описана разработка способа диагностирования крупногабаритных низкооборотных подшипников качения, установленных в опорах кислородного конвертера, опробованная и освоенная специалистами отдела технической диагностики «ММК им. Ильича» в конвертерном цехе МК «Азовсталь». Целью разработки способа диагностирования опорных подшипников является переход от визуального контроля состояния подшипников к безразборной дефектации на основании результатов вибродиагностики, для перехода на обслуживание по фактическому состоянию.

Ключевые слова: опорный подшипник, кислородный конвертер, надёжность, техническая диагностика, вибрация, обслуживание по фактическому состоянию

Кислородные конвертеры относятся к основным металлургическим агрегатам, непредвиденная остановка которых влечёт за собой нарушение технологического процесса производства стали и проката, и, следовательно, значительные материальные потери. Для непрерывной работы такого агрегата необходимо обеспечить надёжность всех его составных частей. Одним из путей решения данной задачи является диагностика и мониторинг технического состояния. Разрушение или отказ в работе одного из ключевых узлов кислородного конвертера практически неизбежно завершает его функционирование.

Основными составными частями конвертера являются: груша конвертера с футеровкой, опорное кольцо с цапфами, опорные узлы с подшипниками качения, привод наклона конвертера (рис.1). Для каждой из составных частей применимы определённые методы технической диагностики. С целью определения повреждений футеровки может применяться тепловизионный контроль и лазерные сканеры. Состояние сварочных швов, усталость металла опорного кольца с цапфами и брони конвертера могут определяться при помощи различных методов неразрушающего контроля и визуального осмотра.

На сегодняшний день для определения состояния подшипников опорных узлов конвертера требуется их разборка и дефектовка (проверка зазоров, осмотр элементов подшипника, проверка состояния системы смазки узла). Для повышения достоверности визуального осмотра подшипника целесообразно применять видеозендоскоп. Однако визуальный контроль такого узла влечёт за собой длительные остановки агрегата, а также большие трудозатраты на разборку и сборку (для бригады из 4-х человек время демонтажа и установки торцевых крышек составляет 8 ч) и не даёт возможности 100%-ного осмотра контактирующих поверхностей подшипника. В связи с этим весьма актуальным становится разработка способа вибродиагностики опорных подшипников кислородного конвертера, что даст возможность:

- идентифицировать техническое состояние этих узлов без разборки;
- перейти на обслуживание по фактическому состоянию;
- сократить время и затраты на ремонт путем исключения операции «вскрыл-осмотрел-закрыл»;
- предотвращать аварийные разрушения опорного подшипника.

Опорные подшипники конвертера работают в условиях высоких динамических нагрузок, нестационарных режимов работы и высоких температур. Все эти факторы способствуют развитию повреждений в элементах подшипника, снижая надёжность его и агрегата в целом. Разрушение подшипника в опорном узле может привести к сбою в работе привода поворота конвертера, а вслед за этим и к нарушению

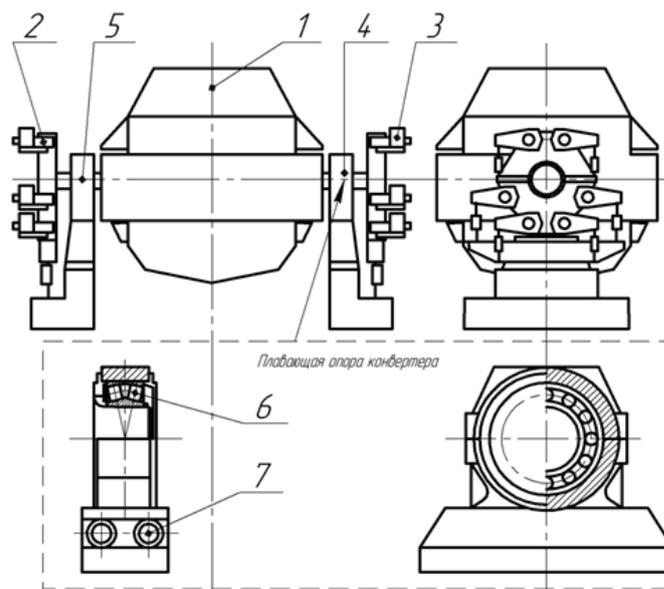


Рис. 1. Кислородный конвертер: 1 – груша конвертера; 2 – привод конвертера левый; 3 – привод конвертера правый; 4 – фиксированная опора конвертера; 5 – плавающая опора конвертера; 6 – опорный подшипник; 7 – шарнирный узел плавающей опоры конвертера

