

**В. В. Веренев****ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ  
НЕПРЕРЫВНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ***Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України*

Целью работы является обобщение результатов опытно-промышленных и теоретических исследований динамических процессов в широкополосных станах 1680, 1700, 2000 и 2500 горячей прокатки. Описаны методы сбора, хранения, идентификации, визуализации и математической обработки больших массивов данных, которые позволили установить новые закономерности и соотношения технологических параметров. Приведены новые результаты, относящиеся к особенностям переходных процессов, их закономерностям и использованию последних в целях диагностики технологии и состояния оборудования. Описаны вибродинамические процессы при захвате полосы валками. Впервые получена и обоснована путем измерения и статистического моделирования корреляционную связь максимального пикового момента при захвате полосы валками  $M_o$  и статического момента  $M_{cm}$  на стане 1680. Разработана новая математическая модель линии привода валков с включением уравнений динамических процессов в зацеплениях и цапфах редуктора. Впервые показана динамика формирования межклетевых натяжений в процессе последовательного заполнения и освобождения полосой 6-клетевой группы. Разработана полная математическая модель и компьютерная программа динамического взаимодействия через прокатываемую полосу шестиклетевой группы. Предложено и нашло развитие новое направление исследований – поиск, обоснование и опробование новых методов и способов диагностирования технического состояния прокатных станов на базе применения переходных процессов и их параметров в различных режимах прокатки и работы оборудования. Предложены и в промышленных условиях на станах 1680 и 1700-М опробованы эффективные способы уменьшения ударных нагрузок в период захвата полосы валками.

**Ключевые слова:** широкополосный стан, горячая прокатка, математическая модель, динамические переходные процессы, момент, натяжение,

**Состояние проблемы.** В 2018 году исполнилось 80 лет со дня пуска непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 1680 комбината «Запорожсталь». Один из старейших станов подобного типа он подвергался неоднократной модернизации с последующим наращиванием производства. После войны 1941-45 гг. разрушенный стан и цех были достаточно быстро восстановлены, о чем свидетельствуют почтовые марки выпуска 1948 года (рис.1).

В 2018-19 гг. исполняется 60 лет первым в мировой практике опытно-промышленным измерениям крутящих моментов на прокатном стане во время захвата полосы валками, выполненным под руководством член-корреспондента академии наук С. Н. Кожевникова. Впервые были

получены переходные процессы момента сил упругости на шпинделях и моторных валах всех клетей стана. С того времени стан 1680 становится объектом пристального исследования технологии и работы оборудования, что нашло отражение в работах [1-4]. В освоение новых технологий прокатки полос различных марок сталей в те годы внесли А. П. Чекмарев, В. И. Мелешко, М. М. Сафьян, А. А. Динник и др. совместно с работниками цеха и комбината.

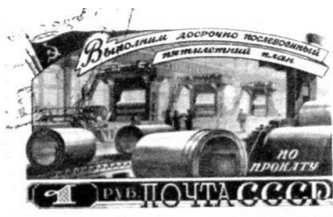


Рисунок 1 – Почтовые марки с изображением черновых клетей стана 1680

С публикацией статьи [3] и монографии [4] С. Н. Кожевников стал фактически основателем нового научного направления - динамики металлургических машин, в частности, прокатных станов, и возглавил отдел металлургического машиноведения в Институте черной металлургии. В работе [3] С. Н. Кожевников и П. Я. Скичко на основании результатов измерений показали, что несмотря на значительные диаметры валов в линиях привода во время захвата полосы валками формируются упругие колебательные процессы и существенные динамические нагрузки. Их пиковые значения, характеризуемые коэффициентом динамичности, могут в 3-5 раз превышать момент, необходимый для прокатки полосы в установившемся режиме. В этой же статье было дано объяснение таким явлениям, как биение колебаний момента, влияние на коэффициент динамичности времени захвата полосы и зазоров в сочленениях, а также формы «языка» на передней кромке полосы. Намечены основные пути уменьшения динамических нагрузок.

С 1970-х годов начался второй этап исследований динамики широкополосных станов. В разные годы выполнены целенаправленные измерения динамических процессов в клетях станов 1700-К (г. Темиртау, Казахстан), 1700-М (г. Мариуполь), 2000-Л (г. Липецк), 2000-Ч (г. Череповец) и 2500 (г. Магнитогорск). Это стало возможным благодаря разработке и созданию сотрудниками ИЧМ к.т.н. Е.Я. Подковыриным и инженером В. П. Биричем аппаратуры для измерения, преобразования и бесконтактной передачи с вращающегося вала сигнала приемному устройству с последующей регистрацией. Удачная разработка измерителя крутящего момента, к сожалению, оказалась не воспринятой руководством предприятий черной металлургии. Исследования широкополосных станов позволили получить значительный объем

информации, на основании которой стали глубже понятны переходные процессы, ранее обнаруженные на стане 1680. Установлен также ряд особенностей колебательных процессов и количественных зависимостей. Например, получена расчетно-эмпирическая зависимость коэффициента динамичности на участке двигатель-редуктор от отношения двух низших собственных частот,  $K_d = K_d(n = \beta_2/\beta_1)$ . Это позволило разработать и передать НИИтяжмаш НКМЗ методику выбора рациональных конструктивных параметров (длин и диаметров валов, моментов инерции вращающихся масс) по критериям динамичности и металлоемкости.

