

металлургия. – 1989. – № 7. – С. 53-54.

2. Большаков В. И., Семенов Ю. С., Лебедь В. В., Шумельчик Е. И., Вишняков В. И. Модель радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи, оборудованной БЗУ // Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2011. – № 23. – С. 52-61.

3. Большаков В. И., Гладков Н. А., Шутьлев Ф. М. Разработка критериев взаимосвязанного

управления режимом загрузки и технологическими параметрами доменной плавки // Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 1999. – № 3. – С. 32-39.

4. Большаков В. И., Лебедь В. В., Жеребецкий А. А. Особенности управления загрузкой на современной доменной печи // Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2012. – № 25. – С. 13-24.

Поступила 12.06.2014

УДК 669. 02 / . 09 : 658. 58.

Сидоров В. А. /к. т. н./

ДНТУ



Наука

## Диагностические признаки развития повреждений виткоукладчиков прокатных станов

*В работе приведены диагностические признаки развития повреждений виткоукладчиков прокатных станов. Определены допустимые значения виброскорости и характерные повреждения данного механизма. Ил. 8. Библиогр.: 3 назв.*

**Ключевые слова:** виткоукладчик, прокатный стан, параметры вибрации, спектральный анализ, развитие повреждений

*Diagnostic features of development of damages of laying pipe of rod mills are given. Accepted values of vibration velocity and characteristic damages of this mechanism are defined.*

**Keywords:** laying pipe, rolling mill, VB parameters, spectral estimation, failure development

Современное металлургическое производство характеризуется возрастающими требованиями к непрерывности и производительности технологических процессов. Это находит отражение в конструкциях металлургических машин и повышении уровня их технического обслуживания и ремонта. Технологические линии становятся более производительными, высокоскоростными, увеличиваются требования к безотказности отдельных механизмов, становится необходимой дополнительная настройка в процессе эксплуатации, раннее обнаружение признаков повреждений и своевременное их устранение. Одной из таких машин является виткоукладчик прокатного стана.

Скорость прокатки на прокатных станах составляет 90-100 м/с. Предполагается увеличение скорости прокатки до 120-130 м/с. Наибольшая скорость проката достигается на выходе прокатных клетей чистового или низкотемпературного блока. После низкотемпературного блока прокат (диаметром 5,5-10,0 мм) подается в виткоукладчик 2 (рис. 1), который укладывает его в виде плоской спирали на движущийся роликовый транспортер 3. Движение витков проволоки на роликовом транспортере со скоростью 1,0-1,2 м/с осуществляется для регулируемого воздушного охлаждения. Перед виткоукладчиком 2 расположен трайбашарат 1, для обеспечения стабильной подачи проката в укладочную трубу.



а)



б)

Рис. 1. Участок образования и укладки витков на роликовый транспортер (а), вид сбоку на процесс укладки витков (б)

©Сидоров В. А. /к. т. н./, 2014 г.

**Описание объекта**

Стабильность работы виткоукладчика, совместно с трайбаппаратом определяет качество укладки витков на роликовом транспортере и плотность бунта. Механизм виткоукладчика представляет собой одноступенчатый мультипликатор с передаточным числом 0,656 (рис. 2). Привод виткоукладчика состоит из электродвигателя мощностью 112 кВт с тиристорным управлением частотой вращения. Номинальная частота вращения выходного вала мультипликатора – 1800 об/мин. Полый выходной вал установлен под углом 10°. Исполнительный орган – ротор, на котором закреплена изогнутая в виде спирали укладочная труба, имеет сложную пространственную форму (рис. 3). Возможность установки корректирующих грузов позволяет проводить замену укладочной трубы, имеющей различный вес без проведения дополнительного уравнивания ротора.

