

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРОБОВАНИЯ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ СТАНОМ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ПОЛОС

Изложены новые результаты теоретических и прикладных исследований в области диагностики резонансных вибраций и управления непрерывным станом 2030 НЛМК холодной прокатки полос, рассмотрена разработанная система контроля технологического процесса непрерывной прокатки и диагностики технического состояния оборудования клетей.

Существующие системы мониторинга резонансной вибрации.

В настоящее время исследование резонансных вибраций (чаттера) и разработки систем контроля вибрации для станов холодной прокатки и дрессировки проводятся в нескольких направлениях:

- установка стационарных систем мониторинга и диагностики;
- методы и устройства демпфирования вибрации;
- методы бесконтактного контроля дефектов на валках и полосе;
- оптимизация процесса и станков для шлифования валков;
- методы управления скоростью и параметрами прокатки;
- методы диагностики оборудования клетей и линий привода.

Существующие системы для предотвращения развития чаттера и обрывов полос используют метод спектрального анализа в определенном диапазоне частот, включающем основную собственную частоту вертикальных колебаний клетки (100–150 Гц). Датчики вибрации (акселерометры) устанавливаются в одной или нескольких последних клетях непрерывных станов. Аварийный сигнал для снижения скорости стана выдается, когда амплитуда спектра превысит заданное предельное значение. Такой метод применяется также в системах мониторинга вибрации на энергетическом и другом вращающемся оборудовании общего назначения (вентиляторы, насосы).

За рубежом получили развитие и внедряются на практике методы ранней диагностики возникновения чаттера и управления процессом для прецизионных металлообрабатывающих станков, где при определенных скоростях и режимах обработки также возникают фрикционные колебания при контактном взаимодействии рабочего инструмента и материала заготовки.

Существующие системы мониторинга вибрации прокатных станов выдают аварийный сигнал в систему автоматического управления для снижения скорости прокатки на 200–250 м/мин, когда уже наступили условия резонанса, что уменьшает общую производительность станов. По-

скольку амплитуда чаттера нарастает достаточно быстро (до 0.5–1.0 с), операторы станов стараются устанавливать аварийные уровни, как можно ближе к нормальному уровню вибрации, что вызывает ложные срабатывания, поскольку от рулона к рулону изменяются комплекты рабочих валков и сортамент прокатываемых полос, которые влияют на уровни вибрации по клетям. По данным известных публикаций и патентов, пока не разработаны системы, которые обеспечивают надежную раннюю диагностику чаттера и прогнозирование момента времени, когда начинается развитие резонансной вибрации, для управления по сигналам вибрации технологическими параметрами прокатки.

Разработка системы контроля вибрации и управления станом.

Исследования резонансных вибраций выполняются на 5–клетьевом непрерывном стане кварто 2030 НЛМК (г.Липецк, Россия), где до этого фирма IAS (Австралия) установила систему «VIDAS chatter monitor». Система включала 6 каналов контроля вибрации с несколькими дополнительными каналами для записи параметров прокатки. Датчики были установлены в трех последних клетях №3, 4, 5 на подушках верхних и нижних опорных валков со стороны обслуживания.

По результатам проведенных исследований было усовершенствовано программное и аппаратное обеспечение существующей системы мониторинга вибрации для реализации таких новых функций как:

- контроль резонансных диапазонов частот и выбор скорости;
- диагностика валковых узлов (подшипники, дефекты валков);
- диагностика износа и дефектов элементов линий привода;
- методы ранней диагностики чаттера и управление скоростью;
- мониторинг расчетных параметров, влияющих на вибрацию:
 - значение нейтрального угла в очаге деформации по клетям;
 - высокочастотное (100–120 Гц) изменение толщины полосы;
 - баланс горизонтальных сил на подушках рабочих валков.

Для диагностики дефектов валков и разнотолщинности полосы были дополнительно установлены датчики вибрации также на подушках опорных валков в клетях №1, 2 непрерывного стана. Новая система спроектирована с учетом характеристик всех известных в мире аналогов.

