На правах рукописи

Рыбаков Юрий Владиславович

ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ПРОКАТКИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В КЛЕТИ НЕПРЕРЫВНОГО СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ 1700 ОАО «Северсталь».

Специальность – 05.03.05 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2004

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор,
Синицкий Владимир Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Комисарчук Ю.С.

кандидат технических наук
Галкин М.П.

Ведущая организация: Акционерная холдинговая компания
"ВНИИМЕТМАШ" им. А.И. Целикова

Защита состоится "22" 12 2004 года в "14⁵⁰" часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская улица, дом 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана.
Телефон для справок: 267-09-63

Автореферат разослан "01" 11 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент В.И. Семенов

ТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1698530
ыбаков Ю.В. Повышение ско

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Высоким спросом на рынке металлопродукции тонкого холоднокатаного листа современное производство тонкой полосы на непрерывных станах холодной прокатки характеризуется стремлением к увеличению производительности и высокими требованиями к качеству поверхности проката. Повышение скорости прокатки сопровождается увеличением динамических нагрузок и вибрации на стане. На ряде непрерывных станов холодной прокатки при прокатке полос толщиной менее 0,7мм при определенных скоростях прокатки, зависящих от толщины проката, возникают явления резонанса, проявляющиеся в виде "гудения" стана, при которых происходит значительный рост вибрации основных узлов прокатных клетей и полосы в последних межклетевых промежутках. Значительный уровень вибрации в момент "гудения" негативно влияет на точность прокатки, непосредственно связан с появлением на полосе дефекта "ребристость" и может стать причиной обрыва полосы. В виду существующей проблемы прокатку тонких полос вынуждены проводить на скоростях, которые ниже предусмотренных при проектировании стана, а в момент возникновения резонанса приходится дополнительно еще снижать скорость прокатки для стабилизации процесса, что снижает производительность стана.

В связи с этим теоретическое и экспериментальное исследование вибрационных процессов в непрерывных станах холодной прокатки для исключения резонансных вибраций, снижающих качество проката и эффективность работы оборудования, является актуальной научно-технической задачей.

Цель и задачи работы

В целях повышения производительности определить пути повышения скорости прокатки стана холодной прокатки на основе экспериментальных и теоретических исследований вибрационных процессов в клети и разработать необходимые рекомендации для внедрения на клети №4 непрерывного стана 1700 ОАО "Северсталь".

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведение экспериментальных исследований вибрационных процессов, происходящих в клети стана холодной прокатки 1700, с использованием специальной вибродиагностической аппаратуры:
   - в момент наступления резонанса в ходе прокатки полосы;
   - при прокрутке клети при нагружении валковой системы без наличия полосы;
   - при различном ускорении при разгоне стана с заправленной полосой;
   - определение собственных частот основных узлов клети.
2. На основе результатов экспериментов установление границ и значений возникающих резонансных вибраций на стане.
3. Создание математических моделей механических колебаний основных узлов клети, линии привода и полосы в межклетевом промежутке.
4. Создание математической модели критической скорости прокатки, при которой наступают резонансные колебания в клети стана холодной прокатки.

5. Разработка, апробация и внедрение рекомендаций, направленных на повышение скорости прокатки в условиях воздействия колебательных процессов на стане холодной прокатки.

Научная новизна

1. Математически описаны колебательные процессы в клети непрерывного стана холодной прокатки и экспериментально изучено протекание этих процессов с использованием современной виброизмерительной аппаратуры.
2. Установлены зависимости для критической скорости прокатки, при которой наступают резонансные вибрации.

Практическая значимость

1. На основе экспериментальных данных и созданных математических моделей разработаны рекомендации по снижению влияния воздействий резонансных вибраций на скорость прокатки.
2. Разработаны и внедрены на действующем стане 1700 рациональные режимы прокатки на клети №4, обеспечившие повышение скорости прокатки.
3. Разработанные математические модели и рекомендации могут быть использованы при проектировании новых прокатных станов и при разработке технологических режимов прокатки на действующих станах.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на V конгрессе прокатчиков (г.Череповец) в октябре 2003 г.; на научно-технических семинарах кафедры МТ-10 Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана. (2003-2004г.).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 6 статей.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 110 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 34 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во в ведении кратко изложены предпосылки, обусловившие постановку основной задачи исследования, обоснована актуальность вопросов, связанных с разработкой рекомендаций, обеспечивающих исключение резонансных вибраций и повышающих скорость прокатки стана, приведены основные практические результаты работы.

Состояние проблемы

Проведен анализ литературных источников, посвященных проблеме повышенных вибраций на станах холодной прокатки. Классифицированы возможные причины колебаний в прокатной клети по типу возникновения: на возбужденные от посторонних источников и колебания самовозбуждения.

Основными факторами, влияющими на возникновение колебаний являются:

- факторы, определяемые оборудованием: конструкция клети, геометрия валков, поверхность валков, подшипники валков, подушки, исполнительные механизмы, шпиндели привода, шестеренная клеть (редуктор), двигатели, проводки, связи с соседними агрегатами, смазка и охлаждение, система управления;
- факторы, определяемые технологией процесса: скорость и момент прокатки, усилие прокатки, натяжение полосы, прогиб валков, материал полосы, твердость полосы, ширина полосы, толщина полосы, обжатие по толщине, условия деформации, трение.