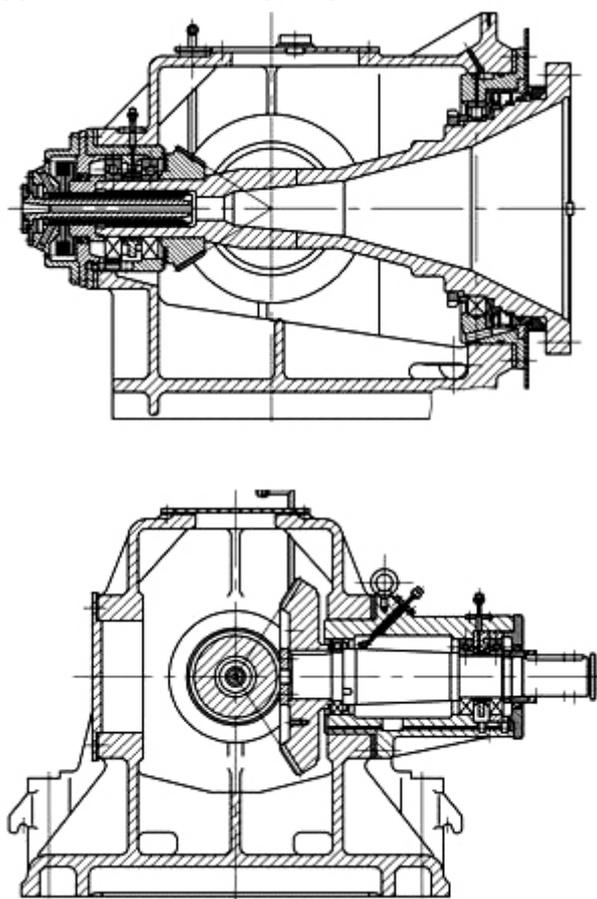


Рис. 2. Схема виткоукладчика

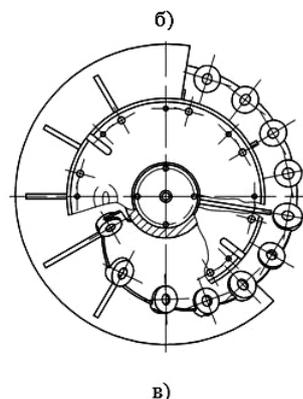
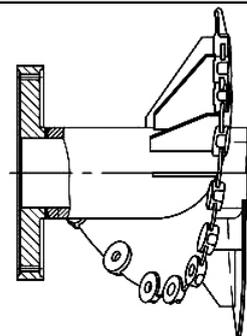
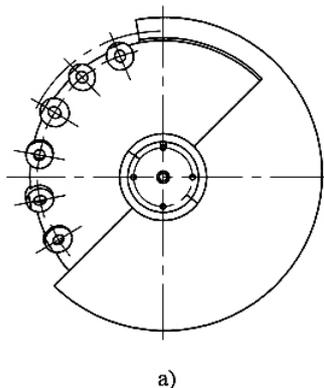


Рис. 3. Исполнительный элемент виткоукладчика – ротор (а, б, в) и укладочная труба (г)

Цель работы – определить диагностические признаки развития повреждений виткоукладчиков проволочных прокатных станов для своевременного проведения ремонтных операций и обеспечения безотказности механизма.

Наиболее характерными неисправностями виткоукладчика являются:

1. Дисбаланс ротора, требующий проведения уравнивания в собственных опорах.

2. Повреждения подшипников в результате осповидного выкрашивания или нарушения режимов смазывания. Для роликового подшипника 527459 выходного вала осповидное выкрашивание беговой дорожки наружного или внутреннего кольца является наиболее характерным после эксплуатации в течение 5-7 лет (рис. 4а, б). Последствия – нарушение вращения тел качения и разрушение сепаратора (рис. 4в, г). Повреждения радиально-упорных шарикоподшипников могут быть связаны с нарушением режима смазывания из-за засорения отверстий маслоподающих форсунок.

3. Ослабление резьбовых соединений, часто является следствием не параллельности оснований корпуса виткоукладчика и рамы основания после 10-12 лет эксплуатации механизма.

4. Износ укладочной трубы наблюдается после прокатки 8,0-10,0 тыс. т.