Одной из основных функций в системе мониторинга является ведение архивов записей вибрации по каждому рулону и построение трендов по различным частотам механических элементов оборудования, включая частоты биений валков. Это позволяет выявлять и оперативно устранять причины повышенных вибраций и дефектов поверхности полос. Для примера на Рис.1 приведены тренды изменения уровней вибрации и скорости прокатки в клетке №5 стана 2030 НЛМК, где символы в прямоугольных рамках обозначают некоторые проблемные события на стане («о» – обрыв полосы, «1, 2, 3, 4» – дефекты поверхности опорных валков, «сп» – сгорел подшипник рабочего валка). Все точечные линии (отдельные рулоны) сглаживаются фильтрами, чтобы персонал стана мог сделать заключение

о взаимосвязи достигнутой скорости стана (верхние линии) и трендов различных источников вибрации. Для примера, приведены тренды амплитуды на частоте биений опорных валков вместе с общим уровнем вибрации в клети №5. Ступенчатые линии соответствуют заменам опорных валков в различных клетях стана.

Диагностика причин повышенной вибрации выполняется путем сравнения значений уровней за некоторое время. Если составляющая спектра на частоте биений опорных валков ($f_{ОВ}$) маленькая, а общий уровень вибрации высокий, то это означает, что валки имеют поверхностные дефекты. Когда было разрушение подшипника рабочего валка в клети №5 (см. метка «сп» на Рис. 1), то это не имело эффекта на предыдущие клети обратно по направлению прокатки, но дефекты валков в предыдущих клетях влияли на уровни вибрации последующих клетей, что говорит о возникновении поверхностных дефектов полосы.

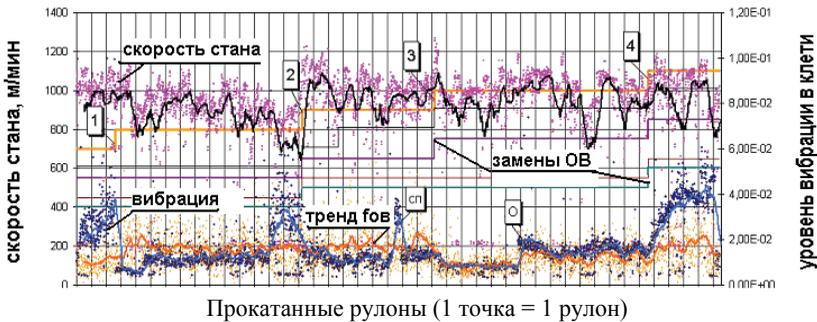


Рис. 1. Статистическая обработка записей вибрации по рулонам

Новые методы ранней диагностики чаттера используют данные измерения в нескольких клетях непрерывного стана и определяют момент начала развития резонансной вибрации, что позволяет на 3–5с раньше, чем по амплитуде спектра, выдать управляющее воздействие в систему управления станом (задания скорости, обжатий, натяжения) для устранения дальнейшего нарастания колебаний. На Рис.2 показано сравнение работы системы контроля вибрации известными и новыми методами.

Эксплуатация новой системы на непрерывном стане 2030 НЛМК показала, что изменения скорости прокатки по каналу контроля вибрации могут составлять менее 10–15 м/мин, что сопоставимо с управляющими воздействиями основного контура САРТиН. По результатам эксплуатации системы с конца июня 2006г., увеличение средней скорости прокатки на тонком (до 0.8мм) сортаменте составило около 10% (100–120 м/мин).

