

Актуальность работы. В современных условиях, когда Россия столкнулась с санкциями со стороны Запада и ограничениями по поставкам оборудования и программного обеспечения, технологическое развитие металлургических компаний стало возможным только благодаря повышению собственных компетенций по совершенствованию существующих и разработке новых технологий. Последнее с учетом высокой степени автоматизации производств невозможно без разработки решений по импортозамещению цифровых продуктов, поставленных ранее из-за рубежа, и освоения современных инструментов, таких как метод конечных элементов, машинное обучение и их комбинации для разработки технологических процессов. Кроме того, возникла потребность в импортозамещении и освоении производства продуктов с уникальным комплексом свойств, таких как плакированный прокат, особотонкостенные круглые и профильные трубы, обсадные трубы повышенной прочности и др. Наиболее эффективное решение этой задачи возможно путем разработки комплекса цифровых моделей для всей технологической цепочки производства листового и рулонного проката, формовки и сварки труб малого, среднего и большого диаметра ($\varnothing 21-1420$ мм), позволяющих проводить детальный анализ процессов формоизменения а также управлять структурными превращениями и формированием свойств в основном металле и сварных соединениях.

Краткое содержание работы. В работе создан и внедрён в условиях производства АО «ВМЗ» комплекс моделей всей технологической цепочки производства листового и рулонного проката, формовки и сварки труб, что позволило усовершенствовать технологии, улучшить точность, плоскостность, однородность свойств, целенаправленно формировать структуру и свойства основного металла и сварных соединений, обеспечить сцепление слоев и требуемую плоскостность плакированного листа, повысить качество труб и эффективность работы формовочных станков и освоить новые виды продукции с уникальным комплексом свойств. Решена проблема обеспечения технологического суверенитета отечественных производителей

проката и труб за счёт расширения возможностей существующих технологий и оборудования при использовании цифровых инструментов.

Основные научные достижения. В работе получены результаты, характеризующиеся научной новизной. Разработана модель сопротивления деформации различных марок стали на основе промышленных данных, которая позволила эффективно учитывать процессы упрочнения стали (рис. 1). Модель разработана на основе рекуррентных нейросетей, данный подход на 34% точнее традиционных моделей машинного обучения (градиентный бустинг, случайный лес и т.п.), которые в свою очередь показали лучшие результаты по сравнению с классическими моделями. На основе анализа больших данных стало возможным прогнозирование коэффициентов уравнения аппроксимации, основываясь на химическом составе стали.

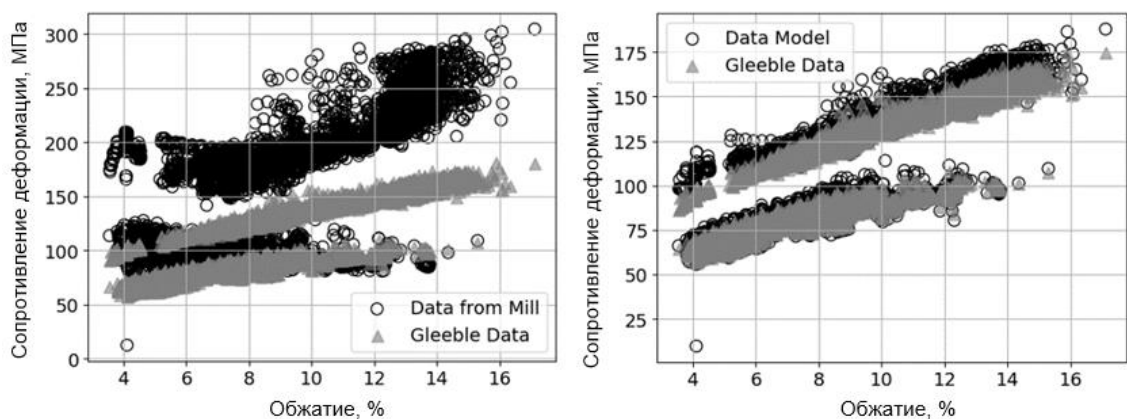


Рис. 1. Сравнение данных со стана и эталонных данных с установки Gleeble до обработки моделью (слева) и после (справа)

На основании имитационного моделирования процесса горячей прокатки разработана новая модель сопротивления деформации, отличающаяся учетом взаимного влияния параметров деформации на коэффициенты модели в процессе прокатки особотонких полос (толщина 1,0-1,2 мм) на литейно-прокатном комплексе. Точность модели при описании экспериментальных данных составляет 0,986 (рис. 2).

