ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol.27, 2019, №7-9 (314-316), 69-74 https://doi.org/10.15407/steelcast2019.07.069

УДК 624.771.06

В.В. Веренев, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., ст. науч. сотр., e-mail: verenev0704@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2561-5365

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Днепр, Украина)

Прокатный стан – источник познания вибродинамических процессов

Задача статьи состоит в том, чтобы на примере широкополосного стана 1680 металлургического комбината «Запорожсталь» показать, что натурные измерения позволяют получить весьма ценную и полезную информацию о вибродинамических процессах в оборудовании. Для достижения этой цели в качестве основных параметров на стане измерялись момент сил упругости на валу между двигателем и редуктором и вибрация в различных точках корпуса шестеренной клети и редуктора. Это позволило установить особенности переходных процессов во время захвата полосы валками и при взаимодействии клетей черновой группы через толстую прокатываемую полосу. Показана связь износа и зазоров в линии привода с временем запаздывания реакции вибродатчиков на ударную нагрузку при захвате полосы, которое принято в качестве диагностического признака. Выявлена корреляционная зависимость максимального динамического момента при захвате полосы от момента в установившемся режиме прокатки, позволяющая вести мониторинг нагрузок с учетом технического состояния линии привода. Показано, что совместные измерения момента и вибрации в разных точках редуктора и шестеренной клети в переходных режимах позволяют установить взаимосвязи в упругих системах прокатной клети, обладающие диагностическими свойствами. Путем измерений моментов и вибрации в черновых клетях показана эффективность уменьшения ударных нагрузок при прокатке слябов с фигурной передней кромкой. Значение натурных измерений в действующих прокатных станах состоит не только в установлении фактической картины колебательных процессов и уровня нагрузок, но и в разработке математических и компьютерных моделей заполнения полосой непрерывной группы клетей, статистическом моделировании, поиске новых способов диагностирования оборудования. В больших массивах измерений всегда содержатся скрытые закономерности, обладающие новизной и существенной информативностью. Приведены примеры научных выводов на базе измерений.

Ключевые слова: *прокатный стан, измерения, динамика, колебания, максимальный момент, диагностика, мониторинг, моделирование.*

Введение. Известно, что захват полосы валками сопровождается существенными ударными нагрузками, прежде всего в линии главного привода клети прокатного стана. Общепризнано, что максимальные пиковые моменты в этот период являются одним из основных факторов, отрицательно влияющих на долговечность оборудования. В связи с этим много внимания уделяется исследованиям динамических процессов при захвате полосы и во время заполнения непрерывной группы клетей полосой. Однако опытно-промышленные измерения динамических параметров в клетях прокатных станов выполняются преимущественно при решении конкретной задачи, например, определении максимальных нагрузок в линии главного привода валков, если происходят поломки оборудования. При таком ограниченном подходе к измерениям не удается глубоко и детально исследовать динамику оборудования в широком диапазоне ее проявления с учетом разнообразия технологии и состояния оборудования.

Поставленная задача состоит в том, чтобы показать насколько разнообразную и полезную информацию о динамических процессах можно получить путем опытно-промышленных натурных измерений на примере одного из старейших станов, работающего с 1938 года. Непрерывный широкополосный стан горячей прокатки 1680 комбината «Запорожсталь» за свою историю прошел ряд этапов совершенствования и развития. Скромный 10-летний юбилей стана в 1948 году был отмечен его полным послевоенным восстановлением и выпуском двух почтовых марок. Наступление 20-летия знаменательно тем, что стан стал первенцем среди станов, на котором во всех клетях были выполнены измерения крутящего момента [1, 2]. Впервые также был установлен факт упругих крутильных колебаний механического момента на шпинделях и промежуточном валу, их частота и затухание, определены коэффициенты динамичности, отмечено влияние зазоров в шпиндельном сочленении на увеличение ударных нагрузок. С этого времени периодическое внедрение новых технологий сопровождалось системными измерениями динамических процессов.