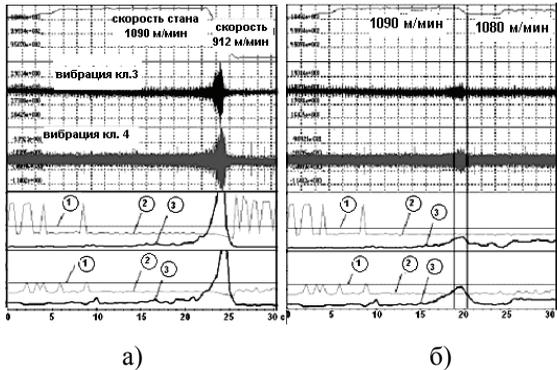


Рис.2. Диагностика чаттера и автоматическое управление: а) управление оператором стана; б) автоматическое управление по сигналам вибрации;

Разработка методов мониторинга высокочастотной продольной разнотолщинности полос и упруго–пластических свойств материала полос.

В дрессировочных и непрерывных тонколистовых станах холодной прокатки полос скорость движения прокатываемого материала составляет 20–30 м/с. Длительность (частота) возмущений, действующих в очаге деформации, за счет изменения условий трения, подачи смазки или текущих свойств материала, составляет менее 0.1с (>10 Гц). Наиболее характерные факторы нестабильности технологических режимов прокатки, которые влияют на параметры вибрации в клетях станов:

- неравномерность подачи смазки по ширине очага деформации и локальные переходы от жидкостного к сухому режиму трения вызывают вибрации в широкой полосе частот;
- взаимодействие последовательно расположенных клеток через полосу за счет периодических участков высокочастотной разнотолщинности (с периодом 20–140 мм), возникшей в предыдущих клетях при колебаниях валковых узлов на основной собственной частоте клетки (100–150 Гц);
- синхронизация смежных клеток, имеющих близкие собственные частоты в диапазоне 100–150 Гц, за счет колебаний натяжения в межклетевых промежутках приводит к увеличению амплитуды вибраций и обрывам полос;
- изменения упруго–пластических свойств материала полос по мере его упрочнения вызывает изменение демпфирующих свойств, собственных частот и форм колебаний валковой системы клетки.

Высокочастотные возмущения при определенных соотношениях параметров процесса прокатки и текущего состояния материала в очаге деформации могут приводить к ухудшению качества продукции, дефектам (периодическая шероховатость, разнотолщинность) и снижению качества управления процессом за счет колебательных явлений в клетях.

Существующие стандартные датчики систем управления и применяемые исполнительные механизмы (измерители толщины, гидравлические нажимные устройства, регуляторы главных электроприводов рабочих валков) из-за неизбежной конструктивной инерционности (диапазон частот – до 10–15 Гц) в состоянии регистрировать и обрабатывать только низкочастотные возмущения, соответствующие, например, эксцентриситету или овальности опорных или рабочих валков в стане.

Несмотря на незначительные амплитуды высокочастотных возмущений по сравнению с действующими значениями усилий и моментов прокатки, сигналы вибрации в оборудовании клетей и линий привода, несут в себе достаточно большой объем информации о технологическом процессе. Сигналы вибрации характеризуют упруго-пластические свойства прокатываемого материала и условия трения в очаге деформации. Мониторинг вибрации станов холодной прокатки и дрессировки позволяет:

- осуществлять контроль условий трения в очаге деформации;
- вести диагностику поверхностных дефектов полос и валков;
- определять высокочастотную разнотолщинность;
- оптимизировать управление процессом прокатки.

Примером использования параметров колебаний (вибрации) оборудования для оценки свойств прокатываемого материала и управления технологическим процессом являются машины непрерывного литья заготовок. Известны действующие системы контроля, где на основе данных измерения текущих параметров вибрации кристаллизатора производится анализ устойчивости течения металла и условий контактного трения.