а)



б)



в)



г)

**Рис. 4. Повреждения роликового подшипника 527459:** а) осповидное выкрашивание беговой дорожки наружного кольца; б) осповидное выкрашивание беговой дорожки внутреннего кольца; в) повреждения тел качения; г) следы разрушенного сепаратора на беговой дорожке наружного кольца

Диагностирование механизмов роторного типа проводится по общему уровню параметров вибрации и анализу спектральных составляющих вибрационного сигнала. Необходимым в данном случае является определение границ категорий технического состояния и диагностических признаков повреждений в привязке к возможным ремонтным операциям.

Точки контроля: корпус подшипников входного вала; шариковые радиально-упорные подшипники выходного вала (расположены со стороны трайбаппарата); роликовый подшипник выходного вала (расположен со стороны роликового конвейера). Измерения параметров вибрации проводятся в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях.

Оценка технического состояния виткоукладчика проводится путем измерения среднеквадратичных значений виброскорости в частотном диапазоне 10-1000 Гц в контрольных точках на невращающихся корпусах подшипниковых опор и сравнения с нормативными значениями, регламентированными ГОСТ ИСО 10816-1-97 [1]. Наличие привода мощностью 112 кВт позволяет отнести данный механизм к средним машинам, с допустимым значением 7,1 мм/с, определяющим необходимость проведения ремонта. Значения виброскорости, определяющие границы состояний: до 2,8 мм/с – функционирование без ограничения сроков; 2,8 - 7,1 мм/с – функционирование в ограниченном периоде времени; выше 7,1 мм/с – возможны повреждения машины. Длительная эксплуатация данного механизма, с повышенными значениями вибрации, приводит к ускоренному износу и требует проведения частых ремонтных операций. Правильный монтаж и уравнивание ротора в собственных опорах позволяют обеспечить эксплуатацию виткоукладчика при значениях виброскорости не превышающих 4,5 мм/с, зафиксированной во время работы машины под нагрузкой при номинальной частоте вращения ротора. Правильный выбор ремонтной операции может быть обоснован характером изменения значений общего уровня вибрации. Так, например:

- снижение виброскорости роликового подшипника выходного вала в горизонтальном направлении при работе под нагрузкой и повышение виброскорости на холостом ходу указывает на наличие зазоров между рамой основанием и корпусом виткоукладчика;
- увеличение вибрации в квадратичной зависимости при увеличении частоты вращения появляется при дисбалансе ротора;
- резкое снижение вибрации при выходе на номинальный режим – признак неустойчивого положения корпуса виткоукладчика.

Для оценки состояния электродвигателя привода виткоукладчика используется ГОСТ 20815-93 [2]. Допустимое значение виброскорости при работе двигателя под нагрузкой не должно превышать 2,8 мм/с.

Дополнительным параметром для оценки состояния подшипников качения виткоукладчика рекомендуется использовать значения виброускорения в частотном диапазоне 10-5000 Гц при следующих соотношениях пикового и среднеквадратичного значений:

1) хорошее состояние – пиковое значение не превышает 10,0 м/с<sup>2</sup>; 2) удовлетворительное состояние – среднеквадратичное значение не превышает 10,0 м/с<sup>2</sup>; 3) плохое состояние – среднеквадратичное значение превышает 10,0 м/с<sup>2</sup>. Плохое состояние соответствует необходимости проведения ремонтных операций.

Для эффективного мониторинга технического состояния механизма необходимо ежемесячно проводить спектральный анализ составляющих виброскорости и виброускорения. В развитии повреждений механизмов роторного типа существует несколько этапов:

– хорошее состояние механизма характеризуется низким уровнем преобладающей составляющей оборотной частоты ротора механизма и наличием большого числа гармоник малой амплитуды (рис. 5а);

– начальная неуравновешенность ротора – появление гармоник оборотной частоты с преобладанием первой гармоники (рис. 5б) наиболее благоприятное время для проведения балансировки;

– средний уровень повреждений механизма – появляются многочисленные гармоники с преобладанием полуторных гармоник (1½, 2½, 3½ оборотной частоты), свидетельствующие о наличии зазоров между сопрягаемыми деталями, в этом случае требуется восстановление посадочных поверхностей подшипников и корпусов опор механизма (рис. 5в);

– значительные повреждения приводят к преобладанию первой гармоники, в этом случае необходимо восстановление фундамента и посадочных мест корпусных деталей механизма (рис. 5г).

