

**И.Ю.Приходько, П.В.Крот, Е.А.Парсенюк, К.В.Соловьев,
В.В.Акишин**

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ВИБРАЦИЙ НА НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНАХ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ПОЛОС

Приведены результаты теоретических и прикладных исследований резонансных вибраций непрерывных станов холодной прокатки полос, рассмотрены функциональные возможности современных систем мониторинга вибраций, в том числе разработанной для стана 2030 НЛМК системы контроля вибраций, диагностики технологического процесса и технического состояния оборудования.

Введение

Проблема развития повышенной вибрации на высоких скоростях (более 15 м/с) в станах холодной прокатки и дрессировки полос возникла уже достаточно давно [1]. В той или иной степени это явление имеет место на станах Череповецкого, Магнитогорского, Карагандинского, Новолипецкого комбинатов. На стане 1700 комбината им. Ильича при скоростях прокатки до 10–12 м/с и стане 1680 ОАО «Запорожсталь» (до 10 м/с) вибрации не ограничивают скорость прокатки. Актуальность проблемы повышенных вибраций на зарубежных станах, где скорости прокатки значительно выше (20–25 м/с), может быть оценена по материалам многочисленных ежегодных публикаций.

На всех станах повышение вибрации до опасного уровня ограничивает производительность, снижает качество готовых полос по продольной разнотолщинности и периодическим дефектам поверхности типа «ребристость», «поперечные теневые полосы», а также повышает расход валков. 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, что уменьшает амплитуду колебаний, но снижает при этом среднюю рабочую скорость стана. Хотя известно, что и увеличение скорости прокатки также может устранять фрикционные колебания, но из опасения вызвать обрыв полосы такой метод на прокатных станах в настоящее время не применяют. Частая замена элементов оборудования клеток (валковых муфт, изнашиваемых накладок, подшипников валков) 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.

В связи с внедрением новых технологий покраски автолиста, заказчики, например, ОАО «АвтоВАЗ», ужесточили требования по качеству поверхности полос. В результате большое количество рулонов 1-й группы отделки поверхности отбраковываются по периодическим дефектам как по разнотолщинности полос, так шероховатости поверхности (изменения $Ra < 4...5$ мкм). На отдельных станах наблюдаются периодические дефекты поверхности валков (рабочих или опорных), нанесенные в результате динамических процессов в клетях при резонансной вибрации стана, которые являются причиной появления дефектов полос и при скорости прокатки 10 м/с (см. Рис.1).



Рис.1. Периодические дефекты на поверхности опорного валка (а) и полосы (б)

Подобные явления имеют также место во многих других технологических процессах обработки металлов точением, сверлением, шлифованием. Наблюдаются периодические метки скольжения на рельсовом пути при действии тяговых колес подвижных составов. Характер этого явления специфичен для каждого из указанных процессов, но его природа связана с природой сил трения, действующих между рабочим инструментом и обрабатываемым материалом, закон изменения которых имеет немонотонную зависимость от многих факторов (жесткость конструкции машины, наличие и условия смазки в зоне контакта, скорость обработки материала). Поэтому такого рода нестабильность процесса, имеющую по внешним признакам много общего с резонансной вибрацией, считают фрикционными автоколебаниями или параметрическими колебаниями, что отражает, соответственно, нелинейное или периодическое изменение параметров внутри самой системы, как источника возбуждения колебаний.

Анализ последних публикаций по резонансной вибрации на скоростных станах холодной прокатки [2,3,4] показывает, что данная

проблема может быть решена только комплексными мерами, прежде всего с использованием стационарных систем контроля вибрации оборудования клетей, включая визуальный контроль периодических дефектов на поверхности валков и полосы [5,6].

Современные разработки проблемы вибрации ("гудение", chatter) для станов холодной прокатки и дрессировки (известны отдельные случаи и в станах горячей прокатки) за рубежом ведутся в двух направлениях:

1) создание систем контроля вибрации и диагностики технического состояния станов;

2) разработка способов и устройств демпфирования колебаний.