Третий этап исследований, начавшийся в 1990-годах, характерен постановкой и решением проблемы использования параметров вибродинамических процессов в переходных режимах с целью мониторинга и диагностирования технического состояния оборудования клетей прокатных станов. В развитии исследований в этом направлении решающую роль, образно выражаясь, сыграл стан 1680. Были выполнены 15 госбюджетных и хоздоговорных работ. Благодаря личной инициативе ведущего инженера А. П. Даличука измерения стали выполнять с применением средств аналого-цифрового преобразования и записью сигналов на цифровые носители персонального компьютера. Это позволило получать большие массивы измеряемой информации при прокатке партий полос различного сорта размера при разном техническом состоянии оборудования. Разработанные методы сбора, хранения, идентификации, визуализации и математической обработки больших массивов данных позволили установить новые закономерности и соотношения. Это способствовало существенному развитию решения поставленной проблемы диагностирования оборудования по параметрам переходных процессов. Одновременно с этим разработаны новые математические модели и компьютерные программы, предназначенные для исследований динамических процессов. По сути, они стали также диагностическими моделями, с помощью которых проверялись новые методы диагностирования.

**Целью работы** является обобщение результатов опытно-промышленных и теоретических исследований динамических процессов в широкополосных станах 1680, 1700, 2000 и 2500.

**Изложение основных результатов исследования.** Новые результаты, полученные на данном этапе исследований, обоснованы и изложены в монографиях [5-10]. В связи с этим ниже приведена краткая их суть.

1. Разработан и в промышленных условиях опробован ряд способов диагностирования износа сочленений и угловых зазоров в линиях главного привода рабочих валков прокатных клетей. Измерениями установлено, что ввиду конструктивных особенностей узла хвостовик вала - головка шпинделя во время холостого хода и последующего удара

полосы о валки происходит размыкание углового зазора. Чем больше разомкнут зазор  $\delta_{ш}$ , тем больше времени необходимо для его замыкания и тем больше время  $\tau$  запаздывания реакции участков вдоль линии привода. Расчетная и опытная зависимости  $\tau(\delta)$  приведены на рис.2 и 3. При хорошем техническом состоянии узла время  $\tau$  наименьшее (время естественного запаздывания), при ухудшении ТС это время на шпиндельном участке может увеличиваться в два-три раза. В данном способе время  $\tau$  измеряется по сигналам вибродатчиков, устанавливаемых на корпусном оборудовании, с последующей статистической обработкой результатов измерений. В других способах используются особенности технологического процесса прокатки.

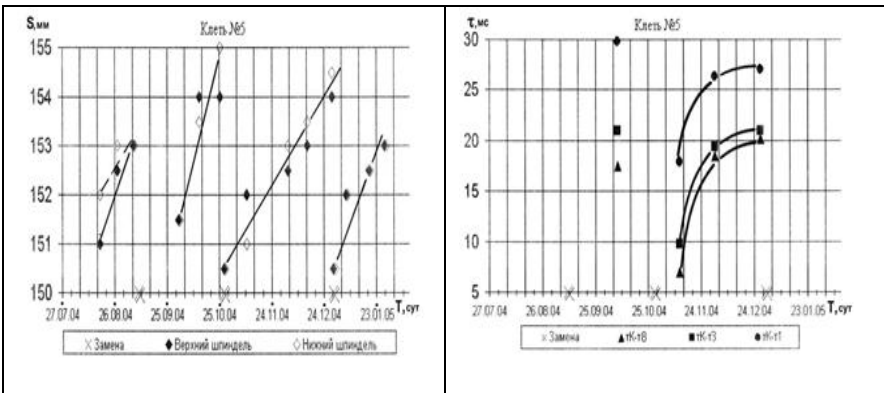
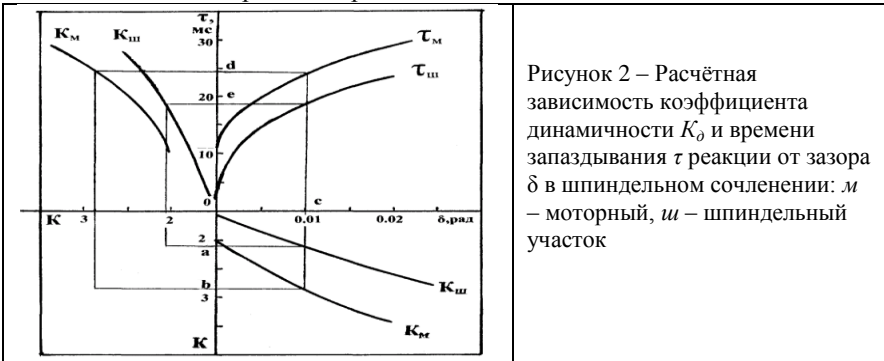


Рисунок 3 – Зависимость времени запаздывания относительно прокатной клетки т.К трёх участков линии привода клетки № 5 стана 1680 от износа бронзовых вкладышей: т.3 и т.1 – корпус редуктора соответственно тихоходного и быстроходного вала.

