

УДК 621.771.06:681.5.015

**В. Большаков, докт. техн. наук; В. Веренев, докт. техн. наук**

*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАНУ*

## **ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОКАТНЫХ СТАНАХ И ИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

**Резюме.** Приведены некоторые результаты измерений момента сил упругости в главных линиях клетей прокатных станов и вибрации оборудования при захвате полосы валками. Установлен ряд особенностей переходных процессов, связанных с технологией прокатки и состоянием оборудования. Получены и обоснованы новые информативные и диагностические признаки.

Впервые предложено и обосновано в качестве диагностического признака использовать время запаздывания реакции участков линии привода на ударную нагрузку.

Разработаны и в промышленных условиях опробованы новые методы и способы диагностики угловых зазоров.

**Ключевые слова:** прокатный стан, линия привода, колебания, вибрация, диагностика, техническое состояние, износ, зазоры.

**V. Bolshakov, V. Verenev**

## **THE FEATURES OF DYNAMIC PROCESSES IN ROLLING MILLS AND THEIR DIAGNOSTIC PROPERTIES**

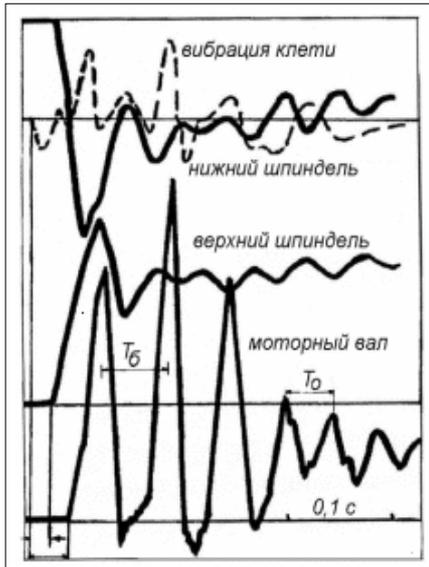
**Summary.** The results of measurements of the elastic force moment in the main line of the drive stand of rolls and equipment vibration when biting of band by rollers are provided. A number of features of transients associated with the technology of rolling and condition of the equipment is identified. New symptoms and diagnosis information are received and justified.

For the first time the usage of time delay reaction in the biting of band rollers is proposed and justified as a diagnostic indicator. The time delay depends on the equipment wear and corner clearance. The larger the angular clearance the greater the delay time. Time lag is defined by signals of measurement of torque on the driving shafts, and by the vibration sensors. The sensors are mounted on a rolling stand and frame along the main line of the drive stand of rolls. The regularities of changes in the dynamic coefficient and delay time of the drive stand of rolls with the wear and angular clearances on the spindle and motor areas are set.

New methods and ways to diagnose angular clearances based on measuring the moment of elastic force and vibration equipment are developed and tested in an industrial setting. An algorithm for diagnosing the technical condition of the spindle and motor areas as measured transients is developed. The method is recommended for systems of vibration diagnostics development.

**Key words:** rolling mill, drive line, oscillations, vibrations, diagnostics, technical state, wearing, gaps.

**Вступление.** Оборудование клетей прокатных станов работает в режимах, соответствующих технологическому процессу. Например, захват полосы валками, разгон стана, установившийся режим прокатки, торможение стана до определенной скорости для прокатки участка полосы со сварным соединением, повторный разгон и торможение, выход полосы из валков, холостой режим работы, захват валками новой полосы и т.д. Во всех режимах в той или иной степени в оборудовании наблюдаются динамические процессы. В наибольшей мере они проявляются во время захвата полосы валками. При этом существенное влияние на уровень динамических нагрузок, особенно в линии главного привода валков, оказывает техническое состояние оборудования: износ и зазоры в шпиндельном сочленении и в зубчатых зацеплениях редукторов и муфт, износ валковых опор и стоек станины и др. Если в начальный период работы стана после ремонта, когда зазоры наименьшие, коэффициент динамичности, например, на моторном участке составляет 1,5...2,3, то перед ремонтом из-за износа он достигает 3,5...5 (рис. 1).



