

**П.П. ЧЕРНОВ, И.Ю. ПРИХОДЬКО, П.В. КРОТ,
Е.А. ПАРСЕНЮК, В.А. ПИМЕНОВ, А.П. ДОЛМАТОВ, В.В. АКИШИН**
(ОАО «НЛМК», Институт черной металлургии НАН Украины)

ВОЗМОЖНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ НЕПРЕРЫВНОЙ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ПОЛОС

Введение

Проблема развития повышенной вибрации в скоростных (более 15 м/с) станах холодной прокатки и дрессировки возникла уже достаточно давно [1]. В той или иной степени это явление имеет место на станах Череповецкого, Магнитогорского, Карагандинского, Новолипецкого меткомбинатов. Практически на всех станах повышение вибрации до опасного уровня ограничивает производительность и снижает качество готовых полос по разнотолщинности и периодическим дефектам поверхности типа «ребристость». В настоящее время единственным широко используемым на практике способом борьбы с резонансной вибрацией, как на отечественных станах, так и за рубежом, является снижение скорости прокатки при возбуждении стана. Частая замена элементов оборудования клетей эффективна до определенного предела, когда стоимость затрат на техническое обслуживание начинает снижать общую эффективность эксплуатации стана. Поэтому по сравнению с уменьшением межремонтных интервалов, решение задачи повышения скорости непрерывной холодной прокатки другими способами является более выгодным и представляет актуальный практический и научный интерес во всем мире.

Состояние проблемы

На стане 2030 бесконечной холодной прокатки полос НЛМК повышение скорости вызвано необходимостью увеличения объемов производства тонкого сортамента (на 300-400 тыс. тонн в год) за счет наращивания производительности. Успешное решение такой задачи позволит отказаться от установки нового 2-х клетьевого стана холодной прокатки.

Основным ограничением повышения производительности на тонком сортаменте (до 1.0 мм) являются случаи резонансной вибрации («гудение», «chatter») при увеличении скорости прокатки более 1100-1150 м/мин, а в некоторых случаях и на более низкой скорости. В начале 2004 г. на непрерывном 5-клетьевом стане 2030 средняя скорость прокатки тонкого (до 0.5-0.6 мм) сортамента находилась в пределах 950-1000 м/мин. Возбуждение вибрации происходило на всем тонком сортаменте, в среднем по 130-150 рулонов в месяц.

В связи с изменениями в технологии покраски автолиста у заказчиков, в частности, ОАО «АвтоВАЗ», ужесточились требования приемки продукции, в результате на рулонах 1-й группы отделки поверхности зафиксированы отдельные случаи дефектов типа «ребристость», как с наличием периодической разнотолщинности полос, так и без нее (изменения шероховатости поверхности до $Ra = 4...5$ мкм). Наблюдались отдельные дефекты поверхности валков (рабочих или опорных), нанесенные в результате переходных процессов в приводе клетей при пуске стана, которые являлись причиной дефектов полос даже при низкой скорости прокатки (до 600 м/мин). Установлена прямая зависимость случаев появления периодических дефектов полос от резонансной вибрации на высокой скорости стана. Поэтому эти две проблемы (резонансные вибрации и периодические дефекты поверхности полос) рассматриваются совместно.

Анализ последних публикаций по резонансной вибрации на скоростных станах холодной прокатки [2-4] показывает, что данная проблема может быть решена только комплексными мерами, прежде всего с использованием систем мониторинга вибрации оборудования, включая визуальный контроль поверхности валков и полос [5,6]. На стане 2030 НЛМК в 90-х годах уже использовалась система обнаружения резонансных вибраций по аналоговым сигналам усилия прокатки в клетях [7]. Для повышения стабильности работы стана и скорости прокатки в конце 2003 г. была установлена цифровая система мониторинга вибрации фирмы IAS (Австралия) - "VIDAS chatter monitor", которая с начала 2004 г. постепенно вводилась в эксплуатацию. Датчики вибрации (акселерометры) установлены в клетях 3,4,5 на подушках верхних и нижних опорных валков со стороны обслуживания.