Диагностическими свойствами обладает вид вибродинамических процессов при захвате полосы валками. Например, чем больше зазор в

зубчатых зацеплениях редуктора и муфт на моторном участке, тем больше период колебаний между первыми двумя пиками момента и низкочастотной составляющей вибрации (рис.4). Причем этот период в ряде случаев в 1,2 - 1,4 раза больше периода собственных колебаний. Поэтому отношение этих периодов принято в качестве диагностических признаков. Научное направление применения параметров вибродинамических процессов в переходных режимах, начатые в ИЧМ, продолжает развиваться.

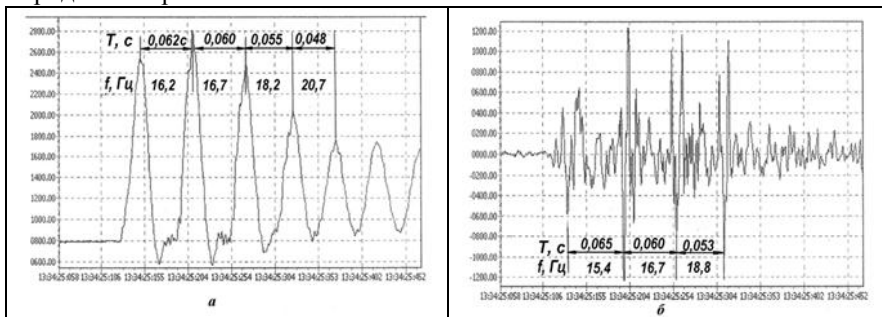


Рисунок 4 – Запись одновременных измерений момента и вибрации корпуса редуктора в клетѣ №3 стана 1680 в режиме захвата полосы валками.

2. Многочисленные измерения на стане 1680 позволили впервые получить и затем обосновать путем статистического моделирования корреляционную связь максимального пикового момента при захвате полосы валками  $M_{\theta}$  и статического момента  $M_{cm}$ . Нарращивание случайных возмущений в модели приводит к её «распушиванию», однако в целом статистическая связь  $M_{\theta}$  и  $M_{cm}$  сохраняется и аппроксимируется как  $M_{\theta}(M_{cm})$  с достаточно значимым коэффициентом детерминации (не менее 0,8, рис.5).

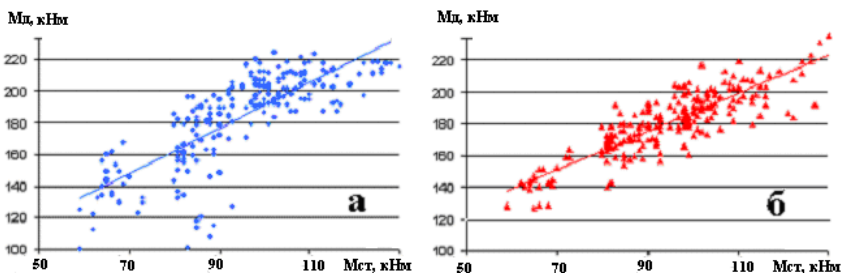


Рисунок 5 – Корреляционные поля  $M_{\theta}$ ,  $M_{cm}$ , полученные путѣм измерений (а) и расчѣтом (б) при одних и тех же фактических значениях  $M_{cm}$

Обнаружение этой зависимости, характерной для всех участков линии главного привода валков, имеет большое практическое значение для

получения спектров динамических нагрузок, необходимых для прочностных расчётов и расчёта ресурса оборудования. Для этих целей разработана статистическая модель со случайными возмущениями в виде отклонения температуры, толщины, ширины полосы, скорости прокатки, формы переднего конца полосы от номинальных значений, а также случайных зазоров.