Проведенные экспериментальные исследования нагрузок и вибрации на различных станах холодной и горячей прокатки показали наличие статистически значимой зависимости параметров вибрации оборудования клетей от упруго-пластических свойств материала и условий трения в очаге деформации. На большом фактическом материале, полученном на непрерывном 5-клетьевом стане холодной прокатки 2030 НЛМК, установлены закономерности изменения вибрации в клетях при прокатке различного сортамента. Даже небольшие (до 0.05–0.10 мм) изменения входной толщины полос или изменения предела текучести материала (жесткости полосы) за счет обжатий по клетям (проходам) влияют на спектральный состав и амплитуды вибрации. В свою очередь, вибрации приводят к изменению коэффициента трения в очаге деформации. Демпфирующая способность клетки зависит от соотношения пластических и упругих свойств материала полосы. Увеличение демпфирующей способности клетки наблюдается для более толстых и менее жестких полос.

Высокочастотные отклонения толщины полосы появляются в стане даже при нормальных условиях прокатки без резонанса (Рис.3), но не могут быть обнаружены существующими толщиномерами. При резонансных вибрациях амплитуда волны толщины может превысить отклонение по стандарту и вызвать отбраковку продукции у заказчиков, особенно на ав-

толисте. Предполагается, что на изменения толщины полосы основное влияние имеют вертикальные колебания последней клетки. Поэтому для измерения таких быстрых периодических дефектов был разработан метод, основанный на анализе сигналов вибрации в последней клетке непрерывного стана.

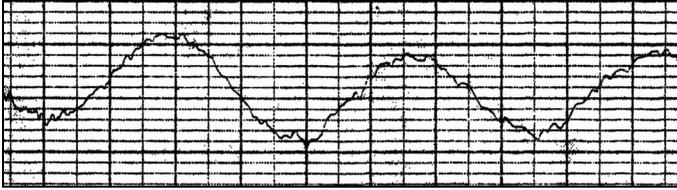


Рис.3. Профиль полосы, прокатанной при нормальных уровнях вибрации (без чаттера); масштаб сетки графика: 20 мм – по горизонтальной оси; 2 μ м – по вертикальной оси

Для вычисления разнотолщинности по сигналам вибрации необходимо определять точные значения фаз относительных вертикальных перемещений опорных и рабочих валков. При постоянной эксплуатации системы акселерометры на стане обычно установлены только на подушках опорных валков (в связи с частыми заменами рабочих валков). При исследованиях были использованы четыре датчика для одновременных измерений на подушках каждого валка в клетях кварты (опорных и рабочих) и были получены аналитические зависимости, которые позволяют вычислять изменения толщины только по сигналам вибрации на подушках опорных валков. Для большинства случаев вибрация клеток происходит на частотах 100–130 Гц по основной форме колебаний в 3–ей октаве, где верхние и нижние комплекты валков движутся в противофазе.

Разработанный метод включает фильтрацию сигналов акселерометров, интегрирование и некоторые дополнительные операции обработки сигналов, которые позволяют получить достоверные результаты измерений. Точность метода проверена путем прямых измерений толщины образцов по длине полосы, взятых в соответствующие моменты времени прокатки на стане. Было также учтено влияние гидравлической системы изгиба валков, сигналы которой также должны быть введены в систему контроля вибрации.

Диагностика периодических дефектов валков при шлифовании

Одним из ключевых условий обеспечения высоких скоростей при холодной прокатке и дрессировке является качество подготовки валков. На стане 2030 НЛМК был исследован процесс шлифования опорных валков на двух используемых станках. Для диагностики применялся и отработывался известный за рубежом метод выявления периодических дефектов с использованием притертых по образующей валка брусков мела. Были выявлены периодические дефекты поверхности (Рис. 4) вдоль образующей

поверхности валков. Период дефектов зависел от режимов шлифования, поэтому дефекты могут быть устранены изменением режимов обработки. Для этого одновременно с измерениями вибрации проводилась регистрация технологических параметров шлифования:

- скорость подачи каретки;
- нагрузка привода;
- обороты привода круга и валка;