Некоторые результаты исследований

В результате проведенных исследований сотрудниками Института черной металлургии НАН Украины и ООО «Металлтехномаш» (г. Днепропетровск) разработана система мониторинга вибрации для станов холодной прокатки. Цель исследований состояла в совершенствовании технологических режимов прокатки полос, повышении средней скорости прокатки, уменьшении обрывности, выявлении периодических дефектов полос, связанных резонансной вибрацией, на основе использования системы мониторинга вибраций.

В настоящее время по результатам исследовательских работ*) система мониторинга вибрации усовершенствована и позволяет в реальном масштабе времени выявлять источники повышенной вибрации в механическом оборудовании стана, включая линии привода, т.е. реализует функции диагностики. После реконструкции системы управления станом 2030 в систему мониторинга вибрации вводятся также сигналы технологических параметров по клетям (усилия прокатки, натяжения, частота вращения валков и моменты приводов). В 2005 г. для мониторинга дефектов валков и диагностики периодических дефектов полос планируется расширение системы каналами измерения вибрации в клетях 1 и 2. Накопленная в системе мониторинга статистическая информация о резонансной вибрации в зависимости от сортамента приведена на рис. 1.

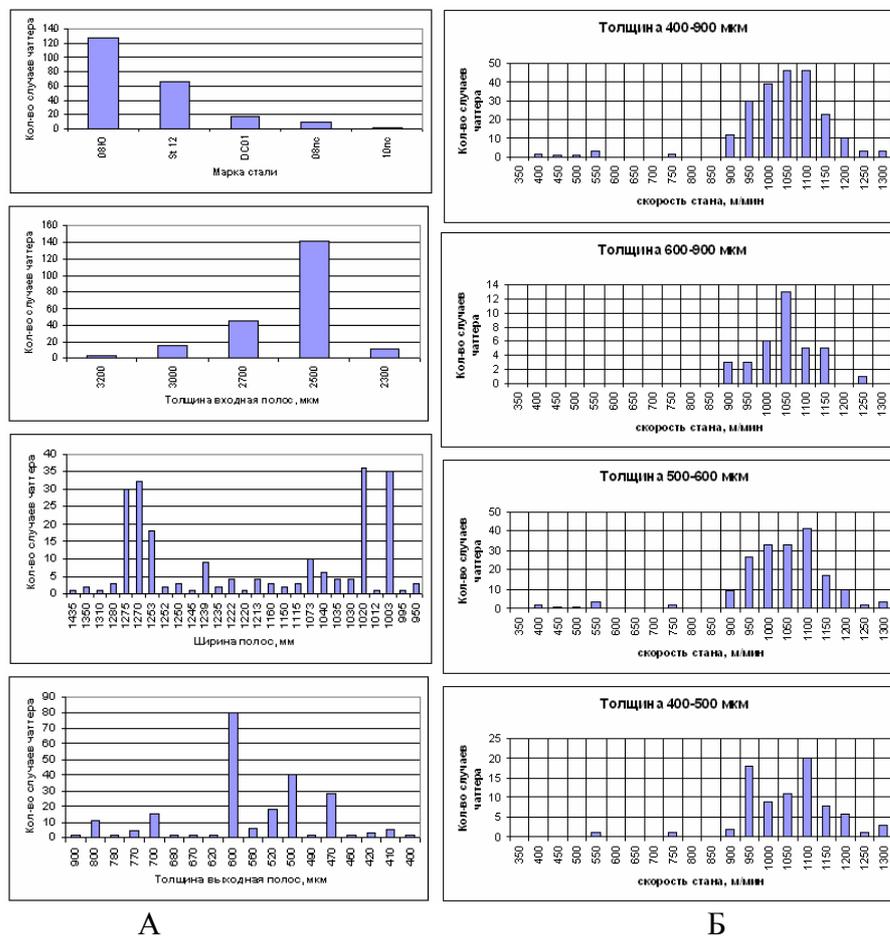


Рис. 1. Статистические данные о сортаменте полос (А) и достигнутых скоростях (Б) в различных диапазонах толщины полос при возникновении резонансной вибрации

На гистограммах рис. 1А выделяются: толщина подката - 2.5 мм, ширина полос - 1020 и 1270 мм, толщина полос - 0.5 и 0.6 мм, что отражает реальную наблюдаемую на стане картину. На верхнем графике рис. 1Б по всему тонкому сортаменту (0.4-0.9 мм) показано распределение максимальной достигнутой (до возникновения вибрации) скорости прокатки, которая в сред-

*) В работах на стане 2030 принимали участие сотрудники НЛМК Шалахов С.Г., Стрельников Р.В, Будников А.Н.