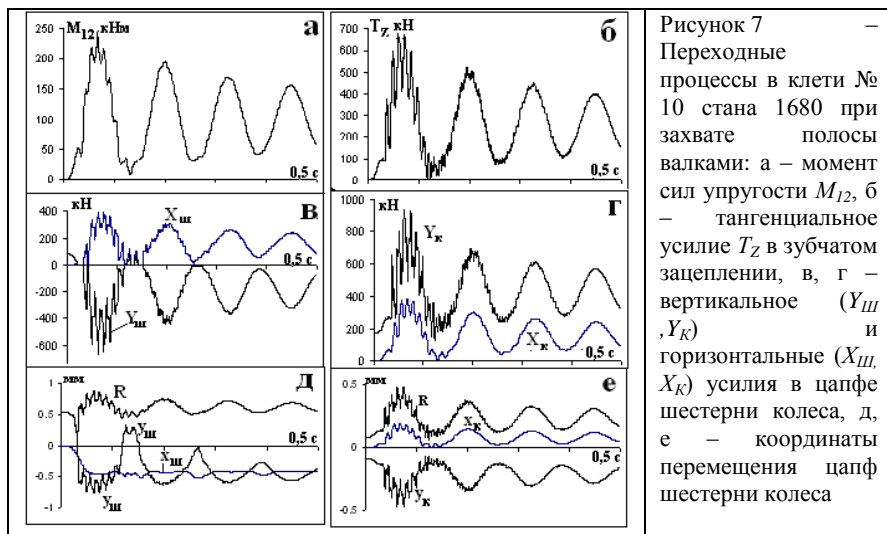
Реальная ситуация на прокатных станах состоит в отсутствии штатных измерителей крутящего момента хотя бы в одной точке линии привода. Однако практически на всех станах измеряется момент главного привода в течение прокатки каждой полосы. Это позволяет фактическое среднее значение момента  $M_{cm}$  для каждой полосы в партии задавать в компьютерную модель с разыгрыванием случайных значений зазоров. Поскольку при прокатке каждой  $i$ -й полосы в партии действуют «свои» отмеченные выше технологические возмущения, то значения  $M_{cmi}$  в свою очередь являются случайными. Однако, особенность состоит в том, что каждое фактическое значение «впитало» влияние остающихся неизвестными, но являющиеся конкретными, возмущения. Поэтому при статистическом моделировании участвуют в виде неявных через  $M_{cmi}$  возмущения со стороны технологии и со стороны оборудования, в частности, зазоры. Расчётной величиной на выходе для каждого фактического значения  $M_{cmi}$  является максимальная динамическая нагрузка  $M_{oi}$  в  $j$ -х участках линии привода (в зависимости от размерности её расчётной схемы). В итоге множеству значений  $M_{cmi}$  соответствует множество (одно или несколько)  $M_{oi}$ . При прокатке следующей  $n$ -й партии полос, отличающейся технологическими параметрами, аналогичным образом получают множество  $M_{cm}(n)$  и  $M_o(n)$ .

Подобные расчёты следует вести при прокатке нескольких партий полос разного сортамента с целью охвата достаточно широкого диапазона изменения  $M_{cm}$ . При этом считается, что в течение 5-8 часов работы стана техническое состояние линии привода не изменяется и розыгрыш значения зазора, как случайной величины, остаётся постоянным. В итоге формируется достаточно представительное корреляционное поле с фактическими значениями  $M_{cmi}$  и расчётными значениями  $M_{oi}$ , например, на моторном и шпиндельном участках (рис.6).

Разработанный метод является расчётно-эмпирическим, поскольку в нём участвует множество фактических измеренных значений  $M_{cmi}$ . Периодическое статистическое моделирование при изменяющемся техническом состоянии оборудования (зазоров) в сторону его ухудшения позволяет вести мониторинг максимальных нагрузок и на основании знаний о них более рационально управлять работой стана и прогнозировать периоды существенного увеличения нагрузок, сроки ремонтных воздействий и возможных отказов.



измерений  $M_{cmi}$ . Расчёты ведутся таким образом, чтобы получить идентичные фактические корреляционные поля ( $M_{cm}, Z_{д}$ )<sub>ф</sub>, где  $Z_{д}$  – один из указанных выше динамических измеряемых параметров и расчётные ( $M_{cm}, M_{д}$ ). В обоих полях присутствует один и тот же измеряемый параметр  $M_{cmi}$ . Один из вариантов решений представлен на рис. 7. Здесь в качестве фактического поля выступают измеряемые значения ( $M_{cm}, M_{д}$ ), а расчётного ( $M_{cm}, Z_{д}$ ), где  $Z_{д}$  – максимальное усилие в зубчатом зацеплении редуктора.



