

И.Ю.Приходько, П.П.Чернов, В.В.Разносилин, А.А.Сергеенко,  
С.В.Трусилло, В.А.Агуреев, А.И.Соболев, Е.А.Парсенюк, Ю.А.Цуканов

## **ПЕРВАЯ ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЛОСКОСТНОСТИ ПОЛОС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОСКОСТНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ**

Представлена первая отечественная система автоматического регулирования плоскостности полос (САРП) для станов холодной прокатки, использующая бесконтактный оптический метод измерения плоскостности и тепловизионный метод измерения температуры полос. Описаны преимущества САРП в сравнении с традиционными системами на основе стрессометрического ролика, а также практические результаты использования системы.

Одним из основных, востребованных на рынке показателем качества тонколистового проката является плоскостность. Автоматическое регулирование плоскостности полос представляет собой наукоемкую технологию управления, без которой сегодня невозможно производство тонколистового проката с высокой плоскостностью.

На Новолипецком металлургическом комбинате в рамках реализации программы по техническому перевооружению и развитию создан промышленный образец системы автоматического регулирования плоскостности (САРП), предназначенной для установки на одноклетевых и непрерывных станах холодной прокатки полос с использованием бесконтактных методов измерения плоскостности и температуры полос.

Пилотный образец системы установлен на дрессировочном стане №1 в цехе холодной прокатки полос из углеродистых сталей (ПХПП).

До настоящего времени на станах холодной прокатки в странах бывшего СССР использовались САРП исключительно зарубежной разработки и изготовления, на которых измерение плоскостности осуществлялось контактным способом, а в качестве датчиков, преимущественно, использовались секционные измерительные ролики (стрессометры).

Современные системы регулирования плоскостности полос на станах холодной прокатки имеют, как минимум, 3 канала регулирования: перекося валков, принудительный изгиб валков, а также тепловое регулирование их профиля путём селективной подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

По сравнению с известными системами автоматического регулирования плоскостности полос на станах холодной прокатки в разработанных алгоритмах учтены новые эффекты и дополнительные факторы, имеющие, по мнению авторов, важное практическое значение для обеспечения высоких показателей плоскостности холоднокатаных полос, а именно:

– учтено влияние распределения температуры по ширине полосы на плоскостность готовой продукции. Исследованиями установлено, что на

станах холодной прокатки изменение температуры по ширине полосы может достигать 20-30 °С (что связано, в первую очередь, с различием подачи СОЖ на валки и полосу), на дрессировочных станах – до 5-7 ° (что связано, в первую очередь, с неравномерностью температурных полей в рулоне после колпакового отжига и неполного остывания рулонов, а также с неодинаковыми условиями теплообмена торцов рулона при остывании и транспортировании в вертикальном положении). Максимальное отклонение температуры по ширине, например, стальной полосы от среднего значения величиной -10 °С эквивалентно скрытой величине нерегулируемой неплоскостности величиной 12 IU, что соответствует высоте волны  $\approx 7$  мм при длине 1 м;

- реализованы алгоритмы работы непрерывного стана, обеспечивающие при прокатке тонких полос создание необходимого (5-15°С) теплового напора СОЖ в регулируемой последней клетки при малом (до 5%) частном обжати. Обычно в таких условиях прокатки температура рабочих валков и СОЖ часто оказываются близкими и, поэтому, эффективность канала работы системы воздействием на тепловой профиль валков селективной подачей СОЖ низка [4];

- учтены физические закономерности воздействий селективным охлаждением валков в ходе их разогрева, когда СОЖ, по сути, является смазочно-нагревающей жидкостью;

- обеспечена стабильность теплового состояния валков при их селективном охлаждении. Обычно регулирование плоскостности полос селективной подачей СОЖ в функции различия на отдельных участках по ширине полосы заданной и измеренной плоскостности вызывает неконтролируемый «дрейф» общего расхода СОЖ в клетки, что вызывает нестабильность их теплового состояния и сужает диапазон регулирования;

- учтено влияние поперечного профиля горячекатаного подката и, следовательно, профиля наружной образующей рулона, влияние которого искажает измеренную плоскостность полосы и должно учитываться в целевой кривой плоскостности, задаваемой системе регулирования на отработку. Искажение связано с неравномерностью по ширине полосы скорости и напряжения смотки, вызванной переменным диаметром рулона по ширине. Даже абсолютно плоская полоса, сматываемая в рулон переменного по ширине диаметра, испытывает неравномерные напряжения. В известных системах, как правило, задание целевой кривой плоскостности оператор стана производит априори, основываясь либо на интуиции, либо на основании визуальной оценки фактической плоскостности;