нем составляет 1050-1100 м/мин. На нижних графиках на рис. 1Б приведено распределение скорости прокатки полос различной толщины. Правые части распределений на самом тонком и наиболее виброопасном сортаменте (0.4-0.5 мм) показывают, что были отдельные случаи достижения скоростей 1250-1300 м/мин, т.е. имеются резервы повышения скорости.

Анализ возможных технических решений

Не зависимо от типа стана основными группами факторов, ограничивающих повышение скорости на станах холодной прокатки, являются эксплуатационные, технологические и конструктивные. Поэтому возможные решения задачи повышения скорости прокатки и устранения дефектов полос заключаются в следующем:

- мониторинг и вибродиагностика состояния оборудования (валковая система, линия привода), в т.ч. и контроль на участке подготовки валков (дисбаланс, дефекты поверхности);
- изменение технологических режимов (скорость прокатки, обжатия, натяжения), в т.ч. изменение параметров и режима подачи СОЖ, шероховатости и профилировки валков;
- конструктивные изменения прокатных клетей, в т.ч. применение устройств демпфирования вибраций, изменение жесткости элементов клетки.

Выбор рабочей скорости стана на основании данных, получаемых и обрабатываемых системой мониторинга вибрации, является основным методом, обеспечивающим повышение скорости прокатки и приближения к максимально возможному уровню. Многочисленными исследованиями установлено, что при совпадении собственных частот вертикальных колебаний валковой системы и кинематических частот (зубчатых зацеплений шпинделей, редукторов и муфт, подшипников рабочих валков) возникают резонансные явления, при которых амплитуда колебаний на определенной скорости прокатки резко возрастает. Ведение процесса прокатки на такой рабочей скорости предопределяет повышение уровня вибрации. В то же время некоторое увеличение скорости приводит к смещению частот и уходу от резонансного состояния. При этом ведение процесса даже на более высокой скорости происходит с меньшими вибрациями. Опробование данного способа (прохождение опасных диапазонов более 1000 м/мин) показало возможность повышения скорости прокатки. Для внедрения этого способа необходимо накопление информации об опасных диапазонах скорости при прокатке полос различного марочного и размерного сортамента, чтобы оператор стана мог обоснованно выбирать максимальную рабочую скорость исходя из текущего технического состояния оборудования отдельных клетей.

Контроль технического состояния оборудования стана без изменения технологического режима прокатки является необходимым условием устранения (или снижения уровня) резонансной вибрации и не требует существенных затрат на дополнительное оборудование. При этом возникают организационные трудности взаимодействия персонала различных служб при систематическом сборе данных о состоянии и порядке обслуживания оборудования валковых узлов и линии привода. Установлено существенное влияние дисбаланса и дефектов поверхности валков на развитие резонансных вибраций. Поскольку технология подготовки валков не предусматривает их балансировку, то для устранения дефектов полос требуется определение и замена комплектов подушек и валков с повышенным дисбалансом перед прокаткой очередной партии металла 1-й группы отделки поверхности на основании данных системы мониторинга вибрации.

Статистическая обработка данных о вибрации является методом, позволяющим выявлять скрытые закономерности и осуществлять первичную диагностику оборудования. На рис. 2 представлены распределения случаев вибрации, зарегистрированные на стане 2030 в течение трех месяцев наблюдения (апрель-июнь 2005 г.). На рис. 2А, 2Б построены зависимости вероятности резонанса от наработки рабочих и опорных валков. Снижение случаев резонанса к концу кампании рабочих валков можно связать со снижением их шероховатости. Такая тенденция по опорным валкам выражена менее сильно, чем по рабочим валкам. Известно, что исходная шероховатость поверхности рабочих валков в течение их кампании может снижаться в 2-2.5 раза. Так, например, рабочие валки первых клетей с исходной шероховатостью поверхности 0.5 мкм к концу кампании будут иметь шероховатость поверхности 0.2 мкм.