технологического процесса выплавки стали. Визуальный осмотр подшипника может обеспечить выявление только значительных повреждений. Дефекты на ранней стадии развития и их причины, в большинстве случаев, не проявляются. Для своевременного обнаружения, локализации и устранения повреждений в машине недостаточно периодических осмотров оборудования. В процессе эксплуатации необходимо применение нескольких видов контроля.

Для обеспечения высокой достоверности диагностирования технического состояния опорных подшипников необходимо проводить работы по входному контролю качества монтируемых подшипников, послеремонтный и периодический контроль [1]. Наиболее подходящим для таких работ методом контроля состояния подшипников является вибродиагностика. Уровни вибрации частотных составляющих определяются видом и степенью развития дефекта, свойствами нагрузки, состоянием смазки и другими факторами. Для уточнения причин проявления вибрации выполняется сопоставление данных, полученных при визуально-оптическом контроле.

Однако уникальность режимов работы и динамика нагружения привода кислородных конвертеров не позволяет применить стандартные подходы вибродиагностики. Её применение для таких узлов осложнено следующими факторами:

- индивидуальность конструкции каждого опорного узла;
- нестабильность режимов работы узла при опрокидывании груши конвертера с жидким металлом, связанная со смещением его центра тяжести в процессе слива металла;
- низкая, переменная скорость вращения (0,66-1,00 об/мин);
- большой вес элементов привода конвертера относительно подшипника затрудняет проявление дефектов на дорожках катания в низкочастотном диапазоне вибраций опор [3];
- высокий уровень внешней вибрации от работы привода;
- ограничение доступа к оборудованию в связи с непрерывностью технологического процесса;
- отсутствие в Украине практических наработок по вибродиагностике опорных подшипников конвертеров.

Стандартные подходы вибродиагностики не дают результатов при таких условиях. Поэтому был применён собственный подход к вибродиагностике подобных объектов, защищённый патентом № 93855 [5]. Задачей вибродиагностики стало отслеживание зависимости вибропараметров дефектов, выявляемых на холостом ходу агрегата (без технологических нагрузок), их идентификация и определение степени развития.

Опорные узлы кислородного конвертера принимают на себя нагрузки от веса груши с металлом, динамические при сливе стали и шлака, а также от привода наклона. Конструктивно опоры конвертера выполнены в виде разъёмных корпусов с подшип-

никами, установленных на массивных рамах. Опора с одной стороны конвертера зафиксирована жёстко во всех направлениях (фиксированная опора), с другой стороны конвертера опора, не имеет фиксации вдоль оси вращения конвертера (плавающая опора, рис. 1). Такая особенность конструкции обусловлена необходимостью компенсировать тепловые расширения опорного кольца конвертера (рис. 1).

В опорных узлах конвертеров устанавливаются двухрядные самоустанавливающиеся роликовые подшипники (рис. 1), способные компенсировать значительные перекосы. Однако, если на сферический подшипник действует осевая нагрузка, то работает только один ряд тел качения, в результате этого уменьшается его долговечность. Нарушение в работе узла плавающей опоры приводит к возникновению повышенных осевых нагрузок на опорные подшипники с обеих сторон конвертера.

По результатам периодических осмотров изношенных опорных подшипников были установлены следующие характерные дефекты:

- усталостное (осповидное) выкрашивание дорожек и тел качения, появляющееся из-за повышенных контактных напряжений, в результате неравномерного распределения сил на тела качения, при действии осевых нагрузок;
- разрушение сепаратора, возникающее при перекосах и подклинивании тел качения.