В рассмотренных литературных источниках содержатся рекомендации, направленные на предотвращение резонансных вибраций путем применения пассивных или активных демпферов, что требует относительно высоких затрат и не всегда приводит к положительным результатам. Воздействие на вибрацию технологическими средствами осуществляют изменением программы обжатий, натяжения полосы или усилия прокатки. Основной рекомендацией является снижение скорости прокатки для стабилизации процесса в случае возникновения резонанса, что снижает производительность стана.

Поэтому актуальным является задача продолжения теоретических и экспериментальных исследований вибрационных процессов на действующем стане холодной прокатки для выявления важнейших факторов, вызывающих резонансные вибрации на стане, и разработки рекомендаций, направленных на устранение явлений резонанса в условиях повышения скорости прокатки.

Исследования вибрационных процессов на 5-ти клетевом стане 1700 холодной прокатки ОАО "Северсталь"

Аппаратура и методы вибродиагностики

В исследованиях использовали стационарную систему вибродиагностики, виртуальный прибор КПА-1В на базе компьютера "Portable" и программное обеспечение фирмы "ВиброАкустические Системы и Технологии". Данная аппаратура состоит из пьезодатчика (пьезоэлектрического акселерометра, марка АР-57) со встроенным предусилителем, крепящегося на контролируемом объекте, соединительного кабеля, вторичного блока контроля. Вторичный блок контроля содержит в себе каскады аналоговых интеграторов и фильтров верхних и нижних частот, настраиваемые согласно требованиям к измерению, плату АЦП. Для диагностики использовали спектральные методы анализа сигнала и его огибающей. Спектральное представление периодических сигналов получали, используя разложение в ряд Фурье.

Экспериментальная часть

Проведены эксперименты по введению 4-ой клети 5-тиклетевого стана в режим резонанса. При прокатке полос шириной 1100-1200мм толщиной 0,25-0,6мм ступенчато на 2м/с увеличивали скорость прокатки с 6м/с до критической скорости, при которой наступают резонансные вибрации, через 2-3с после возникновения "гудения" снижали скорость прокатки. Одновременно записывали при установке акселерометра в вертикальном и горизонтальном направлении (направлении прокатки) временные сигналы вибрации с основных узлов 4-ой клети: подушек рабочих и опорных валков, стоек станин, ГНУ, редуктора главного привода и

режимные параметры процесса прокатки (скорости, натяжения, толщины, усилия прокатки).

Полученные временные сигналы при помощи модуля анализа временных сигналов "TS ANALYSIS" фирмы "ВиброАкустические Системы и Технологии" делили на отрезки, соответствующие постоянной скорости прокатки до наступления момента "гудения", в момент "гудения", и после момента "гудения" и из них получали спектры вибрации в линейном и логарифмическом масштабах.

Основные результаты анализа спектров вибрации следующие:

- с увеличением скорости прокатки происходит рост уровня вибраций в диапазоне частот 100-200Гц (рис.1.);
- в момент "гудения" на всех узлах клети происходит рост гармонического ряда на частоте 112-118Гц, с максимальной амплитудой на первой гармонике от 0,5-3,0G (130-155Дб) (см.рис.1.);
- на нажимных устройствах обнаружен высокий уровень вибрации: со стороны перевалки на частоте 150Гц, со стороны привода на частоте 120Гц; данные частоты не зависят от скорости прокатки.
- в спектрах частот всех узлов кроме опорных валков, присутствуют частоты, составляющие 1/3, 1/2 от частоты "гудения" в моменты его проявления;

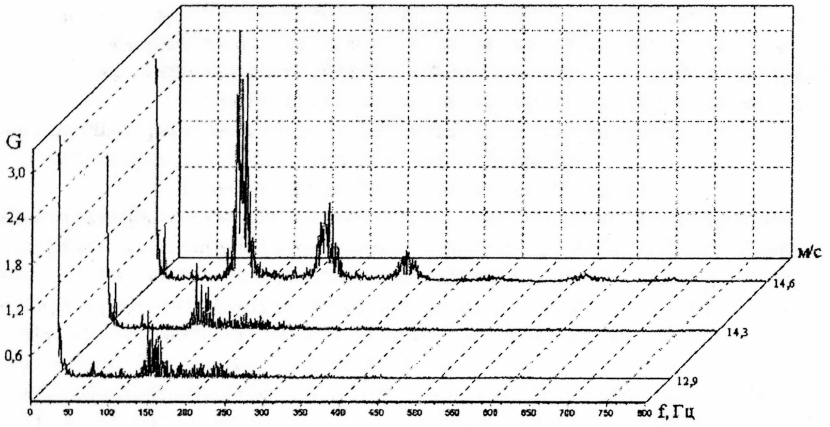

Рис.1. Спектры вибрации [illegible] при увеличении скорости прокатки V до момента резонанса клети (По оси ординат G – виброускорение в вертикальном направлении в долях G =9,8м/с^2, по оси абсцисс частота f в Гц)

Временной сигнал в момент "гудения" (рис.2.) имеет несущую частоту 112–118Гц, при этом рост амплитуды вибрации сопровождается появлением низкочастотной составляющей на частоте 2-3Гц. Низкочастотная вибрация в данном случае - это удары при наложении двух источников вибрации с близкими частотами.

