

**И.Ю.Приходько**

**СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И  
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ  
ИНСТИТУТА ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

*Институт черной металлургии НАН Украины*

Представлено описание комплекса компьютерных программ для инженерных расчётов и оптимизации параметров процессов производства тонколистового проката. Описаны промышленные системы автоматического управления процессами прокатки, в частности: система автоматического регулирования плоскостности полос с использованием бесконтактных методов измерения плоскостности и температуры; система контроля вибрации и управления скоростью непрерывного стана холодной прокатки полос; система управления охлаждением валков широкополосного стана горячей прокатки.

**Ключевые слова:** непрерывный стан холодной прокатки, тонколистовой прокат, системы автоматического управления, плоскостность

Комплекс математических выкладок теории прокатки представляет собой совокупность теоретических знаний, но не является инструментом для исследований, а также отыскания рациональных или оптимальных решений конкретных практических задач. Для того, чтобы методы и алгоритмы расчёта приобрели новое качество (закрывающееся в возможности эффективного практического использования), необходимым условием является реализация теоретических выкладок в виде компьютерных систем (средств компьютерного моделирования), обладающих широким спектром возможностей для исследования, оптимизации параметров процессов, поиска рациональных практических решений, а также управления процессами.

К таким средствам компьютерного моделирования относятся программные продукты, разработанные в отделе проблем прокатки листа Института черной металлургии НАН Украины совместно с ООО «Металлтехномаш». **WinColdRolling** © (Свидетельство о регистрации авторского права на произведение № 15149, выданное Государственным департаментом интеллектуальной собственности Министерства образования и науки Украины, дата регистрации 29.12.2005 г.) – система расчета параметров и оптимизации процессов холодной прокатки и дрессировки полос из сталей и сплавов [1-4]. Программа предназначена для расчетов энергосиловых, кинематических, температурных и других параметров процессов многопроходной холодной прокатки и дрессировки полос, а также для оптимизации деформационно-скоростных и теплосиловых режимов прокатки.

### **Основные функциональные преимущества:**

- оптимизация деформационно - скоростных и теплосиловых режимов прокатки, обеспечивающих минимальную неплоскостность и разнотолщинность, заданные механические свойства и шероховатость поверхности полос, а также максимальную стабильность процесса прокатки;
- определение минимальной толщины прокатываемой полосы, рациональной толщины горячекатаного подката, параметров настройки непрерывного стана (скорости вращения валков и позиции нажимных устройств) по технологическим параметрам процесса, в частности, по распределению промежуточных толщин полосы между клетями и по межклетевым натяжениям;
- решение обратной задачи, а именно, - расчёт промежуточной толщины и межклетевых натяжений полосы по параметрам настройки непрерывного стана;
- адаптация алгоритмов расчёта энергосиловых и кинематических параметров процесса по экспериментальным данным или по условно эталонной модели, встроенной в систему;
- комплекс моделей напряжения текучести сталей различных марок в зависимости от химического состава, параметров структуры и их типов с использованием аналитических зависимостей, которые можно выбрать для сталей различных групп из списка или создать свои пользовательские зависимости, записав и сохранив их в базе данных с возможностью последующего использования в расчётах;
- для сталей и сплавов с немонотонной зависимостью напряжения текучести от температуры, степени и скорости деформации, а также в случаях наличия первичных экспериментальных данные о напряжении текучести, например, пластометрических, реализована модель напряжения текучести, построенная на методах многомерной интер- и экстраполяции экспериментальных данных, учитывающая корректный перенос условий испытаний на моделируемый процесс плоской прокатки;
- предусмотрен комплекс моделей контактного трения при прокатке, включая аналитические и эмпирические зависимости, теоретическую модель трения в полужидкостном режиме (предельными случаями этого режима являются режимы граничного трения и жидкостного трения с учётом гидродинамических эффектов смазки);
- при расчёте упругодеформированной линии контакта валков с полосой используется как итерационный метод решения задачи расчёта длины дуги контакта, так и безытерационный. При этом используются решения для круглой или некруглой дуги контакта;
- используются численные и комплекс аналитических моделей для расчёта энергосиловых параметров очага деформации. Численные модели реализованы методом конечных разностей при решении основного

дифференциального уравнения прокатки, причём решение уравнения отыскивается в продольных напряжениях, что справедливо как для зоны пластической деформации, так и для упругих зон очага деформации. Одна из моделей допускает зону пластической деформации по всему очагу деформации, вторая - дополнительно учитывает участки эллиптического упругого сжатия валков и полосы во входной зоне очага деформации и эллиптической упругой отдачи валков и полосы в выходной зоне очага деформации. Отыскиваются распределения нормальных и касательных напряжений на элементарных участках вдоль очага деформации;

