

УДК 621.74.047

П.В. Крот /к.т.н./, И.Ю. Приходько /к.т.н./, К.В. Соловьев /инж./  
Институт черной металлургии НАН Украины

## **СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВИБРАЦИИ И ДИАГНОСТИКИ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ**

*Приведено результати експериментальних і теоретичних досліджень резонансної вібрації станів холодної прокатки.*

*Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований резонансной вибрации станов холодной прокатки.*

*The results of the experimental and theoretical research of the cold rolling mills resonance vibration are given.*

Ограничение скорости технологического процесса получения тонких полос на станах холодной прокатки и дрессировочных станах связано с повышенными вибрациями оборудования клетей и межклетевых натяжений. При возникновении вибрации на некоторой скорости стана операторы вынуждены ее резко снижать на 10-20%, в противном случае происходят обрывы полос, повреждения рабочих и опорных валков, вызывающие простои и увеличенный расход валков.

Начало исследования данной проблемы можно датировать публикацией [1] и последовавших за ней многочисленных зарубежных [2]. В числе последних можно отметить работу [3] и более ранние, где рассматриваются различные причины возникновения, механизмы усиления вибраций, связанные с ними периодические дефекты поверхности полосы, валков и система мониторинга вибрации на стане 2030.

Основным фактом, с которым не спорит ни один из авторов опубликованных работ - это фрикционный характер данных вибраций. Вторым постулатом является предположение об автоколебательной природе вибраций, поскольку известны решения задач возбуждения колебаний в механических системах без периодического возмущения на постоянной скорости, но имеющими падающий участок характеристики трения от скорости скольжения контактирующих тел (рабочих валков с полосой). Используется термин «отрицательного» демпфирования.

Другим, не менее представительным по числу публикаций, является подход, авторы которого связывают возбуждение вибраций с наличием кинематически обусловленных источников колебаний в стане, в том числе параметрически возбуждаемых при изменении жесткости упругих связей системы и фрикционных колебаний в очаге деформации [4-6]. В числе последних гипотез рассматриваются также горизонтальные колебания подушек валков в поле зазоров станины клетки.

Предложенные технические решения проблемы резонансных вибраций (англ. «chatter»), индивидуальные в каждом конкретном случае, по заявлениям авторов опубликованных работ, позволили устранить их на отдельных станах. Но поскольку появляются все новые и новые публикации, то, очевидно, данная проблема существует, носит феноменологический характер и не может быть решена на основе

известных на сегодня гипотез и подходов. По-видимому имеют право на существование все подходы («автоколебательный», «кинематический», «фрикционный»), пока не будет найдено приемлемое для любых станов решение.

ИЧМ проводил в 1980-х годах несколько исследований по данной проблеме на станах холодной прокатки и дрессировки. В качестве источников возбуждения вибрации в клети рассматривались колебания в зубчатых зацеплениях валковых муфт и редукторов, резонанс крутильных колебаний в линии привода при совпадении с оборотными частотами валковых узлов и моталки. В данной работе в качестве иллюстрации рассматриваются результаты последних исследований на непрерывном 5-ти клетевом стане 2030 холодной прокатки НЛМК, которые сопоставляются с известными результатами и решениями на других станах.

Поскольку прогноз (расчет) условий возбуждения резонансных вибраций (которые нарастают до опасного уровня в течение 1-2 с) вызывает определенные теоретические трудности, то во всем мире пошли по пути создания систем мониторинга уровня вибраций. В наиболее неблагоприятных клетях на подушках валков устанавливают акселерометры в качестве средства сигнализации операторам стана, чтобы они заранее распознавали нарастание вибраций и успевали снижать скорость не допуская обрыва полос, дефектов поверхности и повреждения валков.

Наиболее «продвинутые» системы имеют связь с системами управления станом и могут выдавать сигнал на снижение скорости в автоматическом режиме. Некоторые имеют функции построения трендов уровней вибрации на определенных кинематических частотах, связанных с конкретными узлами оборудования клети (подшипники качения валков) и линии привода (муфты, редукторы), в зависимости от времени их наработки с момента замены, т.е. осуществляют диагностику.