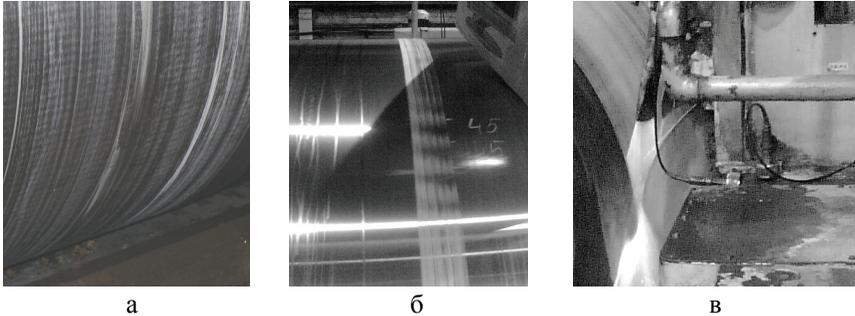


Рис. 4. Диагностика периодических дефектов поверхности опорных валков при шлифовании: а, б) периодические дефекты, выявленные «меловым тестом»; в) измерение вибрации в двух осях на опоре шпинделя круга

Анализ изменения нагрузки привода круга по длине бочки валка за каждый проход и спектральный состав сигналов вибрации в горизонтальном и вертикальном направлении на подшипниковой опоре шпинделя круга показал, что в черновых проходах снижение нагрузки привода круга за счет его текущего износа к концу прохода приводит к усилению колебаний всех сигналов на частоте вращения валка и ее второй гармонике (частота овальности формы валка).

В настоящее время система контроля вибрации модернизирована и может применяться кроме прокатных станов также и на шлифовальных станках. Внедрение системы позволяет вести наблюдение за качеством подготовки валков по периодическим дефектам и выдавать рекомендации с целью корректировки технологического режима шлифования.

Разработка устройств и методов демпфирования вибраций.

Управление станом по сигналам из системы контроля вибрации позволяет поднять средний уровень скорости прокатки до максимально возможного предела, но для увеличения верхнего порога скорости на тонком сортаменте необходимо применение устройств и методов демпфирования вибраций в клетях.

Последние результаты, достигнутые в мире по данному направлению, отражены в материалах конференции по проблеме вибрации в прокатных станах [1], где приводятся сведения, что фирма VAI Siemens после 4-х лет исследований на 5-клетевом непрерывном стане холодной прокатки компании Arcelor (Франция) разработала и опробовала систему подавле-

ния резонансной вибрации. Система по сигналам с акселерометров на подушках валков воздействует на быстродействующие сервоклапаны цилиндров нажимных устройств. Достигнутое при опробовании системы увеличение скорости составило не более 15 м/мин. Последующая отладка на тестовом стенде и оптимизация конструкции системы, по расчетам разработчиков, может дать увеличение скорости стана примерно на 350 м/мин.

С нашей точки зрения, для активного демпфирования резонансных вибраций в клетях более эффективным является использование гидравлической системы уравновешивания опорных валков и принудительного изгиба рабочих валков, имеющих меньшую инерционность по сравнению с нажимными устройствами. Кроме того, известны многочисленные патенты по применению существующих или дополнительных роликов натяжения полосы между клетями для создания противофазных колебаний и демпфирования вибрации в смежных клетях непрерывных станов. Для разработки, изготовления и отладки на действующих и лабораторных станах опытных образцов устройств демпфирования используется производственная база института и НЛМК.

Более простым, хотя и менее эффективным способом снижения вибрации в прокатных станах являются устройства пассивного демпфирования, например на основе полимерных материалов (полиамид ударопрочный).

Один из вариантов устройств демпфирования в виде изнашиваемых полимерных накладок на подушках валков выпускают фирмы Asko (США) и Uniplast (Германия). Фирма SMS Demag (Германия) и несколько фирм Японии (Mitsubishi, Nippon) имеют патенты на плоские гидравлические цилиндры (hydro-liners), которые устраняют горизонтальные колебания подушек валков, но при этом препятствуют вертикальным смещениям валков, ухудшая при этом качество регулирования толщины полосы. Известны также устройства демпфирования вибрации на основе пар трения, предлагаемые фирмой IAS (Австралия).