- реализованы задачи и подзадачи оптимизации распределения обжатий и межклетевых натяжений. Подзадачи оптимизации "на фоне" решения основной задачи (например, режима, соответствующего заданному распределению по клетям непрерывного стана нагрузок) позволяют одновременно достичь других важных целей, например, - определение режимов натяжения, минимизирующих возникновение вибраций стана, определение технологических режимов процесса непрерывной прокатки с заданными величинами опережения в клетях;

- возможность определения режима прокатки, который в наибольшей мере отвечает выбранным величинам профилировок валков, или определения необходимых профилировок валков (или сил их принудительного изгиба), исходя из заданного режима прокатки;

- рассчитываются необходимые объёмы подачи смазочно-охлаждающей жидкости в клетки стана, исходя из температурных и энергосиловых режимов прокатки. При расчётах параметров дрессировки (одно- или двухпроходной) прогнозируется шероховатость поверхности полосы и предел текучести стали после дрессировки. Определяются рациональные степени деформации при дрессировке и энергосиловые параметры процесса при сухой дрессировке и дрессировке со смазкой;

- стохастическое моделирование - позволяет представлять вероятностные оценки процесса в условиях различных режимов прокатки, отслеживать закономерности изменения параметров с учётом вероятностного характера изменения наиболее значимых параметров процесса, закономерностей работы системы автоматического регулирования толщины полосы и натяжения, транспортного запаздывания, что позволяет совершенствовать алгоритмы и параметры системы управления;

- возможности решения задач, связанных с тепловым балансом стана, в частности с определением рациональных объёмов подачи охладителя в клетки, исходя из энергосиловых и температурно-скоростных режимов прокатки с учетом особенностей эмульсионной системы стана;

- возможности определения температуры и теплового профили рабочих и опорных валков стана, исходя из температуры охладителя, объёмов СОЖ, подаваемой в клетки. Возможно также определение

требуемых объемов СОЖ на основании данных о мощности и других параметров прокатки в каждой клетке, а также изменения температуры СОЖ при охлаждении в эмульсионной системе стана с использованием холодильников или без них. С учетом особенностей алгоритмов расчета теплового баланса стана холодной прокатки, данная система позволяет определить рациональное распределение охладителя по клеткам непрерывного стана холодной прокатки с учетом загрузки клетей по силе и мощности прокатки, условий полужидкостного трения и полноты граничного контакта в очагах деформации клетей стана с учетом шероховатости поверхностей валков и полосы и гидродинамических эффектов смазки, являющейся в очаге деформации по сути термическим сопротивлением, и приводящей к разрывам тепловых потоков от полосы к валкам.

Возможности системы позволяют детально анализировать процесс непрерывной прокатки на действующих станах (в том числе с вероятностных позиций), осуществлять расчеты температурных и энергосиловых параметров процесса холодной прокатки, показателей точности, плоскостности и микрогеометрии поверхности полосы, профилировки валков, количества подаваемой СОЖ; оптимизировать режимы прокатки с целью повышения плоскостности полос, производительности стана, снижения удельной энергоемкости процесса с учетом комплекса известных ограничений на основе разработанных критериев и быстродействующего алгоритма оптимизации; минимизировать вероятность возникновения вибраций и пробуксовок валков изменением режимов обжатий и натяжений; определять возможности прокатки сталей различных марок в условиях существующего и проектируемого оборудования, определять конечную толщину полосы при заданной начальной, и наоборот, а также осуществлять разработку оптимальных режимов прокатки, исходя из конкретных научных и практических задач.

Отдельные компоненты WinColdRolling используются в системах автоматического регулирования процессами холодной прокатки и дрессировки полос. Компоненты WinColdRolling могут служить основой верхнего уровня систем автоматизации станов холодной прокатки.

**CoilTemper3D** - система расчёта температурного и напряжённо-деформированного состояния рулонов в процессах прокатки-смотки, а также прогнозирования условий (интенсивности) слипания витков в процессе термической обработки рулонов в колпаковых печах [5-7]. Предназначена для расчета нестационарного теплового (температурного) и напряженно-деформированного состояния рулонов холоднокатанных полос, с учётом исходной неизотермичности условий смотки, неплоскостности и шероховатости поверхности полос, а также режимов нагрева и охлаждения рулонов в колпаковых печах при заданных

коэффициентах теплоотдачи и циклограммах температуры защитного газа.