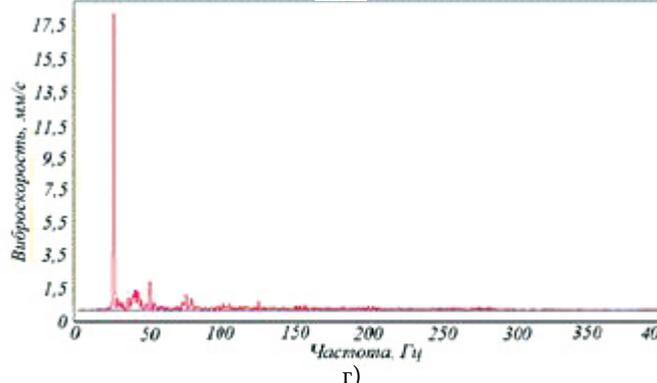
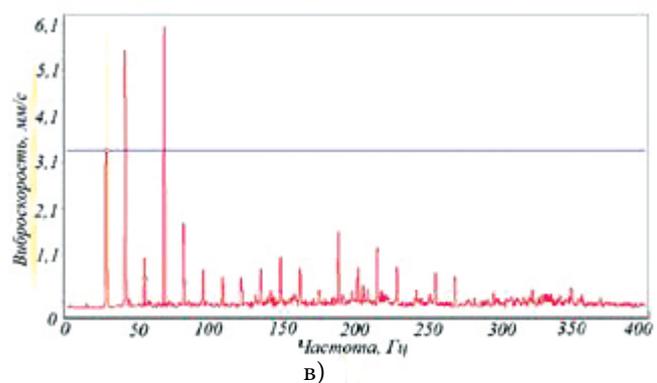
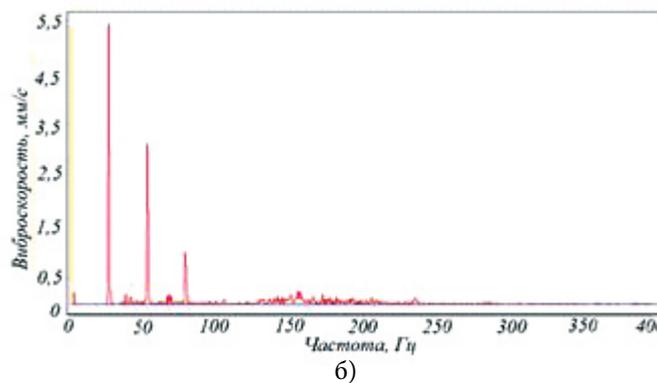
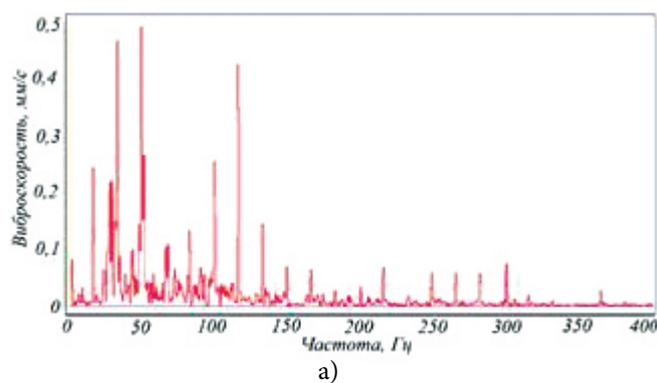


Рис. 5. Этапы развития повреждений виткоукладчика: а – хорошее состояние; б – начальная неуравновешенность ротора; в – средний уровень повреждений; г – значительные повреждения