Среди поставщиков таких систем известны компании: *Vold Solution Automation* (США) с системами "*QuartzGrind*" (для процесса шлифовки валков) и "*QuartzMill*" (для процесса прокатки), *AMTRI* (Великобритания) с системой наблюдения "*AVAS*", *IAS – Industrial Automation Systems* (Австралия) с системой "*VIDAS chatter monitor*", *SMS Demag* (Германия) с системой "*MIDAS*", а также существовавшая до недавнего времени фирма *SensorScript* (США) с системой "*ChatterMD*" и другие. Некоторые фирмы-разработчики наряду с системами контроля вибрации предлагают различные технические решения, направленные на демпфирование вибрации (в шлифовальных станках, прокатных клетях). Реализуются функции сопровождения каждого прокатанного рулона протоколом по уровню вибрации, построения трендов вибрации на частотах отдельных компонентов оборудования клетей, включая также данные о вибрации вальцешлифовальных станков.

Использование на посту управления станами систем контроля вибрации позволяет операторам более уверенно вести прокатку полос наиболее виброопасного тонкого сортамента на повышенной скорости и достигать технологически допустимого по уровню вибрации предела скорости. Однако диагностические возможности многих зарубежных систем исчерпываются выдачей оператору предупреждения о превышении амплитуды спектра вибраций в выбранных диапазонах частот некоторого заданного порогового уровня. Это не позволяет в режиме реального времени работы прокатного стана оценить влияние отдельных элементов оборудования на возникновение резонансных вибраций и, следовательно, целенаправленно увеличить пороговый уровень скорости прокатки путем ревизии или замены отдельных узлов оборудования, которые являются основными источниками резонансной вибрации и ограничивают возможную максимальную скорость прокатки.

Проведенные исследования

В 90-х годах на 5-клетевом стане 2030 НЛМК использовалась система обнаружения резонансных вибраций по аналоговым сигналам датчиков давления в нажимных устройствах, разработанная специалистами НЛМК [7].

Для повышения стабильности работы стана и скорости прокатки в конце 2003 г. на стане была установлена цифровая система мониторинга вибрации фирмы IAS (Австралия) – "*VIDAS chatter monitor*", которая включала 6 датчиков вибрации (акселерометры), установленных в трех последних клетях стана со стороны обслуживания на подушках верхних и нижних опорных валков. Система работала в режиме визуализации уровней вибрации в последних клетях стана. Присущие всем зарубежным системам и указанные выше недостатки, выявленные в ходе эксплуатации системы "*VIDAS*", привели к необходимости создания новой системы контроля вибрации.

При разработке новой системы на стане 2030 был выполнен комплекс исследований, которые включали:

- построение и идентификация математических моделей резонансных вибраций при взаимодействии клеток стана;
- исследование технологических условий возбуждения резонансных вибраций в зависимости от применяемых режимов прокатки;
- исследование кинематических источников вибрации в оборудовании стана и зависимость от его технического состояния;
- разработка и адаптация методов вибродиагностики оборудования клеток и линий привода;
- анализ воздействий со стороны системы управления приводами;
- построение алгоритмов управления станом на повышенных скоростях по сигналам, формируемым в системе контроля вибрации;
- реализация в автоматическом режиме разработанных алгоритмов управления скоростью стана.

В настоящее время разработанная система контроля вибрации (СКВ) позволяет в реальном масштабе времени выявлять источники повышенной вибрации в механическом оборудовании стана, включая линии привода, т.е. реализует функции диагностики. После реконструкции систем автоматизации стана 2030 в СКВ введены также сигналы технологических параметров по клетям (усилия прокатки, натяжения, частота вращения приводов валков и моменты нагрузки приводов). В 2006 г. для выявления дефектов валков и диагностики периодических дефектов и разнотолщинности полосы, формируемых, в том числе и в первых клетях стана, и которые не могут быть выявлены существующими измерителями (толщиномерами) в силу их инерционности (ограниченной частоты получения результатов измерения), СКВ расширена дополнительными каналами измерения вибрации в двух первых клетях стана. То есть вибрации измеряются и анализируются во всех клетях стана.

Большой объем записей резонансной вибрации, накопленный системой, при прокатке различного сортамента, в различных технологических условиях и состоянии оборудования клеток позволил

разработать и внедрить ряд технических решений для снижения динамических процессов, которые могут быть применены и на других скоростных прокатных станах.

Анализ методов снижения резонансных вибраций

Независимо от типа стана основными группами факторов, ограничивающих повышение скорости холодной прокатки, являются эксплуатационные, технологические и конструктивные. Поэтому возможные пути повышения рабочей скорости прокатки и устранения периодических дефектов полос заключаются в следующем:

- применение методов вибродиагностики оборудования стана для выявления источников наиболее интенсивных вибраций;
- применение методов мониторинга и раннего обнаружения резонансной вибрации стана;
- изменение параметров и режима подачи СОЖ;
- корректировка шероховатости и профилировки валков;
- применение устройств демпфирования вибраций;
- управление скоростью и технологическими режимами прокатки.