Результаты исследований. Наиболее интенсивные и регулярные исследования путем опытно-промышленных измерений на стане выполнялись с 1990 года, когда внедрялись новые энергосберегающие технологии, в частности, прокатка слябов транзитом без дополнительного нагрева в печах, непрерывная прокатка в парах черновых клетей, освоение работы промежуточного перемоточного устройства типа "Coilbox". Главное в методике проведения работ

заключалось в измерениях крутящего момента в прокатных клетях на валу между редуктором и двигателем и вибрации корпусного оборудования вдоль линии привода с регистрацией параметров на персональный компьютер. Одновременно фиксировались технологические параметры (сорторазмер, скорость прокатки, обжатие и др.). Массовые измерения с учетом особенностей технологий и состояния оборудования, новые приемы обработки параметров и визуализации позволили установить ряд особенностей переходных процессов и их информативности, количественных соотношений и статистических закономерностей. Цель подобных измерений состоит в том, чтобы на основании знаний о фактических процессах совершенствовать режимы работы оборудования, технологию, улучшать качество проката и развивать способы диагностики.

Главные выводы и решения, представляющие собой новые знания, состоят в следующем.

1. При заполнении и непрерывной прокатке толстой полосы (от 110 до 50 мм) удвоенной длины в парах черновых клетей установлены особенности динамики взаимодействия главных линий (рис. 1). Между клетями ДУО – № 1 при небольшом расстоянии (6 м) проявляется существенная «отдача» через толстую полосу от быстрого формирования подпора или натяжения. Особенность технологии в паре ДУО – № 1 состоит в том, что полоса (сляб) удвоенной длины с целью сохранения температуры задается в клеть ДУО с бóльшей скоростью, чем при одиночной прокатке слябов обычной длины. Это приводит к размыканию зазоров и увеличению ударных нагрузок, что явилось поводом создания способа диагностирования состояния шпиндельного участка линии привода.

Расстояние между другими клетями большее (19 и 25 м), полоса тоньше, однако реакция клетей № 2 и № 3 заметна в виде биений момента. В клетях № 3 и № 4 после одного-двух первых пиков момент кратковременно падает до нуля, в отдельные периоды наблюдаются обратные удары. При определенных условиях они проявляются систематически. Это указывает на увеличение износа и зазоров в зубчатых зацеплениях на участке двигатель – редуктор. Для их диагностирования предложен способ, учитывающий изменение формы и вида колебаний.

2. Совместные измерения вибрации корпусного оборудования вдоль линии привода и момента показали запаздывание реакции участков линии привода по отношению к ударной нагрузке в клети при захвате полосы (рис. 2). Установлено, чем больше износ и зазоры, тем больше время запаздывания, то есть тем большее время необходимо на замыкание зазоров. В результате разработан и путем измерений проверен новый не имеющий аналогов диагностический признак – время запаздывания и способы диагностирования состояния сочленений по этому признаку [3].

3. Более глубокие познания вибродинамических процессов на основе массовых измерений привели к обоснованию и разработке нового направления – диагностирования состояния прокатного оборудования и технологии в переходных режимах работы. Разработаны два десятка новых способов. В частности, определение состояния оборудования линии привода и стабильности технологии прокатки по трем коэффициентам вариации: динамического момента $\nu_д$, статического момента $\nu_{ст}$ и коэффициента динамичности $\nu_к$ [4].

4. Установлена корреляционная связь максимального динамического момента $М_д$ при захвате полосы валками и момента $М_{ст}$ в установившемся режиме прокатки (рис. 3). Формирование корреляционных полей {$М_д$, $М_{ст}$} подтверждается статистическим моделированием динамики захвата полосы валками. В результате разработан расчетно-эмпирический метод определения $М_д$, в нем, что очень важно, учитывается фактический, то есть измеряемый момент $М_{ст}$ главного привода [5].

Значение этого метода состоит в следующем. Ввиду отсутствия на станах штатных измерителей механического крутящего момента, оборудование эксплуатируется без знания уровня максимальных динамических нагрузок $М_д$. Последние существенно зависят от технологии и рассеяния ее параметров и состояния оборудования. Нестабильность технологии в партиях полос одной плавки, а также

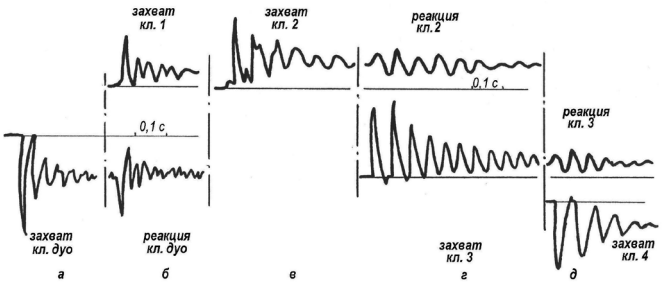

Рис. 1. Взаимодействие главных линий клетей ДУО – № 1, № 2 – № 3 и № 3 – № 4 стана 1680 при захвате полосы валками в режиме непрерывной прокатки