**Рисунок 1.** Переходний процес по моменту сил упругости на моторном участке, верхнем и нижнем шпинделе в черновой клетке 4 широкополосного стана горячей прокатки 1700

**Figure 1.** Transient process of elastic force moment in motor division, in upper spindle and lower one in rougher stand 4 of broad-strip hot-rolling mill 1700

Анализ публикаций показывает, что в сложившихся новых экономических отношениях в последние 15 – 20 лет существенно уменьшился интерес металлургических комбинатов к хоздоговорным работам, направленным на уменьшение ударных нагрузок, защиту прокатного оборудования от поломок, разработку новых методов диагностирования состояния оборудования. Существенно сократились измерения вибродинамических процессов в прокатных станах. В работах [1, 2] дано обобщение результатов ранее полученных исследований. Все же, несмотря на трудности, указанное направление исследований развивается, о чем свидетельствуют работы [3, 4]. Предложены, обоснованы и проверены в промышленных условиях на действующих станах новые защитные устройства от поломок [3], способы уменьшения динамических нагрузок [5] и диагностики [4, 5, 7]. Для вибрационного диагностирования прокатных станов применяются, однако явно недостаточно и лишь в стационарных режимах, стандартные методы и приборы [6]. Прокатные клетки работают в режиме периодически повторяющихся ударных нагрузок,

обусловленных захватом валками очередной полосы. Естественно использовать параметры переходных процессов в диагностических целях.

Цель данной работы – показать, каким образом могут быть использованы переходные процессы и их параметры для разработки новых способов диагностирования состояния оборудования прокатных станов.

В результате многочисленных опытно-промышленных измерений на ряде станов, в том числе и на непрерывных широкополосных (1680, 1700, 2000, 2500), в Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова НАНУ, г. Днепропетровск, разработан ряд методов и способов диагностирования технического состояния оборудования, основанных на выявленных особенностях и закономерностях переходных процессов [4, 5]. Во время исследований наибольшее внимание уделялось измерению момента сил упругости в линии главного привода валков и вибрации корпусного оборудования шестеренной клетки, редуктора и двигателя.