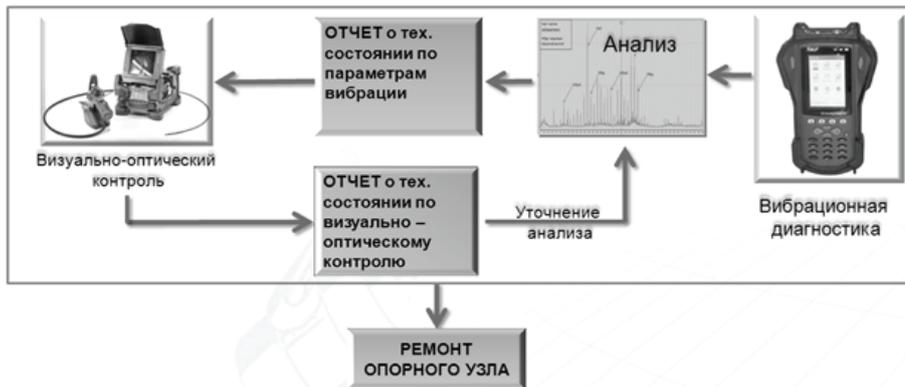
Эти дефекты составляют примерно 90 % всех дефектов, приводящих к разрушению подшипников кислородных конвертеров на «ММК им. Ильича» и МК «Азовсталь», что, в свою очередь, позволило сосредоточиться на идентификации очень узкого круга дефектов.

Задача диагностики этого узла была решена следующим путём: применение способа диагностирования, согласно патенту № 93855, набор статистических данных (многократные измерения параметров вибрации и наблюдение за развитием дефекта), проверка, уточнение и привязка конкретных виброхарактеристик к конкретному дефекту и степени его развития. Алгоритм проведения работы представлен на рис. 2. Проверка результатов вибродиагностики производилась посредством визуально-оптического контроля (ВОК).

Способ вибродиагностики отрабатывался специалистами отдела технической диагностики ПАО «ММК им. Ильича» в конвертерном цехе ПАО МК «Азовсталь». Весь цикл наблюдения за опорами конвертера занял примерно 1 год (от начала наблюдения до замены подшипника).

Практика вибродиагностики показывает, что измерение виброскорости в стандартных полосах частот (2-1000 Гц), согласно ГОСТ 10816-97, неинформативны для низкой частоты вращения. Подшипник качения не создаёт колебаний, достаточно мощных для того, чтобы повлиять на колебания всего опорного узла в низкочастотной области. Поэтому используются вибропараметры, характеризующие высокочастотную область вибросигнала.

При помощи виброанализатора записываются следующие параметры вибрации:



(БПФ) исключает появление случайных, непериодических колебаний в анализируемом сигнале. Вибросигнал, который был снят на опоре с новым подшипником, показал: амплитуды собственных частот для нового подшипника в несколько раз ниже аналогичных для дефектного подшипника.

Значение виброускорения в пике: для нового подшипника – $a = 0,147 \text{ м/с}^2$; для дефектного подшипника – $a = 0,607 \text{ м/с}^2$.

Появление в спектре огибающей амплитуды дефектных частот

совпадает с наличием повреждений в подшипнике. Дефектные частоты подшипника определяются его характеристиками и зависят от частоты вращения вала. Средняя частота вращения во время проведения измерений конвертера $n = 0,66 \text{ об/мин}$.

На спектре огибающей, снятом с дефектного подшипника, четко проявляется частота перекатывания тел качения по наружному кольцу с гармоническим рядом (рис. 4).

Для установления связи между амплитудой дефектных частот и степенью развития дефекта потребовалось проведение периодического визуально-оптического контроля (ВОК) состояния подшипника. Данная работа производилась видеоэндоскопом. Результаты ВОК сопоставлялись с параметрами вибрации.

Дальнейшие наблюдения за вибростоянием объекта показали рост амплитуд дефектных частот подшипника в спектре огибающей по мере развития дефекта.

Исходя из проведенного анализа данных вибрации опорного подшипника, дефекты дорожек качения получили ускоренный рост. Перед остановкой конвертера № 2 на перефутеровку 23.06.2014 г. проводились измерения вибрации дефектного подшипника. Во время ремонта подшипник с фиксированной стороны был заменён. Осмотр снятого подшипника производился на ремонтной площадке. На момент демонтажа состояние дорожек катания и роликов было критическим (рис. 5).