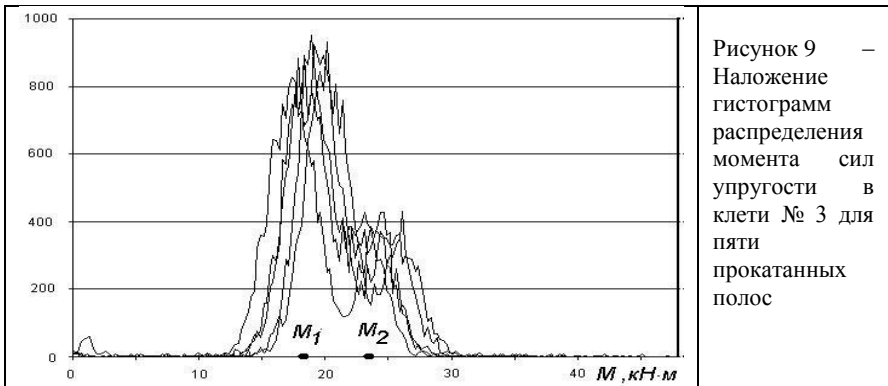
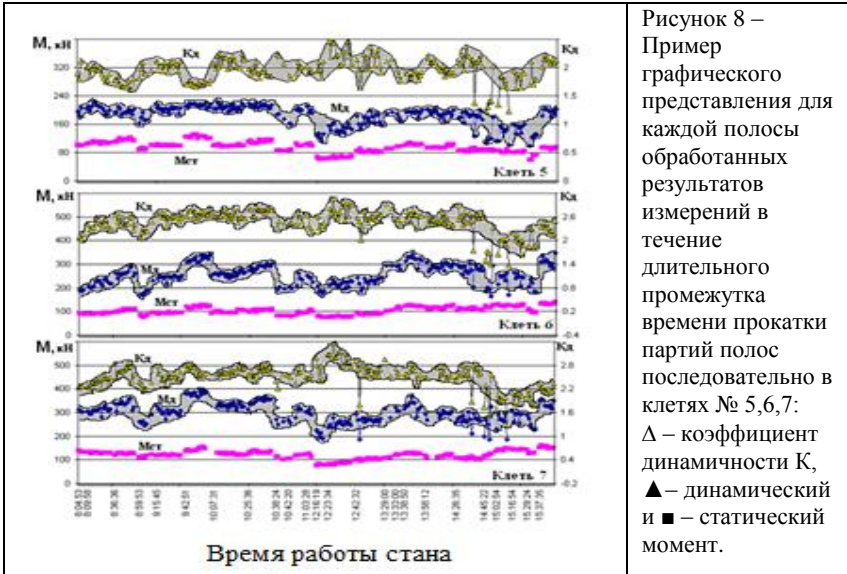
4. Разработаны и реализованы программы обработки результатов измерений с целью повышения информативности последних. Например, в течение длительного времени прокатки по результатам измерения момента строится графическое изображение фактических значений  $M_{cm}, M_{д}$  и коэффициента динамичности  $K$ . В интервалах между приведенными значениями времени ведётся прокатка полос одного сортаразмера (рис.8). Подобная информация даёт оператору стана наглядное представление о величине и о ходе изменения нагрузок для общей оценки процесса прокатки и работы оборудования.

5. Разработан метод оценки стабильности технологического процесса прокатки и состояния оборудования линий главного привода с помощью трех коэффициентов вариации  $v$ . Данные коэффициенты рассчитываются по результатам измерений момента сил упругости при прокатке одной или нескольких полос. Для них определяются коэффициенты вариации: статической нагрузки –  $v_{cm}$ , динамической нагрузки –  $v_{д}$  и коэффициента динамичности –  $v_K$ . Анализируя и сравнивая их средние значения в трех



клетях, приведенные в таблице, видим во всех клетях стабильную прокатку.

	$V_{ст}$	$V_d$	$V_k$
Клеть 1	0,055	0,082	0,084
Клеть 2	0,050	0,046	0,058
Клеть 3	0,053	0,221	0,216



Большие значения коэффициентов  $V_d$  и  $V_k$  отмечены в клетях № 3 при «хорошей» технологии. Это означает, что в период измерений клеть № 3

находилась в наихудшем техническом состоянии, что подтвердила запись в агрегатном журнале. Нарботка шпинделей здесь составила 3,5 месяца при средней согласно регламенту замен 1,5-2 месяца. Фактически предложенный анализ является способом диагностирования состояния технологии и оборудования. Поскольку на захват полосы валками вибрационные процессы откликаются аналогично механическому моменту, к их параметрам может быть реализован подобный описанному подход.

Полезным методом может быть построение гистограмм распределения момента  $M$  при непрерывной прокатке в смежных клетях и наложение их один на другой. Так из рисунка 9 видно, что  $M_1$  соответствует среднему моменту при совместной прокатке в клетки № 3. После захвата полосы валками клетки № 4 в промежутке 3-4 возникло натяжение. Это привело к появлению на гистограмме второго среднего значения  $M_2 < M_1$ . По разности данных моментов можно оценивать натяжение в полосе

6. Разработана полная математическая модель и компьютерная программа динамического взаимодействия через прокатываемую полосу шестиклетевой группы (Н.И. Подобедов). Полная в том смысле, что:

- уравнения движения и соотношения теории прокатки записаны в абсолютных величинах, а не в отклонениях;
- учтены упругие колебания в линиях главного привода и в клетях;
- разработана модель транспортного переноса (запаздывания) отклонения толщины между клетями реализован впервые в виде специально разработанного алгоритма.