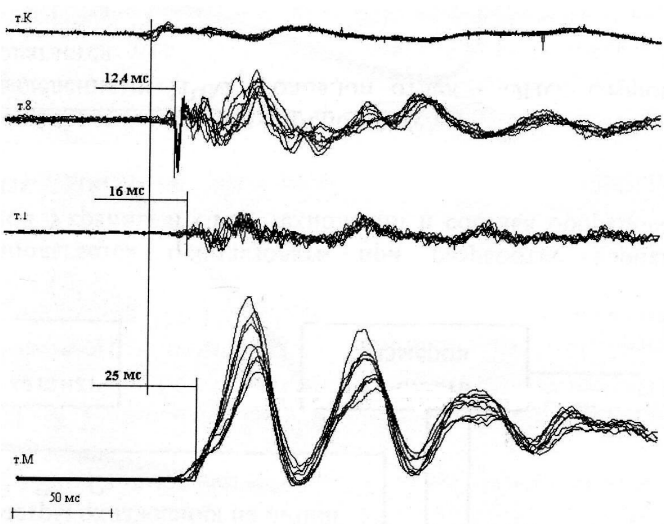

Рис. 2. Наложение 10-ти переходных процессов при захвате полосы в клети № 3: вибрация рабочей клети (*К*), шестеренной клети (8), опоры быстроходной шестерни редуктора (*1*); М – момент сил упругости

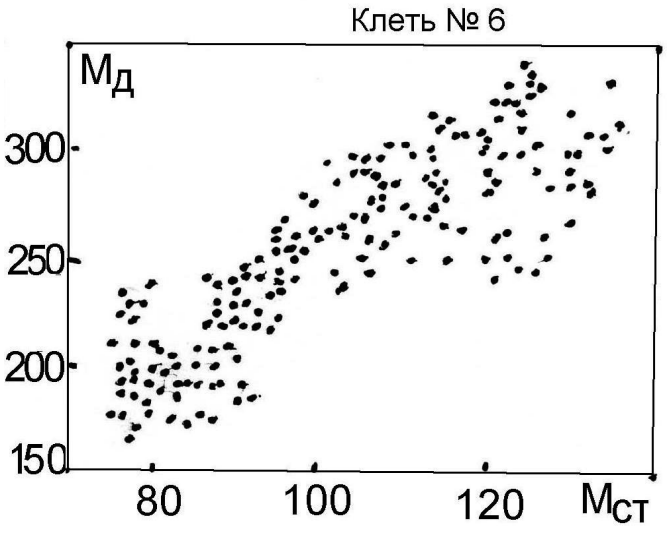

Рис. 3. Корреляционное поле измеренных значений максимального момента сил упругости $М_д$ на промежуточном валу и момента $М_{ст}$ в установившемся режиме прокатки (кН·м)

переходы к прокатке других сортоpазмеров учитываются в фактических значениях $М_{ст}$. Износ и зазоры определяются путем их диагностирования. С учетом этих факторов путем статистического моделирования с большой вероятностью определяются значения $М_д$, ведется построение корреляционных полей и их аппроксимация $М_д(М_{ст})$.

Знания зависимости $М_д(М_{ст})$ в каждой клети непрерывного стана позволяет: а) вести мониторинг $М_д$ и прогнозировать развитие ударных нагрузок; б) корректировать режим обжатий, если в одной-двух клетях $М_д$ приближается к предельно допускаемому значению; в) оценивать возможность прокатки новых сортоpазмеров полос по динамическому критерию; г) формировать годовую упорядоченную нагрузочную диаграмму, необходимую для расчета ресурса оборудования и на прочность.