Другим очевидным решением является установка демпфирующих устройств между подушками верхних опорных валков и гидронажимными устройствами, настроенными на основную частоту резонансных колебаний в клети. Известны разработки ИЧМ по использованию резинометаллических муфт в шпинделях для устранения влияния колебаний в линии привода на вибрацию рабочих валков.

Для работы при повышенных скоростях на стане 2030 (в клетях 3,4,5) установлена система мониторинга вибрации «VIDAS» (австралийской фирмы *IAS – Industrial Automation Systems*). В данных исследованиях использованы сигналы вибрации с акселерометров этой системы (частота дискретизации до 10 кГц) и технологические параметры (усилия прокатки, натяжения, скорости, моменты) из системы управления станом (частота опроса датчиков до 100 Гц). Сортамент и условия работы оборудования (диаметры валков, комплектация подушек подшипниками и сроки их замены) фиксировались в ручном режиме. Был составлен перечень всех известных причин возникновения и усиления вибраций, которые последовательно проверялись в ходе исследований. По мере накопления данных о вибрации постепенно отсеивались менее вероятные для данного стана.

Для накопления в автоматическом режиме статистики по резонансной вибрации, разработано собственное аппаратное и программное обеспечение, установленное на параллельном с системой «VIDAS» компьютере. Для регистрации колебаний в линии привода дополнительно устанавливались акселерометры на опорах валов редукторов. Вибрация возбуждалась в основном в клетях 3,4,5 на тонком сортаменте (0.4 - 0.6 мм) при скорости на выходе стана 900-1200 м/мин. Основное внимание уделялось

«кинематическому» подходу, т.е. отслеживанию характерных частот, связанных со скоростью прокатки на стане, и наложением их на собственные частоты.

При расчете собственных частот колебаний на стане 2030 использовали достаточно подробные расчетные схемы прокатной клетки кварто и линии привода. Привод каждого рабочего валка индивидуальный, от сдвоенных двигателей через предохранительные зубчатые муфты, редуктор и шпиндели с зубчатыми муфтами. Получены следующие расчетные собственные частоты валковой системы: 67, 118, 143, 254, 389, 416, 502 Гц. Отдельными массами взяты: верхняя часть станины, опорные валки, отдельно их подушки и рабочие валки вместе с подушками. Частоты линии привода: 8, 10, 46, 76, 529, 731 Гц. Отдельными массами взяты: двигатели (по два совместно), валы редуктора и валки. Каждая из расчетных частот при определенных скоростях и условиях прокатки наблюдается по записям вибрации, поэтому дальнейшее приведение к более простым схемам не выполнялось. Основной частотой колебаний в клетке является 118 Гц, форма колебаний которой предполагает противофазное движение нижнего комплекта валков и верхнего со станиной относительно очага деформации, что вполне закономерно, т. к. основное возмущение вносят колебания сил трения и натяжений, от которых зависит усилие прокатки в клетке. При резонансной вибрации пик спектра на частоте 118 Гц сужается, подчеркивая преобладание соответствующей этой частоте формы колебаний, что хорошо наблюдается при сравнении фаз колебаний верхнего и нижнего датчика.

В нестационарных режимах прокатки при анализе резонансной вибрации на длительных интервалах записи (2-3 мин.) основную проблему составляет текущий расчет кинематических частот с изменением скорости привода и собственных частот валковой системы, которые также смещаются в некотором диапазоне при изменении упругих свойств полосы и усилия прокатки в клетке на различном сортаменте. Для решения этой задачи разработано программное обеспечение, которое по записям вибрации создает представление амплитудных спектров на плоскости. При этом по оси абсцисс – время прокатки, по оси ординат – частота спектра, амплитуда спектра представлена цветовой гаммой или оттенками серого цвета (см. рис. 1). По спектру вибрации определили, что резонанс возник на частоте зацепления предохранительной муфты, совпадающей на данной скорости с частотой валковой системы. Видны биения опорных валков, которые приводят к модуляции частоты 254 Гц .