Разработаны и опробованы на стане 2030 НЛМК различные конструкции полимерных устройств демпфирования, которые устанавливаются под штоками цилиндров уравновешивания опорных валков и штоками изгиба рабочих валков (Рис.5). Выполнена оценка эффективности устройств демпфирования при обкатке и последующей прокатке с демпфирующими элементами в клетях №3,4. Снижение среднеквадратичного уровня вибрации в среднем по различным рулонам составило 8–10%. Установлено также, что с ростом усилия отрицательного изгиба валков действие полимерных элементов на штоках цилиндров уравновешивания снижается, а с ростом положительного изгиба валков – повышается. Поэтому применение демпфирующих устройств наиболее эффективно при работе клеток №3,4 на балансировке (при усилии изгиба +100%), что позволяет снизить не только уровень вибрации в клетях, но и высокочастот-

ные дефекты поверхности полос, возникающие на частотах подшипников качения рабочих валков.

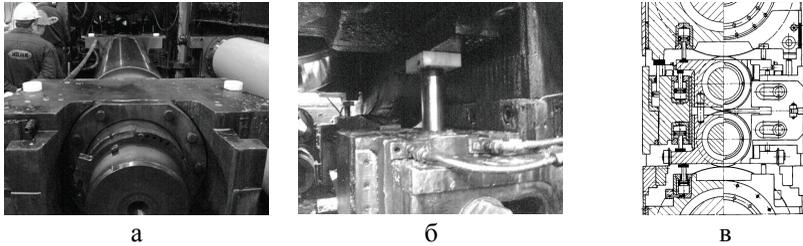


Рис.5. Полимерные устройства демпфирования вибраций и места их установки в клетях кварто стана 2030 НЛМК: а) полимерные вкладыши под штоками цилиндров изгиба валков; б) полимерные вставки под штоками цилиндров уравнивания; в) схема клетки кварто с указанием мест установки демпферов

Выполнено опробование демпферов в виде полимерных изнашивающихся плит (накладок) на подушках рабочих валков в клетях №3,4. Эксплуатация полимерных изнашивающихся накладок с апреля 2007г. на двух комплектах подушек рабочих валков показала их работоспособность и стойкость к воздействию эмульсии и масел. Положительный эффект при их использовании заключается в демпфировании горизонтальных перемещений подушек рабочих валков при колебаниях натяжений полосы, снижение ударов в подшипниковых опорах валков при обрывах полос клетей. В настоящее время отрабатывается конструкция креплений, которые позволят без лишних затрат времени при заменах валков производить установку устройств в процессе их постоянной эксплуатации на клетях кварто.

Изменение схемы обжатий в клетях для снижения вибраций.

Для определения влияния обжатий и натяжений по клетям (в пределах расчетной схемы обжатий) была проведена опытная прокатка 33-х партий металла, в процессе которой изменяли (перераспределяли) обжатия в клетях и снижали величину межклетьевого натяжения. Оператору стана было дано указание вести прокатку на максимально допустимой скорости, ограниченной переходом вибраций в опасную фазу. Диагностику перехода осуществляли автоматически по сигналу на снижение скорости, который выдается из СКВ в АСУ ТП стана, и одновременно визуально по монитору на главном посту.