**Основные функциональные преимущества:**

- реализованы методы расчёта объёмного напряжённо-деформированного состояния рулонов полос в процессе нагрева и остывания с учётом исходного температурного состояния рулона, закона изменения натяжения смотки шероховатых полос. Учитывается взаимное влияние межвитковых давлений и термических сопротивлений в процессе термообработки рулона;

- на основании разработанной модели реализованы алгоритмы расчета нестационарного температурного и напряженно-деформированного состояния (ТНДС) рулонов холоднокатаных полос в процессе намотки на барабан моталки, снятия с барабана моталки, нагрева и охлаждения рулонов при заданных коэффициентах теплоотдачи и функциях изменения температуры защитного газа, моделирующих условия теплообмена рулона с высокотемпературной защитной атмосферой в колпаковой печи. Алгоритм учитывает неидеальный тепловой и механический контакт на смежных поверхностях витков полосы;

- особенности в постановке задачи обусловлены состоянием поверхностей контактирующих слоев – неплоскостностью и шероховатостью поверхностей. Эти особенности учтены использованием параметра обобщенного неидеального контакта, который позволяет в условиях совместности деформаций в рулоне учитывать сближение контактирующих поверхностей как функцию от межвитковых давлений;

- в методе расчёта ТНДС учтено влияние дополнительных термических напряжений, возникающих при остывании и нагреве рулона, когда в нем возникает переменное температурное поле.

Разработанная компьютерная система является частью методологии решения научных и практических задач повышения качества поверхности холоднокатаных полос при рулонном способе производства.

CoilTemper3D может служить средством оптимизации технологических режимов прокатки, смотки и рекристаллизационного колпакового отжига холоднокатаных полос, минимизируя вероятность возникновения дефектов поверхности полос типа "линии перегиба" (так называемый "излом"), следы проскальзывания витков (царапины), а также для контроля устойчивости рулонов от проседания под действием собственной массы или возникновения дефектов смотки рулонов типа "птичка" (когда внутренние витки в рулоне, теряя устойчивость, нарушают круглую форму, что делает невозможным дальнейшую обработку такого рулона).

**TRoICS** © - программа расчёта изменения среднemasсовой температуры вала в его центральном сечении [8]. Позволяет выполнять

расчеты полей и среднемассовой температуры в центральном поперечном сечении рабочего валка в процессе прокатки и во время пауз.

**Основные функциональные преимущества:**

- программа позволяет решать задачу по определению в различных условиях оптимальных соотношений подачи охладителя со стороны входа и выхода из валков, на верхний и нижний валки, оптимизировать месторасположения зон охлаждения по окружности валков, исходя из существующих конструктивных возможностей, определить номера клетей, где целесообразно применение дополнительных приемов снижения температуры валков (подача технологической смазки или применения системы антишелушения);
- распределение коэффициента теплоотдачи в зонах орошения рассчитывается программой в зависимости от текущей температуры поверхности валка, плотности орошения, давления охладителя в коллекторе, расстояния от форсунок до валка, а также угла атаки струи;
- распределение коэффициента теплоотдачи в очаге деформации рассчитывается в зависимости от распределения температуры поверхности полосы в очаге деформации, силы прокатки и толщины слоя окалины;
- удобная интерактивная мнемосхема охлаждения валка; расчеты полей и среднемассовой температуры валка в процессе прокатки каждой полосы, во время пауз, а также в стационарном режиме.

TRollCS © является составной частью более общей разработанной компьютерной системы расчета и оптимизации температурного режима рабочих валков клетей чистовой группы ШСГП (TRollHSM ©).

**TRollHSM ©** - программа расчета и оптимизации температурного режима рабочих валков клетей чистовой группы ШСГП [8]. Программа позволяет рассчитывать оптимальное распределение охладителя по клетям с учетом режима прокатки, конфигурации системы охлаждения в каждой клетке ШСГП и заданной температуры валков.

**Основные функциональные преимущества:**

- позволяет рассчитывать режимы прокатки (энергосиловые параметры, температуру полосы по клетям) и оптимизировать распределение охладителя по клетям с учетом режима прокатки, выбранной конфигурации системы охлаждения в каждой клетке и заданной температуры валков;
- оптимальный режим обжатий по клетям стана рассчитывается, но может быть и задан. Расчетные силы прокатки могут быть скорректированы с учетом данных измерений;
- расчеты температуры валков могут выполняться в двух вариантах: после прокатки заданного количества полос, либо с выходом с выходом на стационарный температурный режим. Во втором случае можно оптимизировать расход воды по клетям стана, задав требуемую

температуру валков в каждой клетке. При расчете расхода воды в каждой клетке программа учитывает напорно-расходные характеристики форсунок. Параметры форсунок различных производителей хранятся в редактируемой базе данных.

Алгоритмы, реализованные в TRollHSM ©, используются в системе автоматического управления охлаждением валков ШСГП.

**RollPrewflow** - программа для конфигурирования и рационального ориентирования коллекторов подачи охладителя на валки [8]. Предназначена для конфигурирования и рационального ориентирования коллекторов подачи охладителя на валки прокатного стана.