Анализ кинематических возмущений в клетях станов.

Для реализации алгоритмов диагностики в систему должны вводиться сигналы оборотов приводов отдельно верхних и нижних рабочих валков, которые используются для расчета кинематических и собственных частот по клетям в процессе изменения скорости прокатки на стане. Установлено увеличение амплитуды вибрации при совпадении кинематических частот подшипников рабочих валков и собственных частот валковой системы клетей, а также частот зубчатых зацеплений валковых муфт шпинделей, редукторов и предохранительных муфт.

Для распознавания частотных составляющих при анализе данных измерения вибрации, изменения во времени характерных частот колебаний визуализируются на двумерной частотной диаграмме. Амплитуда спектра имеет цветовое отображение, по вертикали расположена ось частот, по горизонтали – время прокатки. На рис. 2 показано смещение максимума спектра вибрации в 5-й клетке стана 2030 на частоте зацепления редуктора в диапазоне 500–600 Гц при снижении скорости стана. Собственные частоты на двумерной частотной диаграмме имеют вид прямых горизонтальных линий (см. рис. 3). Кинематические частоты имеют вид кривых, изменяющихся по времени в соответствии со скоростью прокатки. При пересечении этих линий возникают условия для усиления колебаний, которые распознаются системой в процессе работы стана. В процессе работы стана для более удобного выбора оператором рабочей скорости система строит частотную диаграмму, представленную на рис. 3, где вертикальными линиями обозначены собственные частоты, наклонными – кинематические, маркерами – совпадения кинематических и собственных частот.

Исследованиями ИЧМ на станах КарМК, ММК установлено усиление колебаний также за счет натяжения в промежутках размотыватель – первая клеть, последняя клеть – моталка, которое происходит при определенных соотношениях диаметров рулона и опорных валков клетей.

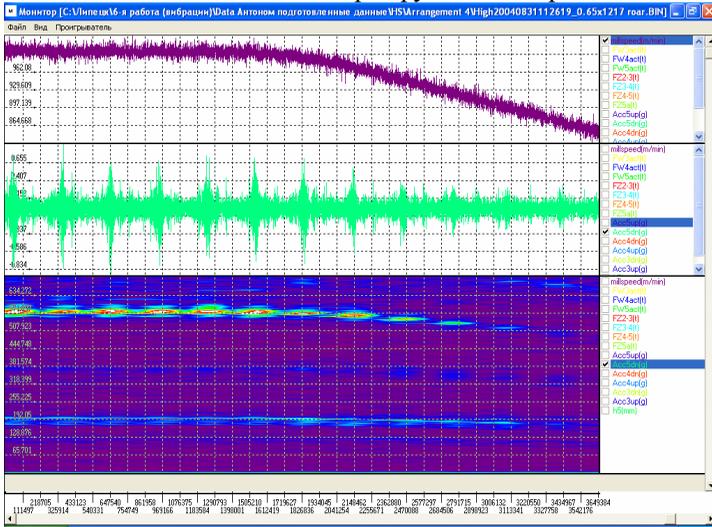


Рис.2. Снижение скорости стана, уровень вибрации в одной из клетей и изменение частоты зубчатого зацепления редуктора