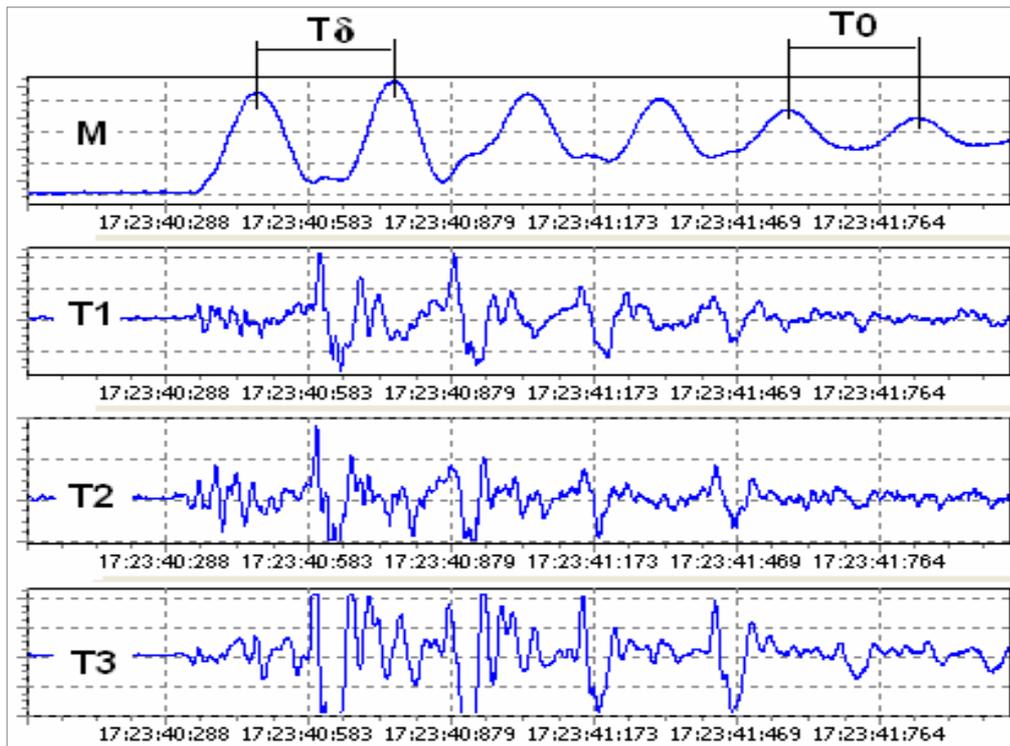


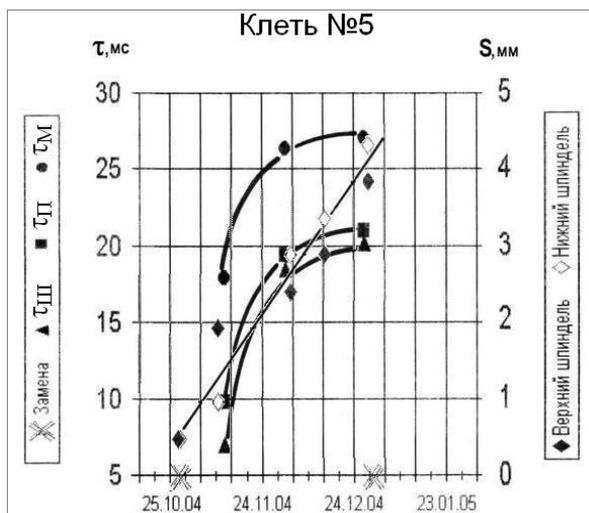
Рисунок 2. Момент сил упругости на моторном участке М и виброскорость корпуса редуктора Т1, Т2 и шестеренной клетки Т3. Клеть 5 стана 1680

Figure 2. Moment of elastic force in motor division M and vibration speed of reduction gear case T1, T2 and of pinion stand T3. Stand 5 of Rolling mill 1680

1. С увеличением износа сочленяемых элементов и как следствие угловых зазоров вид колебаний момента сил упругости трансформируется от типового затухающего осциллятора к процессу, изображенному на рис. 1. Здесь после первых двух-трех пиков момента вал между редуктором и двигателем кратковременно разгружается с формированием отрицательного пика, соизмеримого с моментом в установившемся режиме прокатки. Подобное явление иногда наблюдается на нижнем шпинделе. Период  $T_{\delta}$  между первыми пиками колебаний момента увеличивается. Отношение периода  $T_{\delta}$  к периоду  $T_0$  свободных колебаний момента (рис. 1, 2) с увеличением износа и размыканием зазоров заметно увеличивается – от  $1,0 \dots 1,05$  до значений  $1,3 \dots 1,5$ . Это дало основание принять отношение  $T_{\delta}/T_0$  и его изменение в процессе эксплуатации стана в качестве диагностического признака. Получена расчетная зависимость  $T_{\delta}/T_0$  от углового зазора  $\delta$ , порождаемого износом во время работы стана, которая положена в основу одного из способов диагностирования состояния линии привода.

2. Установлено, что имеет место запаздывание реакции момента на шпинделях и моторном участке относительно ударной нагрузки, действующей на валки во время захвата полосы. Чем больше зазор, тем больше необходимо времени на его замыкание и тем больше время запаздывания  $\tau$  реакции участков линии. Это подтверждают результаты моделирования переходных процессов и прямых измерений на действующих станах вибрации корпусного оборудования вдоль линии (рис. 2) совместно с измерением износа бронзовых вкладышей (во время перевалки валков).

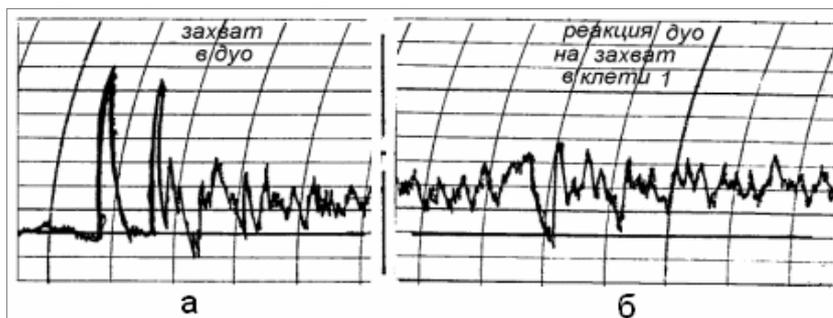
Как видно из рис. 3, на шпиндельном участке время  $\tau$  увеличилось от 7 мс до 20 мс, на моторном – от 17,5 мс до 27 мс. Периодические измерения  $\tau$  позволяют отслеживать тенденцию развития износа сочленений и зазоров на участках линии и определять их значение путем сравнения с расчетными зависимостями (рис. 3).



**Рисунок 3.** Изменение времени запаздывания реакции шпиндельного  $\tau_{ш}$ , промежуточного  $\tau_{п}$  и моторного  $\tau_{м}$  участков и износа  $\delta$  бронзовых вкладышей во время работы клетки 5 стана 1680

**Figure 3.** Changing of reaction dead time of spindle division  $\tau_{ш}$ , of interstitial division  $\tau_{п}$  and motor one  $\tau_{м}$  and wear  $\delta$  of bronze bearing bushes during of stand 5 of rolling mill 1680 working

3. При непрерывной прокатке захват толстой полосы валками следующей клетки сопровождается формированием существенного продольного усилия в полосе, находящейся в межклетевом промежутке. Как скачкообразное возмущение оно действует на валки предыдущей клетки (рис. 4).