На основе результатов эксперимента установлено, что в момент "гудения" все узлы прокатной клети совершают колебания на частоте 112-118Гц т.е. указанный диапазон частот следует назвать частотой резонанса системы.

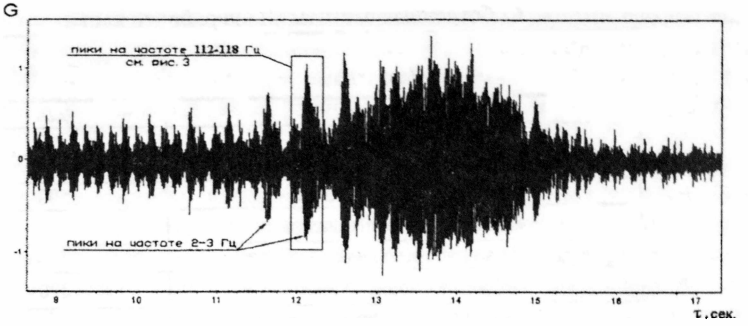

Рис.2. Временной сигнал, характерный моменту "гудения" (По оси ординат G– виброускорение в вертикальном направлении в долях G=9,8 м/с^2)

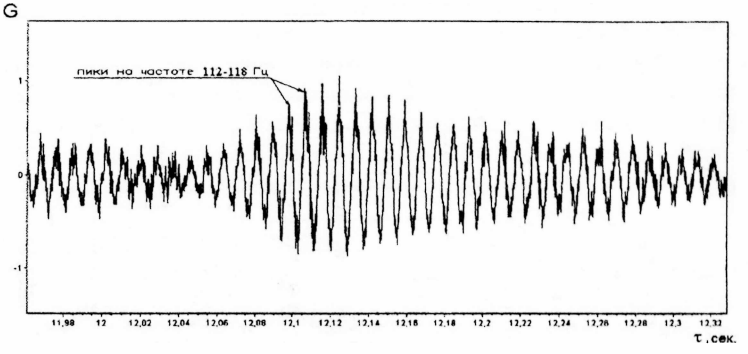

Рис.3. Увеличенный фрагмент рис 2

Для определения вибрационных характеристик узлов рабочей клети и их влияния на возникновение резонанса системы были проведены эксперименты по определению собственных частот станин, рабочих и опорных валков, их подушек, а также тензоролика и перегибного ролика. Путем ударного воздействия возбуждали в выше перечисленных узлах рабочей клети продольные и поперечные свободные колебания, которые фиксировали при помощи виртуального прибора КПА-1В на базе компьютера "Portable" и программы определения собственных частот SHOCK. Полученные таким образом величины частот собственных колебаний отдельных узлов клети представлены в таблице 1.

Для определения собственных резонансных колебаний впервые в практике был проведен эксперимент, при котором в 4-ой рабочей клети ступенчато на 2м/с увеличивали скорость прокатки до 20м/с при отсутствии полосы. Валки были предварительно поджаты с усилием 5МН, что примерно соответствует прокатке на некоторых режимах. В ходе эксперимента записывали временные сигналы вибрации с датчиков, установленных: на подушки рабочих и опорных валков, на стойки станины со стороны обслуживания.

Таблица 1.

Собственные частоты узлов рабочей клети

Узел	Частоты, Гц
Рабочий валок	224
Рабочий валок в сборе	390
Опорный валок	264
Опорный валок в сборе	503
Подушка рабочего валка	670
Подушка рабочего валка в сборе	706
Подушка опорного валка	270
Подушка опорного валка в сборе	338
Станина	117
Тензоролик	566
Перегибной ролик	460

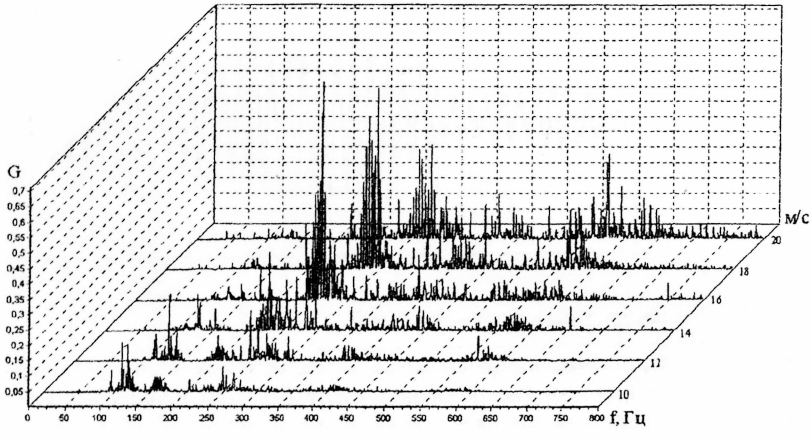

Рис.4. Спектры вибрации опорного валка при холостом режиме работы при увеличении скорости прокатки V до 20м/с (По оси ординат – виброускорение в вертикальном направлении в долях G=9,8м/с^2, по оси абсцисс частота f в Гц)

При анализе спектров вибрации основных узлов клети при работе поджатых рабочих валков без полосы на различных скоростях было установлено:

- при увеличении скорости вращения рабочих валков не происходит рост уровня вибрации основных узлов клети в диапазоне 112-118Гц, как во время прокатки полосы;
- рост амплитуды вибрации основных узлов клети происходит на частотах, кратных частоте вращения рабочего валка с максимальным уровнем вибрации в диапазоне 200-300Гц рис.4.;

Основными составляющими вибрации при холостом режиме работы являются гармоники частот, пропорциональных частоте вращения рабочего валка. Максимальные амплитуды вибрации имеют место при совпадении этих частот с собственными частотами основных узлов клети: рабочих валков, опорных валков, станины (см.табл. 1).