Изменение шероховатости рабочих валков до более низкого класса, например, до шероховатости поверхности $Ra = 0.7-0.8$ мкм, в течение первых 3-4 часов после переделки в период наиболее интенсивного уменьшения шероховатости поверхности валков, должна была по результатам обработки данных привести к снижению пороговой скорости и спровоцировать появление резонансных вибраций. Результаты экспериментальных исследований показали отсутствие явно выраженного влияния повышенной исходной шероховатости рабочих валков на вероятность резонансной вибрации. Отмечено некоторое повышение загрязненности поверхности прокатанных полос в начале кампании. Поэтому такой метод воздействия на вибрацию требует более длительной проверки, кроме того, необходимо учитывать данные по общей статистике наработки валков.

Автоматизированная обработка информации о состоянии оборудования и движении комплектов подушек рабочих валков позволяет определять комплекты, подлежащие замене или ревизии. На рис. 2В для стана 2030 наблюдается повышенное число случаев вибрации на комплектах с номерами 31,32 при их установке в различных клетях стана и с разными валками, что может быть вызвано износом роликовых подшипников. Эксплуатация различных комплектов подушек (периодичность замены) примерно равномерная и в течение времени наблюдения замена элементов валковых узлов не производилась. Длина выборки (количество замен) подушек опорных валков за указанный период времени была недостаточной для расчета статистики и продолжает накапливаться в системе мониторинга по настоящее время.