Экспериментальную прокатку проводили в конце кампании опорных валков, когда для 5-клетьевого стана 2030 пороговая скорость развития неустойчивых вибраций закономерно снижается по сравнению с началом кампании на 150–200 м/мин, поэтому составляла менее 1200 м/мин. Установлено, что перераспределение обжатий даже в относительно небольшом диапазоне оказывает влияние на пороговую скорость, при которой вибрации на стане переходят в неустойчивую (опасную) фазу. Увеличение об-

жаций в клетях №1–3 с одновременной уменьшением в клети №4 привело к повышению скорости. Увеличение обжатия в клети №3 и в клети №4 с одновременным уменьшением обжатия в клети №2 приводит к обратному результату – максимальная скорость прокатки снизилась. В среднем при снижении обжатий в клетях №3,4 за счет их повышения в клетях №1,2 удастся повысить скорость стана на 20 м/мин на каждые 1% снижения обжатия. Более точные данные зависимости достигаемой скорости прокатки от изменения обжатий по клетям могут быть получены при реализации обмена данными о настройках режима прокатки и рекомендуемыми в СКВ стана 2030 их изменениями в зависимости от уровней вибрации.

Изменение натяжений между клетями для снижения вибраций.

В работе [2] проведен анализ устойчивости к резонансным вибрациям на модели непрерывного 5–клетьевого стана. Устойчивость к резонансу оценивалась по интервалу с момента поступления возмещения в стан (участок разнотолщинности) до момента нарастания колебаний, при которых полоса рвется. Результаты расчетов показали, что натяжения (их влияние на усилие прокатки и положение валков) играют главную роль в механизме самовозбуждения колебаний в непрерывном стане. Причем заднее натяжение влияет сильнее, а переднее меньше, но вызывает явление модуляции амплитуды колебаний в клетях. Установлено, что основное влияние оказывают натяжение между клетями 4 и 5, скорость прокатки и коэффициент трения. Существует уровень натяжения σ_{4-5} (порядка $1,3 \text{ кгс/мм}^2$), при котором усилие вибрации от возмущения при всех прочих равных условиях не наступает. Снижение натяжения σ_{4-5} на $0,5 \text{ кгс/мм}^2$ давало по расчетам увеличение критической скорости прокатки на 200–250 м/мин. Увеличение коэффициента трения повышает устойчивость к вибрациям. Но при этом он не должен быть достаточно большим, чтобы не вызвать появления тепловых рисков на высокой скорости.

С целью проверки указанных зависимостей стабильности от технологических параметров на стане 2030 при прокатке тонкого сортамента выполнили варьирование натяжения между клетями №4–5. Уменьшение удельного натяжения между клетями №4–5 на $0,5 \text{ кгс/мм}^2$ позволило увеличить пороговую скорость прокатки примерно на 40–50 м/мин. При этом установлено, что резкое изменение технологических параметров даже в нужном направлении, но в процессе прокатки, а не между рулонами, может наоборот спровоцировать стан к резонансу. Поэтому изменения параметров настройки стана следует производить между прокаткой рулонов.

Выводы.

1. Повышение пороговой скорости прокатки на высокоскоростных станах холодной прокатки и дрессировки полос может быть обеспечено только внедрением стационарных систем контроля вибрации, обладающих развитыми функциями диагностики оборудования и автоматического управления технологическим процессом.

2. Установлено, что на достигаемую скорость прокатки влияют демпфирующие свойства материала полосы в очаге деформации, которые зависят от жесткости материала, соотношения пластической и упругой деформации с учетом упрочнения полосы по клетям стана.

3. Снижение уровней вибрации и повышение пороговой скорости прокатки при различном техническом состоянии оборудования и валков может быть достигнуто внедрением устройств и методов активного и пассивного демпфирования колебаний в клетях станов.

4. Достигаемый уровень скорости прокатки зависит от качества подготовки валков по периодическим дефектам. Для устранения в процессе подготовки валков периодических дефектов поверхности необходимо контролировать вибрацию и технологические параметры на шлифовальных станках.

1. *Vibration in Rolling Mills*. Proc. of International Conference // Institute of Materials, Minerals and Mining, London, 9–11 November, 2006.
2. *CHEFNEUX, L., FISCHBACH, J.-P.* Study and industrial control of chatter in cold rolling // *Iron and Steel Eng.*, Vol. 61, No. 11, Nov. 1984, pp. 17–26.

Статья рекомендована к печати канд.техн.наук. В.В.Вереневым