Из выше представленного следует, что основными составляющими вибрации на стане являются частоты, линейно зависящие от скорости прокатки. Данными частотами являются частоты подшипника, гармоники частот вращения рабочих, опорных валков, тензороликов и перегибных роликов. Максимальные амплитуды вибрации имеют место при совпадении частот линейно зависящих от скорости прокатки с собственными частотами основных узлов клети: рабочих валков, опорных валков, станины, а также собственными частотами поперечных колебаний полосы в межклетевых промежутках. В ходе увеличения скорости прокатки происходит периодическое совпадение гармоник указанных частот с частотой резонанса системы, что может привести к возникновению резонансных колебаний.

Проведен эксперимент при котором разгоняли стан при прокатке полос толщиной 0,66мм и 0,76мм при ускорении 1,2м/с^2 и 0,5м/с^2 соответственно до критической скорости, при которой наступали резонансные вибрации. Одновременно записывали сигналы вибрации с подушек опорных валков 4-ой клети и параметры процесса прокатки (скорости, натяжения, толщины, усилия прокатки).

Результаты эксперимента следующие:

- при прокатке полос толщиной 0,66мм при ускорении стана 1,2м/с^2 резонансные вибрации возникали на скорости прокатки 22м/с, тогда как при ускорении стана 0,5м/с^2 резонанс возникал при скорости прокатки 18м/с.

Использование большего темпа разгона стана позволило сократить продолжительность моментов совпадения частот, ответственных за возникновение резонанса клети, и повысить скорость прокатки.

Таким образом, вибрации в клетях станов холодной прокатки вызываются вынужденными колебаниями основных узлов клети, зависящими от скорости прокатки, в тот момент, когда гармоники их частот становятся близкими по значению к частоте резонанса системы. Инициирующими факторами могут быть воздействия изменяющихся сил в очаге деформации и узлах привода.

Математические модели механических колебаний основных узлов прокатной клети и линии привода станов холодной прокатки

Полоса в межвалковом пространстве как колебательная структура

Из-за непостоянной силы трения между валками и полосой происходит периодическое "проскальзывания" полосы в валках, которое проявляется в виде "полосчастости" внешней поверхности листового холоднокатаного проката, так называемой "ребристости". Полоса в данном случае совершает продольные колебания. Совпадение частоты колебаний от внешнего источника с собственной частотой продольных колебаний полосы приводит к явлению резонанса и как следствие возбуждению поперечных колебаний полосы.

Для математического анализа этих явлений рассмотрены продольные колебания стержня, один конец которого закреплен, а второй – имеет колебательное движение (рис.5.).

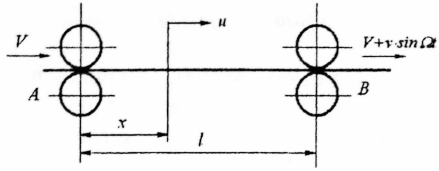

Рис.5. Расчетная схема

Дифференциальное уравнение волновых колебаний полосы записано в виде:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \qquad (1)$$

где u - смещение элемента полосы, расположенного на расстоянии x от начала координат; a – скорость распространения ударной волны в материале полосы.

Граничные условия заданы в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0 \qquad \text{при } x = 0 \qquad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = v\sin\Omega t \qquad \text{при } x = l$$

При нулевых начальных условиях решение уравнения (1) представлено в виде:

$$u = \frac{vx}{\Omega l} - \frac{v}{\Omega}\frac{\sin\frac{\Omega x}{a}\cos\Omega t}{\sin\frac{\Omega x}{a}} + \frac{2v}{\Omega}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n \sin\frac{\pi n x}{l}\cos\frac{\pi a n t}{l}}{\pi n\left(1 - \frac{\pi^2 a^2 n^2}{\Omega^2 l^2}\right)} \qquad (3)$$

Напряжения в полосе:

$$\sigma = E\frac{du}{dx},$$

где E – модуль упругости, $E = 2\cdot 10^5$ МПа.

В случае $\pi a n/\Omega l = 1$ возникают резонансные колебания. Основная частота их $\Omega = \pi a/l$. Гармоники колебаний имеют частоты $\Omega_n = n\Omega$.

Для непрерывного стана холодной прокатки 1700 ОАО "Северсталь" $l = 5$м. Скорость распространения ударной волны в стали a = 5010 м/с.

Угловая частота колебаний:

$\Omega = (\pi\cdot 5010)/5 = 3146$ 1/с.