**Основные функциональные преимущества:**

- позволяет определять топографию подачи охладителя, теоретический погонный расход охладителя с учетом имеющих место закономерностей его распределения вдоль и поперек плоскости факела, оценивать плотность орошения каждым коллектором в отдельности и в целом на валок, определять геометрические параметры подачи охладителя (центральные углы орошения на валке, зоны и площади орошения), а также распределение углов атаки по площади зоны работы каждой форсунки (струи) с валком;

- содержит пополняемую и редактируемую базу данных о форсунках различных производителей с их напорно-расходными характеристиками, углами раскрытия факелов, законами распределения жидкости по площади факела;

- позволяет автоматически оптимально конфигурировать одно- и многорядные коллекторы (шаг форсунок, их ориентация на базе выбранных пользователем типов или выбирая их из каталога самостоятельно), обеспечивая заданное общее распределение охладителя по длине бочки валка и плотность орошения с учетом допустимого отклонения от заданных общего уровня и неравномерности;

- учитываются случаи неполного попадания жидкости на валок, а также эффекты конвергенции струй. Вычисляются плотности орошения не только от действия струй от каждой форсунки, но и интегральные плотности по всей площади орошения, центральные углы на валке, орошаемые жидкостью.

TRollPrewflow полностью решает задачи организации и проектирования рациональной подачи жидкости на валки, позволяет определить теоретическое распределение погонного расхода по каждому ряду форсунок и в целом по окружности (четвертям) валка. Представлена удобная возможность осуществления ручной коррекции местоположения отдельных форсунок, их групп, их ориентации по отношению к валку.

**TRollAB** - программа расчёта динамики изменения температурных полей и теплового профиля валков по длине бочки с учётом селективной подачи смазочно-охлаждающей и смазочно-нагревающей эмульсии со встроенным алгоритмом управления тепловым профилем валков [8,9].

Позволяет моделировать процесс работы (в одной отдельно взятой клетки) селективной подачи смазочно-охлаждающей и смазочно-нагревающей эмульсии в режиме реального времени, а также определять динамику изменения температурного поля и теплового профиля рабочего валка с учетом управляющих воздействий (давления и общего расхода, объемом подаваемого охладителя в отдельные зоны).

**Основные функциональные преимущества:**

- реализовано управление тепловым профилем валков на локальных участках, учтены особенности управления тепловым профилем на стадии разогрева валков, когда подаваемая смазочно-охлаждающая жидкость приводит к разогреву валков;
- расчеты изменения температурного поля и теплового профиля рабочих валков происходят в режиме реального времени с учетом управляющих воздействий (изменения давления и общего расхода, а также изменения расхода охладителя по отдельным зонам);
- обеспечивается расчёт необходимого распределения по длине бочки не только охлаждающей, но и дополнительной подачи в области кромок прокатываемой полосы предварительно подогретой эмульсии, исходя из заданного теплового профиля рабочих валков;
- алгоритм управления тепловым профилем валков используется как компонент автоматической системы управления плоскостностью полос по каналу селективного охлаждения валков при одновременном использовании и других способов (и средств) воздействия.

**HRSProfileControl** - программа расчёта поперечного профиля, плоскостности полос и управляющих воздействий при горячей прокатке. Программа обеспечивает расчёт составляющих (износ, упругие деформации, тепловое расширение, профиль валков) поперечного профиля полос при горячей прокатки в чистовой группе клеток ШСГП, а также реверсивного одно- или двухклетевого стана Стеккеля с моталками в печах. Программа ориентирована на оценку эффективности использования различных алгоритмов управления поперечным профилем и плоскостностью полос на станах, оснащенных комплексом средств управления, таких как изменение взаимной ориентации валков (параллельность, перекрещивание, осевая сдвижка), принудительный изгиб (+/-) и тепловое профилирование (изменением общего расхода и/или по зонам). Возможно моделирование использования средств в различных комбинациях. В зависимости от совокупности выбранных средств и программ прокатки программа позволяет выбрать оптимальные параметры профилировок рабочих и опорных валков, а также диапазоны управляющих воздействий.

**Основные функциональные преимущества:**

- по заданной программе прокатки на любом этапе кампании валков рассчитываются их изношенный, тепловой профиль активной образующей, а также упругие деформации валкового узла. Путём



сравнения расчётного и заданного профилей поперечного сечения полосы с учётом профилировок валков определяются вид и параметры управляющих воздействий по каналам: параллельность валков; перекрещивание рабочих валков друг относительно друга и перекрещивание опорных валков относительно рабочих с целью компенсации возникающих осевых нагрузок на последние; осевая сдвигка рабочих валков; дополнительный изгиб и противоизгиб рабочих валков;

- износ валков рассчитывается с учётом использования различных технологий управления их осевой сдвижкой:

- циклическая сдвигка валков CS;

- универсальное регулирование профиля URP с применением «сигарообразных» рабочих валков или валков, имеющих односторонний скос на краю бочки;

- непрерывное изменение профиля CVC с применением выпукло-вогнутых валков;

- при управлении поперечным профилем полос различной толщины и ширины учитываются критические значения неравномерности деформации, приводящие к неплоскостности

Алгоритмы, реализованные в HRSPProfileControl, созданы для использования в системах автоматического управления поперечным профилем полос на ШСГП.