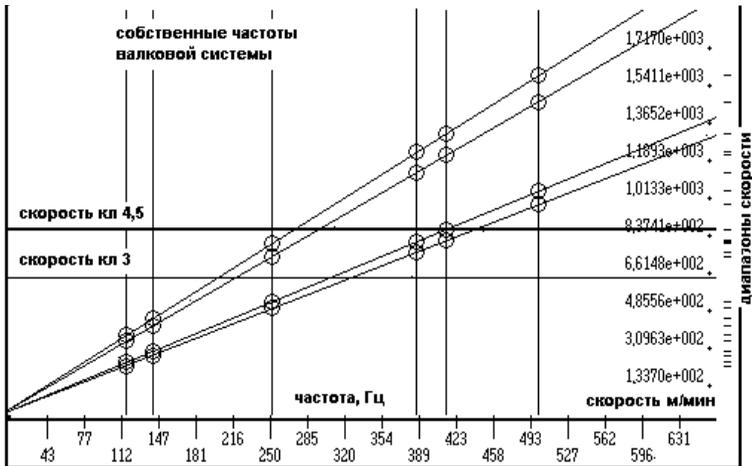


Рис.3. Частотная диаграмма для выбора оператором стана рабочей скорости прокатки

Резонанс наступает, когда частоты биений моталок (или собственные частоты их линий привода) и опорного валка совпадают. Исследовались также случаи резонанса при совпадении собственных частот в крутильной системе клетей с оборотными частотами валков [8]. Рассматривалось усиление колебаний в линиях привода дрессировочного стана при параметрическом возбуждении от прямоугольного зацепления шестеренной клетки, когда частота зацепления вдвое превышала собственную частоту линии привода. Все эти явления распознаются и визуализируются в разработанной системе контроля вибраций.

Выбор рабочей скорости стана на основании данных, получаемых и обрабатываемых системой, является основным методом, обеспечивающим повышение скорости прокатки и приближения к максимально возможному уровню. При совпадении собственных частот вертикальных колебаний валковой системы и кинематических частот (зубчатых зацеплений шпинделей, редукторов и муфт, подшипников рабочих валков) амплитуда вибрации на определенной скорости прокатки возрастает. Ведение процесса прокатки на такой рабочей скорости предопределяет повышенный уровень вибрации. В то же время некоторое увеличение скорости приводит к смещению частот и уходу от резонансного состояния. При этом прокатка даже на более высокой скорости происходит с меньшими вибрациями. Опробование в ручном режиме прохождения опасных диапазонов скорости (более 15 м/с) показало возможность повышения производительности стана. Для автоматической реализации этого способа необходимо накопление данных об опасных диапазонах скорости при прокатке полос различного марочного и размерного сортамента с учетом текущего технического состояния оборудования клетей.

Контроль технического состояния оборудования стана является необходимым условием снижения уровня вибрации. 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 периодических дефектов полос требуется своевременное определение и замена комплектов подушек и валков с повышенным дисбалансом перед прокаткой металла 1-й группы отделки поверхности на основании данных системы контроля вибрации.

Разработанная система позволяет строить распределения случаев возникновения повышенной вибрации стана в зависимости от наработки (по времени или тоннажу) рабочих и опорных валков. Наблюдаемое уменьшение случаев резонанса к концу кампании рабочих валков может быть связано со снижением шероховатости поверхности бочки. Известно,

что исходная шероховатость поверхности рабочих валков в течение их кампании может снижаться в 2–2.5 раза (например, с $Ra=0.5$ мкм до 0,2 мкм). Уменьшение шероховатости поверхности валков в течение первых 3–4 часов после перевалки в период наиболее интенсивного износа, должно приводить к снижению пороговой скорости и появлению резонансных вибраций.

Анализ записей резонансных вибраций является средством, позволяющим выявлять скрытые дефекты подшипников валков и осуществлять первичную диагностику оборудования. Обработка данных о состоянии оборудования линий привода и движении комплектов подушек рабочих валков позволяет определять подшипники, подлежащие ревизии или замене. На стане 2030 наблюдалось повышенное число случаев вибрации на комплектах с определенными номерами при их установке в различных клетях стана и с разными валками. Такая закономерность может быть обусловлена износом и дефектами подшипников, что и было установлено в ходе их очередной ревизии. Наибольшая эффективность автоматизированной обработки данных о сортаменте и валках достигается при реализации связи 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 появления колебаний трения в очаге деформации, которая не может быть устранена по технологическим причинам. Текущий контроль 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 существенно изменить ситуацию в связи с регламентируемыми ограничениями на параметры прокатки.

Изменение распределения удельных натяжений по ширине полосы происходит при изменении величины усилия принудительного изгиба валков. 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 клетях только через изменение условий распределения нагрузок в элементах

подшипников качения рабочих валков и подшипников жидкостного трения в подушках опорных валков.