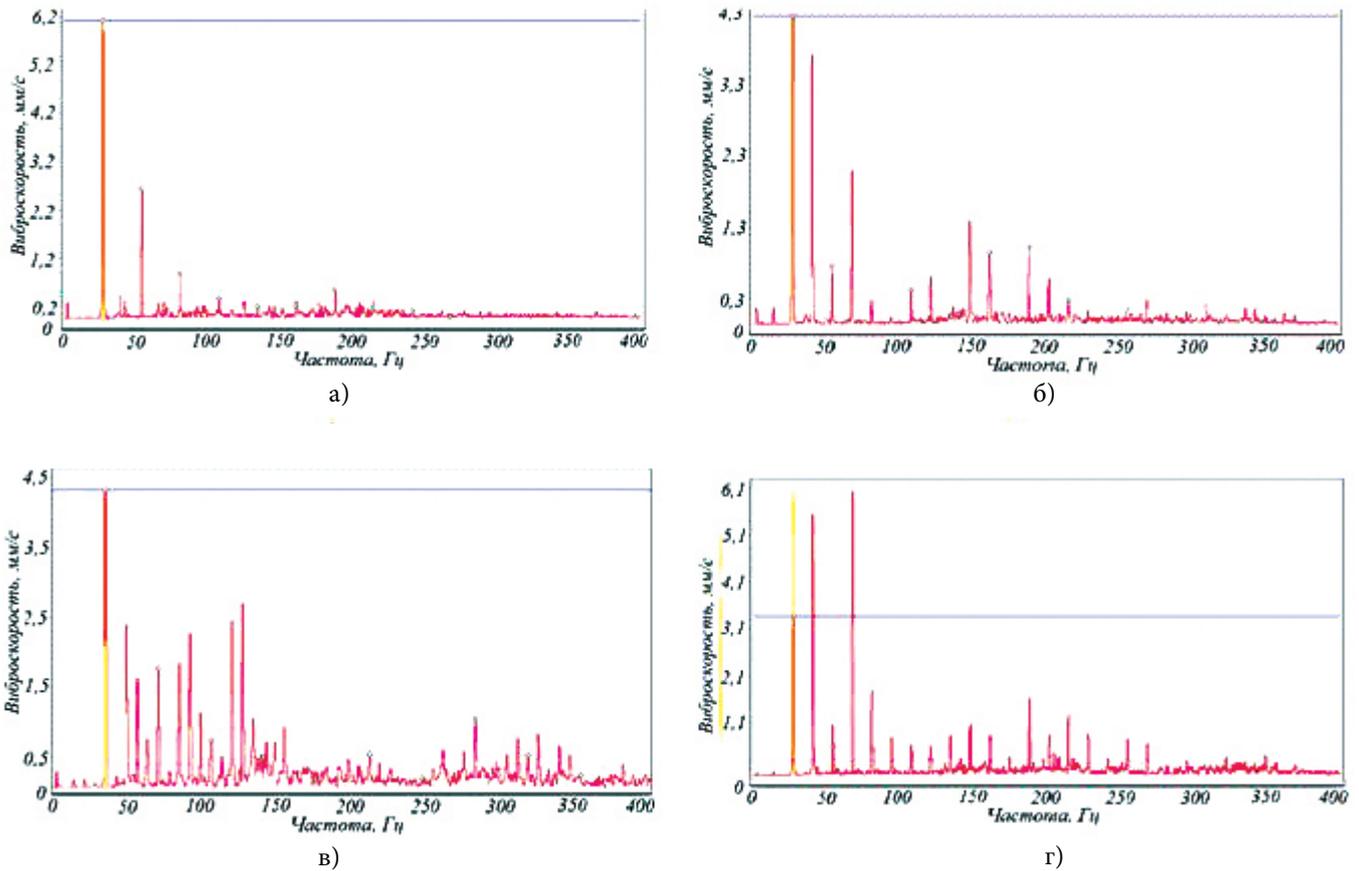
Одним из характерных повреждений виткоукладчика, после длительной эксплуатации (10-15 лет), является не параллельность опорных поверхностей корпуса машины и фундамента, при этом вес машины распределяется на три или две опоры. Спектр виброскорости в этом случае содержит гармонические составляющие с амплитудой более 4,5 мм/с и полуторные гармоники. Данное повреждение приводит к повышенной податливости корпуса виткоукладчика в одном из направлений и нестабильности фазового угла при балансировке. Поэтому, не параллельность опор корпуса машины и фундамента, ослабление резьбовых соединений, износ посадочных мест подшипников, а также повышенный осевой люфт подшипников перед балансировкой ротора виткоукладчика необходимо устранить.