Определено расстояние S между участками ребристости при скорости прокатки V = 10м/с. Временной период периодичности T=S/V.

Угловая частота, соответствующая этому периоду колебания, равна:

$\Omega = 2\pi/T = 2\pi V/S$

Следовательно

$$S = \frac{2\pi V}{\Omega} = \frac{20 \cdot 3{,}14}{3146} \approx 20 \text{ мм}$$

Шаг ребристости находится внутри обычно наблюдаемого диапазона 10-100мм.

Крутильные колебания шпинделей и вибрация клетей станов холодной прокатки с независимым приводом рабочих валков

Особенностью стана холодной прокатки 1700, эксплуатируемого в ОАО "Северсталь", является независимый привод каждого рабочего валка от соединенного с ним электродвигателя и как следствие неодинаковая жесткость на кручение каждой из ветвей привода.

Крутильные колебания в линии привода, включающей шпиндели валков, вызывают некоторые малые взаимные повороты рабочих валков относительно друг друга, а также относительно массивных опорных валков. Эти периодические малые повороты становятся причиной линейных смещений, приводящих к силовым воздействиям через опорные подшипники и подушки на станины клетей. Особенно вибрация клетей и неустойчивая прокатка проявляется в резонансном режиме, когда возбуждающая частота этих воздействий приводит к усиленной вибрации.

Рассмотрена динамическая система привода стана холодной прокатки и определены собственные частоты ее крутильных колебаний.

Расчетная модель динамики привода приведена на рис.6.

При одинаковых конструктивных размерах жесткости на кручение у шпинделей $c_2 = c_3$.

$$c_i = \frac{G_0 J_0}{l}; \qquad (4)$$

где G_0 - модуль сдвига; $G_0 = 0{,}8 \cdot 10^{11} H/м^2 (8 \cdot 10^4 МПа)$;

J_0 - геометрический момент сечения шпинделя $J_0 \approx 0.1 d^4$

где d - диаметр шпинделя, м; l - длина шпинделя, м.

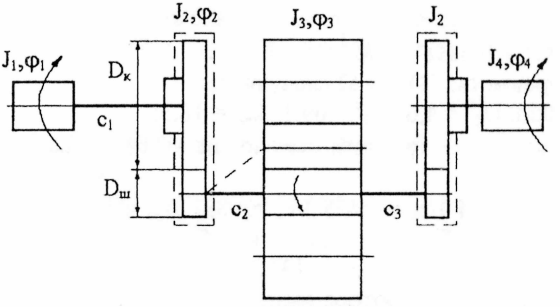

Рис.6. Расчетная модель динамики привода

$J_1 = J_4$ – моменты инерции роторов электродвигателей;

J_2 – приведенный момент инерции ведущего колеса шестерни редуктора и муфты предельного момента;

J_3 – приведенный момент инерции валковой системы с шпиндельными муфтами;

$\varphi_1 \ldots \varphi_4$ – углы поворота соответствующих инерционных масс.

Считаются положительными повороты по часовой стрелке.

$D_к$, $D_ш$ – диаметры делительных окружностей колеса и шестерни редуктора;

c_1 – жесткость на кручение промвала;

c_2=c_3 – жесткость на кручение шпинделей.

В расчетах приведенная инерционная масса рабочих и опорных валков является общей.

$$J_3 = 2\left(J_{вр} + J_{во}\frac{D_p^{\,2}}{D_o^{\,2}}\right); \qquad (5)$$

где $J_{вр}$ - момент инерции рабочего валка;

$J_{во}$ - момент инерции опорного валка;

D_p, D_o - диаметры рабочего и опорного валка соответственно, м.

Система дифференциальных уравнений свободных колебаний системы имеет следующий вид:

$$\begin{cases} J_1\ddot{\varphi}_1 + c_1(\varphi_1 - \varphi_2) = 0 \\ J_2\ddot{\varphi}_2 - c_1(\varphi_1 - \varphi_2) + c_2(\varphi_2 - \varphi_3) = 0 \\ J_3\ddot{\varphi}_3 - c_2(\varphi_2 - \varphi_3) + c_3(\varphi_3 - \varphi_4) = 0 \\ J_4\ddot{\varphi}_4 - c_3(\varphi_3 - \varphi_4) = 0 \end{cases} \qquad (6)$$

При подстановке численных значений, получили:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 + 5{,}1\cdot 10^4(\varphi_1 - \varphi_2) = 0 \\ \ddot{\varphi}_2 - 13{,}8\cdot 10^4(\varphi_1 - \varphi_2) + 51\cdot 10^4(\varphi_2 - \varphi_3) = 0 \\ \ddot{\varphi}_3 - 4{,}4\cdot 10^4(\varphi_2 - \varphi_3) + 4{,}1\cdot 10^4(\varphi_3 - \varphi_4) = 0 \\ \ddot{\varphi}_4 - 14{,}1\cdot 10^4(\varphi_3 - \varphi_4) = 0 \end{cases} \qquad (7)$$

Ввели подстановку $\ddot{\varphi} = \dot{\omega} = \dot{\Omega}\cdot 10^2$, $\omega^2 = \Omega^2\cdot 10^4$