Основными неизвестными, определяемыми в результате решения системы дифференциальных уравнений, являются моменты сил упругости в линиях привода, межклетевые натяжения и отклонение толщины полосы после каждой клетки. Получены следующие результаты

а) Впервые показана динамика формирования межклетевых натяжений в процессе последовательного заполнения и освобождения полосой 6-клетевой группы. Показана динамика изменения толщины переднего и заднего участков полосы и её связь с натяжениями (рис.10).

б) Впервые показан процесс транспортного переноса отклонения толщины полосы на входе в группу в режимах заполнения и установившейся прокатки и его влияния на натяжения.

в) Показано, что имеются такие сочетания отклонения толщины и температуры по величине и знаку (+, -), когда происходит их взаимно парярующее влияние на процесс или усиление (ослабление) влияния на уровень натяжений (вплоть до петлеобразования) и толщину.

г) Установлены особенности изменения межклетевых натяжений при перемещении вверх или вниз нажимных устройств в первой клетки и внутри группы.

д) Раскрыты особенности коэффициента выравнивания относительной продольной разнотолщинности чистовой группы, установлена его зависимость от знака и величины возмущения совместно с натяжениями.

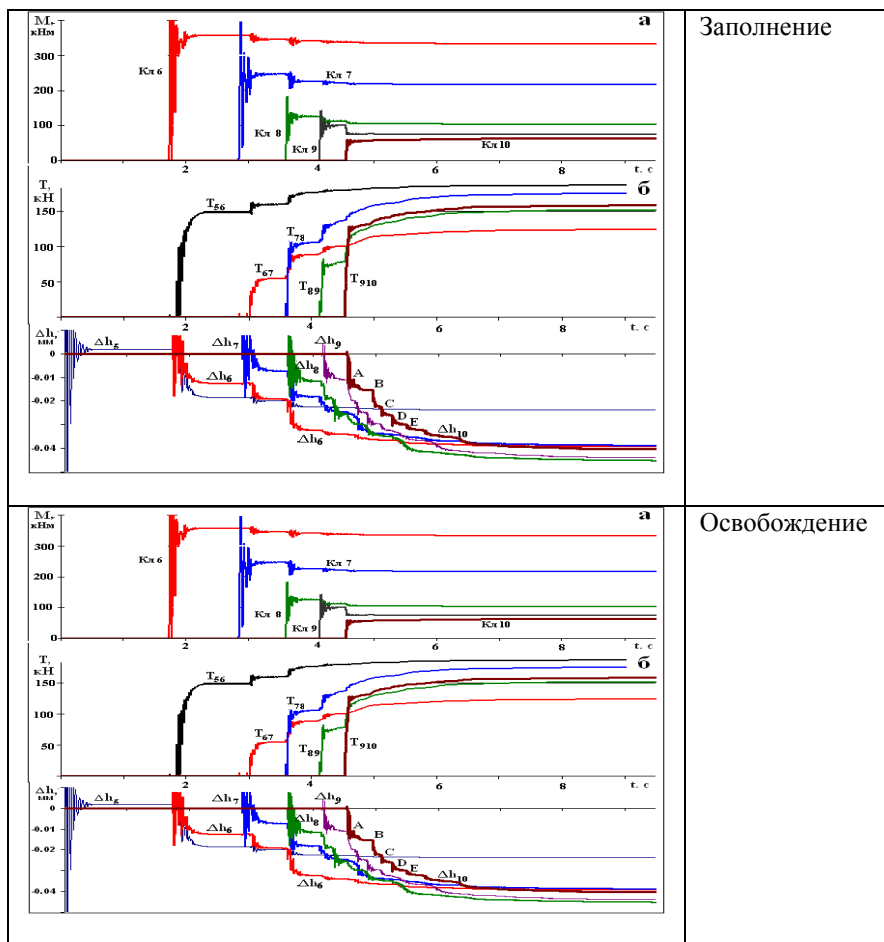


Рис.10. Динамика изменения моментов  $M$ , межклетевых натяжений  $T$  и отклонения толщины  $\Delta h$  полосы в период заполнения полосой непрерывной группы и освобождения.

7. На станах 1680 и 1700-М выполнены неоднократные опытно-промышленные прокатки слябов с фигурной передней кромкой. На основании измерений момента сил упругости показана эффективность уменьшения динамической составляющей нагрузки в 1,5-2 раза в период захвата металла вальцами. Разработаны и опробованы способы

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»,  
Сборник научных трудов ИЧМ. – 2018. - Вып.32*

целенаправленного формирования кромки слябов (валки горизонтального окалиноломателя с выступом, ножи ножниц слябинга). Показано, что применение этих способов не приводит к дополнительному расходу металла в обрызг. Несмотря на это руководство двух комбинатов не идет на внедрение столь эффективных способов уменьшения ударных нагрузок.