Варианты появления и развития полуторных гармоник представлены на рис. 6. Малая амплитуда полуторной гармоники характерна для ранней стадии развития данного повреждения (рис. 6а). Дальнейшее развитие может проходить двумя путями:

– происходит увеличение амплитуды полуторной гармоники (рис. 6б);

– появляются более дробные субгармоники – 1/3 или 1/4 и соответственно гармоники 1½, 1¾ или 1¼, 1½, 1¾ (рис. 6в).

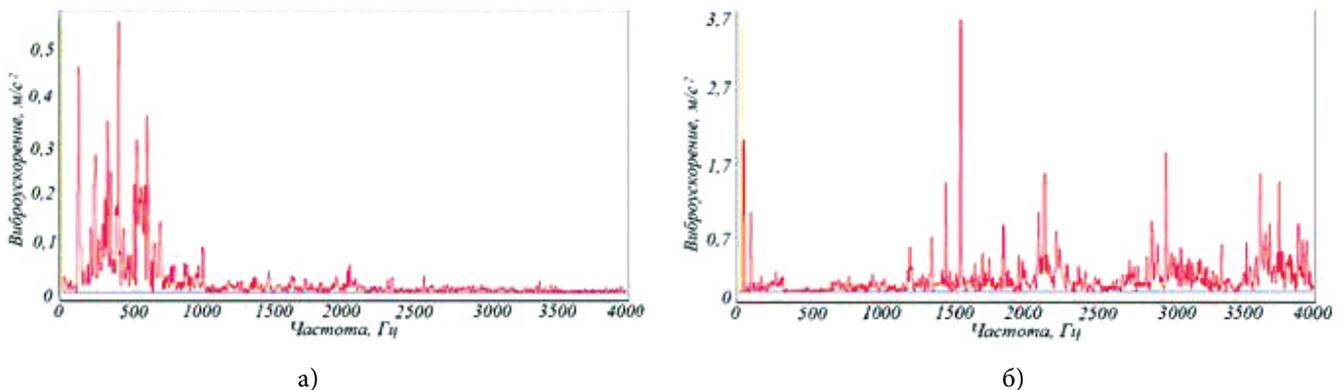
Необходимость ремонта возникает в том случае, если амплитуда полуторной гармоники превышает амплитуду оборотной частоты (рис. 6г).



**Рис. 6. Варианты проявления и развития полуторных гармоник:** а – ранняя стадия развития повреждения ; малая амплитуда полуторной гармоники; б – развитие повреждения ; увеличение амплитуды полуторной гармоники; в – развитие повреждения – появление гармоник  $1\frac{1}{4}$ ,  $1\frac{1}{2}$ ,  $1\frac{3}{4}$  и др.; г – необходимость ремонта ; амплитуда полуторной гармоники превышает амплитуду оборотной частоты

Для диагностирования подшипников качения также можно выделить характерные спектрограммы виброускорения, связанные с различной степенью повреждения (рис. 7). Исправное состояние характеризуется наличием незначительных по амплитуде составляющих в низкочастотной области исследуемого спектра 10-4000 Гц (рис. 7а). Начальная стадия повреждений имеет несколько составляющих с амплитудой 1,7-3,5 м/с<sup>2</sup> в средней части спектра (рис. 7б). Средний уровень повреждений связан с образованием «энергетического горба» в диапазоне 2-4 кГц с пиковыми значениями до 4,0 м/с<sup>2</sup> (рис. 7в).