Рис. 2. Порядок проведения технической диагностики опорных подшипников конвертера

– прямой спектр виброускорения, γ – спектр вибрации отображает зависимость амплитуды виброускорения от частоты колебаний;

– виброускорение во временной области, g – сигнал изменения амплитуды виброускорения с течением времени (2 датчика);

– спектр огибающей, gE – спектр, выделенный из области высокочастотных колебаний в опоре в диапазоне частот 500-10000 Гц.

Опытные замеры проводились на 2-х опорах конвертера № 2 ККЦ «Азовсталь». При следующих условиях: 8 полных оборотов конвертера для проведения измерений вибрации на одной опоре; скорость вращения конвертера во время проведения измерений $n = 0,66-1 \text{ об/мин}$. Запись сигнала производилась с 2-х каналов, акселерометры устанавливались в радиальном направлении, угол установки 60° от вертикальной оси опоры (рис. 3). Такое расположение датчиков вибрации связано с конструктивными особенностями корпуса опорного узла.

В фиксированной опоре был установлен разъемный подшипник 40-538/1320хк производства СПЗ, имевший на момент первого измерения следующие дефекты: абразивный износ тел качения; раковины по разьёму внутреннего кольца; раковины по разьёму наружного кольца. В это же время в плавающей опоре был установлен новый разъемный подшипник 40-538/1320хк. Появилась уникальная возможность сравнить параметры вибрации дефектного и нового подшипников, отследить динамику развития дефектов и изменения их вибропараметров, чем удалось существенно сократить время наработки статистического материала.

Вибросигнал, снятый с дефектного подшипника (фиксированная опора), показал, что на прямом спектре виброускорения наблюдается рост амплитуд в области собственных частот элементов подшипника (2,0-4,5 кГц). Колебания на собственных частотах элементов подшипника возбуждаются ударами, возникающими при перекатывании тел качения по дефектам на беговых дорожках колец подшипника.

Так как колебания в полосе частот выше 2 кГц быстро затухают, то появление в спектре посторонних шумов от работы близлежащего оборудования в этой полосе частот маловероятно. В свою очередь, усреднение сигнала и выделение из него спектров, с использованием быстрого преобразования Фурье