5. На основании измерений установлена взаимосвязь переходных процессов в упругих системах: линии привода, станины клети, опоры валков – боковые накладки, болты редуктора и вибрации в ряде точек оборудования. При нормальном техническом состоянии узлов линии (непосредственно после ремонта) во всех системах наблюдаются пик ударной нагрузки и последующие затухающие колебания с частотой линии главного привода (рис. 4). По мере работы стана и износа сочленений вид колебаний заметно искажается. В частности, появляется высокочастотная составляющая, обусловленная увеличивающимися зазорами, изменяется амплитуда и период колебаний. В итоге по тренду вида процессов предложено делать достаточно правильное заключение о состоянии участков шпиндель – редуктор и редуктор – двигатель [6].

6. Установлено, что от точности настройки деформационно-скоростного режима чистовых клетей зависит динамика взаимодействия главных линий через прокатываемую полосу в период заполнения группы полосой. Измерениями показано, что изменение скорости клетей в установившемся режиме

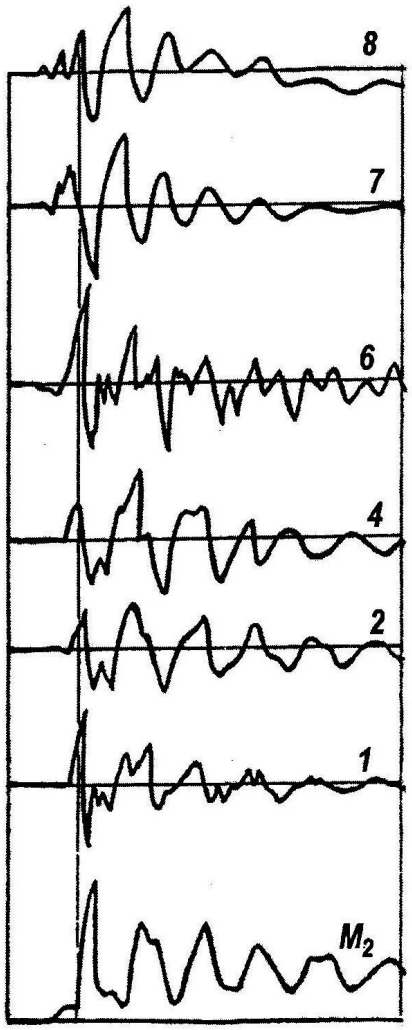

Рис. 4. Совместная запись момента сил упругости М на промежуточном валу между двигателем и редуктором и вибрации шестеренной клети (*7, 8*) и корпуса редуктора (*1, 2, 4*) при захвате полосы валками в клети № 2

прокатки приводит к отклонению по длине толщины готовой полосы на выходе из стана до 0,3–0,5 мм. Разработан метод определения координаты начала изменения толщины и ее корректировки при последующей обработке на непрерывном стане холодной прокатки.

7. В черновых клетях стана выполнена опытная прокатка слябов с фигурной передней кромкой. Измерениями показана существенная эффективность такого способа. В клетях ДУО № 1, 2 и 3 относительная динамическая составляющая ударной нагрузки уменьшалась от 1,4–2,2 до 2,1–3,8 раза по сравнению с прокаткой слябов с прямой кромкой (рис. 5). Предложены способы формирования фигурной кромки в потоке производства слябов [3, 4].

Выводы

Выявленные путем измерений новые особенности и закономерности переходных процессов на стане 1680 способствовали в свою очередь развитию теоретических исследований и решению ряда задач.

1. Обосновать и разработать новое направление

в диагностике технического состояния оборудования прокатных станов, основанное на переходных процессах при захвате полосы валками и взаимодействии клетей через прокатываемую полосу. Предложены способы диагностирования, разработаны алгоритмы и правила распознавания ТС оборудования, интегрируемые в существующие системы диагностики роторных машин.

2. Разработать математическую и компьютерную модели переходных процессов в линии привода валков совместно с динамикой в зубчатом зацеплении и цапф редуктора. Они являются также диагностическими моделями для исследования влияния различных факторов (поломка зубьев, зазоры в подшипниках и др.) на колебательные процессы и поиска новых способов и методов диагностирования.

3. Разработать компьютерную программу статистического моделирования динамики захвата полосы валками и на ее основе метод построения корреляционных полей и мониторинга максимальных динамических нагрузок на всех участках линии привода.