Причина данных повреждений – осповидное выкрашивание на беговых дорожках или нарушение режима смазывания, что приводит к появлению металлического контакта между телами качения и беговой дорожкой. Значительные повреждения приводят к увеличению амплитудных значений составляющих «энергетического горба» свыше 10 м/с<sup>2</sup> (рис. 7г). Замену подшипника следует проводить после начала снижения значений пиковых составляющих. При этом меняется характер трения – в подшипнике качения появляется трение скольжения, тела качения начинают проскальзывать относительно беговой дорожки.



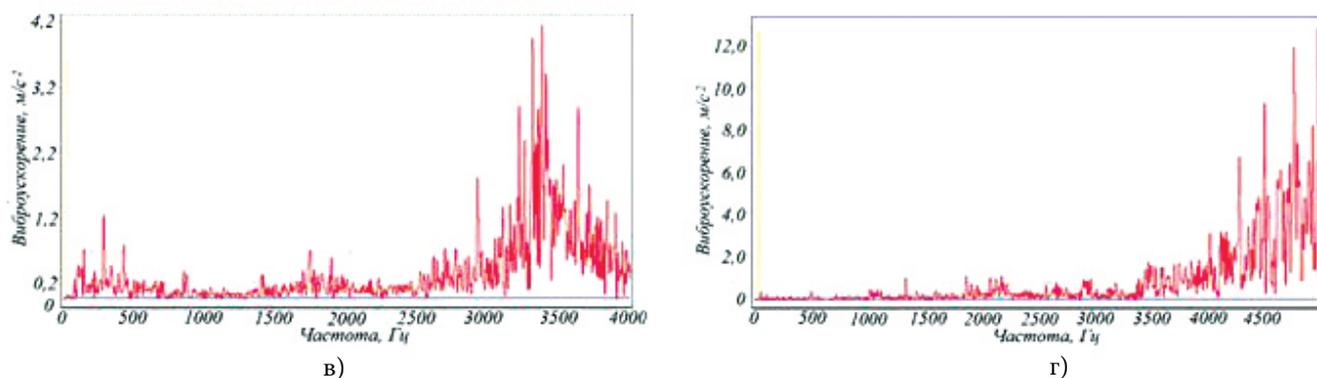


Рис. 7. Этапы развития повреждений подшипника качения: а – хорошее состояние; б – начальная стадия; в – средний уровень повреждений; г – значительные повреждения

Для укладки катанки на роликовый транспортер в качестве проводки используется укладочная труба 25×4,5 изготовленной из стали 12Х13 ГОСТ 9941-81. Большая длина и сложная геометрия изгиба (рис. 3г) делает практически невозможным раннее обнаружение износа внутренней поверхности методами неразрушающего контроля. Места износа могут меняться в зависимости от прокатываемого сортамента и скорости прокатки.

В этом случае, после прокатки 8000 т рекомендуется осмотр внутренней поверхности трубы при помощи видеоэндоскопа. Признаки повреждения просто распознаются (рис. 8а, б), что позволяет в некоторых случаях увеличить срок службы трубы до 10000 т и избежать внеплановых остановок оборудования. Знание скорости износа позволяет выполнить прогнозирование срока службы на кратковременный период.



а)



б)

Рис. 8. Внутренняя поверхность укладочной трубы виткоукладчика: а - без повреждений; б - при износе трубы перед заменой

Повреждения ротора, установка нового мультипликатора требуют проведения балансировки ротора на месте установки в собственных опорах виткоукладчика. Наличие портативных виброанализаторов, со встроенными балансировочными программами, позволяет оперативно решать данную задачу. Однако использование стандартных балансировочных программ не всегда позволяет эффективно провести уравновешивание ротора. Необходимо учитывать особенности балансировки данного механизма используя основы динамического уравновешивания. Уменьшение количества запусков, эффективное снижение вибрации позволяет рекомендовать метод уравновешивания в составляющих для балансировки широких консольных роторов, в частности, ротора виткоукладчика [3].