В результате получено уравнение для нахождения Ω^2

$$\Omega^8 - 92\Omega^6 + 1668\Omega^4 - 5827\Omega^2 + 4 = 0 \qquad (8)$$

Решения уравнения (8) для Ω следующее:

$$\Omega_1 = 0{,}026;\ \Omega_2^{\,2} = 4{,}6;\ \Omega_3^{\,2} = 69{,}1;\ \Omega_4^{\,2} = 18{,}3;$$

Переходя от Ω к ω, находим следующие угловые частоты колебаний привода стана 1700:

ω_1=2,6 1/с, ω_2=214 1/с, ω_3=428 1/с, ω_4=831 1/с, которые соответствуют частотам f_2=34, f_3=68 и f_4=132 Гц при частоте колебаний валковой системы f_1=0,4Гц. На верхний валок передаются частоты 132Гц (от колебаний массы колеса редуктора) и 34Гц (от колебаний массы ротора двигателя), на нижний валок – частота 68Гц (от колебаний общей массы ротора двигателя и присоединенных масс).

В расчете не учитывалось влияние трения, которое снижает частотные характеристики. Поэтому фактические измеренные частоты несколько ниже расчетных.

Выполненный расчет показывает возможность возникновения колебаний в приводе клети стана, частота которых может быть близка к частоте резонанса системы. Следовательно, одной из вероятных причин вибрационных колебаний

клетей является их возбуждение, вызываемое крутильными колебаниями валопроводов и шпинделей.

Колебания валковой системы в клетях с гидронажимным механизмом

Гидравлические цилиндры гидронажимных механизмов, заполненные сжатой рабочей жидкостью, обеспечивающей усилие прокатки, подобны механическим пружинам. Это дает основание представить динамическую схему прокатной клети в виде, показанном на рис.7. Для упрощения расчетов принято, что деформация валковой системы передается на верхний опорный валок, а нижний опорный валок жестко фиксируется на станине.

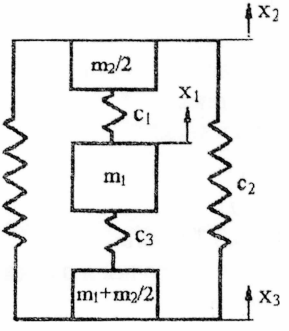

Рис.7. Динамическая схема прокатной клети

Введены следующие обозначения:

m_1 – половина массы рабочего и опорного валка с подушками, кг;

m_2 – масса одной рамы станины рабочей клети, кг;

c_1 – коэффициент жесткости гидронажимного устройства, Н/м;

c_2 – коэффициент суммарной жесткости стоек станины клети, Н/м;

c_3 – коэффициент жесткости при упругой деформации собственно валковой системы, Н/м;

Значения коэффициентов жесткости определены следующим образом. Пренебрегая деформацией корпуса гидроцилиндра ГНУ

$$c_1 = \frac{E_ж \cdot F_ц}{l_п},$$

где $E_ж$ – модуль упругости рабочей жидкости, $E_ж \approx 2 \cdot 10^3$ МПа;

$F_ц$ – площадь поршня, м^2;

$l_п$ – высота объема жидкости в гидроцилиндре, м.

$$c_2 = \frac{2EF_c}{l_c}$$

где E – модуль упругости материала стоек станины,

$E = 2 \cdot 10^5$ МПа;

F_c – площадь сечения стойки станины, м^2;

l_c – длина стойки станины, м.

При определении коэффициента c_3 принимали, что металл в очаге деформации находится в пластическом состоянии, а величины упругих смещений зависят от упругой деформации собственно валковой системы. Деформации валковой системы

и упругие смятия валков определяются по формулам (9,10) предложенным А.И.Целиковым.

Прогиб опорного валка:

$$y_{B1} = \frac{P}{384EJ_б}\left[8a^3 - 4ab^2 + b^3 + 64c^3\left(\frac{J_б}{J_ш} - 1\right)\right], \qquad (9)$$

где P – усилие прокатки;

$J_б$ – момент изгиба по бочке валка;

$J_ш$ – момент изгиба по шейке валка;

a – расстояние между центрами опор валка;

b – длина распределенной нагрузки на валок;

c – длина опорного подшипника.

Упругое смятие определяется в виде:

$$y_{B2} = \frac{P}{\pi GD^2}\left[a - \frac{b}{2} + 2c\left(\frac{D^2}{d_ш^2} - 1\right)\right], \qquad (10)$$

где G – модуль сдвига, $G = 0{,}8 \cdot 10^5$ МПа;

D, $d_ш$ – диаметры соответственно бочки и шейки валка;

Общее смещение пары валков:

$$y = y_{B1} + y_{B2}$$

Коэффициент жесткости соответственно валковой системы:

$$c_3 = \frac{P}{2y}$$

Система дифференциальных уравнений для прокатной клети:

$$\begin{cases} m_1 \dfrac{d^2x_1}{dt^2} = -c_1(x_1 - x_2) + c_3(x_3 - x_1) \\ \dfrac{m_2}{2}\dfrac{d^2x_2}{dt^2} = -c_1(x_2 - x_1) + c_2(x_3 - x_2) \\ (m_1 + \dfrac{m_2}{2})\dfrac{d^2x_3}{dt^2} = -c_2(x_3 - x_2) - c_3(x_3 - x_1) \end{cases}, \qquad (11)$$

Решение системы при начальном перемещении δ имеет вид:

$$x_1 = \delta(0{,}24 + 0{,}34\cos 1249t + 0{,}42\cos 1050t)$$

Таким образом, колебания верхних рабочего и опорного валков проходят по косинусоидальному закону с комбинацией угловых частот $\omega_1 = 1249$ 1/с и $\omega_2 = 1050$ 1/с, этим угловым частотам соответствуют частоты колебаний $f_1 = 200$Гц, $f_2 = 167$Гц.