4. Впервые создать компьютерную модель (в абсолютных значениях переменных) динамики взаимодействия клетей во время заполнения, прокатки и освобождения полосой непрерывной группы и исследовать особенности процесса транспортного запаздывания, переноса толщины и формирования межклетевых натяжений совместно с толщиной, которые на станах горячей прокатки непосредственно не измеряются.

5. Идентифицировать математические модели, включая статистические и компьютерные программы, адаптировать их к конкретным станам и обеспечить высокую точность и достоверность расчетов.

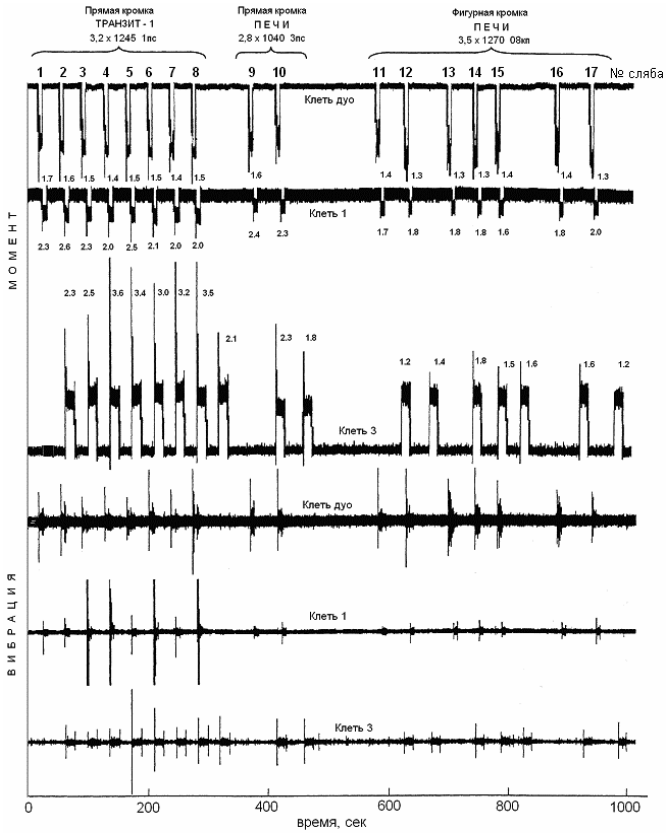

Рис. 5. Момент сил упругости на промежуточном валу и вибрация корпуса редуктора в клетях ДУО – № 1 и 3 стана 1680 при прокатке слябов с прямой и фигурной передней кромкой. Значения коэффициента динамичности для каждого сляба приведены рядом с кривыми

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кожевников С.Н., Скичко П.Я.* Экспериментальное исследование главных линий чистовой группы клетей непрерывного тонколистового стана 1680 завода «Запорожсталь». *Изв. вузов. Черная металлургия.* 1961. № 12. С. 179–184.
2. *Кожевников С.Н.* Динамика машин с упругими звеньями. Киев: АН УССР, 1961. 312 с.
3. *Веренев В.В., Большаков В.И., Маншилин А.М., Путноки А.Ю., Мацко С.В.* Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680. Днепропетровск: ИМА–пресс, 2011. 184 с.
4. *Веренев В.В.* Снижение динамических нагрузок и диагностика широкополосных станов в переходных режимах. Никополь: СПД Фельдман О.О., 2014. 203 с.
5. *Веренев В.В., Подобедов Н.И., Коренной В.В.* Расчетно-эмпирический метод определения динамических нагрузок в прокатных клетях. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* ИЧМ. 2014. Вып. 28. С. 206–210.
6. *Веренев В.В., Баглай А.В.* Динамика парциальных упругих систем в прокатных клетях. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2018. № 7. С. 104–107.