Разработан алгоритм определения коэффициента трения при установившемся процессе с использованием фактических измерений на основе обработки более 100 000 проходов в условиях чистовой группы стана. Определены значения коэффициента трения, которые находятся в диапазоне

0,12-0,32 (рис. 3а). На основе методов машинного обучения разработана и внедрена в производство математическая модель износа рабочих валков в 300 точках по длине бочки (средняя абсолютная ошибка составляет 0,02 мм, что в 4 раза меньше, чем при моделировании классическим способом) (рис. 3б).

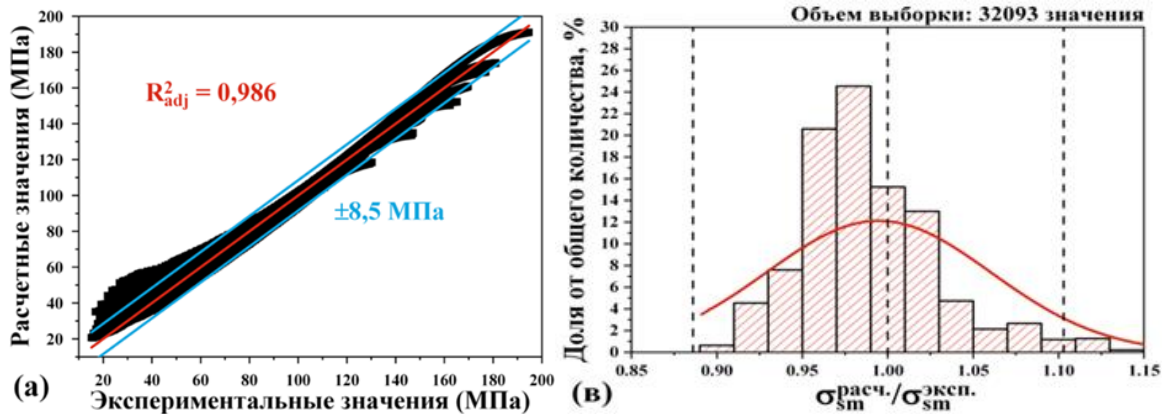


Рис. 2. Точность определения сопротивления деформации при прокатке особотонких полос на литейно-прокатном комплексе

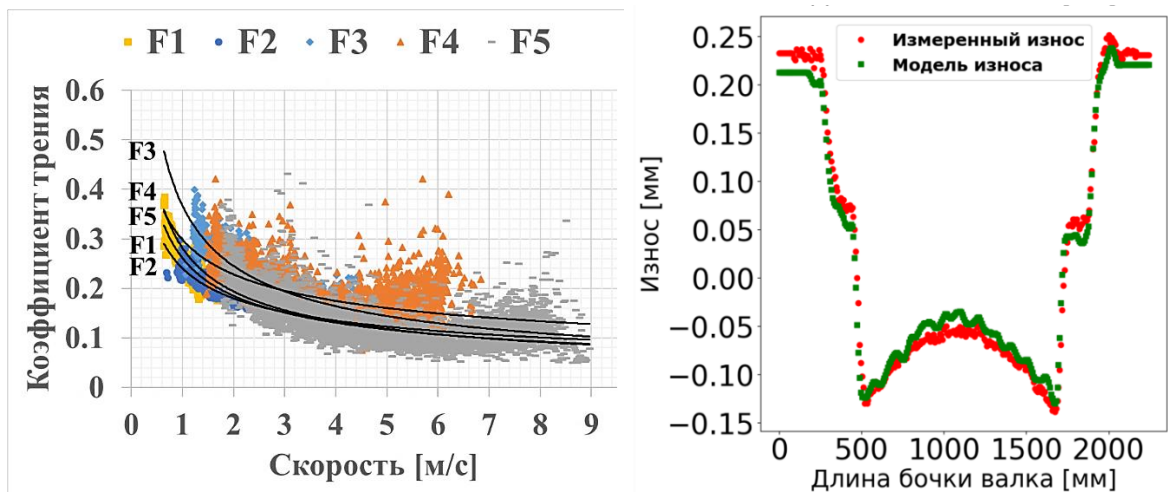


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от скорости прокатки (а) и пример точности моделирования износа (б)