Применение пониженных уровней натяжения и режима обжатий приводит к ослаблению связей через полосу, посредством которых происходит передача энергии колебаний между клетями. С целью определения влияния на резонансную вибрацию снижения межклетевых натяжений, провели серию экспериментальных исследований. В ходе проведения экспериментов уменьшали величину удельного межклетьевого натяжения с уровня 130–150 Н/мм² до 90–100 Н/мм². В результате использование данного технологического приема при прокатке полос виброопасного сортамента (толщиной 0,5–0,6 мм) позволяло повысить пороговую скорость прокатки без наступления резонансных колебаний на 50–100 м/мин. Однако применение этого приема связано с технологическими ограничениями, а именно – порезами валков. Наиболее опасным с этих позиций является последний межклетевой промежуток, где вариация натяжения достигает наибольшего значения вследствие закономерностей работы системы автоматического регулирования толщины полосы и натяжения в режиме постоянного усилия в последней клетке.

Контроль горизонтального усилия на подушках рабочих валков позволяет оценить и воздействовать на устойчивость их положения. Колебания возникают в результате действия горизонтальной составляющей усилия прокатки за счет смещения рабочих валков относительно опорных по ходу прокатки (как правило, около 6 мм) и разности заднего и переднего натяжений полосы. Положительное значение суммарного усилия соответствует прижатию подушек против хода прокатки. По данным системы контроля вибрации построены распределения суммарного горизонтального усилия на подушках рабочих валков в последних клетях стана 2030 при резонансной вибрации. Максимальный статистический разброс в интервале $\pm 3\sigma$ (σ – 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 заданных по режимам прокатки средних значениях усилия возможен выход подушек из устойчивого положения и периодическое их соударение со станиной в пределах зазоров.

На устранение указанного явления направлены различные технические решения, обеспечивающие гарантированное прижатие подушек рабочих валков, например на стане горячей прокатки с помощью гидравлических устройств [9], которые одновременно выполняют функции демпферов, или режимом натяжений, согласно способу [10].

Повышение демпфирующей способности оборудования требует установки специальных 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 вибрации клетки, позволяют повысить скорость прокатки на 25–30%.

Метод подавления вибрации с использованием демпферов, широко применяемый во многих отраслях промышленности, для прокатных станов имеет определенные особенности, связанные с тем, что для обеспечения эффективной работы демпферов необходима их 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 измерений, имеют более широкий диапазон (± 25 Гц) и могут вообще менять частотный диапазон, проявляясь 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 исследования их работы при разном техническом состоянии оборудования и на разном сортаменте.

Изменения жесткости элементов клетки изменяет форму колебаний валковой системы, в результате чего узел вертикальных противофазных движений валков может сдвигаться за пределы контакта рабочих валков с полосой. При этом исключаются возмущения усилия натяжения между клетями и периодические колебания толщины полосы. По результатам расчетов, клиновое устройство под нижними подушками опорных валков является элементом, в наибольшей степени влияющим на частоты и формы колебаний клетки. Применение данного способа ограничено возможностями конструктивных изменений и необходимостью смещения уровня прокатки в клетке.

Активное воздействие на вибрацию периодическим усилием в клетке, например, согласно способу [11], является достаточно перспективным с точки зрения устранения резонансных вибраций за счет противофазных вынужденных колебаний одной из масс на резонансной частоте клетки. Воздействие прикладывается к любому из колеблющихся элементов в клетке и может быть реализовано несколькими путями.

1) Периодическое изменение усилия в цилиндрах гидронажимных устройств (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.

2) Периодическое изменение усилия уравнивания, действующего на подушки верхних опорных валков (на стане 2030 НЛМК усилия

постоянные, четыре цилиндра с усилием 400 кН каждый). Реализация способа требует некоторой доработки гидравлической системы уравнивания и применения специальных быстродействующих клапанов высокого давления для создания периодического усилия с частотой до 120 Гц.

Использование накладок на подушках опорных и рабочих валков, изготовленных из полимерных материалов (капрон вместо бронзы или стали) или специальная обработка поверхности металлических накладок для увеличения коэффициента трения со станиной является возможным вариантом демпфирования вертикальных колебаний валков на станах холодной прокатки полос. Такой способ в сочетании с повышением полных усилий натяжения на входе последних клетей стана, по расчетам, может существенно сократить амплитуду вертикальных колебаний подушек без установки гидравлических устройств для их прижатия.

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

Критерии начала развития вибраций. Анализ закономерностей развития вибраций в ряде клетей на стадии, предшествующей резонансу, показал, что в самом начале их возникновения меняется соотношение основной и ближайших боковых частот, отстоящих от основной частоты на величину, кратную оборотной частоте опорных валков в данной клетке. Предложен и опробован критерий, позволяющий более надежно и раньше распознавать опасные ситуации, нежели настройка на более низкий допускаемый уровень вибрации в выбранном диапазоне частот, что, как показал опыт, приводило к повышению частоты ложных предупреждений. Критерий базируется на явлении модуляции резонансной частоты вертикальных колебаний клетки (≈ 120 Гц) низкой частотой (1–3 Гц) биений опорных валков. Такое явление модуляции наблюдается и на других станах, но интерпретируется как биения близких частот смежных клетей.