- реализована функция создания оптимального объёмного напряженного состояния рулонов в зависимости от назначения полос, для чего необходимо управлять как величиной натяжения смотки полосы, так и создавать рациональные формы целевых эпюр плоскостности полос различного сортамента с учётом многих факторов. Эту функцию задания

закона изменения натяжения по мере смотки рулонов целесообразно реализовать в системе автоматического регулирования плоскостности полос, так как оптимальный закон изменения натяжения полосы существенно зависит от её плоскостности и наоборот, – оптимальная целевая кривая плоскостности должна зависеть от профиля наружной образующей рулона, формируемого, в том числе, вследствие его напряжённо-деформированного состояния.

Ранее были разработаны методы синтеза оптимальных управляющих воздействий, в том числе на плоскостность полос, по ряду каналов (см. например, [2]).

Для исследования условий селективного охлаждения валков и синтеза соответствующих оптимальных управляющих воздействий разработана компьютерная система TRollAB © [3,6].

Для расчёта напряжённого состояния рулона и профиля его наружной образующей по мере намотки в зависимости от закона изменения натяжения, профиля поперечного сечения и плоскостности сматываемой полосы, а также шероховатости поверхности разработана компьютерная система Coil\_Temper\_3D© [5].

Методы расчёта других основных параметров процессов холодной прокатки и дрессировки полос, включая методы оптимизации, также были разработаны и реализованы в специализированной компьютерной системе WinColdRolling© [1]. В этой системе также реализованы методы оценки условий потери полосой плоской формы.

На этапе завершения создания основных принципов, алгоритмов и компьютерной реализации методов расчёта возник вопрос о наиболее выгодном объекте для первой реализации системы.

Выбор осуществляли с учётом целесообразности последовательного задействования и освоения отдельных каналов регулирования плоскостности (перекос, изгиб валков и их селективное охлаждение) и исходили из следующих соображений.

Стан горячей прокатки 2000 и стан 2030 холодной прокатки уже оснащены современными системами измерения, соответственно, профиля поперечного сечения и формы полос, а также соответствующими системами автоматического регулирования.

Оснащение САПР дрессировочного стана позволяет замкнуть весь цикл приборного контроля за формой полос и обеспечить наиболее высокий уровень плоскостности готовых полос.

Несмотря на установку пилотной САПР на дрессировочном стане, где важность использования данных о температуре полосы по длине и ширине менее выражена в сравнении со станами холодной и горячей прокатки, было принято решение использовать данный канал измерения с целью определения рационального метода, условий измерения, и его освоения

для последующего использования в условиях станов холодной и горячей прокатки.

В разработанной и реализованной на дрессировочном стане САРП ДС-1 ОАО «НЛМК» учтено большинство изложенных выше эффектов и дополнительных факторов, так как не все из них реализуемы в условиях дрессировочного стана, не оборудованного системой селективной подачи эмульсии.

Общая структурная схема адаптированной для дрессировочного стана системы представлена на рис. 1. На рис. 2 представлен соответствующий комплекс технических средств (КТС). На рис. 3 показаны фотоснимки выходной стороны дрессировочного стана с установленным измерительным оборудованием, на рис. 4 показаны фотоснимки КТС САРП.

Оператору стана доступна информация о поперечном профиле горячекатаной полосы, а также об измеренной плоскостности полосы со стана холодной прокатки в режиме непрерывного мониторинга в привязке к месту измерения плоскостности на дрессировочном стане. Это позволяет осуществлять численные оценки последовательного изменения параметров неплоскостности полосы на агрегатах технологической схемы производства.

Предусмотрен дифференцированный подход к обеспечению плоскостности полосы по ширине, реализованный в виде дополнительной функции весовых коэффициентов. Например, оператор может сконцентрировать внимание системы на приоритетное обеспечение рассчитанной целевой кривой плоскостности в выбранных им областях по ширине полосы - вблизи кромок или на любых других отдельных участках.

На рис. 5 представлено одно из диалоговых окон интерфейса панели оператора с результатами измерений плоскостности и температуры по ширине полосы.

Одно из диалогов настроек управляющей программы на ПК-2 представлено на рис. 6.

Сервер баз данных, где организовано основное хранилище данных, включая аналитическую базу данных, находится в помещении вычислительного центра станов 2030 и ДС.