**Рисунок 4.** Изменение максимального момента сил упругости при захвате полосы (а) и взаимодействии (б) черновых клетей дуо и 1 стана 1680

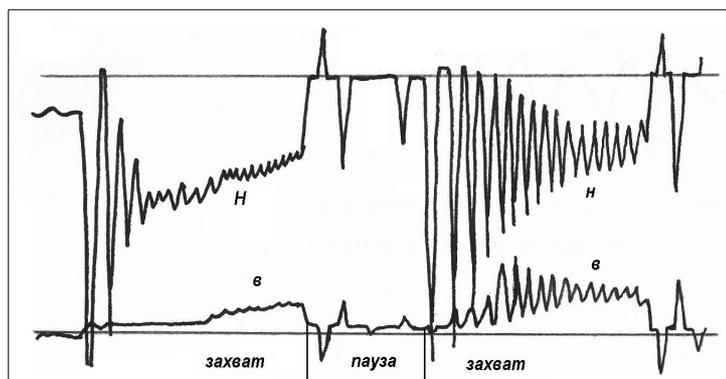
**Figure 4.** Changing of maximum elastic force moment when biting (a) and when rougher stands duo-1 and rolling mill 1680 are interacting (б)

Ввиду того, что зазоры в линии этой клетки замкнуты, время запаздывания реакции участков существенно меньше, чем при захвате полосы валками с холостого режима. Учет данной особенности позволяет сразу по одной серии измерений (для набора статистики) оценить величину зазора, ориентируясь на расчетную зависимость  $\tau(\delta)$ . Другим подтверждающим параметром является коэффициент динамичности  $K$  в линии привода, среднее значение которого в рассматриваемой клетке при проявлении зазоров составило  $K1_{ср}=5,5$ , а при взаимодействии клетей  $K2_{ср}=1,9$  (рис. 4).

4. В некоторых клетях для прокатки тонких полос рабочие валки сводят с определенным усилием (в «забой»), чтобы в холостом режиме вращения их бочки касались. Вращающий момент от двигателя к шпинделям и валкам передается через шестеренную клетку. Ввиду незначительного неравенства диаметров момент на холостом ходу передается обоим валкам через шпиндель валка большего диаметра, зазоры в его ветви оказываются выбранными. В линии валка меньшего диаметра зазоры размыкаются. Когда происходит захват полосы, ветви нагружаются

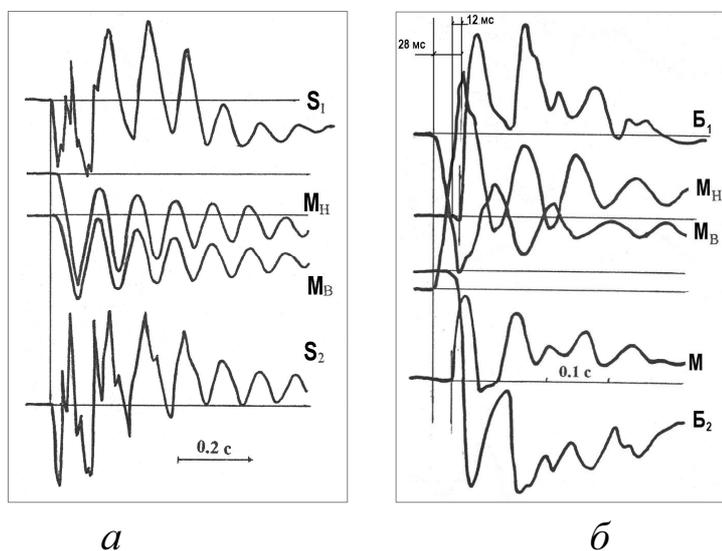
неравномерно, динамические процессы в них существенно различаются, что хорошо видно на рис. 5.

**Рисунок 5.** Момент сил упругости на верхнем (в) и нижнем (н) шпинделях стана 2800 полистой прокатки стальных карточек при захвате и выбросе полосы из валков, находящихся в «забое»



**Figure 5.** Moment of elastic force in the upper (в) and lower spindle (н) of rolling mill 2800 with one-sheet rolling of steel cards when biting and ejecting of band at the confined rollers

Переходные процессы в прокатных станах достаточно полно описаны (С.Н. Кожевников, В.И. Большаков, С.Л. Коцарь и др.) математическими моделями. Последние одновременно являются фактически и диагностическими моделями, т.к. в них учтены как параметры технологии и оборудования, так и технического состояния (износ и зазоры в шпиндельном сочленении, зубчатых зацеплениях, подшипниковых опорах). Имея в наличии данные опытных натурных измерений, параметры работы оборудования и прокатки, путем компьютерного моделирования можно идентифицировать техническое состояние линии привода при явлениях, подобным на рисунках 5 и 6.