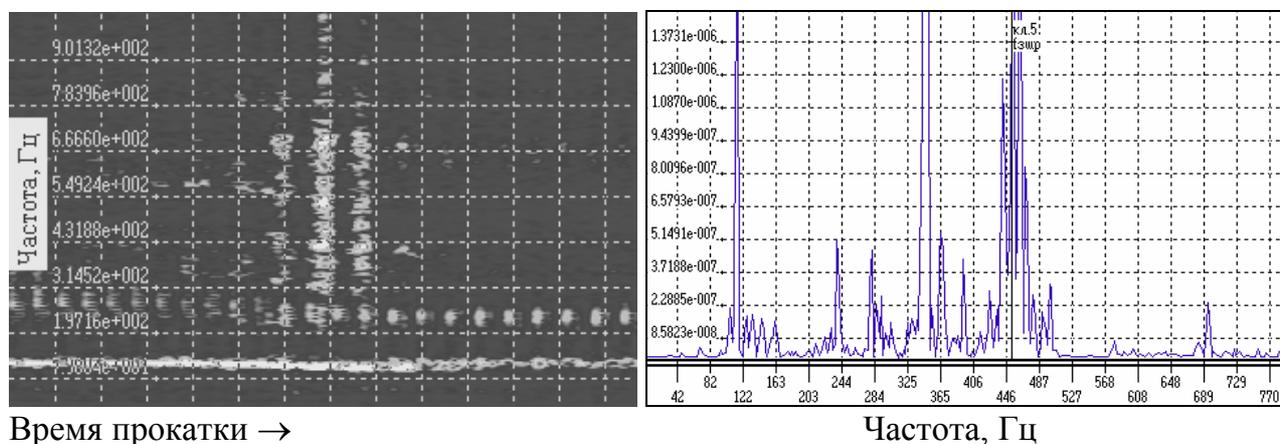


Рисунок 1 – Спектрограммы резонансной вибрации в клетке 5 стана 2030

Важным фактом является возможность наблюдения частот зацеплений всей линии привода в вибрации на подушках опорных валков со стороны обслуживания, где установлены акселерометры. Несмотря на такую возможность, наиболее надежным местом установки датчиков при мониторинге резонансной вибрации в клети являются опоры валов редуктора, где на входе редуктора проявляется частота зацеплений предохранительных муфт, а на выходе – частота муфт шпинделей.

Для проверки гипотезы о горизонтальных колебаниях валков в поле зазоров станины выполнены измерения вибрации с установкой датчиков в горизонтальном направлении на подушках рабочих валков. Спектральный анализ вибрации не выявил различных собственных частот валковой системы в диапазоне до 250 Гц, основной максимум располагался в районе 500-550 Гц, что может соответствовать более высокой собственной частоте колебаний рабочих валков с подушками на податливости накладок и стоек станины.

Проверку расчетных форм вертикальных колебаний на собственных частотах валковой системы выполнили путем измерений вибрации с установкой датчиков на различных точках (массах) в клети. Результаты измерений подтвердили правильность расчета. При различном сортаменте происходит изменение собственных частот в диапазоне около 400 Гц и выше (389, 416 и 502 Гц). Более низкие собственные частоты (67, 118, 254 Гц) остаются практически постоянными.

При разработке алгоритмов управления станом путем прохождения вверх опасных диапазонов скорости необходимо знать зависимости собственных частот от усилия прокатки, которое зависит в свою очередь от скорости, натяжений и степени упрочнения при обжатии металла в клетях. Для этого выполнена автоматическая обработка всех имевшихся случаев резонансных вибраций (порядка 150 файлов за 2 месяца наблюдений) и построены зависимости собственных частот в клетях от усилия прокатки. Таким образом получены примерные диапазоны изменения собственных частот клетей практически на всем «опасном» сортаменте в рабочем диапазоне скоростей и усилий прокатки, значения которых уточняются по мере дальнейшего накопления записей вибрации по каждому отдельному сортаменту.