Разработаны конечно-элементные модели прокатки плакированных листов на Стане-5000 АО «ВМЗ» для различных комбинаций материала основного и плакирующего слоёв (рис. 4). Впервые установлен коэффициент неравномерности деформации слоёв биметаллических листов для композиций K60+316L, K60+Alloy625 при производстве на стане 5000. Исследовано влияние параметров процесса на напряженно-деформированное состояние при прокатке несимметричного плакированного проката. Впервые показано, что оптимальной стратегией обжатию является применение больших обжатию в первых проходах и нарастающих обжатию в последних (рис. 5), за счет чего

достигается лучшая проработка по толщине полосы и более однородное распределение размеров аустенитных зерен.

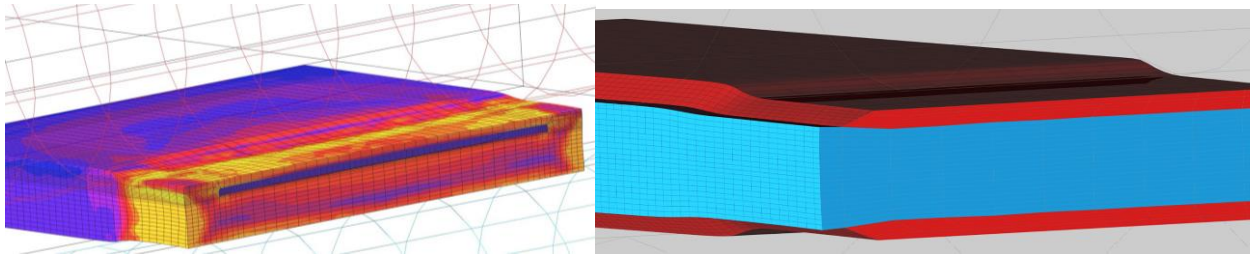


Рис. 4. Примеры моделирования процесса прокатки плакированного проката

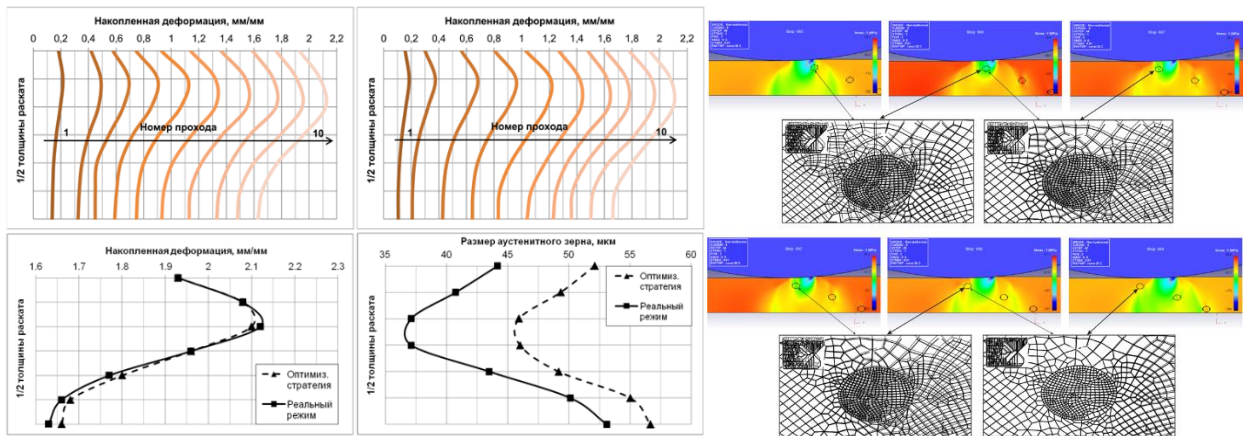


Рис. 5. Результаты анализа распределения деформации и величины зерен в черновой стадии прокатки

Разработана модель процесса черновой стадии прокатки, процесса ускоренного охлаждения на установке стана 5000 при помощи совместного использования метода конечных элементов и машинного обучения, а также модель на основе компьютерного зрения для анализа, корректировки и совершенствования работы установки. Впервые определены коэффициенты теплопередачи для коллекторов установки охлаждения, имеющих уникальную конструкцию (рис. 6).