При расчетах не принималось во внимание трение, а также завышено значение коэффициента жесткости валковой системы c_3, т.к. не учитывалась упругая просадка в подшипниковых опорах, не учитывалась податливость корпуса цилиндра ГНУ, а также возможный больший размер от днища гидроцилиндра до поршня. Эти факторы уменьшают частоты колебаний валковой системы.

Тем не менее, выполненный расчет показывает, что колебания валковой системы в клети с ГНУ могут приводить к резонансным вибрациям клети стана.

Резонансные колебания валковой системы в клети стана и критическая скорость прокатки

Линеаризированная схема очага деформации представлена на рис.8. При движении полосы со скоростью $V_П$ возмущение перемещается вдоль горизонтальной проекции очага деформации за время $\frac{l_д}{V_П}$, где $l_д$ – длина очага деформации, мм. Время, в течение которого подвижная масса перемещается из равновесного состояния в крайнее, составляет $\frac{\pi}{2\omega}$, где ω - частота вертикальных колебаний валковой системы в клети стана

Для избежания возникновения резонанса необходимо, чтобы:

$$\frac{l_д}{V_П} > \frac{\pi}{2\omega}, \qquad (12)$$

Условие отсутствия недопустимых колебаний при прокатке и обеспечения до резонансного режима:

$$V_П < \frac{2}{\pi}\omega l_д, \qquad (13)$$

где ω - собственная частота колебаний валковой системы в клети стана

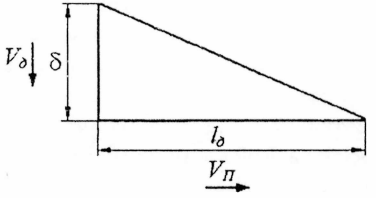

Рис.8. Линеаризированная схема очага деформации

$l_д$ – длина очага деформации;

δ – величина обжатия;

$V_П$ – скорость прокатки;

$V_д$ – скорость деформации.

На основании технологических режимов прокатки полосы на стане 1700 ОАО "Северсталь" при радиусе рабочего валка R=300 мм, величине обжатия Δh=0,28 мм и среднем удельном давлении $P_{ср}$ = 60 кгс/мм^2 по формуле Хичкока длина дуги захвата с учетом упругого сжатия валков:

$$x_0 = \frac{8(1-\nu^2)}{\pi E} R \cdot P_{ср} = \frac{8 \cdot 0{,}9 \cdot 300 \cdot 60}{3{,}14 \cdot 2 \cdot 10^4} = 2{,}1 мм,$$

где ν - коэффициент Пуассона.

Горизонтальная проекция очага деформации с учетом сжатия валков и полосы:

$$l_д = x_0 + \sqrt{R\Delta h + x_0^2} = 2{,}1 + \sqrt{84 + 4{,}4} = 11{,}5 мм$$

Частоты собственных колебаний валковой системы четвертой клети стана 1700 рассчитанные ранее:

$\omega_1 = 1249$ 1/с и $\omega_2 = 1050$ 1/с

Для этого случая колебательные явления в виде "гудения" стана, периодической пробуксовки и неравномерного движения полосы проявляются на высшей частоте при скорости прокатки полосы, близкой к:

$$V_1 = \frac{2 \cdot 1249 \cdot 11{,}5}{\pi \cdot 1000} = 9 м/с$$

Расчет носит характер "идеального", в нем не были учтены потери на трение, влияние переднего и заднего натяжения, которые могут создавать возможности для обеспечения большей скорости прокатки.

При большей скорости избыток кинетической энергии компенсирует неучтенные в расчете потери. В расчетную формулу введен повышающий коэффициент, значение которого взято в пределах 1,15-1,2.

Конечная формула условия отсутствия недопустимых колебаний при прокатке и обеспечения до резонансного режима:

$$V_п \le \frac{2{,}5 l_д \omega}{\pi 1000} м/с$$

Рекомендации, направленные на снижение влияния воздействий резонансных вибраций на скорость прокатки