### **Выводы**

В последние два десятилетия в отделе технологического оборудования и систем управления Института черной металлургии НАН Украины путём опытно-промышленных измерений и математического моделирования получен ряд новых научно-практических результатов, относящихся к широкополосным станам горячей прокатки.

1. Предложено и найдено развитие новое направление исследований – поиск, обоснование и опробование новых методов и способов диагностирования технического состояния прокатных станов на базе применения переходных процессов и их параметров в различных режимах прокатки и работы оборудования. Разработано 18 способов диагностирования, часть которых описана в монографиях и применяется при проведении экспериментальных исследований.

2. Разработаны и применены при выполнении НИР программы для компьютерного моделирования:

- переходных процессов в зацеплениях и цапфах колеса и шестерни редуктора;

- статистического расчёта максимальных динамических нагрузок со случайными возмущениями в виде зазоров и рассеиванием технологических параметров (температуры, толщины и ширины полосы, скорости прокатки и др.), а также с заданием фактических (измеренных) значений момента электродвигателя при прокатке каждой полосы;

- динамического взаимодействия шести клетей непрерывной группы через полосу в режимах заполнения, прокатки и освобождения полосой группы клетей.

3. Установлены закономерности формирования межклетевых натяжений, разнотолщинности полосы, транспортного переноса (запаздывания) и коэффициента выравнивания относительной продольной разнотолщинности в разных режимах прокатки.

4. На базе массовых измерений особенно на стане 1680 установлена эмпирическая корреляционная связь максимального момента сил упругости при захвате полосы и момента в установившемся режиме прокатки. Это дало основание разработать статистическую модель расчётно-эмпирического расчёта спектров нагрузок на разных участках линии главного привода и методику их мониторинга на действующих станах.

5. Предложены и в промышленных условиях на станах 1680 и 1700-М опробованы эффективные способы уменьшения ударных нагрузок в период захвата полосы валками.

### Бібліографічний список

1. Сафьян М.М. Непрерывные листовые станы горячей прокатки./ М.М. Сафьян // М.: Metallurgizdat. – 1956.
2. Сафьян М.М. Прокатка широкополосной стали. / М.М. Сафьян // М.: Metallurgiya. – 1969. – 460 с.
3. Кожевников С.Н. Экспериментальное исследование главных линий чистой группы клетей непрерывного тонколистового стана 1680 завода "Запорожсталь" / С.Н. Кожевников, П.Я. Скичко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1961. – № 12. – С. 179–184.
4. Кожевников С.Н. Динамика машин с упругими звеньями. / С.Н. Кожевников // Киев. Изд. АН УССР. – 1961. – 312 с.
5. Диагностика и динамика прокатных станов/ В.В.Веренев, В.И.Большаков, А.Ю.Путноки [и др.]/Монография. Днепропетровск: ИМА – пресс. 2007. – 144 с.
6. Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680 / Веренев В.В., Большаков В.И., Путноки А.Ю., Маншилин А.Г., Мацко С.В. // Монография. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2011. – 184 с.
7. Веренев В.В. Снижение динамических нагрузок и диагностика широкополосных станов в переходных режима./ В.В.Веренев // Монография. Никополь: СПД. Фельдман О.О. 2014. – 203 с.
8. Веренев В.В. Динамические процессы в полосовых станах холодной прокатки./В.В.Веренев // Днепропетровск: Лира. 2015. – 112 с.
9. Веренев В.В. Переходные процессы при непрерывной прокатке. / В.В.Веренев, А.Ю. Путноки, Н.И. Подобедов // Монография. – Д.: Литограф, 2017. – 116 с.
10. Веренев В.В. Динамические процессы в широкополосных станах горячей прокатки. / В.В. Веренев// Монография. – Д.: Литограф. 2018. – 127 с.

### Reference

1. Safyan M.M. Nprerivnyye listovyye stany goryachey prokatki./ M.M. Saf'yan // M.: Metallurgizdat. – 1956.
2. Safyan M.M. Prokatka shirokopolosnoy stali. / M.M. Saf'yan // M.: Metallurgiya. – 1969. – 460 s.
3. Kozhevnikov S.N. Eksperimental'noye issledovaniye glavnykh liniy chistovoy gruppy kletey neprerivnogo tonkolistovogo stana 1680 zavoda "Zaporozhstal'" / S.N. Kozhevnikov, P.YA. Skichko // Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya. – 1961. – № 12. – S. 179–184.
4. Kozhevnikov S.N. Dinamika mashin s uprugimi zven'yami. / S.N. Kozhevnikov // Kiyev. Izd. AN USSR. – 1961. – 312 s.
5. „Diagnostics i dinamika prokatnykh stanov/ V.V.Verenev, V.I.Bol'shakov, A.YU.Putnoki [i dr.]/Monografiya. Dnepropetrovsk: IMA – press. 2007. – 144 s.