**HRSPProfileAnalysis** - программа для автоматизированной оценки параметров поперечного профиля горячекатаного подката и определения критических параметров локальных утолщений. Предназначена для численной оценки профиля поперечного сечения горячекатаного подката с учётом его трансформации в клетях стана холодной прокатки, а также условий работы и возможностей системы зонного охлаждения валков последней клетки.

#### **Основные функциональные преимущества:**

- программа может оперировать данными, полученными от сканирующего измерителя поперечного профиля горячекатаных полос и, помимо определения основных характеристик (клиновидность, выпуклость, смещение выпуклости), идентифицировать все параметры локальных утолщений поперечного профиля подката (высота, ширина основания, месторасположение по ширине полосы) а также определять критичность локальных утолщений с учётом известных параметров процесса холодной прокатки, в том числе работы системы селективного охлаждения рабочих валков;

- программа позволяет научно обоснованно формулировать требования к локальным утолщениям профиля поперечного сечения горячекатаного подката, которые охватывают не только предельную высоту локальных утолщений в зависимости от толщины подката, но и учитывают ширину основания локальных утолщений;

- разработанная методика и алгоритм расчёта трансформации локальных утолщений в клетях стана холодной прокатки позволяют выполнить численную оценку закономерностей формирования в клетях стана предпосылок образования двух случаев распределения остаточных напряжений по ширине полосы в месте локальных утолщений горячекатаного подката при производстве тонких полос (толщиной менее 1 мм);
- требования к предельным величинам локальных утолщений могут генерироваться программой по двум взаимоисключающим механизмам – формированию продольных критических сжимающих напряжений и образованию локальной неплоскостности (потеря устойчивости локальных участков по ширине в продольном направлении полосы), а также формированию продольных критических растягивающих напряжений в местах локальных утолщений и образованию жёлоба (потери устойчивости тонкой полосы в поперечном направлении полосы);
- программа автоматически протоколирует параметры поперечного профиля горячекатаного подката и служит для анализа результатов и причин отбраковки холоднокатаных полос;
- HRSPProfileAnalisis может рассчитывать изменение целевой эпюры плоскостности холоднокатаных полос (в зависимости от профиля наружной образующей и радиуса рулона), задаваемой системе автоматического регулирования плоскостности полос на стане холодной прокатки.

Разработанная система автоматизированной оценки профиля горячекатаного подката в увязке с результатами работы системы автоматического регулирования плоскостности полос открывает перспективы сквозного анализа качества (профиль и форма) на всех основных этапах технологии производства холоднокатаных полос.

**FlatnessAnalisis** - программа для контроля плоскостности холоднокатаных полос и определения степени соответствия заданным показателям. Предназначена для численной оценки показателей плоскостности прокатываемых полос, а также статистической обработки данных о неплоскостности и определения закономерностей изменения этих показателей с возможностью выбора различных методик аттестации.

#### **Основные функциональные преимущества:**

- в программе реализованы два подхода к определению доли соответствия гарантированных показателей плоскостности – по длине и площади полосы. Предусмотрено решение обратной задачи – определение предельных отклонений плоскостности при заданной доле выхода годного;
- предусмотрена пакетная обработка измерений плоскостности для заданного числа полос. Полученные результаты представляются в виде таблиц и графиков – трендов, показывающих закономерности изменения

доли отбраковки для различных групп полос по толщине и ширине. Анализ этих трендов позволяет отслеживать динамику изменения плоскостности прокатываемых полос различного сортамента, анализировать причины ухудшения и улучшения показателей при реализации различных мероприятий;

- в программу встроены диагностические функции оценки работоспособности клапанов и форсунок систем селективного охлаждения валков, определения эффективности работы систем AFC, коэффициентов корреляции и передачи управляющих воздействий по каналу селективного охлаждения валков.

**Система контроля вибрации (СКВ) непрерывного стана холодной прокатки** полос [11,12]. Данная промышленная система служит для непрерывного мониторинга динамической ситуации в непрерывном стане, а также управления процессом прокатки в реальном масштабе времени с целью повышения рабочей скорости и производительности стана.

Система контроля вибрации предназначена для контроля вибрационной ситуации на станах холодной прокатки в реальном масштабе времени и направлена на предупреждение входа ее в фазу лавинообразного нарастания, сопровождающуюся гудением стана. Система обладает возможностью автоматического снижения скорости на оптимальную величину при обнаружении развития резонансной вибрации. В систему входит функция диагностики периодических дефектов толщины при прокатке.

Основные функции СКВ:

- контроль синхронизации колебаний клетей и управления станом;
- контроль горизонтальной устойчивости подушек рабочих валков;
- контроль обжатий и натяжений в клетях непрерывного стана;
- контроль высокочастотной продольной разнотолщинности полос;
- контроль нейтрального угла в очаге деформации;
- диагностики элементов оборудования и линии привода клетей стана.