Поступила 19.09.2019

REFERENCES

1. *Kozhevnikov, S.N., Skichko, P.Ya.* (1961). An experimental study of the main lines of the finishing group of stands of a continuous sheet mill 1680 of the Zaporizhstal plant. *Izv. universities. Ferrous metallurgy,* no. 12, pp. 179–184 [in Russian].
2. *Kozhevnikov, S.N.* (1961). The dynamics of machines with elastic links. Kyiv: AN USSR, 312 p. [in Russian].
3. *Verenev V.V., Bolshakov V.I, Manshilin A.M., Putnoki A.Yu., Matsko, S.V.* (2011). Dynamic processes in the stands of broadband mill 1680. Dnepropetrovsk: IMA – press, 184 p. [in Russian].
4. *Verenev, V.V.* (2014). Dynamic load reduction and diagnostics of broadband mills in transient conditions. Nikopol: SPD Feldman O.O., 203 p. [in Russian].
5. *Verenev, V.V., Podobedov, N.I., Korennoy, V.V.* (2014). Calculation-empirical method for determining dynamic loads in rolling stands. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy.* ISI, iss. 28, pp. 206–210 [in Russian].
6. *Verenev, V.V., Baglay, A.V.* (2018). The dynamics of partial elastic systems in rolling stands. *Metallurgical and mining industry,* no. 7, pp. 104–107 [in Russian].

Received 19.09.2019

Анотація

В.В. Вереньов, д-р техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр.,
e-mail: verenev0704@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2561-5365

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Прокатний стан – джерело пізнання вібродинамічних процесів

Задача статті полягає в тому, щоб на прикладі широкосмугового стану 1680 металургійного комбінату «Запоріжсталь» показати, що натурні вимірювання дозволяють отримати дуже цінну і корисну інформацію про вібродинамічні процеси в обладнанні. Для досягнення мети в якості основних параметрів на стані вимірювалися момент сил пружності на валу між двигуном та редуктором і вібрація в різних точках корпусу шестеренної кліті і редуктора. Це дозволило встановити особливості перехідних процесів під час захоплення полоси валками і при взаємодії клітей чорнової групи через товсту полосу. Показано зв'язок зносу і зазорів в лінії приводу з часом запізнювання реакції вібродатчиків на ударне навантаження при захопленні полоси, який прийнято в якості діагностичної ознаки. Виявлено кореляційну залежність максимального динамічного моменту при захопленні полоси валками від моменту в сталому режимі прокатки, що дозволяє вести моніторинг навантажень з урахуванням технічного стану лінії приводу. Показано значення спільних вимірів моменту і вібрації для встановлення взаємозв'язків пружних систем в перехідних режимах, які мають діагностичні властивості. Шляхом вимірювань моментів та вібрації в чорнових клітях показано ефективність зменшення ударних навантажень при прокатці слябів з фігурною передньою кромкою. Значення натурних вимірювань в діючих прокатних станах полягає не тільки у встановленні фактичної картини коливальних процесів і рівня навантажень, але і у розробці математичних і комп'ютерних моделей заповнення полосою безперервної групи клітей, статистичному моделюванні, пошуку нових способів діагностування обладнання. У великих масивах вимірювань завжди містяться приховані закономірності, які мають важливу новизну та інформативність. Наведено приклади наукових висновків на базі вимірювань.

Ключові слова

Прокатний стан, вимірювання, динаміка, коливання, максимальний момент, діагностика, моніторинг, моделювання.

V.V. Verenev, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher, e-mail: verenev0704@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2561-5365

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Rolling mill – source of knowledge of vibrodynamic processes

Summary

Using the example of the wide strip mill 1680 of the Zaporizhstal metallurgical plant, it is shown that field measurements allow one to obtain very valuable and useful information about the vibrodynamic processes in the equipment. As the main parameters of the mill, the moment of elastic forces on the shaft between the engine and the gearbox and the vibration at different points of the gear stand and gearbox housing were measured. The features of transients during the capture of the strip by rolls and during the interaction of the stands of the rough group through a thick rolling strip are established. The relationship of wear and gaps in the drive line with the time delay of the vibration sensors reaction to the shock load when capturing the strip is shown. The correlation dependence of the maximum dynamic moment when the strip is captured on the moment in the steady rolling mode is revealed, which allows monitoring loads taking into account the technical condition of the drive line. The value of joint measurements of the moment and vibration for the establishment of interconnections of elastic systems in transition modes, in particular, when rolling slabs with a curly leading edge, is shown. The importance of full-scale measurements in existing rolling mills consists not only in establishing the actual picture of oscillatory processes and the load level, but also in developing mathematical and computer models for filling a continuous group of stands with a strip, statistical modeling, and searching for new ways to test equipment. Large arrays of measurements always contain hidden patterns that have novelty and substantial informational content. Examples of scientific conclusions based on the measurements are given.

Keywords

Rolling mill, measurements, dynamics, oscillations, maximum torque, diagnostics, monitoring, modeling.