Для выделения составляющей изменения собственных частот, соответствующей упругости полосы между валками, дополнительно выполнили обкатку клетей 3,4,5 стана на холостом ходе без полосы в валках на скорости 600 м/мин (предельно допустимая для обкатки). При этом ступенчато изменяли усилия прокатки в клетях с шагом 50 т в диапазоне 900-1100 т, который соответствует рабочим усилиям на тонком сортаменте. Таким образом определили долю остальных составляющих податливости клети в изменение собственных частот.

При опробовании системы мониторинга вибрации на посту операторам стана строились частотные диаграммы, на которых горизонтальными линиями отмечены скорости по клетям, вертикальными – собственные частоты, наклонными – кинематические частоты. Нанесение тех или иных частот на диаграмму происходит из общего списка по выбору эксперта. Эксперт на основании анализа предыдущих записей резонансных вибраций должен выбрать наиболее опасные сочетания частот (обозначены на диаграмме кружками), и выдать с помощью системы мониторинга рекомендации по увеличению (снижению) скорости прокатки или изменению условий прокатки по клетям (обжатия, натяжения).

Наилучшим вариантом, конечно, является автоматическое управление станом на основании данных измерения вибрации, но реализация такой функциональности возможна только при условии длительной эксплуатации системы в режиме советчика с накоплением фактических данных по опасным диапазонам скоростей на протяжении сроков службы заменяемых узлов и деталей. Поэтому параллельно с функциями мониторинга вибрации и прогноза диапазонов скоростей, опасных с точки зрения возбуждения вибрации, необходима разработка функций диагностики состояния оборудования в переходных режимах работы стана.

Основными узлами, подверженными износу и отказам, являются подшипники рабочих валков (10% замен в год от общего количества по всем клетям). Ежемесячно заменяются валковые муфты шпинделей и 2-3 замены в год приходится на подшипники редукторов и предохранительные муфты перед редукторами. Существенными источниками возмущений в клети являются поврежденные на поверхности валки (рабочие и опорные), дефекты которых включая дисбаланс являются ключевыми низкочастотными возмущениями, т.к. легко передаются чрез полосу на соседние клети. Дисбаланс натяжных роликов между клетями также оказывает сильное влияние на колебания натяжения и возбуждение вибрации. Все эти узлы могут быть диагностированы на основании совместного анализа сигналов указанных выше технологических параметров и вибрации.

#### **Выводы**

1. Для успешного мониторинга резонансной вибрации в станах холодной прокатки и повышения их производительности необходим расчет и статистическая идентификация характерных частот валковой системы и линии привода.
2. Мониторинг вибрации прокатных станов должен проводиться совместно с текущим анализом технологических параметров и вибродиагностикой оборудования.

#### **Список литературы**

1. Автоколебания в стане холодной прокатки. / Аркулис Г.Э., Шварцман З.М. и др. // Сталь №8, 1972, с.727-728.
2. B.R. Hardwick Application of vibration monitoring to cold mill process // Iron and Steel Engineer, July, 1999, P. 39-45.
3. Автоматическое диагностирование вибраций и управление скоростным режимом на стане 2030 холодной прокатки. / В.А. Пименов, С.С. Колпаков, Ю.А. Цуканов и др. // Производство проката, № 11, 1999, С. 42-48.
4. A.N. Marjuta, P.V. Krot High frequency rolling mills chatter – mathematical identification and simulation. / 1<sup>st</sup> International Symposium on “Multi-Body Dynamics Monitoring and Simulation Techniques”. University of Bradford. UK. 25-27 March 1997, pp. 407-419.
5. Крот П.В. Исследование дефекта «ребристость» и высокочастотных колебаний полосовых станов холодной прокатки. Труды IV Конгресса прокатчиков, Магнитогорск, 16-19 октября 2001. т.1. М.:ОАО «Черметинформация». 2002, С. 225-227.
6. Крот П.В. Параметрические колебания в прокатных станах. / Сб. научных тр. НГУ №13, том 3 – Дн-вск: Национальный горный университет, 2002. – С. 15-21.

*Статья поступила 08.05.2005 г.*

*© П.В. Крот, И.Ю. Приходько, К.В. Соловьев*