Режим функционирования системы – круглосуточный.

**Программное и аппаратное обеспечение.** СКВ включает персональный компьютер, оснащённый общесистемным программным обеспечением на базе ОС Windows и специальным (прикладным) ПО. Специальное ПО представляет собой совокупность программных модулей, которые обеспечивают сбор и обработку данных получаемых из АСУ ТП стана, а также реализацию целевых функций системы. В состав КИП входят: комплект акселерометров, держатели, аналого-цифровой преобразователь сигналов, кабели и соответствующие формирователи сигналов.

Меньшие значения снижения скорости в автоматическом режиме работы СКВ обусловлены началом снижения скорости на более ранней

фазе развития резонансной вибрации. Это достигается за счет мгновенной выдачи электрического сигнала снижения скорости в автоматическом режиме без учёта человеческого фактора - реакции и внимательности оператора. Чем раньше начинается воздействие на скорость стана, тем меньше значение снижения скорости, необходимое для нормализации динамической ситуации на стане.

**Основные результаты использования СКВ.** Исследования выполнялись в течение 3-х месяцев (июль-сентябрь 2006 г.) в начальный период после сдачи СКВ в промышленную эксплуатацию на пятиклетевом стане бесконечной холодной прокатки 2030 ОАО «НЛМК». Результаты сравнивались с аналогичным по протяжённости базовым периодом (апрель-май 2006 г.). В целом анализ работы СКВ в автоматическом режиме управления скоростью показал:

- надежное (в 95% случаев) не позднее, чем за 3 секунды, распознавание возникновения резонансных вибраций («гудения») стана;
- автоматическое устранение случаев «гудения» стана без вмешательства операторов;
- минимальное (на 10-15 м/мин) снижение скорости стана в случаях возникновения опасных вибраций;
- возможность последующего восстановления прежней скорости (в ручном режиме);
- снижение связанных с резонансными вибрациями периодических дефектов полос;
- повышение за счет этого средней рабочей скорости стана, так как каждый последующий случай «гудения» стана происходит уже на меньшей скорости вследствие ухудшения состояния поверхности валков;
- снижение вероятности развития резонансных вибраций значительной амплитуды уменьшает количество возможных обрывов полос.

Объём выборок данных за анализируемый период позволяет утверждать, что автоматическое управление скоростью стана посредством СКВ привело к повышению скорости прокатки полос тонкого сортамента:

- средним значениям скорости прокатки – на 11%;
- по максимальной достигнутой скорости прокатки – на 8%;
- по снижению величин падений скорости – на 31%.

**Система автоматического регулирования плоскостности (САРП) полос.** Первая отечественная промышленная САРП реализована на дрессировочном стане №1 ОАО «НЛМК» [13,14]. САРП, использующая бесконтактные методы измерения плоскостности и температуры полос, предназначена для автоматического измерения и управления плоскостностью полос на одноклетевых и непрерывных станах холодной

прокатки, сбора, хранения, визуализации и протоколирования технологической информации.

**Основные функции САРП:**

- измерение и регулирование усилия гидроизгиба и прокатки раздельно со стороны привода и обслуживания (перекос);
- визуализация заданной и фактической эпюры поперечного профиля полосы на мониторе оператора;
- ввод и текущие изменения оператором заданной эпюры плоскостности полос с поста управления;
- сбор данных о плоскостности полос и технологической информации;
- хранение собранной информации не менее 1-го года;
- визуализация параметров плоскостности в форме трендов и цифровых значений с учетом принятых размерностей;
- просмотр накопленной информации о работе САРП в форме графиков и таблиц, привязанной к единице продукции (номер партии, номер рулона);
- печать накопленных данных в форме отчетов, графиков и таблиц (номер партии, номер рулона), (форма отчетов согласовывается на этапе технического проектирования заказчиком и разработчиком);
- статистическая обработка технологической информации (определяются min, max, среднее значение и др. параметры);
- реализации передачи интегральных характеристик плоскостности полос с привязкой к номеру партии, номеру рулона по согласованному с заказчиком протоколу обмена.

**Программное и аппаратное обеспечение.** Программное обеспечение представляет собой общесистемное ПО на базе ОС Windows, а также комплекс системных, прикладных и специальных программ, обеспечивающих реализацию функций системы. Состав специального программного обеспечения состоит из управляющей программы и четырех подсистем обеспечивающих ее работу. 1-я подсистема - измерений плоскостности и температуры ИП-4М. Результаты измерений через DIM-сервер передаются в управляющую программу для обработки; 2-я подсистема - система управления контроллером. Данная система обеспечивает связь САРП с действующей АСУ. 3-я подсистема - система визуализации. Позволяет оператору контролировать технологические параметры дрессировки и параметры полосы. 4-я подсистема - система архивации. Данная система обеспечивает хранение всех технологических параметров, используемых в САРП. Также в САРП используются клиентские приложения AnalyseClient, FlatResult и Web отчет – сменный рапорт. Клиентские приложения устанавливаются на удаленных ПК в сети комбината и используются для анализа полученных результатов, а также технологических параметров

процесса дрессировки. В состав КИП входят: рабочая станция, сервер баз данных, панель оператора (на базе Windows), контроллер Siemens S7-300, измеритель плоскостности и температуры ИП-4М (рабочая станция, видеокамера, тепловизор), шкафы, кабели и др.