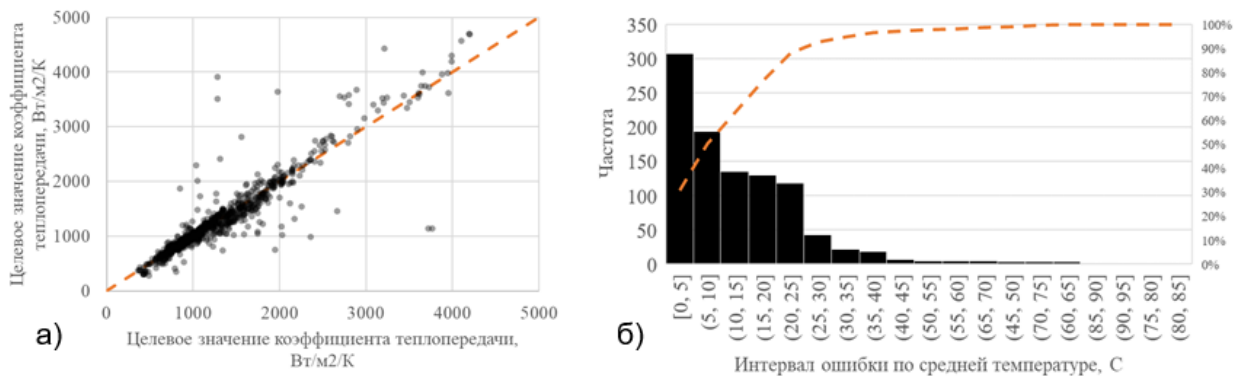


Рис. 6. Точность определения коэффициента теплопередачи (а) и температуры после охлаждения, при помощи разработанной модели (б)

Расчётами и экспериментально установлены закономерности преобразования структуры металла при варьировании параметров охлаждения, позволяющие обеспечить требуемые механические свойства и структурно-фазовое состояние металлопроката на отводящем рольганге многоклетьевого непрерывного прокатного стана.

Разработка конечно-элементной модели процесса непрерывной формовки труб (относительная ошибка не более 3,1%) (рис. 7), позволила выявить ключевое условие эффективности процесса – минимизацию обратного пружинения трубной заготовки на этапе предварительной формовки, для выполнения которого на станах классической валковой формовки впервые реализован шаговый принцип формоизменения на всей ширине полосы, позволяющий за меньшее количество переходов обеспечить большую степень деформации поперечного изгиба трубной заготовки. На станах точечной валково-роликовой формовки впервые реализован принцип адаптивной настройки формовочного стана по уровню механических свойств металла, учитывающий при построении схемы формоизменения и определении ширины штрипса величину обратного пружинения заготовки в процессе холодной гибки и характер распределения продольных деформаций по ее сечению в результате тангенциального сжатия в закрытых калибрах.

Новые принципы построения схем формоизменения и настройки станов обеспечили повышение качества формовки трубной заготовки по геометрии ее поперечного профиля (Рис. 8) и точности сведения кромок в зоне сварки тонкостенных (D/t от 20 до 50) и особотонкостенных ($D/t > 50$) труб из стали повышенной прочности (σ_T от 285 до 440 МПа), а также равномерность распределения деформаций в тангенциальном направлении заготовки в клетях предварительной формовки, что позволило при производстве труб с соотношением D/t от 6 до 70 из стали нормальной и повышенной прочности (σ_T от 225 до 440 МПа) значительно снизить, либо исключить относительное обжатие заготовки в закрытых калибрах клеток окончательной формовки.

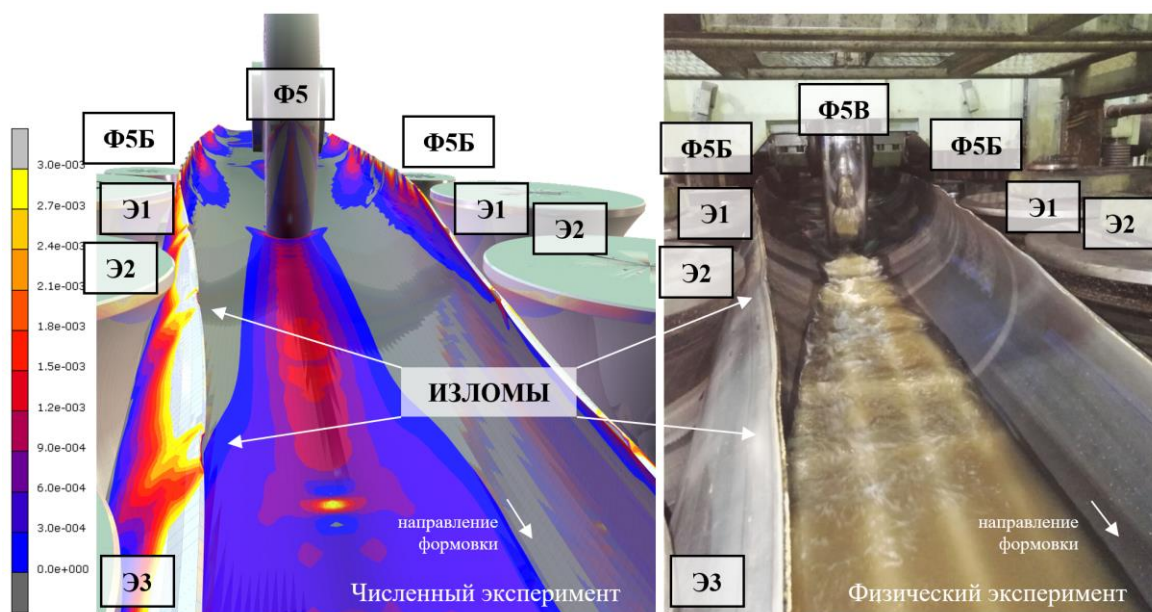


Рис. 7. Форма трубной заготовки на участке предварительной формовки ТЭСА 203-530 при производстве труб $\varnothing 530 \times 6$ мм ($D/t=88$) из стали К56, полученная посредством численного и физического экспериментов

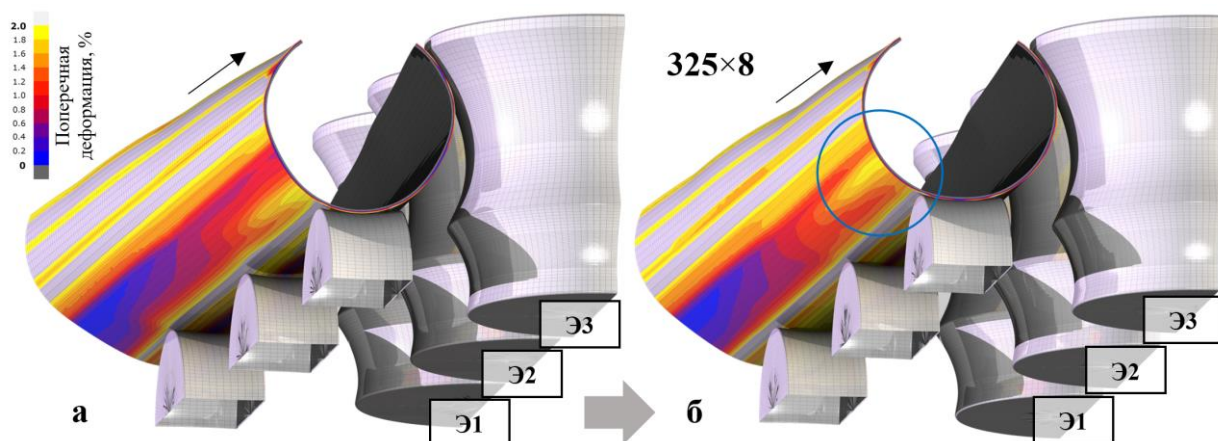


Рис. 8. Форма поперечного профиля трубной заготовки после клеток предварительной формовки при исходной (а) и предлагаемой (б) настройке

Разработаны модели подгибки кромок в объемном варианте и деформирования трубной заготовки на прессе шаговой формовки в плоско-деформированной постановке. Отклонение расчетных значений усилия деформирования от экспериментальных составили менее 1,8%.

Разработаны конечно-элементные модели многодуговой сварки под флюсом, высокочастотной сварки (ТВЧ) и локальной термической обработки (ЛТО) сварного соединения, позволяющие определять термический цикл и температурное поле (рис. 9). Разработана уникальная методика имитации основных параметров сварки и ЛТО, позволяющая оценивать влияние

параметров технологии на структуру и механические свойства сварного соединения. Выявлена роль микроструктурных факторов в формировании сопротивления разрушению: для сварного ТВЧ соединения впервые установлена роль кристаллографической текстуры (рис. 10 а); для сварного соединения, выполненного многодуговой сваркой – установлено, что основным механизмом повышения вязкости ЗТВ является увеличение плотности высокоугловых границ за счёт формирования пакетов речного бейнита и повышения вклада от границ зёрен бывшего аустенита (рис. 10 б).

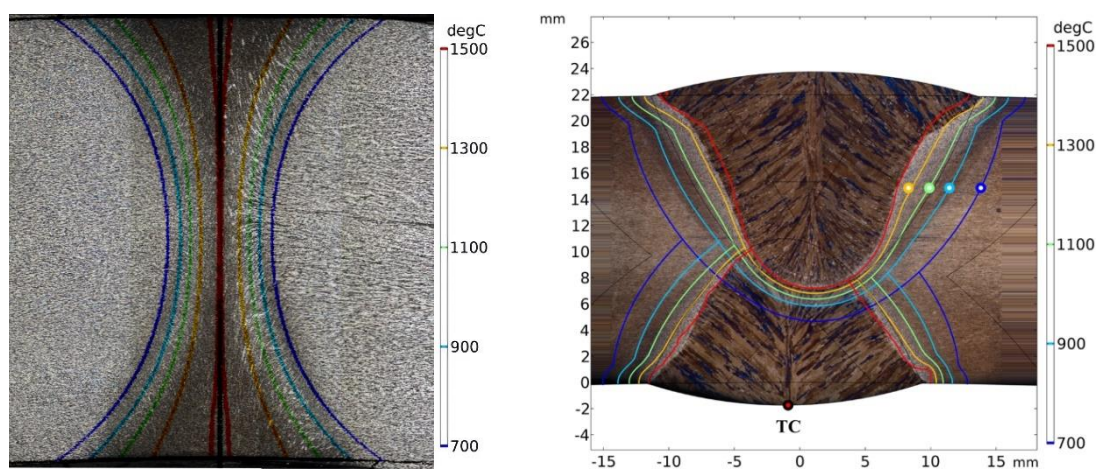


Рис. 9. Продольное сварное ТВЧ соединение трубы $\varnothing 89 \times 6,4$ мм (а) и сварное соединение ТБД $\varnothing 1020 \times 22$ мм (б), выполненное многодуговой сваркой под флюсом. Расчётные тепловые поля

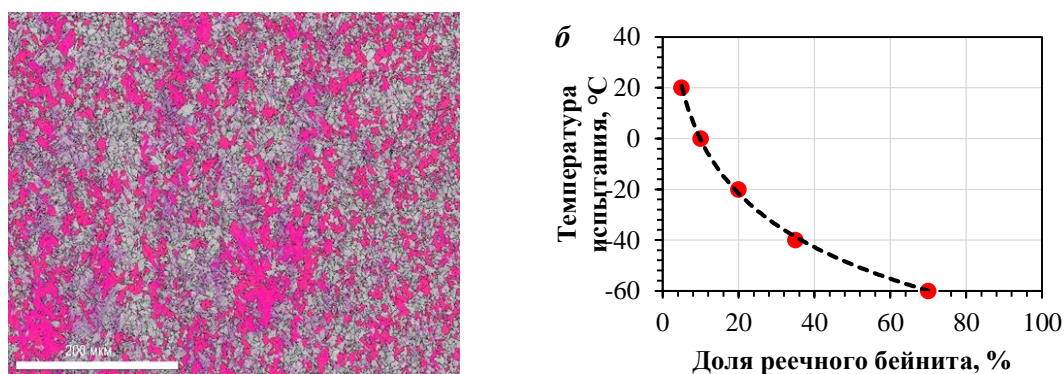


Рис. 10. Карта потенциальных фасеток скола $\{001\}$ в сварном соединении ТВЧ (а); влияние доли речного бейнита на хладостойкость стали 05ХГ2НМДБ (пороговое значение $K_{CV} \geq 150$ Дж/см²) (б)

Практические результаты работы. Созданы научные и практические основы разработки технологий и новых видов продукции. Разработана экспертная система поддержки производства стана 1950, включающая в себя новые цифровые модели, которые позволили улучшить качество

горячекатаных полос толщиной менее 1,5 мм по геометрическим параметрам, уменьшить расходный коэффициент металла и снизить количество аварийных остановок. Полученные зависимости совместной деформации различных композиций плакированного проката позволили обеспечить выбор необходимой толщины плакирующего слоя. На основе моделирования разработаны режимы деформации, позволяющие получить прокат с обеспечением сцепления слоев и требуемой плоскостностью.

Освоена технология производства хладостойкого проката классов прочности до К60 и строительных марок стали, без микролегирования импортными ферросплавами или с их уменьшенным содержанием. Разработана и внедрена технология производства проката и обсадных электросварных труб высоких групп прочности с низким соотношением σ_T/σ_B в хладостойком и обычном исполнении с контролируемым охлаждением проката, обеспечивающим равномерность структуры и свойств по телу трубы.

Внедрение результатов в ТЭСЦ-2 АО «ВМЗ» снизило расходный коэффициент металла на 9 кг/т, увеличило выход годного на 1,87%, сократило время переналадки агрегатов с 8 до 3,5 часов. Полученные показатели эффективности работы станов классической валковой формовки сопоставимы с дорогостоящими импортными станами точечной валково-роликовой и линейной роликовой формовки. Внедрение результатов в ТЭСЦ-1, 3 и 5 АО «ВМЗ» позволило увеличить выход годного на 4,16%, вдвое уменьшить количество технологических пауз. Значительно расширен сортамент производимой продукции без изменений конструкции оборудования.

На основе моделирования процесса черновой прокатки, разработана оптимальная стратегия обжатий листов из трубных марок стали, обеспечивающая лучшую проработку середины полосы и однородное распределение размеров аустенитных зерен. Модель охлаждения проката на стане 5000 использована при освоении технологии производства новых видов продукции для анализа превращений и выбора параметров охлаждения для обеспечения уровня и равномерности свойств. Обеспечено предиктивное

устранение причин неравномерности охлаждения, что позволило производить сортамент, чувствительный к температуре конца охлаждения.

Усовершенствованы технологии сварки и ЛТО труб: для труб малого и среднего диаметра – минимизировано образование в ЗТВ твёрдых закалочных структур, оптимизирована микроструктура и текстура, повышена ударная вязкость сварного соединения; для труб большого диаметра – снижены тепловложения, улучшена форма, микроструктура и химический состав сварного соединения и обеспечена его хладостойкостью до $-50\dots-60$ °С.

Полученные результаты могут быть эффективно использованы на металлургических предприятиях России.

Объёмы внедрения. Достигнутый экономический эффект. Освоено производство новых видов уникальной наукоёмкой продукции, включая лакированный листовой прокат, высокопрочные обсадные трубы категории К55, хладостойкие (до минус 60°С) трубы высокочастотной сварки, особо тонкостенный рулонный прокат толщиной 1,0-1,5 мм и профильные трубы из него, электросварные трубы большого диаметра с уникальным сочетанием сортамента и свойств (температура эксплуатации до минус 60°С и рабочее давление до 22 МПа) для компаний нефтехимической, нефтегазовой и строительной отраслей – ПАО «Газпром», ПАО «Роснефть», ПАО «Сургутнефтегаз», АО «Волгограднефтемаш» и др., что позволило реализовать ряд проектов, в том числе, газовых месторождений «Семаковское» и «Южно-Кириновское», реновация сетей газораспределения г. Норильск, «Мессояха-Норильск», «Лахта-Центр», продукция применена для модернизации нефтеперерабатывающих заводов РФ. По разработанным технологиям произведено более 194 тыс. т уникальной продукции, фактический подтверждённый экономический эффект составил 5 267 млн руб.