**Выводы**

1. Диагностические признаки развития повреждений виткоукладчиков проволочных станков включают оценку технического состояния на основе измерения общего уровня, анализа спектров и визуального осмотра. Предложены допустимые значения виброскорости для оценки технического состояния данного механизма.
2. Установленные этапы развития повреждений виткоукладчика и подшипников качения при изменениях составляющих спектрограмм виброскорости в частотном диапазоне 10-400 Гц и виброускорения в частотном диапазоне 10-4000 Гц позволяют определить необходимость проведения ремонтных операций.
3. Одним из характерных повреждений виткоукладчика, после длительной эксплуатации (10-15 лет), является не параллельность опорных

поверхностей корпуса машины и фундамента, что распознается появлением полуторных гармоник с различными вариантами проявления и развития.

### Библиографический список

1. ГОСТ ИСО 10816-1-97 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования. - Введ. 01.07.99. - Минск: ИПК изд-во стандартов, 1998. - 18 с.

2. ГОСТ 20815-93 Машины электрические вращающиеся. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и выше. Измерение, оценка и допустимые значения.

3. Сидоров В. А. Особенности балансировки роторов виткоукладчиков мелкосортных прокатных станов / В. А. Сидоров // Международный научно-технический и производственный журнал «Вибрация машин: измерение, снижение, защита». - 2012. - № 2 (29). - С. 43-48

Поступила 10.06.2014



УДК 621.771.28.001.57

Рахманов С. Р. /к. т. н./

НМетАУ

Ольшанский В. П. /д. ф-м. н./

ХНТУСХ

Наука

## Математическое моделирование динамики автоматического стана трубопрокатного агрегата с учетом переменности массы системы

*Разработана математическая модель, учитывающая взаимодействие развитой механической системы линии привода стана с прокатываемой гильзой и стержнем механизма удержания оправки. Динамика эквивалентной двухмассовой динамической модели механической системы линии привода стана и продольные колебания стержня оправки представлены системой взаимосвязанных дифференциальных уравнений. При этом прокатываемая гильза, имеющая переменную во времени массу, рассматривается как часть сложной механической системы. Приведены результаты численного решения задачи и анализ формирования динамических процессов в трансмиссии и механизме удержания оправки автоматического стана. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 9 назв.*

**Ключевые слова:** динамика, модель, автоматический стан, гильза, очаг деформации, валок, оправка, стержень, жесткость, труба, привод, момент инерции, масса, момент сил, колебания, амплитуда, частота, функция Бесселя, функция Неймана

*Mathematical model considering interaction of developed mechanical system of the line of drive of a mill with rolled billet and core of a mandrel is developed. Dynamics of equivalent two-mass dynamic model of mechanical system of the drive line and longitudinal fluctuations of mandrel core are presented by system of the interconnected differential equations. Herein rolled billet having time variant mass is considered as a part of complex mechanical system. Results of numerical solution of a task and the analysis of formation of dynamic processes in transmission and mandrel core along an axis of rolling of an automatic mill are given.*

**Keywords:** dynamics, model, automatic mill, hollow billet, deformation zone, roll, mandrel, core, rigidity, pipe, drive, inertia moment, weight, moment of forces, fluctuations, amplitude, frequency, Bessel's function, Neumann's function

Автоматический стан является важным звеном в технологическом цикле производства бесшовных горячекатаных труб и со всем комплексом основных и вспомогательных механизмов относится к тяжело нагруженному оборудованию [1, 2].

Характер нагружения элементов привода валков рабочей клетки и стержня оправки стана преимущественно определяется спецификой реализации технологических процессов производства бесшовных труб с определенными режимами деформации гильз по стенке и диаметру. Нестационарные технологические процессы и возникающие при этом значительные

динамические нагрузки вызывают в узлах и деталях привода стана значительные знакопеременные напряжения.

Следует отметить, что при принудительной подаче гильзы в калибры стана происходит значительное улучшение захвата гильзы рабочими валками (предусмотрена подача гильзы вталкивателем в очаг деформации). Захват гильзы валками автоматического стана, помимо всего прочего, существенно осложнен тем, что гильза, ударяясь о массивные валки, одновременно взаимодействует с оправкой, предварительно выдвинутой из пережима калибра, и всей стержневой системой механизма удержания оправки (рис. 1).

Автоматический стан является важным звеном в технологическом цикле производства бесшовных