Исследованиями на стане 2030 НЛМК установлено, что модуляция основной частоты вибрации клетки происходит с частотой биений опорных валков. Контроль уровня модуляции позволяет раньше на 2–3 с гарантированно распознавать начало развития резонансных вибраций, что дает возможность вовремя скорректировать динамическую ситуацию, не допуская резонанса. Тем самым повышается средняя скорость прокатки, т.к. эффекта добиваются небольшими отклонениями скорости. Адаптивный метод управления скоростью используется и в других технологических процессах обработки металлов [12].

В многоклетевых станах анализируется также частота основного максимума вибрации одновременно по всем клетям и делается вывод о

наступлении синхронизации и начале развития резонансных вибраций. Данный метод контроля резонансных вибраций и управления скоростью стана реализован в СКВ и используется в автоматическом режиме на стане 2030 НЛМК. За счет высокой надежности метода раннего (за 3–5 с) распознавания условий развития вибрации и перехода ее в опасную фазу средняя скорость стана в зависимости от состояния валков и сортамента повышена на 50–100 м/мин.

Выводы.

Анализ технических решений, направленных на повышение скорости непрерывных станов холодной прокатки полос, показал следующее:

1) Установка системы контроля вибрации является первоочередным и необходимым условием успешной реализации любых технических решений и средством проверки их эффективности.

2) Включение в систему функций статистической обработки данных и диагностики оборудования повышает вероятность поиска и устранения основных причин повышенной вибрации, ограничивающих скорость прокатки.

3) Основными способами повышения скорости прокатки на станах являются контроль состояния оборудования, технологических параметров и управление рабочей скоростью прокатки по данным измерения вибрации в реальном масштабе времени.

4) Разработка и применение способов и устройств демпфирования вибрации должно быть основано на предварительных исследованиях закономерностей ее развития при прокатке полос различного сортамента и при разном техническом состоянии оборудования.

5) Реализован метод раннего обнаружения резонансной вибрации и автоматического управления скоростью стана, что позволяет повысить рабочую скорость прокатки без развития резонансных вибраций.

1. *Автоколебания* в стане холодной прокатки. / Г.Э. Аркулис, З.М. Шварцман 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, p.43–49.
3. *Исследование причин возникновения колебаний в клетях непрерывных прокатных станов* / Э.А.Гарбер, В.П.Наумченко и др. // *Производство проката*. – 2003. – №1 – С. 10–12.
4. *Рыбаков Ю.В., Субботин Г.Н.* Определение источников вибрации, вызывающих явление резонанса на станах холодной прокатки // *Производство проката*. – 2003. – №10. – С. 13–16.
5. *Hardwick B.R.* A technique for the detection and measurement of chatter marks on roll surfaces // *Steel Technology*, April, 2003, p.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»*. – 1999. – № 11–12. – 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. – 1999. – № 11. – С. 42–48.
8. . *Веренев В.В, Кукушкин О.Н., Зиновьев Е.Г.* Влияние динамических процессов в оборудовании полосовых станов на качество и выход годного: Обзор по системе Информсталь // Ин-т «Черметинформация». –М., 1990. –Вып. 4(361), 33с.
9. *Усуги Т., Хаяси К.* Устройство для демпфирования горизонтальных ударных нагрузок и вибрации клетки на стане горячей прокатки // ОАО «Черметинформация», Бюллетень «Черная металлургия». – 2005. – №6.– С.52–54.
10. *Патент* России №2225272, В21В1/28. Способ холодной прокатки полос в многоклетевом стане / И.Ю.Приходько, В.П. Настич, П.П. Чернов и др. Оpubл. 2004–03–10.
11. *Патент* США №9727953. В21В37/00. Interruption of rolling mills chatter by induced vibrations. W. Albert, С.К. Wing and others. Оpubл. 07.08.1997.
12. *E. Soliman and F. Ismail* Chatter suppression by adaptive speed modulation // International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 37, Issue 3, March 1997, Pages 355–369

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. В.И.Большаковым.