Для получения аналитической итоговой информации о плоскостности прокатанных полос, а также детального анализа процесса дрессировки отдельных рулонов разработаны клиентские приложения, выполняющие запросы к серверу БД САРП ДС-1, а также к базам данных станов горячей прокатки 2000 и холодной прокатки 2030. Эти приложения установлены на удаленных ПК технологических служб комбината, обслуживающего и контролирующего персонала, а также в инженерном центре НЛМК. С их помощью формируются сменные рапорты о работе системы, порулонные отчёты, а также различного рода представления, в которых содержатся статистические и прогнозные данные, обобщающие закономерности и тенденции. Например, на основании фактических данных возможно для

каждого рулона получение графика зависимости выхода годного от предельно допустимой величины неплоскостности, что позволяет оценить возможности исполнения заказов с особыми требованиями к неплоскостности.

Основные преимущества разработанной и адаптированной для условий дрессировочного стана системы состоят в следующем.

В САРП использован бесконтактный принцип и система измерения плоскостности, которая легко может быть встроена в существующие агрегаты, формирующие плоскостность производимой тонколистовой продукции.

В качестве дополнительного фактора, формирующего плоскостность полос в агрегатах листоотделки, учтено распределение температуры полосы по длине и ширине в процессе дрессировки рулонов после колпакового отжига, неравномерные температурные поля в которых изменяют плоскостность полосы после дрессировки при остывании. Учёт фактора температурного последеформационного коробления позволил достичь после полного остывания полосы эффекта термоправки.

На рис. 7 представлен один из отчётов о результатах работы САРП.

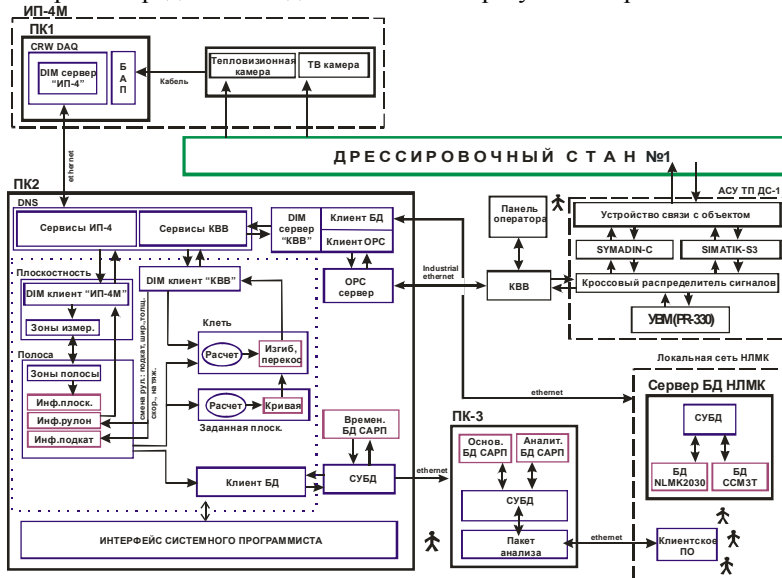


Рис. 1 Структурная схема аппаратно-программного комплекса САРП ДС-1.

Аббревиатура: АСУ ТП – автоматическая система управления технологическим процессом; БАП – блок аналогового процессора; КВВ – контроллер ввода-вывода; СУБД – система управления базами данных; ПО – программное обеспечение; УВМ – управляющая вычислительная машина; ПК – персональный компьютер; OPC и DIM – протоколы управления распределенными данными (OPC - OLE for Process Control; OLE - object linking and embedding; DIM - distributed information management)