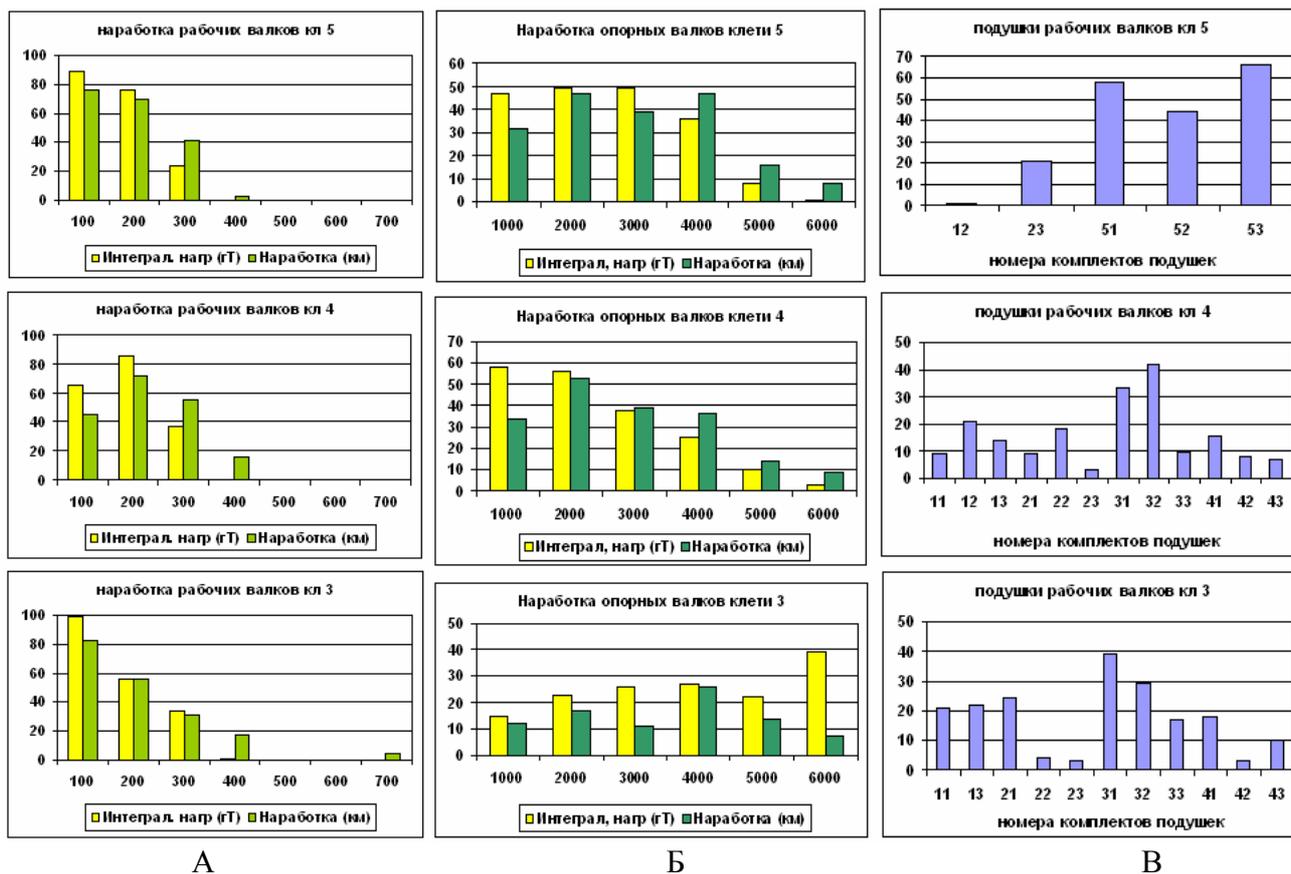


Рис. 2 – Распределение случаев резонансной вибрации от наработки рабочих (А) и опорных (Б) валков, номеров комплектов подушек рабочих валков (В)

Наибольшая эффективность при автоматизированной обработке данных о сортаменте и валках достигается при реализации связи по сетевому протоколу с информационными системами, действующими на станах холодной прокатки, включая участки подготовки валков.

Контроль и изменение технологических параметров позволяет оценить превышение полных усилий натяжения на входе последних клетей, что является возможной причиной по-

явления колебаний трения в очаге деформации, которая не может быть устранена по технологическим причинам. Мониторинг расчетного значения нейтрального угла в процессе прокатки тонкого сортамента показал, что его значение находится в пределах очага деформации, а колебания усилия прокатки и натяжений не оказывают на него существенного влияния. Различные технологические способы могут уменьшить вероятность появления критических условий в очаге деформации, когда наступает проскальзывание валков, но не могут кардинально изменить ситуацию.

Изменение распределения удельных натяжений по ширине полосы происходит при изменении величины усилия принудительного изгиба валков. В целях эксперимента на стане 2030 в клетях 3-4 добивались в одном случае видимой краевой волнистости, а в другом – центральной. После изменений в настройках усилий изгиба валков осуществляли постепенный разгон стана до появления резонансных вибраций. В результате установлено, что изменение вида заданной величины удельных натяжений в клетях 3 и 4 практически не повлияло на величину предельной скорости прокатки. Резонансные вибрации происходили на той же скорости прокатки, что и до изменений изгиба валков. С нашей точки зрения принудительный изгиб валков может оказывать влияние на уровень вибрации в клети только через изменение условий распределения нагрузок в элементах подшипников рабочих валков. Это же касается и условий работы подшипников жидкостного трения в подушках опорных валков.

Применение пониженных уровней натяжения и понижающего режима обжатий приводит к ослаблению связей между клетями. С целью определения влияния на резонансную вибрацию снижения межклетевых натяжений, посредством которых происходит передача энергии колебаний между клетями, провели серию экспериментальных исследований. В ходе проведения экспериментов уменьшали величину удельного натяжения между клетями 2,3,4,5 с уровня 130-150 Н/мм² до 90-100 Н/мм². В результате использование данного технологического приема при прокатке полос толщиной 0.5-0.6 мм позволяло повысить пороговую скорость прокатки без наступления резонансных колебаний на 50-100 м/мин. Однако в ходе эксперимента возникли технологические ограничения, заключающиеся в опасности пореза валков. Наиболее опасным с этих позиций является последний межклетевой промежуток, где вариация натяжения достигает наибольшего значения вследствие работы системы автоматического регулирования толщины полосы и натяжения в режиме постоянного усилия в 5-й клети. При величине натяжения между 4-й и 5-й клетями в 100 Н/мм² произошла потеря устойчивости полосы в поперечном направлении и, как следствие, порез валков 5-й клети. При прокатке с величиной удельного натяжения между 4-й и 5-й клетями на уровне 110 Н/мм² проблем с порезами валков не возникало. Таким образом, при ограничении скорости стана по уровням вибрации рекомендовано вести процесс прокатки полос с понижением величин межклетевых натяжений до минимально допустимого уровня по промежуткам: $T_{4-5}=110$ Н/мм²; $T_{3-4}=T_{2-3}=100$ Н/мм²; $T_{1-2}=120$ Н/мм², при этом величину обжатия в клети 4 задавать на 3...7% меньше, чем в клети 3, а в клети 3 – на 3...7% меньше, чем в клети № 2.