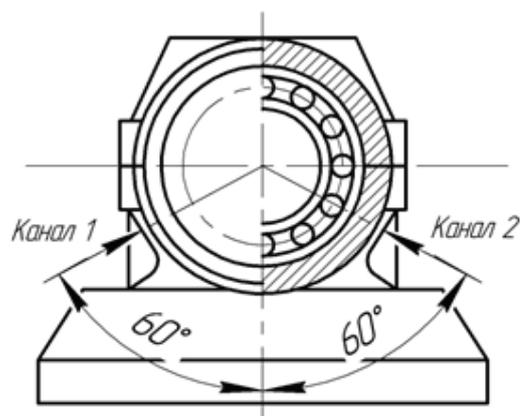


Рис. 3. Установка датчиков вибрации на подшипниковую опору

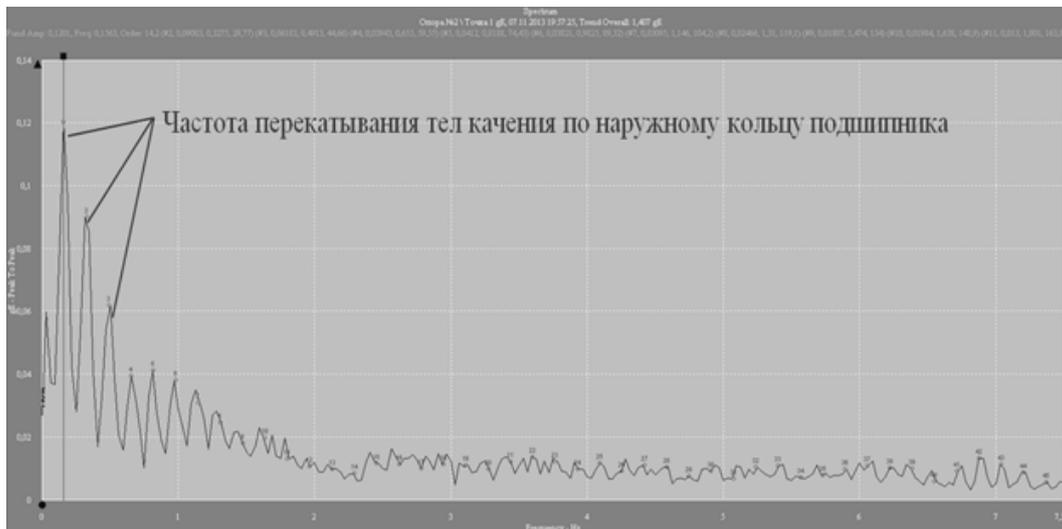


Рис. 4. Спектр огибающей gE дефектного подшипника (измерения до проведения ВОК)

При помощи периодических осмотров дефектного подшипника установлено, что развитие дефектов сопровождается увеличением общих уровней виброускорения, а также ростом амплитуд дефектных частот в спектре огибающей. Таким образом установлена связь между амплитудой дефектных частот и степенью развития дефекта подшипника.

В табл. 1 показана хронология развития дефекта, сопровождаемого изменением общего уровня виброускорения.

Такой подход позволил проследить за развитием дефекта и определить пороговые уровни параметров вибрации опорного подшипника (табл. 2). В данный момент определение технического состояния



Рис. 5. Раковины на элементах опорного подшипника

Таблица 1

Хронология данных диагностики опорных подшипников конвертера

Дата проведения измерений	Дефектный подшипник			Новый подшипник		
	виброускорение g		результаты визуально-оптического контроля	виброускорение g		результаты визуально-оптического контроля
	канал 1	канал 2		канал 1	канал 2	
7.11.2013 г.	0,062g	–	обнаружение дефекта на внутреннем кольце подшипника	0,015g	–	установка нового подшипника
26.12.2013 г.	0,039g	0,03g	отслеживание дефекта	0,011g	0,011g	приработка подшипника
28.05.2014 г.	0,045g	0,09g	обнаружение дефекта на наружном кольце подшипника	0,012g	0,011g	нормальная эксплуатация подшипника
23.06.2014 г.	0,074g	0,273g	замена подшипника	0,011g	0,011g	визуальный осмотр подшипника; дефектов нет

Зоны технического состояния подшипника 40-538/1320хк, установленного в опоре конвертера вместимостью 350 т, на основании параметров вибрации

Зона технического состояния	Рекомендации	Значение параметра вибрации	
		огигающая в диапазоне частот 500-10000 Гц, gE	виброускорение, g
Удовлетворительное состояние	эксплуатация подшипника допускается	< 2,5	< 0,06
Неудовлетворительное состояние	проверка состояния подшипника	2,5-4,6	0,06-0,12
Аварийное состояние	замена подшипника	> 4,6	> 0,12

подшипника проводится по указанным уровням вибропараметров. Определены 3 зоны состояния, по которым принимается решение о проведении ремонта опорного узла.

Пороговые уровни виброускорения g и огибающей gE , соответствующие зонам технического состояния, выведены на основании набранных статистических данных. Расчёт производился по теории математической статистики (метод «3-х Сигм») [4], в среде Microsoft Excel, основываясь на числовых значениях всех вибропараметров, измеренных на подшипниковых узлах конвертера МК «Азовсталь». Такой расчёт даёт возможность проводить качественную оценку состояния опорного подшипника без разборки узла.

В данный момент на ММК им. Ильича проводится опытная диагностика опорных подшипников конвертеров ККЦ. Эта работа находится на стадии набора статистических данных и их обработки.

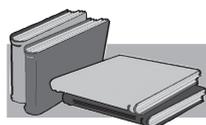
Выводы

Выведенные пороговые уровни параметров вибрации позволяют оценить техническое состояние

опорного подшипника 40-538/1320хк без вскрытия опоры. При помощи этих диагностических мероприятий достигнут экономический эффект за счёт:

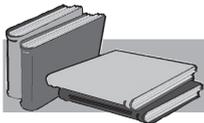
- перехода на обслуживание опорных подшипников по фактическому состоянию;
- сокращения трудоёмкости ремонта;
- уменьшения вероятности аварийного простоя по поломке узла опорного подшипника;
- снижения потерь производства.

Разработанный диагностический подход (вибродиагностика на холостом ходу и ВОК) применим для всех типов опорных узлов конвертеров. Пороговые значения вибропараметров носят индивидуальный характер для каждого типа опорного узла. Следовательно, для применения данной методики на аналогичных узлах необходим набор статистики.



ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль: справочник, т. 7 / под ред. РАН В. В. Клюева. – Москва: Машиностроение, 2006. – С. 829.
2. Опыт диагностики крупногабаритных подшипников качения / М. А. Зайцев, А. И. Ляшенко, А. А. Воробьёв, О. В. Ченчевич, О. Г. Фролов. – Мариуполь: Metallургические процессы и оборудование. – № 3 (37). – 2014. – С. 4.
3. Кравченко В. М. Техническое диагностирование механического оборудования / В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, В. Я. Седуш. – Донецк: Юго-Восток, ЛТД. – 2009. – С. 458.
4. Лекционный материал курса подготовки специалистов по вибродиагностике. – Учебный центр ООО «Диамех 2000». – Москва, 2004. – С. 72.
5. Патент № 93855 Украина МПК G01 M 13/00. Способ вибрационной диагностики приводов механического оборудования; заявитель и правообладатель ПАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича». – № 2013 14490; заявл. 11.12.2013; опублик. 27.10.2014, Бюл. № 20.



REFERENCES

1. Kljuev V. V. (Eds.). (2006). Nerazrushajushhij kontrol' [Non-destructive control]: (vols. 7). Moscow: Mashinostroenie, pp. 829. [in Russian].
2. Zaitsev M. A., Lyashenko A. I., Vorobyov A. A., Chenchovich O. V., Frolov O. G. (2014). Opyt diagnostiki krupnogabaritnyh podshipnikov kachenija [Experience in the diagnosis of large-sized bearings rolling]. Mariupol: Metallurgical processes and equipment, no 3 (37), p. 4. [in Russian].
3. Kravchenko V. M., Sidorov V. A., Sedush V. Ja. (2009). Tehnicheskoe diagnostirovanie mehanicheskogo oborudovanija. [Technical diagnosing of mechanical equipment]. Doneck: «South-East, LTD» publishing house, pp. 458. [in Russian].
4. Lekcionnyj material kursa podgotovki specialistov po vibrodiagnostike [Handout training courses for vibration diagnostics]. Moscow: Training Center LLC «Diamex 2000», 2004, pp. 72. [in Russian].
5. Sposob vibracionnoj diagnostiki privodov mehanicheskogo oborudovanija [Method of vibration diagnostics drives the mechanical equipment] Patent Ukraine, no 93855, 2014. [in Russian].

Анотація

Зайцев М. О., Ченчевич О. В., Ватралик Е. М.

Вібродіагностика опорних підшипників кисневих конвертерів

Описано розробку способу діагностування великогабаритних низькообертових підшипників кочення, встановлених в опори кисневого конвертера, випробувано і освоєно фахівцями відділу технічної діагностики «ММК ім. Ілліча» в конвертерному цеху МК «Азовсталь». Метою розробки способу діагностування опорних підшипників є перехід від візуального контролю стану підшипників до безрозбірної дефектації, на підставі результатів вібродіагностики, для переходу на обслуговування по фактичному стану.

Ключові слова

опорний підшипник, кисневий конвертер, надійність, технічна діагностика, вібрація, обслуговування по фактичному стану

Summary

Zaitsev M., Chenevich O., Vatralic E.

Vibration monitoring for BOF pillow-block bearings

The development of monitoring method for large low-speed rolling established into BOF supports bearings that was tested and mastered by experts from "Ilych iron and steel works of Mariupol" engineering diagnostics department in "Azovstal Iron and Steel Works" converter plant is described. The purpose of this development is the pass from bearings state visual diagnostics to in-place inspection on the base of vibration monitoring for actual state maintenance.

Keywords

pillow-block bearing, BOF, reliability, engineering diagnostics, vibration, actual state maintenance

Поступила 29.01.2016