**Основные результаты использования САРП.** Исследования выполнялись в течение 2-х месяцев (апрель-май 2009 г.) в период гарантийных испытаний САРП. На основании обработки результатов данных об эффективности работы САРП 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. В 2009 г. система была принята комбинатом в постоянную промышленную эксплуатацию.

**Система автоматического управления охлаждением валков (САУОВ) [15].**

Институтом черной металлургии НАН Украины совместно с ООО “Металлтехномаш” разработан комплекс математических моделей, которые позволяют рассчитывать температуру рабочих валков и управлять ею в процессах прокатки полос. Эти модели положены в основу подсистемы автоматического управления охлаждением рабочих валков (АСУ СОВ) для ШСГП 2000 ОАО “Магнитогорский металлургический комбинат”. Разработанное комплексное ПО предназначено для АСУ СОВ чистовой группы клетей. ПО обеспечивает в автоматическом режиме расчет и оптимизацию параметров СОВ, а именно,- объемов охлаждающей воды по клетям чистовой группы, а также номера клетей чистовой группы, где необходимо включение подстуживания поверхности полосы системой «антишелушения».

#### **Основные функции подсистемы САУОВ:**

- автоматический прием входной информации о планируемом графике прокатки, номерах партий, марках стали, размерах полос, регламентных (заданных) значениях температуры рабочих валков, скорости полосы и др. параметров, необходимых для расчета режимов охлаждения валков;
- автоматический расчет режимов охлаждения валков и передача рассчитанных уставок в контроллер системы;
- автоматический расчет параметров работы системы антишелушения и передача рассчитанных уставок в контроллер системы;
- контроль текущей температуры рабочих валков (расчет температуры рабочих валков; выдача предупреждающего сообщения оператору в случае превышения расчетной температуры валков относительно заданной);
- расчет коэффициентов адаптации математической модели на основании измеренных значений температуры валков, их последовательное

сохранение для каждой клетки в базе данных в привязке к сортаментным группам (группам режимов прокатки) с целью последующего использования в модели с учётом приоритета последних значений;

- накопление текущей информации о параметрах работы СОВ, параметрах технологического процесса прокатки (от которых зависит работа СОВ) в базе данных, в том числе аналитической базе данных, в которой хранятся интегральные и статистические параметры по каждому прокатанному рулону;

- формирование и печать отчетных документов (протоколов работы СОВ, сменных рапортов) по выбору пользователя (на основе информации, хранящейся в базе данных);

- протоколирование работы программного обеспечения с выдачей информационных сообщений на экран оператора и в лог-файлы;

- расчет и оптимизация режимов охлаждения рабочих валков в диалоговом режиме (off line симулятор), который включает в себя ввод и редактирование исходных данных о системе охлаждения и валках, расчет режима охлаждения, вывод рассчитанных значений на экран в виде таблиц и графиков с дополнительной возможностью подтверждения и реализации рассчитанных параметров системой охлаждения валков на стане.

**Ожидаемые результаты внедрения САУОВ.** Использование системы должно обеспечить: улучшение теплового режима работы валков; повышение качества поверхности валков и готового проката; увеличение межперевального ресурса рабочих валков; повышение производительности стана; повышение надежности системы охлаждения.

В настоящее время разработанная система готова для опытно-промышленного опробования и дальнейшего внедрения в промышленную эксплуатацию.

1. *Управление качеством тонколистового проката* / [В.Л.Мазур, А.М.Сафьян, И.Ю.Приходько, А.И.Яценко]. – К.: Техника, 1997. – 384 с.
2. *Приходько И.Ю.* Метод определения сопротивления деформации материалов со сложной зависимостью реологических свойств от параметров деформирования / И.Ю.Приходько, А.А.Сергеенко, В.В.Разносилин // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии: сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины.* Вып. 14. – 2007. – С. 187 – 193.
3. *Голубченко А. К.* Повышение стабильности непрерывной холодной прокатки и эффективности работы системы автоматического регулирования толщины и натяжения полосы / А.К.Голубченко, В.Л. Мазур, И.Ю.Приходько // *Сталь.* – 1996. – №10. – С.32 – 36.
4. *Приходько И.Ю.* Оценка тепловых условий холодной прокатки полос с учётом полноты контакта рабочих валков и полосы в очаге деформации / И.Ю.Приходько, А.М.Сафьян, П.П.Чернов, В.В.Акишин // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии: сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины.* Вып. 4. – 2001. – С. 182 – 187.