Контроль горизонтальной составляющей усилия на подушках рабочих валков позволяет оценить и воздействовать на устойчивость положения и колебания в результате действия горизонтальной составляющей усилия прокатки за счет смещения рабочих валков относительно опорных по ходу прокатки (около 6 мм) и разности заднего и переднего натяжений полосы. Распределения суммарного горизонтального усилия на подушках рабочих валков в клетях 3,4,5 стана 2030 при резонансной вибрации представлены на рис. 3. Положительное значение усилия соответствует прижатию подушек против хода прокатки. По данным системы мониторинга вибрации, статистический максимальный разброс в интервале ± 3 СКО (СКО – среднеквадратическое отклонение) полного усилия натяжения при колебаниях по межклетевым промежуткам составляет (кН): $\Delta T_{5\text{мот}}=\pm 3$, $\Delta T_{45}=\pm 28$, $\Delta T_{34}=\pm 17$, $\Delta T_{23}=\pm 19$. При таких колебаниях натяжения и указанных на рис. 3 средних значениях суммарного усилия возможен выход подушек из устойчивого положения и периодическое их соударение со станиной в пределах зазоров.



Рис. 3 – Распределение суммарного горизонтального усилия на подушки рабочих валков

На устранение указанного явления направлены различные технические решения, обеспечивающие гарантированное прижатие подушек рабочих валков, например на стане горячей прокатки с помощью гидравлических устройств [8], которые одновременно выполняют функции демпферов, или выбором режима натяжений, согласно рекомендациям авторов работы [3].

Повышение демпфирующей способности оборудования требует установки специальных демпфирующих устройств. Например, фирма IAS предлагает демпфирующие устройства (*VIP - Vibration Inhibition Piston*), которые устанавливаются вместо плунжеров уравнивания верхнего опорного валка. По данным фирмы-разработчика, эти гасители вибраций, динамические характеристики которых рассчитываются на основании измерения спектра собственных частот клетки при помощи системы мониторинга, позволяют повысить скорость на 25-30%.

Метод подавления вибрации с использованием демпферов, широко применяемый во многих отраслях промышленности, имеет для прокатных станов определенные особенности, связанные с тем, что для обеспечения эффективной работы демпферов необходима настройка на определенную частоту колебаний с учетом податливости элементов. Собственная частота в большинстве стандартных механизмов и машин обычно постоянна или изменяется в узких пределах (± 5 Гц). Резонансные вибрации в клетях станов холодной прокатки (основная частота около 120 Гц), по результатам статистической обработки данных системы мониторинга, имеют более широкий диапазон (± 25 Гц) и могут вообще менять частотный диапазон, проявляться на частотах 300-500 Гц. Поэтому при высокой в целом эффективности применения демпфирующих устройств гарантировать устранение всех случаев резонансной вибрации на прокатных станах можно только после предварительных исследований при разном техническом состоянии оборудования.

Изменения жесткости элементов клетки изменяет форму колебаний валковой системы и направлены на то, чтобы узел противофазных движений рабочих валков сдвигался за пределы очага деформации. При этом исключаются возмущения усилия натяжения между клетями и периодические колебания толщины полосы. По результатам модельных расчетов, клиновое устройство является наиболее сильно влияющим на частоты и формы колебаний в клетях.

Использование накладок на подушках опорных и рабочих валков является возможным вариантом демпфирования при специальной обработке поверхности для увеличения коэффициента трения со станиной на станах холодной прокатки. Такой способ в сочетании с повышением полных усилий натяжения на входе последних клеток стана, по расчетам, может существенно сократить амплитуду вертикальных колебаний подушек без установки дополнительных гидравлических устройств для их прижатия.

Активное воздействие на вибрацию периодическим усилием в клетях, например, согласно способу [9], является достаточно перспективным с точки зрения устранения резонансных вибраций за счет противофазных колебаний одной из масс на резонансной частоте. Воздействие прикладывается к любому из колеблющихся элементов в клетях и может быть реализовано несколькими путями.

Первый вариант - это периодическое изменение усилия в цилиндрах ГНУ, что аналогично действию системы компенсации эксцентриситета валков, но отличается алгоритмом расчета закона изменения усилия с использованием данных измерения вибрации. Проблема состоит в том, что эффективная полоса пропускания системы сервоклапанов и гидроцилиндров ГНУ ограничена частотой 10-12 Гц.

Второй вариант, более приемлемый, – периодическое изменение усилия уравнивания (в настоящее время оно постоянно), действующего на подушки верхних опорных валков

(четыре цилиндра с усилием 40 т каждый). После некоторой доработки гидравлической системы уравнивания и применения специальных быстродействующих клапанов высокого давления возможно создание периодического усилия с более высокой частотой (до 120 Гц).

Эффективность работы устройств демпфирования и других способов устранения вибрации, может быть оценена только с использованием системы мониторинга вибрации при различных режимах прокатки, т.к. любые изменения в конструкции клетей (податливости элементов) может привести к нежелательному изменению частот и форм колебаний.

Выводы

Проведенный анализ возможных технических решений повышения скорости на станах холодной прокатки показал следующее:

- установка системы мониторинга вибрации является первоочередным этапом и необходимым условием успешной реализации любых технических решений и средством проверки их эффективности на различном сортаменте и режимах прокатки;

- включение в систему мониторинга вибрации функций автоматизированной статистической обработки данных для диагностики оборудования повышает вероятность поиска и устранения основных причин повышенной вибрации, ограничивающих скорость прокатки;

- основными способами повышения скорости прокатки на станах являются контроль состояния оборудования, контроль изменения технологических параметров и выбор рабочей скорости прокатки по данным измерения вибрации в реальном масштабе времени;

- разработка и применение способов и устройств демпфирования колебаний должно быть основано на предварительных исследованиях закономерностей развития вибрации при прокатке полос различного сортамента и при разном техническом состоянии оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоколебания в стане холодной прокатки. / Аркулис Г.Э., Шварцман З.М. и др. // Сталь №8, 1972, с.727-728.
2. Automatic vibration analysis and trending for complex drives / G. Helekal, R. Luftensteiner, C. Riegler, H. Aigner // Steel Technology, October, 2002, pp. 43-49.
3. Исследование причин возникновения колебаний в клетях непрерывных прокатных станов / Э.А. Гарбер, В.П. Наумченко и др. // Производство проката, №1, 2003, с. 10-12.
4. Ю.В. Рыбаков, Г.Н. Субботин Определение источников вибрации, вызывающих явление резонанса на станах холодной прокатки // Производство проката, №10, 2003, с. 13-16.
5. B.R. Hardwick A technique for the detection and measurement of chatter marks on roll surfaces // Steel Technology, April, 2003, pp. 64-70.
6. Исследование причин образования дефекта «ребристость» при дрессировке жести / В.Д. Петров, В.В. Левин, Т.С. Сейсимбинов, В.А. Шенбергер // Бюлл. «Черная металлургия», № 11-12, 1999, с. 42-44.
7. 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.
8. Т. Усуги, К.Хаяси Устройство для демпфирования горизонтальных ударных нагрузок и вибрации клетки на стане горячей прокатки // ОАО «Черметинформация», Бюллетень «Черная металлургия», №6, 2005, с. 52-54.
9. Патент США №9727953. B21B37/00. Interruption of rolling mills chatter by induced vibrations. W. Albert, C.K. Wing and others. Опубл. 07.08.1997.