**Рисунок 6.** Изменение момента сил упругости на валу двигателя М, верхнем Мв и нижнем Мн шпинделе, усилий у фундаментных болтах редуктора Б1, Б2 и перемещений подушек S1, S2 рабочего вала при захвате полосы: а – стан 2000-1 (клеть 3); б – стан 2000-2 (клеть 7)

**Figure 6.** Changing of elastic force moment on the engine shaft M, in the upper Mв and lower spindle Mн, forces in reduction gear foundation bolts B1 and B2 and shocks displacements S1, S2 when biting: а – rolling mill 2000-1 (Stand 3), б – rolling mill 2000-2 (Stand 7)

Рассмотренные примеры показывают, что переходные процессы в прокатных станах и их параметры (вид колебаний, максимальный момент, частота и период

колебаний, затухание, коэффициент динамичности, время запаздывания и др.) обладают существенной диагностической информативностью, связанной с техническим состоянием оборудования.

Одновременные измерения в прокатных станах момента сил упругости в линии привода валков, усилий у фундаментных болтах редуктора, вибрации прокатной и шестеренной клетей и корпуса редуктора и опор двигателя, электрического момента двигателя и частоты его вращения показывают взаимосвязь переходных процессов в указанных системах (рис. 6). Чем больше износ и угловые зазоры, тем больше амплитуды колебаний момента, усилий в болтах, вибрации.

Частота колебаний момента сил упругости (10...20 гц) явно проявляется в вибрации корпусного оборудования вдоль линии привода на фоне высокочастотных колебаний существенно меньшей амплитуды. Практика измерений показала, что ввиду определенных трудностей измерения момента сил упругости в прокатных клетях (отсутствие штатных измерителей, недоступность к оборудованию, безопасность и др.) с успехом можно воспользоваться результатами измерений микроперемещений, деформаций и вибраций. При этом информативность измерений может быть повышена, если их использовать не только в переходных режимах, но и в установившемся режиме прокатки. Разработаны правила распознавания изменения технического состояния узлов линии привода клетки с учетом количества устанавливаемых датчиков вибрации.

**Выводы.** Переходные процессы в клетях прокатных станов при захвате металла валками обладают рядом особенностей, связанных с технологией прокатки и состоянием оборудования. На их основе разработаны новые способы диагностики технического состояния оборудования в процессе его эксплуатации. В качестве информативных параметров используется вибрация корпусного оборудования вдоль главной линии привода клетки. Эффективным диагностическим признаком состояния линии привода является время запаздывания реакции при захвате полосы валками. Способ опробован на действующих станах. Предложенные решения рекомендуется использовать при разработке систем диагностики оборудования прокатных клетей.

**Summary.** Transients in the rolling mills during the biting of metal rollers have a number of features associated with the technology of rolling and condition of the equipment. New ways of the equipment technical condition diagnosing during its operation are developed. As a parameter of information the frame vibration of the equipment along the main line of the drive stand of rolls is used. Effective diagnostic indicator of the rolling mill drive status is the lag time of the reaction in the biting of band rolls. The method was tested on existing mills. Proposed solutions are recommended for developing of the equipment rolling stands diagnostic systems.

#### Список использованной литературы

1. Динамика процессов прокатки [Текст] / С.Л. Коцарь, В.А. Третьяков, А.Н. Цупров, Б.А. Поляков. – М.: Металлургия. 1997. – 255 с.
2. Переходные процессы в электро-гидромеханических системах металлургических машин [Текст] / В.И. Большаков, В.Е. Злобинский, Б.А. Харлан и др. – Днепропетровск, 2002. – 324 с.
3. Артюх, В.Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах: монография [Текст] / В.Г. Артюх. – Мариуполь: ПГТУ, 2008. – 246 с.
4. Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680: монография [Текст] / В.В. Веренев, В.И. Большаков, А.Ю. Путники и др. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2011. – 184 с.
5. Диагностика и динамика прокатных станов: монография [Текст] / В.В. Веренев, В.И. Большаков, А.Ю. Путники и др. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2007. – С. 144.
6. Диагностирование механического оборудования металлургических предприятий: монография [Текст] / В.Я. Седуш, В.М. Кравченко, В.А. Сидоров, Е.В. Ошовская. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2004. – 100 с.
7. Сушко, А.Е. Подходы к организации технического диагностирования на современном металлургическом производстве [Текст] / А.Е. Сушко // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». – М.: – 2013. – Вып. 2. – С. 92 – 98.

Получено 15.08.2013