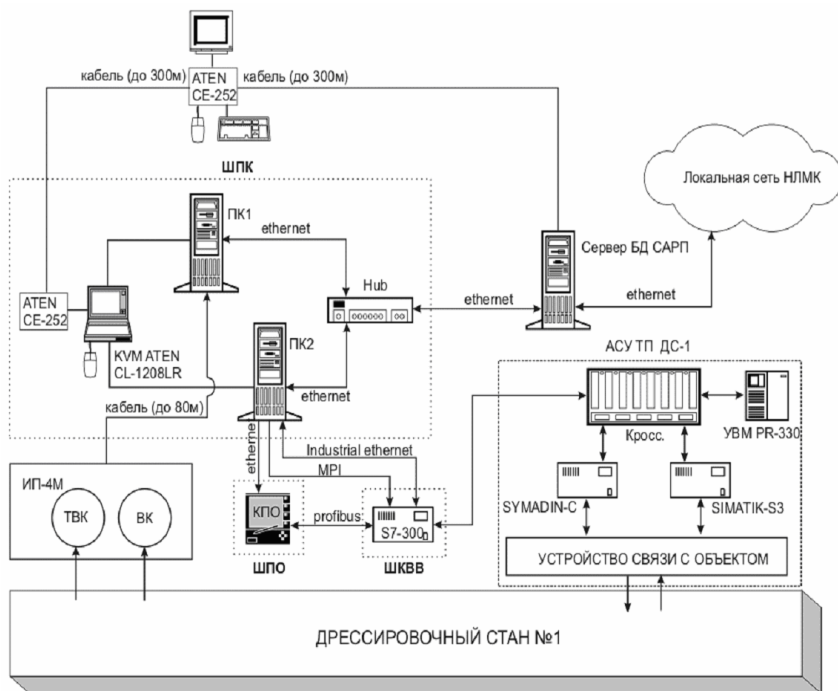


Рис. 2 Структурная схема КТС системы



Рис. 3 Выходная сторона дрессировочного стана с осветителем (1) и экраном тепловизора (2) со стороны привода, а также боксы телевизионной (3) и тепловизионной (4) камер электронно-оптической системы измерения плоскостности и температуры полосы со стороны обслуживания

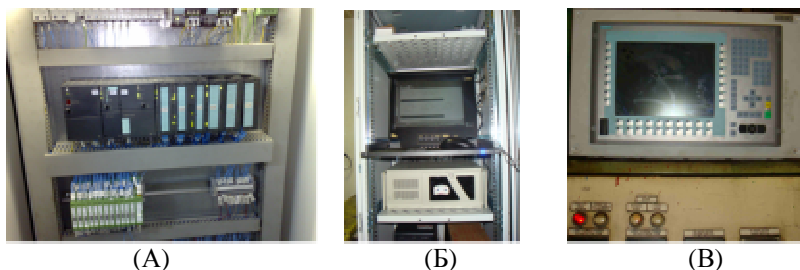


Рис. 4 Шкаф с контроллером ввода-вывода (КВВ) сигналов (А), шкаф с компьютером системы измерения ПК-1 и компьютером ПК-2, осуществляющего сбор данных, синтез и оптимизацию управляющих воздействий по каналам изгиба и параллельности валков, первичное архивирование параметров технологического процесса (Б) и шкаф с кнопочной панелью оператора (КПО) системы автоматического регулирования плоскостности, установленный на пульте оператора стана (В)

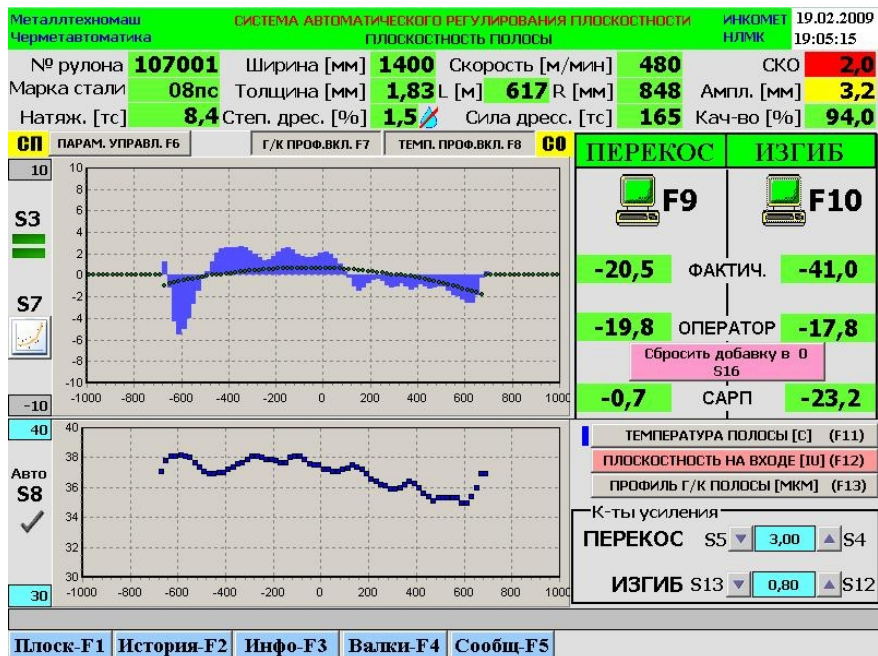


Рис. 5 Пример диалогового окна интерфейса панели оператора

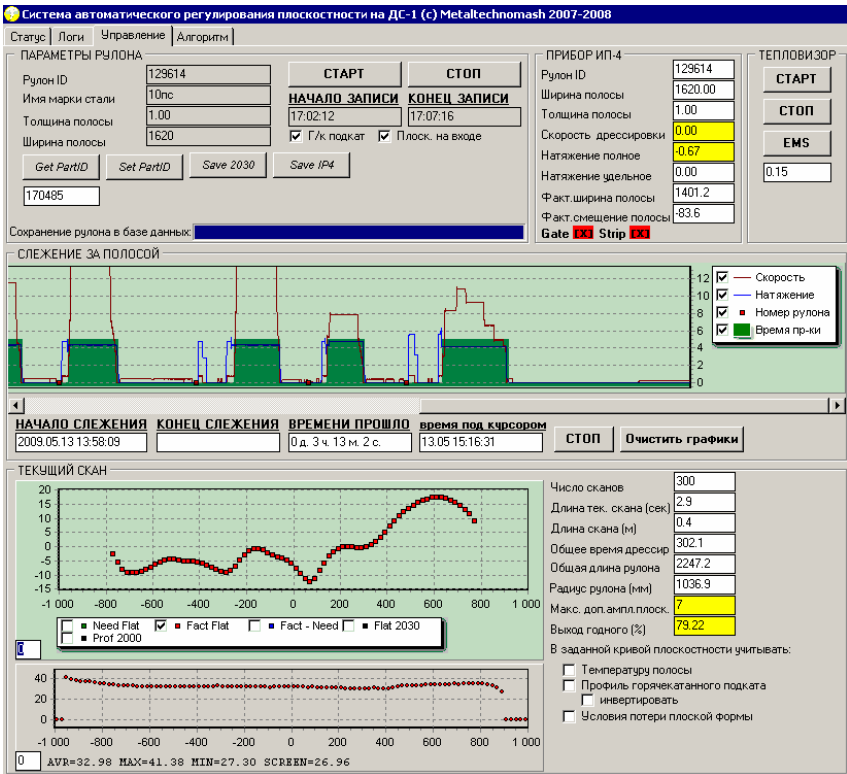


Рис. 6 Управляющая программа САРП

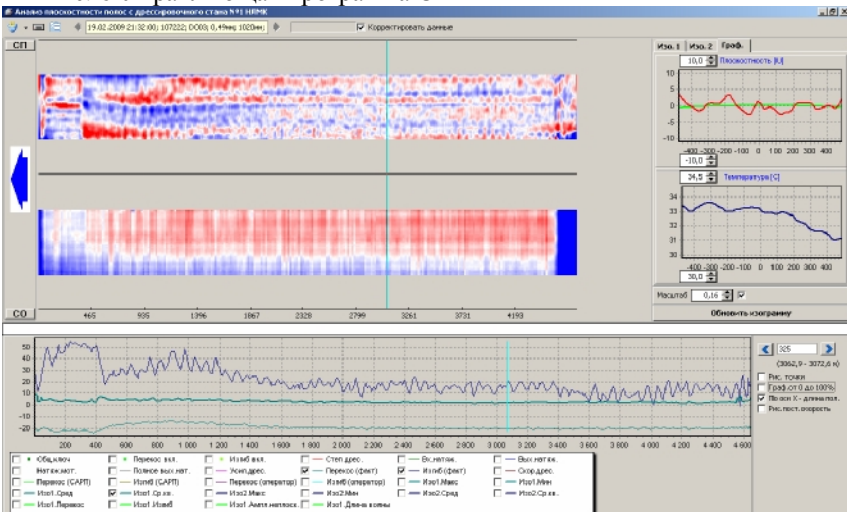


Рис. 7 Диалог программы - клиента для анализа плоскостности полос

САРП интегрирована в структуру компьютерной сети комбината, благодаря чему стало возможным использовать дополнительные данные, повышающие эффективность системы, в частности, данные о поперечном профиле, плоскостности и распределению температуры горячекатаного подката, а также плоскостности полосы на предыдущем технологическом подделе (стан холодной прокатки).

Преимущества системы также состоят в том, что возможно задание общей стратегии смотки рулона. Например, для агрегатов листоотделки (с минимальным отклонением плоскостности полосы после размотки рулона и полного усреднения температуры полосы) или с формированием заданного напряжённого состояния рулона, исключающего его проседание под действием собственной массы, проскальзывание и царапание витков в ходе последующей размотки. Для варианта САРП, ориентированного на использование в условиях стана холодной прокатки, предусмотрена также опция создания стратегии (изменения натяжения) смотки рулона перед колпаковым отжигом с обеспечением минимальной неравномерности межвитковых давлений в рулоне и, соответственно, минимальной вероятности слипания витков полосы в ходе отжига.

Особенностью созданной системы (ориентированной на использование в условиях стана холодной прокатки) являются реализованные методы расчёта и оптимизации условий селективного охлаждения валков (включая возможность использование коллекторов подачи предварительно подогретой эмульсии за пределами кромок прокатываемых полос), учитывающие инверсию управляющих воздействий в зависимости от знака разницы температуры эмульсии и валков [6], а также реализующих комплекс запатентованных решений, направленных на создание достаточного теплового напора СОЖ. То есть система не только управляет плоскостностью полосы по каналу селективного охлаждения валков, но и определяет заданные силовые условия прокатки в последней клетке, а также создаёт для этого канала воздействия оптимальные условия, повышающие её эффективность, путём управления расходами СОЖ в клетках стана в зависимости от скорости прокатки, ширины полосы. Функцией отклика является тепловой напор СОЖ в последней клетке стана, величина которого должна составлять 5-15°C. Величина теплового напора СОЖ может вычисляться как на основании измерений разницы температуры валков и СОЖ, так и косвенными методами – на основании разницы температуры СОЖ на входе в клетку и выходе из клетки (с использованием методов расчёта теплового баланса клетки). Для этого дополнительно используются данные измерения температуры полосы на выходе из клетки. На стане холодной прокатки 2030 в настоящее время реализованы оба метода, для чего установлены два дополнительных бесконтактных инфракрасных датчика: 1) для измерения температуры поверхности нижнего рабочего валка со стороны выхода 5-й клетки (где СОЖ не подаётся) и 2) для из-

мерения температуры полосы за 5-й клетью. С использованием разработанной методики на основании измерения температуры поверхности валков со стороны выхода из клетки с учётом скорости их вращения определяется температура поверхности валка в зоне орошения со стороны входа в 5-ю клетку.

Динамически меняющиеся целевые кривые плоскостности, рассчитываемые системой, учитывают измеренное распределение температуры полосы по длине и ширине, различие критических условий возникновения краевых и центральных видов неплоскостности, а также искажения измеренной неплоскостности вследствие распределения напряжений в полосе по её ширине, являющегося следствием формы наружной образующей сматываемого рулона или формируемого S-роликами натяжной станции.

Использование в САПР бесконтактного оптического принципа измерения плоскостности [7] стало возможным благодаря применению разработанных методов и алгоритмов восстановления формы натянутой полосы, то есть учитывающих величину натяжения полосы в зоне измерения. Один из реализованных методов расчёта изложен в статье [8].

Перед реализацией проекта осуществлялась временная установка бесконтактной системы измерения плоскостности полос на стане холодной прокатки 2030 для оценки адекватности измерения неплоскостности полос измерителем ИП-4 в сравнении со штатной имеющейся на стане системой измерения на основе стрессометрического ролика. Результаты исследования и их анализ приведен в работе [9]. На рис. 8 представлен один из многочисленных сравнительных результатов. Показана принципиальная возможность использования бесконтактного метода. Из рис. 8 следует, например, что влияние натяжения полосы, величина которого вначале намотки в 2-2,5 раза выше в сравнении с натяжением смотки основной части полосы, практически не оказывает влияния на результаты измерения плоскостности.

Основное преимущество используемой системы измерения плоскостности в сравнении с системами на основе стрессометрического ролика заключается в его бесконтактном принципе, низкой аппаратной и конструкционной себестоимости, минимальных эксплуатационных расходах.

Стрессометрическую измерительную систему на основе ролика возможно эффективно использовать, когда «видимая» неплоскостность полосы, измеряемая под натяжением полностью отсутствует, то есть когда полоса по всей ширине непрерывно охватывает и касается измерительного ролика. В то время, когда имеет место неплоскостность полосы под натяжением, в измерения вносится погрешность. Такие случаи могут иметь место в условиях значительной фактической неплоскостности полосы и низком уровне натяжения смотки. Недостатки присущи и бесконтактному методу, однако отличие состоит уже в иных ограничениях – в условиях чрезмерно высокого натяжения полосы в зоне измерения, чрезвычайно высокой фактической плоскостности полосы, а также в условиях

значительной концентрации паров эмульсии в зоне измерения (проблема решается путем смещения зоны измерения от клетки стана).

С целью расширения условий измерения и повышения их точности хорошим вариантом было бы комбинированное измерение двумя методами, однако высокая себестоимость и конструктивные ограничения, связанные с встраиванием в существующие агрегаты, делают более предпочтительным бесконтактный оптический метод, который, благодаря высокой разрешающей способности, позволяет измерять плоскостность полосы в присутствии достаточно больших удельных натяжений (до 70-100 Н/мм<sup>2</sup>). Заложенный в него принцип первичных измерений продольных углов поверхности полосы сводит к минимуму негативное влияние вертикальных колебаний полосы, в отличие от лазерных или оптических треугольных измерительных систем (которые измеряют высоту поверхности полосы над её горизонтальной проекцией). Встроенные методы фильтрации данных обеспечивают достоверные измерения даже в присутствии незначительных паров эмульсии на станах холодной прокатки. Аппаратно и программно реализованы функции измерения ширины полосы и определения смещения полосы с оси прокатки.

Еще одним преимуществом используемого бесконтактного принципа измерения является возможность определения длины волны неплоскостности, что позволяет определять высоту неплоскостности прокатанной полосы – основного гарантируемого показателя, оговариваемого в стандартах. Стрессометрические измерительные системы такой возможности не имеют, так как плоскостность полосы определяется на основании распределения давлений на секции ролика за один – три его полных оборота на длине полосы, значительно большей обычной длины волны неплоскостности (в зависимости от вида дефекта длина волны может составлять от 100 до 400 мм для локальных видов неплоскостности и до 1-2 м (в зависимости от ширины полосы) для обычных видов – краевой или центральной волнистости, в то время, как только за один оборот ролика и одну минимальную порцию измерений длина транспортируемой полосы составляет около одного метра).

Новые технические решения, заложенные в проект системы запатентованы. В их числе патенты РФ 2119643, 2259245, 2211102, 2190488, 2190489, 2212289, 2212962, 2212963, 2225272, отражающие приоритет первой отечественной системы автоматического регулирования плоскостности полосы.

В мае 2009 года система введена в постоянную промышленную эксплуатацию. Для оценки эффективности работы САРП в управляющей программе был реализован режим гарантийных испытаний. Управляющая программа попеременно (через один рулон) включала и выключала автоматический режим работы системы. В таком режиме испытаний становится возможным наиболее точно сравнивать уровень качества полос, полученного при ручном и автоматическом управлении. При этом исклю-

чается влияние таких факторов как особенности партии металла, поступившей на дрессировку, агрегат, с которого поступил металл и др. Необходимо отметить, что даже в ручном режиме управления плоскостность полос улучшалась, так как операторы стана ориентировались на показания измерителя плоскостности и стремились её улучшить.

На основании результатов обработки множества данных об эффективности работы САРП в марте-мае 2009 г. установлено однозначное её положительное влияние на плоскостность производимой продукции. В различные периоды времени и на различном сортаменте дрессируемых полос улучшение плоскостности, выраженной в виде средней величины амплитуды неплоскостности (высоты волны), оказалось в пределах 10...30%. Систематическое положительное влияние работы системы привело к снижению отсортировки готовой продукции по неплоскостности.

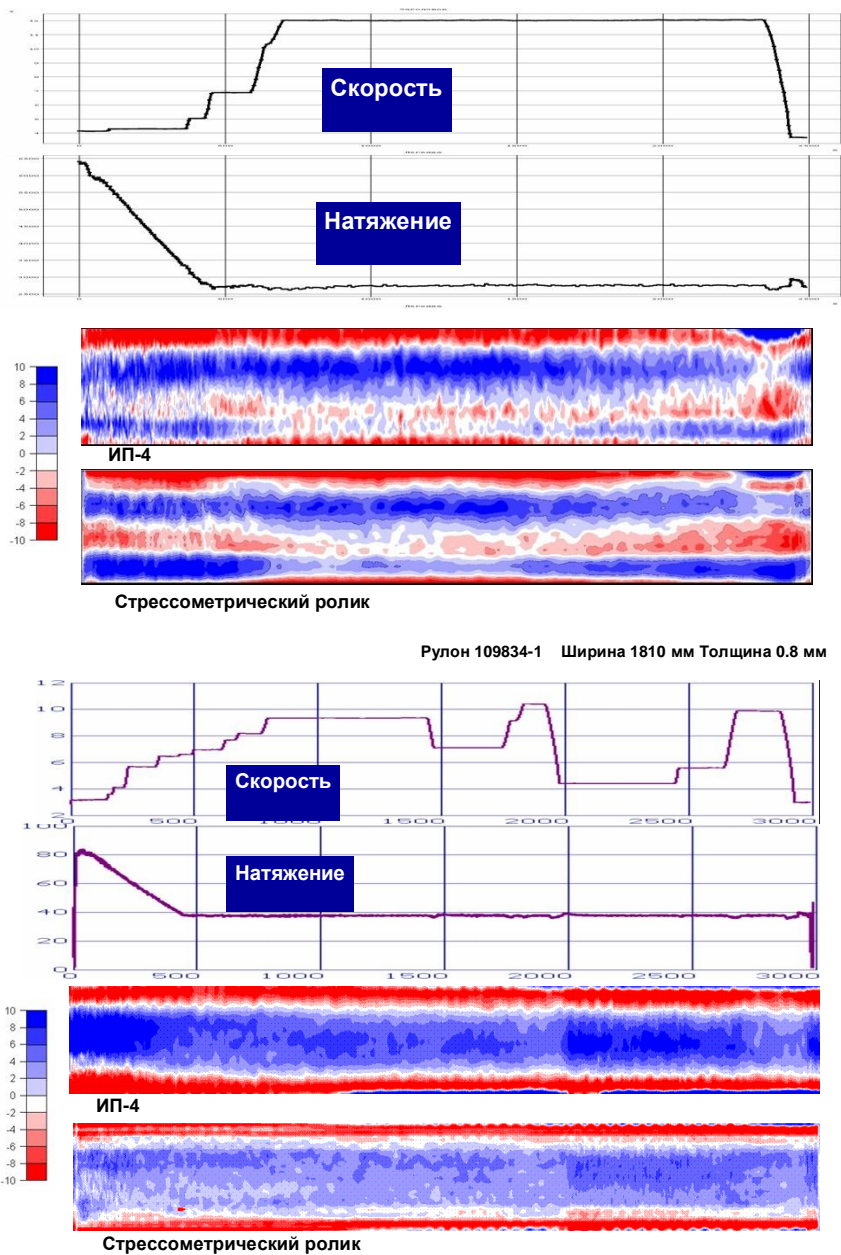


Рис. 8 Сравнение результатов измерения с помощью стрессометрического ролика и бесконтактной оптико-электронной системы ИП-4

## Литература

1. Управление качеством тонколистового проката / В.Л.Мазур, А.М.Сафьян, И.Ю.Приходько, А.И.Яценко // К.: Техніка.- 1997.–384 с.
2. Совмещённое регулирование толщины, натяжения и плоскостности полос при холодной прокатке современными средствами регулирования с учётом скоростных характеристик исполнительных механизмов / И.Ю.Приходько, А.М.Сафьян, В.С.Кузин // *Металлургическая и горнорудная промышленность.*– 2000.– № 2.– С. 32-35.
3. Приходько И.Ю. Управление тепловым профилем валков зонной подачей СОЖ // В кн.: "Труды пятого конгресса прокатчиков, г. Череповец, 21 – 24 октября 2003». – М.: АО Черметинформация. – 2004. – С. 113 – 122.
4. Исследование эффективности системы регулирования плоскостности полос зонным охлаждением рабочих валков. Часть 1 / П.П.Чернов, А.М.Сафьян, И.Ю.Приходько и др. // *Производство проката*, № 9, 2001.- С. 32-34; Часть 2 // *Производство проката*, № 10, 2001.- С. 31-35; Часть 3 // *Производство проката.* – 2002. - № 4. – С. 15 – 17; Часть 4 // *Производство проката.* – 2002. - № 5. – С. 14 – 17.
5. Оптимизация температурного и напряженно-деформированного состояния рулонов в ходе холодной прокатки и колпакового отжига с помощью компьютерного моделирования / И.Ю.Приходько, П.П.Чернов, В.И.Тимошенко, В.В.Акишин // В кн.: "Труды пятого конгресса прокатчиков, г. Череповец, 21 – 24 октября 2003». – М.: АО Черметинформация. – 2004. – С. 124 – 127.
6. Управление тепловым профилем валков и плоскостностью полос селективной подачей эмульсии / И.Ю.Приходько, П.П.Чернов, С.Е.Шатохин // *Сталь*, № 11, 2006 г., С. 87 – 93.
7. Опыт использования измерителя плоскостности полосы ИП-4ГП на стане горячей прокатки / В.А.Агуреев, А.В.Курякин, В.С.Руднев, С.В.Трусилло, В.П.Шершелюк // *Металлург.*- 2004.- №1.- С.41-45.
8. Измерение плоскостности горячекатаной полосы электронно-оптическим измерителем ИП-4 под натяжением моталки / В.А.Агуреев, А.В.Курякин, С.В.Трусилло // *Металлург.*- 2007.- №3.- С.72-75.
9. Agureev, Ye. Kalmanovich, A.V. Kuryakin, S.V. Trusillo "Comparison of Non-Contact Shapemeter a Stressometer for Strip Flatness Control", journal "Steel Times International", January/February 2007, Vol.31.№1, pp. 16-20.