6. Dinamicheskiye protsessy v kleyakh shirokopolosnogo stana 1680 / Verenev V.V., Bol'shakov V.I., Putnoki A.YU., Manshilin A.G., Matsko S.V. // Monografiya. – Dnepropetrovsk: IMA-press, 2011. – 184 s.
7. Verenev V.V. Snizheniye dinamicheskikh nagruzok i diagnostika shirokopolosnykh stanov v perekhodnykh rezhima./ V.V.Verenev // Monografiya. Nikopol': SPD. Fel'dman O.O. 2014. – 203 s.
8. Verenev V.V. Dinamicheskiye protsessy v polosovykh stanakh kholodnoy prokatki./V.V.Verenev // Dnepropetrovsk: Lira. 2015. – 112 s.
9. Verenev V.V. Perekhodnyye protsessy pri nepreryvnoy prokatke. / V.V.Verenev, A.YU. Putnoki, N.I. Podobedov // Monografiya. – D.: Litograf, 2017. – 116 s.
10. Verenev V.V. Dinamicheskiye protsessy v shirokopolosnykh stanakh goryachey prokatki. / V.V. Verenev// Monografiya. – D.: Litograf. 2018. – 127 s.

### ***В. В. Вереньов***

#### **Узагальнення результатів досліджень динаміки безперервних широкостабових станів гарячої прокатки**

Метою роботи є узагальнення результатів дослідно-промислових і теоретичних досліджень динамічних процесів в широкосмугових станах 1680, 1700, 2000 і 2500 гарячого прокатування. Описано методи збору, зберігання, ідентифікації, візуалізації і математичної обробки великих масивів даних, що дозволили встановити нові закономірності та співвідношення технологічних параметрів. Наведено нові результати, пов'язані з особливостями перехідних процесів, їх закономірностям та використання з метою діагностики технології та стану обладнання. Описано вібродинамічні процеси при захопленні смуги валками. Вперше отримано і обґрунтовано шляхом вимірювання і статистичного моделювання кореляційний зв'язок максимального пікового моменту при захопленні смуги валками і статичного моменту прокатування на стані 1680. Розроблено нову математичну модель лінії приводу валків з включенням рівнянь динамічних процесів в зацепленнях і цапфах редуктора. Вперше показано динаміку формування межклетевих натягів у процесі послідовного заповнення і звільнення смугою 6-квіткової групи. Розроблено повну математичну модель і комп'ютерну програму динамічної взаємодії клітей шестиклетевої групи через прокатну смугу. Запропоновано новий напрямок досліджень що вміщує: пошук, обґрунтування і випробування нових методів і способів діагностування технічного стану прокатних станів на базі застосування перехідних процесів і їх параметрів в різних режимах роботи обладнання. Запропоновано і випробувано в промислових умовах на станах 1680 і 1700-М ефективні способи зменшення ударних навантажень в період захоплення смуги валками.

**Ключові слова:** широкосмуговий стан, гаряча прокатка, математична модель, динамічні перехідні процеси, момент, натяг,

### ***V. V. Verenev***

#### **Generalization of research results on the dynamics of continuous wide-strip hot-rolling mills**

The aim of the work is to summarize the results of experimental-industrial and theoretical studies of dynamic processes in wide-strip hot rolling mills 1680, 1700, 2000

and 2500. We describe the methods of collecting, storing, identifying, visualizing and mathematical processing of large data arrays, which made it possible to establish new laws and correlations of technological parameters. New results related to the peculiarities of transient processes, their patterns and the use of the latter for the purpose of diagnosing technology and equipment condition are presented. Vibrodynamic processes are described when the strip is captured by the rollers. For the first time, a correlation between the maximum peak moment when the strip is captured and the static rolling moment on the 1680 mill is obtained and substantiated by measuring and statistical modeling. A new mathematical model of the roll line is developed, incorporating the equations of dynamic processes in gears and axles of the gearbox. For the first time, the dynamics of the formation of intercellular tensions in the process of sequential filling and release with a 6-cell band is shown. A complete mathematical model and a computer program for the dynamic interaction of six-group stands of a rolling strip have been developed. A new line of research has been proposed, which includes the search, substantiation and testing of new methods and methods for diagnosing the technical condition of rolling mills based on the use of transients and their parameters in various modes of equipment operation. Proposed and tested in industrial conditions at the mills 1680 and 1700-M are effective ways to reduce the impact loads during the period of the strip capture by the rollers.

**Keywords: broadband mill, hot rolling, mathematical model, dynamic transients, moment, tension**

*Статья поступила в редакцию сборника 01.11.2018 года,  
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания  
редакционной коллегии сборника №1 от 26 декабря 2018 года)  
Рецензенты: д.т.н., проф. С.В.Белодеденко, д.т.н. И.Г.Муравьева*