5. Приходько И.Ю. О механизме влияния шероховатой поверхности холоднокатаных полос на условия слипания витков рулонов при отжиге и образование дефектов поверхности / И.Ю.Приходько, В.И.Тимошенко, П.П.Чернов, А.М.Сафьян, В.В.Акишин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 8 – 9. – С.92 – 101.
6. *Приходько И. Ю.* Исследование влияния режимов смотки и отжига полос на условия слипания-сваривания витков рулонов / И.Ю.Приходько, П.П. Чернов, В.И.Тимошенко, В.В.Акишин // *Труды 5-го конгресса прокатчиков*, г. Череповец, 21 – 24 октября 2003. – М.: АО Черметинформация, 2004. – С.152 – 155.
7. Чернов П. П. Исследование влияния температуры смотки полос в рулоны при холодной прокатке на образование дефектов поверхности полос / П.П.Чернов, И.Ю.Приходько, В.Н.Скороходов, В.В.Акишин, А.М.Сафьян // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 8 – 9. – С.102 – 108.
8. *Приходько И.Ю.* Моделирование процессов эффективного охлаждения валков листопрокатных станов / И.Ю.Приходько, С.А.Воробей, С.Е.Шатохин // *Сталь*. – 2005. – №1 – С.72 – 77.
9. *Приходько И.Ю.* Управление тепловым профилем валков и плоскостностью полос селективной подачей эмульсии / И.Ю.Приходько, П.П.Чернов, С.Е.Шатохин // *Сталь*. – 2006. – С.87 – 93.
10. *Приходько И.Ю.* Первая отечественная система автоматического регулирования плоскостности полос с использованием бесконтактных методов измерения плоскостности и температуры / И.Ю.Приходько, П.П.Чернов, В.В.Разносилин, и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии: сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины*. Вып.19. – 2009. – С.206 – 218.
11. *Крот П.В.* Системы мониторинга вибрации и диагностики станов холодной прокатки / П.В.Крот, И.Ю.Приходько, К.В.Соловьёв // *Вибрация машин. Измерение, снижение, защита*. Вып. 1. – Донецк. – Май 2005. – С.17 – 20.
12. *Приходько И.Ю.* Vibration monitoring system and the new methods of chatter early diagnostics for tandem mill control // И.Ю.Приходько, П.В. Крот, К.В.Соловьёв , и др. // *Материалы Лондонской конференции «Вибрации в прокатных станах»*, г. Лондон. – 9 ноября 2006. – С.87 – 106.
13. *Приходько И.Ю.* Система автоматического регулирования плоскостности полос и температуры с использованием бесконтактных методов измерения / И.Ю.Приходько, П.П.Чернов, В.В.Разносилин и др. // *Сталь*. – 2009. – №3. – С.41 – 45.
14. *Приходько И.Ю.* Система контроля и методы снижения резонансных вибраций на непрерывных станах холодной прокатки полос: / И.Ю.Приходько, П.В.Крот, Е.А.Парсенюк, К.В.Соловьёв, В.В.Акишин // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии: сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины*. Вып.12. – Днепропетровск. – 2006. – С.232–244.
15. *Приходько И.Ю.* Управление температурным режимом работы валков широкополосного стана горячей прокатки / И.Ю.Приходько, С.А.Воробей, В.В. Разносилин и др. // *Сталь*. – 2010. – №11. – С. 42-47.

*Статья рекомендована к печати  
докт.техн.наук С.А.Воробьем*



***І.Ю.Пріходько*****Системи комп'ютерного моделювання та керування процесом тонколистового прокату Інституту чорної металургії**

Представлено комплекс комп'ютерних програм для інженерних розрахунків і оптимізації параметрів процесів виробництва тонколистового прокату. Описано промислові системи автоматичного управління процесами прокату, зокрема: система автоматичного регулювання площинності смуг з використанням безконтактних методів вимірювання площинності і температури; система контролю вібрації і керування швидкістю безперервного стану холодної прокату смуг; система управління охолодженням валків широкосмугового стану гарячої прокату.

**Ключові слова:** безперервний стан холодної прокату, тонколистовою прокат, системи автоматичного управління, площинність

***І.Ю.Приходко*****Computer simulation and sheet rolling process control systems of Iron and Steel Institute**

Submitted a complex of computer programs for engineering calculations and optimization of parameters of sheet rolling processes. Also presented industrial automatic control system of the rolling process, in particular: strip flatness automatic control system with using contactless methods to measure of flatness and temperature; vibration and mill speed control system; system for calculate, optimize and control of the work rolls cooling in finishing stands of Hot Strip Mill.

**Keywords:** continuous cold rolling mill, sheet rolling, automatic control system, the flatness