1. Усовершенствовать технологические режимы прокатки:
   - применение возможно быстрого прохождения зоны резонанса за счет повышения темпа "разгона" стана. Для стана холодной прокатки 1700 ОАО "Северсталь" увеличить ускорение при разгоне с 0,5м/с^2 до 1,2м/с^2;
   - увеличение усилия прокатки и повышение значения обжатия для увеличения длины очага деформации, что способствует повышению скорости прокатки. Для стана холодной прокатки 1700 ОАО "Северсталь" увеличить обжатие в 4-ой клети на 10-15%.
2. Повысить жесткости валковой системы и клети стана:
   - при наличии гидронажимного устройства, жесткость которого обратно пропорциональна объему жидкости, воспринимающему усилие прокатки, следует обеспечить работу при положениях поршня, обеспечивающего уменьшение этого объема;
   - обеспечивать максимальную дегазацию рабочей жидкости, применяемой в гидронажимном устройстве. Наличие газовых пузырьков также снижает жесткость системы ГНУ.
3. Устранить возможность возникновения крутильных колебаний в приводе клети стана на частотах, близких к частоте резонанса системы:
   - при новом проектировании использовать схемы с симметричным приводом валков, вплоть до связи их через общую шестеренную клеть;
   - увеличить жесткость промежуточного вала в линии привода, что повысит собственные частоты колебаний привода до величин, значительно превосходящих частоты колебаний масс клети.
4. Устранить периодические проскальзывания полосы относительно валков:
   - повысить силу прокатки в клетях;

- принять меры по уменьшению осевого биения валков, влияющего на изменение коэффициента трения при прокатке;
- применить технологическую смазку, свойства которой повысят стабильность сил трения в очаге деформации.

Выводы по работе

Выполнены экспериментальные и теоретические исследования вибрационных процессов в клети стана холодной прокатки.

Основные результаты исследований:

1. Проведены эксперименты на действующем стане холодной прокатки 1700 с использованием специальной вибродиагностической аппаратуры, которые позволили определить собственные частоты основных узлов клети и вибрационные процессы, происходящие в клети стана:
   - в момент наступления резонанса в ходе прокатки полосы;
   - при прокрутке клети при нагружении валковой системы без наличия полосы;
   - при различном ускорении при разгоне стана с заправленной полосой.
2. На основе результатов экспериментов установлены причины возникновения резонансных вибраций на стане. Вибрации в клетях станов холодной прокатки вызываются вынужденными колебаниями основных узлов клети, зависящими от скорости прокатки в тот момент, когда гармоники их частот становятся близкими по значению к частоте резонанса системы (для стана 1700 ОАО"Северсталь" частота резонанса системы 112-118Гц). Инициирующими факторами могут быть воздействия изменяющихся сил в очаге деформации и узлах привода.
3. С целью установления закономерностей колебательных процессов в клетях станов холодной прокатки разработаны математические модели:
   - полосы в межклетевом промежутке как колебательной структуры;
   - крутильных колебаний шпинделей и вибрации клетей станов холодной прокатки с независимым приводом рабочих валков;
   - колебаний валковой системы в клетях с гидронажимным механизмом;
   - резонансных колебаний валковой системы в клети стана в основном определяющих критическую скорость прокатки.
4. Разработаны рекомендации, направленные на снижение влияния воздействий резонансных вибраций на скорость прокатки.
   - с целью повышения собственной частоты колебаний производить установку валковой системы с обеспечением минимального объема жидкости в поршневой полости ГНУ;
   - перераспределить обжатия по клетям с увеличением обжатия и силы прокатки в 4-ой клети стана на 10-15%;
   - повысить ускорение разгона стана для быстрого прохождения зоны резонанса с 0,5м/с^2 до 1,2м/с^2;
   - уменьшить осевые биения рабочих валков и продолжить работы по подбору СОЖ с целью стабилизации условий трения.

5. Выполнение предложенных рекомендаций, составленных с учетом предложений исследователей ЧГУ, позволило увеличить среднюю скорость прокатки на 20%.

В заключение работы автор считает своим долгом отметить большой научный вклад в исследования динамики прокатных станов, внесенные учеными ВНИИМЕТМАШ им. академика А.И. Целикова Житомирским Б.Е., Гарцманом С.Д., Филатовым А.А. и др. а также, что данная работа выполнялась по заданию ОАО"Северсталь" как составная часть работы, выполненной кафедрой МАМЗ Череповецкого государственного университета под руководством Заслуженного деятеля науки РФ профессора Гарбера Э.А.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Синицкий В.М., Рыбаков Ю.В. Стальная полоса в межвалковом пространстве стана холодной прокатки как колебательная структура // Производство проката. – 2002. – № 5. - С.18-20.
2. Рыбаков Ю.В., Субботин Г.Н. Определение источников вибрации, вызывающих явление резонанса на станах холодной прокатки // Производство проката. – 2002. – № 10. - С.13-16.
3. Рыбаков Ю.В., Субботин Г.Н. Причины возникновения повышенного уровня вибрации на станах холодной прокатки // Бюллетень научно-технической и экономической информации Черная металлургия. - 2003. - № 7. - С.95-96.
4. Исследование причин возникновения колебаний в клетях непрерывных прокатных станов / Э.А.Гарбер, В.П.Наумченко, Ю.В.Рыбаков и др. // Производство проката. – 2003. – № 1. - С.10-12.
5. Синицкий В.М., Рыбаков Ю.В. Резонансные колебания валковой системы в листопрокатной клети и критическая скорость прокатки // Производство проката. – 2004. – № 8. - С.8-10.
6. Синицкий В.М., Рыбаков Ю.В. Крутильные колебания шпинделей и вибрация клетей станов холодной прокатки с независимым приводом рабочих валков // Производство проката. – 2004. – № 10. - С.23-26.

Подписано к печати 13.10.04г. Зак.206; объем 1,0 п.л. Тир.100
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана