УДК 621.771 : 621.785 : 669.14

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ КАТАНКИ НА НЕПРЕРЫВНОМ СОРТОВОМ СТАНЕ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПРОИЗВОДСТВА ТЕРМОУПРОЧНЕННОЙ АРМАТУРЫ

© 2026 А.Б. Моллер, О.Н. Тулупов, С.А. Левандовский, С.В. Михалев, А.В. Михалев, А.Д. Савва.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Статья поступила в редакцию 08.09.2026

В статье рассмотрена технологическая система производства мелкосортного круглого проката и стержневой арматуры с возможностью термоупрочнения в линии стана. Актуальность работы обусловлена необходимостью компактных, высокопроизводительных и энергоэффективных технологических решений для мини-заводов и литейно-прокатных агрегатов, ориентированных на выпуск катанки Ø5–18 мм и арматуры класса А500С из углеродистых, низколегированных и легированных сталей, включая подшипниковую сталь ШХ15. Цель работы – обоснование состава оборудования и технологических режимов прокатки, охлаждения и термомеханического упрочнения с учетом ограничений по площади размещения и требований к качеству металлопроката. Методы исследования включали результаты анализа технологических рисков, расчетные оценки энергосиловых параметров и компьютерное моделирование формоизменения в калибрах. Установлено, что отклонение стороны исходного квадрата более чем на 1 мм приводит к риску переполнения первого овального калибра и дефектам типа «закат», а снижение температуры нагрева с 1150 до 900 °С увеличивает энергосиловые показатели прокатки до двух раз. Обоснованы режимы проходного индукционного нагрева квадрата 42×42 мм до 1020±30 °С и компоновка двух потоков продукции – «катанка» с воздушным охлаждением на линии Стелмор и «арматура» с установкой ускоренного водяного охлаждения по схеме прерванной закалки с самоотпуском. Сформулированы требования к составу и компоновке технологического комплекса и приведены варианты размещения оборудования в условиях ограниченной длины пролета. Практическая значимость результатов заключается в снижении технологических рисков и обеспечении стабильности геометрии и свойств проката.

Ключевые слова: горячая прокатка; мелкосортный стан; катанка; арматура А500С; термомеханическое упрочнение; индукционный нагрев; линия Стелмор; технологические риски; калибрование; управление охлаждением.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-179-186
EDN: SPPYNW

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда, проект №26-19-20025 https://rscf.ru/project/26-19-20025/

ВВЕДЕНИЕ

Мелкосортные непрерывные станы, интегрированные в литейно-прокатные агрегаты, являются основой пластической деформации при производстве катанки и арматурного проката в условиях малотоннажных партий. В сравнении с крупными сортовыми станами такие линии выигрывают по капитальным затратам и гибкости технологии, однако предъявляют более жесткие требования к согласованию операций нагрева, прокатки и охлаждения: из-за меньшего сечения исходного полупродукта металл быстрее теряет температуру, а диапазон допустимых отклонений по геометрии и температуре становится уже. В результате возрастает роль автоматизации, диагностического контроля и методик расчета режимов деформации, учитывающих возможные возмущения технологических параметров.

Моллер Александр Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки материалов давлением имени М.И. Бояршинова. E-mail: amoller@mail.ru.
Тулупов Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обработки материалов давлением имени М.И. Бояршинова. E-mail: o.tulupov@mail.ru.
Левандовский Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры обработки материалов давлением имени М.И. Бояршинова. E-mail: s.levandovsky@magtu.ru.
Михалев Сергей Викторович, аспирант по специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением. E-mail: s.mihalev85@mail.ru
Михалев Александр Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения. E-mail: mialex@trubprom.com
Савва Аркадий Дмитриевич, магистрант кафедры обработки материалов давлением имени М.И. Бояршинова. E-mail: savva.arkadiy@mail.ru

В литературе по технологии сортовой прокатки подробно рассмотрены принципы калибрования, устойчивости заполнения калибра, влияние условий трения, параметров захвата, а также особенности прокатки малых сечений и катанки [1, 2]. Показано, что дефекты типа «закат» являются типичными следствиями переполнения калибра, неправильного кантования или недостаточной устойчивости калибровочной схемы при колебаниях размеров заготовки. Для непрерывных станков с высокими скоростями также характерна чувствительность к температурному фактору: снижение температуры прокатки приводит к росту сопротивления деформации, увеличению сил и моментов, повышению износа инструмента и риску нестабильной работы приводов.

Отдельное направление исследований связано с термомеханическим упрочнением арматуры (QST/Tempcore-подобные процессы). Концепция основана на прерванной закалке поверхностных слоев с последующим самоотпуском за счет тепла сердцевины. На практике эта технология позволяет получать арматуру требуемых классов прочности при умеренном углеродном эквиваленте, сохраняя свариваемость и пластичность. Однако стабильность свойств существенно зависит от режимов охлаждения, распределения температуры по сечению и длине стержня, а также от стабильности скорости прокатки. Для малых диаметров управление процессом осложняется тем, что характерные отрезки времени теплопереноса и фазовых превращений сравнимы с временем прохождения технологических участков.

Для катанки, предназначенной для метизного передела, ключевым становится не столько достижение высокой прочности, сколько обеспечение структуры, технологичной для волочения и последующей термообработки. Для подшипниковых сталей (например, ШХ15) технологичность определяется карбидной неоднородностью, склонностью к образованию карбидной сетки и требованиями к стабильности свойств по бунту. Это требует тонкой настройки охлаждения на линии Стелмор и, при необходимости, применения термоизоляции (крышек) для выравнивания температуры.

Цель исследования – разработка и обоснование технологической схемы непрерывного сортового стана, включающей проходной индукционный нагрев квадратной заготовки 42×42 мм, режимы прокатки, управляемое охлаждение катанки на линии Стелмор и технологию термоупрочнения арматуры класса А500С по схеме прерванной закалки с самоотпуском, а также формирование состава и компоновки технологического комплекса в условиях ограниченной длины цеха.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходные данные для проектирования технологической линии включали требования к сортаменту и производительности (годовой выпуск порядка 30 тыс. т), непрерывную схему стана с черновой и чистовой группами клетей и необходимость получения двух потоков продукции: катанка Ø5–18 мм в мотках и арматурный прокат в прутках длиной 11,7–12,0 м класса А500С. В качестве исходного полупродукта принята квадратная заготовка не более 42×42 мм (длина до 19 м) из углеродистых, низколегированных и легированных сталей.

Для снижения рисков внедрения использован риск-ориентированный подход: на ранней стадии проектирования формируется перечень потенциальных отказов и дефектов, после чего каждому фактору сопоставляются: вероятность возникновения, тяжесть последствий и управляемость средствами АСУ ТП. Такой подход позволяет перейти от «описательного» проектирования к проектированию на основе контролируемых параметров и допусков.

Инженерные расчеты охватывали:

– оценку времени нагрева в индукционном нагревателе при заданной скорости подачи (с учетом теплопроводности, коэффициента полезного действия и требуемого повышения температуры);

– оценку тепловых потерь на рольгангах и в межклетевых промежутках для определения минимальной скорости начала прокатки;

– первичные оценки энергосиловых параметров прокатки по сопротивлению деформации и степени обжатия.

Компьютерное моделирование формоизменения в калибрах включало вариативность исходной геометрии и температуры: рассматривали квадрат 41×41, 42×42 и 43×43 мм, а также различные уровни ромбовидности. В качестве выходных параметров анализировали степень заполнения калибра, распределение деформации, изменение ширины и высоты раската, а также силовые характеристики (сила, момент, мощность). Отдельно оценивали чувствительность первого прохода, как наиболее критичного с точки зрения захвата и дефектов поверхности.

Для обоснования режимов термоупрочнения использованы базовые представления теплопереноса и фазовых превращений. В упрощенной постановке температура T(r,t) в круглом стержне при охлаждении описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial к}\right), \quad (1)$$

где a – температуропроводность стали. На поверхности r=R задается граничное условие конвективного теплообмена:

$$-\lambda\cdot\frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R} = h\cdot(T_s - T_w), \quad (2)$$

где λ – теплопроводность, h – коэффициент теплоотдачи в зоне форсунок, T_s – температура поверхности, T_w – температура воды. Несмотря на упрощенность, такая модель позволяет объяснить принципиальные тенденции: увеличение h (интенсивности охлаждения) уменьшает температуру поверхности и увеличивает градиент температуры по радиусу, что способствует формированию закаленной оболочки и самоотпуску.

Рассматриваемая технологическая система представляет собой литейно-прокатного агрегата и включает проходной индукционный нагреватель, черновую непрерывную группу клетей, разделение потоков на участке чистовой прокатки («арматура» и «катанка»), а также два различных узла охлаждения: установку водяного охлаждения (для термоупрочнения арматуры) и линию воздушного охлаждения расправленных витков (Стелмор) для катанки.

В качестве исходного полупродука принята квадратная заготовка с размером 42×42 мм. Критичными параметрами являются точность геометрии (размер по стороне и ромбовидность), качество поверхности и однородность структуры металла. Для обеспечения устойчивости процесса прокатки предлагается входной контроль: измерение геометрии квадрата и диагоналей, визуальный контроль поверхности, а также прослеживаемость плавки по химическому составу. При выявлении повышенной ромбовидности или отклонений стороны квадрата технологический регламент предусматривает корректирующие действия: снижение темпа, настройку проводок, перераспределение вытяжек и (при необходимости) отбраковку [3, 4].

Индукционный нагрев литой заготовки обеспечивает управляемое доведение температуры до заданного уровня непосредственно перед прокаткой и снижает потери металла на окисление. Для квадратного сечения важна форма индукторов и управляемая равномерность прогрева ребер. Предусмотрены пирометрический контроль и автоматическое регулирование мощности.

Ориентировочное время нагрева до температуры начала прокатки при частотах порядка 5 кГц составляет около 80 с. Для скорости начала прокатки 0,25 м/с минимальная длина активной части нагревателя составляет около 20 м. Температура начала прокатки принята 1020±30 °C как компромисс между пластичностью, энергосиловыми параметрами и снижением окисления.

Прокатка реализуется по схеме «овал–круг» с чередованием горизонтальных и вертикальных клетей. Для стабилизации переднего конца и исключения дефектов предусмотрены ножницы для обрези концов и аварийный режим порезки при бурении, запускаемый по сигналам датчиков петель. В чистовой части организованы две технологические ветви. Поток «арматура» формирует периодический профиль и включает установку термоупрочнения, трайб-аппарат, делительные ножницы и холодильник. Поток «катанка» включает виткообразователь и линию Стелмор с принудительной вентиляцией и возможностью выдержки под термокрышками.

С учетом принятого решения, что размер поперечного заготовки формируется при тройном слиттинг-процессе путем ковки с разделением, следуем уделить особое внимание вариативности как стабильности размера сторон квадратной заготовки, так и меняющейся её ромбичности. Указанные характеристики будут напрямую зависеть от «ручья» слиттинг-машины центральные или боковые [5, 6] (рис. 1).

Моделирование первого прохода «квадрат → овал» показало высокую чувствительность заполнения калибра к изменению стороны исходного квадрата. При стороне 41 мм увеличивается разброс уширения и риск неполного заполнения, при стороне 43 мм наблюдается переполнение, повышающее вероятность появления поверхностного дефекта типа «закат». Следовательно, допуск по стороне квадрата должен быть минимизирован, а первая клеть и проводки спроектированы с учетом технологического резерва. Решение по установке калибрующих клетей не нашло применения в силу организационных сложностей как в технологическом плане, так и в физическом размещении оборудования в стесненных условиях промышленной площадки.

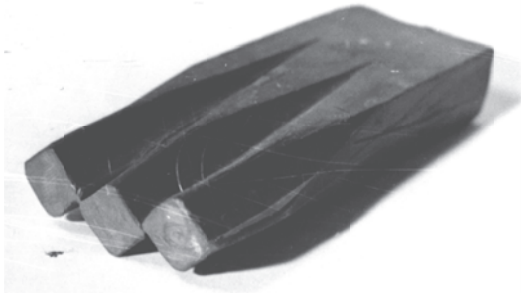

Рис. 1 – Фотография трех сортовых заготовок, соединенных перемычками

Снижение температуры нагрева увеличивает энергосиловые параметры прокатки. Так падение температуры со 1150 до 1000 °С повышает показатели примерно на 50%, а снижение до 900 °С – приблизительно вдвое [7]. Учитывая малое сечение заготовки, её большую длину и низкую скорость начала прокатки, возникает острая необходимость автоматического регулирования нагрева и исключения пауз между нагревом и первой клетью.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для успешной реализации технического задания по реализации литейно-прокатного комплекса малой производительности были спроектированы, следующие его элементы: участок подачи заготовок, проходной индукционный нагреватель с водооборотом, черновую группу клетей, ножницы обрези и аварийной порезки, узел разделения потоков, чистовую линию «арматура» (клети периодического профиля, термоупрочнение, деление, холодильник), чистовую линию «катанка» (виткообразователь, Стелмор, бунтоукладка), а также АСУ ТП и системы энерго- и водоснабжения.

При длине пролета порядка 138 м прямолинейное размещение всех участков затруднено, поэтому предложены варианты с локальными поворотами потока на участках перехода от черновой к чистовой прокатке и при размещении холодильника/Стелмора. Компоновка обеспечивает минимальные теплопотери, безопасные аварийные режимы и возможность безопасного обслуживания с учетом ресурсной инфраструктуры, включающей воду, воздух и электроснабжение. Для устойчивой работы предусмотрены независимые контуры охлаждения индуктора и силовой электроники, технологической воды для термоупрочнения с фильтрацией согласно классу, применяемых форсунок. Для Стелмора рекомендована система воздушного охлаждения с частотным регулированием привода вентиляторов. Электроснабжение индукционного нагрева выделяется в отдельный узел с резервом мощности.

Калибровка непрерывного стана при малом сечении исходной заготовки обеспечивает одновременно: устойчивый захват в первых проходах, минимизацию переполнения калибров, равномерность деформации по сечению и допустимые удельные давления в очаге деформации. Для сортамента круглого проката и катанки рациональна последовательность «квадрат – овал – круг» с периодическим кантованием раската. При этом на ранних стадиях (первый–третий проход) целесообразно ограничивать единичные обжатия, обеспечивая запас по заполнению калибра, поскольку именно эти проходы наиболее чувствительны к вариативности стороны квадрата и ромбовидности.

С точки зрения теории ОМД критичным является отношение ширины раската к высоте в конкретном калибре, так как оно определяет характер уширения и вероятность образования закатов. В практической настройке используется критерий заполнения калибра, выраженный через отношение площади выпускаемой фигуры к площади ручья. Для предотвращения переполнения вводится технологический резерв по площади ручья первого овала; полученные расчетно-модельные результаты показали, что при увеличении стороны квадрата до 43 мм резерв исчерпывается и возрастает риск дефектов «закат».

Отдельная задача – согласование маршрута деформации для двух потоков продукции: катанки и арматуры. До узла разделения потоков калибровка является универсальной, то есть обеспечивает формирование промежуточного круглого/овального раската, который может быть далее направлен либо на формирование периодического профиля арматуры, либо на гладкий круг катанки. Это требование предопределяет необходимость унификации последних проходов черновой группы и первых проходов чистовой группы с минимальным числом переналадок.

С учетом ограничений по длине пролета и требования высокой ремонтопригодности предусмотрен «каскадный» принцип обслуживания: калибры черновой группы и предчистовые калибры выполняются сменными кассетами, что сокращает время перевалки. Для арматурного потока важна оперативная смена калибров периодического профиля и контроль износа ребристых элементов, так как износ напрямую влияет на геометрию ребер и сцепление с бетоном.

Согласование скоростей по клетям в непрерывном стане является ключевым условием устойчивости процесса. В классической постановке выполняется условие равенства секундных объемов по клетям непрерывной группы. На практике введены поправки на межклетевые петли, упругие деформации, проскальзывание и температурный фактор.

В проектируемой линии выделены три характерных диапазона скоростей: зона начала прокатки, ограниченная необходимостью выдержки времени индукционного нагрева и предотвращения переохлаждения (скорость не ниже 0,2–0,25 м/с); средняя зона черновой прокатки, где скорость растет по мере уменьшения сечения, но остается в пределах, обеспечивающих безопасную работу ножниц и рольгангов и зона чистовой прокатки, где скорость определяется требуемой производительностью, условиями работы виткообразователя (для катанки) и допустимой длительностью охлаждения в установке термоупрочнения (для арматуры).

Энергосиловые параметры зависят от сопротивления деформации, которое в свою очередь определяется температурой, скоростью деформации и химическим составом стали. Результаты моделирования показали, что снижение температуры с 1150 до 900 °C может увеличить силу и момент до двух раз, что должно учитываться при выборе приводов клетей и при проектировании режимов нагрева [7]. На уровне АСУ ТП это реализовано, как ограничение по минимальной температуре на входе в первую клеть: при недогреве прокатка блокируется или переводится в пониженный темп.

Для ориентировочной оценки требуемой мощности привода применено известное соотношение $N \approx M \cdot \omega$, где M – момент, ω – угловая скорость валков. При прочих равных увеличение скорости прокатки в чистовой группе повышает ω и требуемую мощность, тогда как увеличение момента связано с сопротивлением деформации и параметрами калибра. Рациональность энергопотребления достигается комбинацией: энергосберегающая калибровка (умеренные обжатия), стабилизация температуры и минимизация пауз в процессе прокатки.

Для катанки, предназначенной для метизного передела, важно обеспечить технологичность последующих операций: отжиг, волочение, формирование структуры. Для стали ШХ15 нежелательно интенсивное неравномерное охлаждение, приводящее к повышенной твердости и карбидной неоднородности [8, 9].

В разработанной схеме охлаждения на линии Стелмор предусмотрено зонное управление охлаждением на транспортере. На первых участках после виткообразователя интенсивность охлаждения ограничивается, что снижает риск образования нежелательных структур. Далее интенсивность охлаждение может быть повышена для стабилизации цикла и сокращения времени охлаждения. Для ряда марок стали применима выдержка под термокрышками, которая обеспечивает выравнивание температуры по бунту и формирование более равновесной структуры, в зависимости от формы поставки заказа и его дальнейшего применения.

Отдельно выделяется вопрос равномерности по бунту. Даже при стабильной температуре раската на входе в виткообразователь различная плотность укладки витков приводит к различию локальной интенсивности охлаждения. Поэтому рекомендуется управление как вентиляторами, так и параметрами укладки (скорость, шаг витков), а также внедрение контроля температуры на транспортере (термопары/пирометры и тепловизоры по зонам транспортера) [10, 11].

Термоупрочнение арматуры А500С реализовано как термомеханическая обработка, использующая тепло прокатного нагрева и управляемое охлаждение в линии прокатного стана [12, 13]. Схема включает: интенсивное водяное охлаждение поверхности с образованием мартенситного слоя; сохранение высокой температуры в сердцевине и самоотпуск поверхности за счет тепла сердцевины. Между оболочкой и сердцевиной возможно образование переходного бейнитного слоя, повышающего вязкость. Для класса А500С критично обеспечить сочетание прочности и пластичности, а также свариваемость. В технологическом смысле это означает необходимость получать требуемый предел текучести преимущественно термоупрочнением, а не ростом углеродного эквивалента. При этом важна стабильность режима по длине прутка и от партии к партии.

Установка водяного охлаждения имеет проходной тип и располагается непосредственно после чистовой клети, предназначенной для производства арматурного профиля. Управляемые параметры: расход воды Q, давление p, температура воды T, длительность активного охлаждения τ (определяется длиной установки и скоростью движения проката), а также температура конца прокатки. Для обеспечения переналадки предусматриваются сменные элементы (форсунки, направляющие).

Для двухпоточной линии, совмещающей нагрев, прокатку, термоупрочнение и охлаждение, АСУ ТП выполняет роль интегратора технологических режимов. В составе системы выделены следующие контуры управления:

- контур управления нагревом. Включает измерение температуры пирометрами, расчет требуемой мощности по модели нагрева и корректировку по обратной связи. Контур должен учитывать темп подачи заготовок и прогнозировать изменение температуры при возможных паузах;
- контур синхронизации скоростей клетей. Реализуется через задания скоростей приводам, контроль петель и стабилизацию натяжений. Для снижения риска обрыва или бурения вводятся алгоритмы быстрого перехода в аварийный режим с включением ножниц на автоматически порез раската;
- контур термоупрочнения арматуры. Уставки расхода воды привязываются к текущей скорости прокатки и температуре раската. Реализуется автоматическая компенсация: при росте скорости система увеличивает расход/давление, сохраняя заданную интенсивность охлаждения. Для контроля результата применяются пирометры на выходе установки и на участке самоотпуска;
- контур охлаждения катанки на Стелморе. Включает зонное управление интенсивностью охлаждения, регистрацию температуры по зонам и, при необходимости, управление термокрышками (режим выдержки). Для сталей типа ШХ15 алгоритм управления должен минимизировать термошоки в начальной зоне и обеспечивать выравнивание температуры по бунту.

Цифровая поддержка процесса включает базы данных режимов (карты калибровки, карты нагрева и охлаждения), автоматизированную диагностику оборудования и систему прослеживаемости партии. Последняя позволяет связать параметры обработки (температуры, скорости, уставки воды/воздуха) с результатами испытаний, что является основой для статистического управления качеством.

Экономическая эффективность разработки определяется сочетанием факторов: снижение удельных энергозатрат за счет индукционного нагрева «по требованию», сокращение брака благодаря контролю геометрии заготовки и стабилизации первых проходов, повышение добавленной стоимости продукции за счет выпуска арматуры класса А500С с термоупрочнением и катанки, пригодной для метизного передела.

Индукционный нагрев по сравнению с печным нагревом обеспечивает меньшие потери на окисление и более короткое время нагрева, что снижает выбросы и количество окалины. Дополнительный экологический эффект связан с замкнутыми системами водооборота: при корректном проектировании фильтрации и охлаждения уменьшается водопотребление и нагрузка на очистные сооружения.

Для участка термоупрочнения ключевым является выбор режима водооборота, предотвращающий образование аэрозолей и утечки воды на площадку. Для Стелмора важны шумовые характеристики вентиляции и организация аспирации в зоне виткообразования. Эти требования учтены при компоновке и выборе вентиляторного оборудования.

В целом внедрение предложенной технологии обеспечивает повышение устойчивости производства при ограниченных производственных площадях и выполнение сортамента без значительного роста капитальных затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технологическая схема горячей прокатки мелкосортного круглого проката и арматуры с возможностью термоупрочнения в линии непрерывного сортового стана. Показано, что отклонение стороны квадрата более чем на 1 мм повышает риск переполнения первого овального калибра и дефектов типа «закат». Обоснована концепция проходного индукционного нагрева квадрата 42×42 мм до 1020±30 °С при скорости начала прокатки не ниже 0,2–0,25 м/с и длине активной части порядка 20 м.

Выбрана двухпоточная технологическая линия проектируемого стана: катанка с управляемым охлаждением на Стелморе (включая режимы для ШХ15) и арматура А500С с установкой ускоренного водяного охлаждения по схеме прерванной закалки с самоотпуском. Определены состав оборудования, инфраструктурные требования и принципы компоновки комплекса при ограниченных производственных площадях. Результаты могут быть использованы при проектировании и внедрении компактных сортопрокатных линий, ориентированных на выпуск катанки и арматуры с малыми годовыми объемами производства (до 40тыс.т/год) и повышенной стабильностью геометрии и свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Михайленко, А. М.* Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 4. Оптимизация схемы калибровки / А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2022. – Т. 65. – № 11. – С. 769-777.
2. Behavior of Structural Defects of Already-Deformed Continuous-Cast Bar on Rolling / E. N. Smirnov, V. A. Sklyar, R. E. Pivovarov [et al.] // Steel in Translation. – 2018. – Vol. 48, No. 5. – P. 289-295.
3. *Захаров, Е. А.* Определение диапазона допустимой ромбовидности литой заготовки с целью снижения дефектообразования при прокатке в калибрах / Е. А. Захаров, А.Б. Моллер, О.Н. Тулупов // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2006. – № 1. – С. 125-129.
4. *Смирнов, Е. Н.* Исследование влияния наличия дополнительного сдвигового воздействия на эффективность технологии MSRB условиях сортовой МНЛЗ / Е. Н. Смирнов, В. А. Скляр, Д. И. Богадевич [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63. – № 1. – С. 19-26.
5. *Фастыковский, А. Р.* Оценка возможностей калибров, формирующих сочлененные профили, для реализации технологии прокатки - разделения / А. Р. Фастыковский, В. А. Вахроломеев, А. Г. Никитин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2022. – Т. 65. – № 4. – С. 294-297.
6. *Лехов, О. С.* Напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации при получении сортовых заготовок из стали на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Сообщение 2 / О. С. Лехов, А. В. Михалев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63. – № 9. – С. 730-734.
7. *Сидельников, С.Б.* Технология прокатки / С.Б. Сидельников, И.Л. Константинов, Д.С. Ворошилов. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 180 с.

8. *Савченко, С. А.* Влияние гомогенизирующего отжига непрерывнолитой заготовки на уровень карбидной сегрегации в бунтовом прокате из подшипниковой стали / С. А. Савченко, И. А. Ковалева, И. В. Астапенко, А. Б. Сычков // Металлург. – 2025. – № 6. – С. 17-21.
9. *Панковец, И. А.* Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / И. А. Панковец, С. А. Савченко, В. И. Возная, М. Н. Верещагин, И. В. Астапенко // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. – Т. 77. – № 7. – С. 804–810.
10. *Моллер, А. Б.* Совершенствование линии ускоренного охлаждения катанки с использованием цифровой модели процесса / А. Б. Моллер, О. Н. Тулупов, С. А. Левандовский, Д. Ф. Целиканов // Черные металлы. – 2022. – № 6. – С. 29-34.
11. *Витушкин, М. Ю.* Выбор способа термической обработки канатной катанки / М. Ю. Витушкин, В. А. Харитонов // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2019. – № 3(30). – С. 33-34.
12. *Сычков, А. Б.* Технология термической обработки арматурного и фасонного проката: Теория и металлургическая практика / А. Б. Сычков, Э. В. Парусов, А. Б. Моллер [и др.]. – Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2017. – 264 с.
13. *Савченко, С. А.* Совершенствование технологии сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковой стали / С. А. Савченко, И. А. Ковалева, И. В. Астапенко, А. Б. Сычков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2025. – Т. 23. – № 1. – С. 62-72.

DEVELOPMENT OF HOT ROLLING TECHNOLOGY FOR WIRE ROD ON A CONTINUOUS BAR MILL WITH THE CAPABILITY OF PRODUCING HEAT-HARDENED REINFORCEMENT

© 2026 A.B. Moller, O.N. Tulupov, S.A. Levandovskiy, S.V. Mikhalev, A.V. Mikhalev, A.D. Savva

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

The paper presents an engineered technological system for producing small-diameter round bars and reinforcing steel with an in-line thermomechanical strengthening option. The relevance of the study stems from the demand for compact, high-capacity and energy-efficient solutions suitable for mini-mills and casting-rolling units that manufacture wire rod (Ø5–18 mm) and A500C class rebar from carbon, low-alloy and alloy steels, including bearing steel ShKh15. The objective is to justify the equipment set and process parameters for rolling, cooling and strengthening under limited shop-floor space and stringent product-quality requirements. The methodology combines risk-oriented analysis, engineering estimations of power-and-force parameters and computer simulation of groove rolling. It is shown that a deviation of the billet side by more than 1 mm may cause overfilling of the first oval groove and surface laps, while lowering the billet temperature from 1150 to 900 °C increases rolling loads by up to two times. A through-feed induction heating concept for a 42×42 mm billet to 1020±30 °C is substantiated. Two product routes are proposed: (i) wire rod with controlled air cooling on a Stelmor line and (ii) rebar with a water-quenching unit implementing interrupted quenching and self-tempering. Requirements for the composition and layout of the technological complex are formulated. The practical relevance lies in reducing implementation risks and ensuring stable geometry and mechanical properties of the rolled products.

Keywords: hot rolling; continuous bar mill; wire rod; A500C rebar; thermomechanical treatment; induction heating; Stelmor cooling; groove design; process risks; cooling control.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-179-186
EDN: SPPYNW

The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant No*26-19-20025* (Available at: *https://rscf.ru/project/26-19-20025/*)

REFERENCES

1. *Mihajlenko, A. M.* Koncepciya optimal'noj kalibrovki sortoprokatnyh valkov. Soobshchenie 4. Optimizaciya skhemy kalibrovki / A. M. Mihajlenko, D. L. Shvarc // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya metallurgiya. – 2022. – T. 65. – № 11. – S. 769-777.
2. Behavior of Structural Defects of Already-Deformed Continuous-Cast Bar on Rolling / E. N. Smirnov, V. A. Sklyar, R. E. Pivovarov [et al.] // Steel in Translation. – 2018. – Vol. 48, No. 5. – P. 289-295.
3. *Zaharov, E. A.* Opredelenie diapazona dopustimoj rombovidnosti litoj zagotovki s cel'yu snizheniya defektoobrazovaniya pri prokatke v kalibrah / E. A. Zaharov, A.B. Moller, O.N. Tulupov // Modelirovanie i razvitie processov OMD. – 2006. – № 1. – S. 125-129.
4. *Smirnov, E. N.* Issledovanie vliyaniya nalichiya dopolnitel'nogo sdvigovogo vozdejstviya na effektivnost' tekhnologii MSRV usloviyah sortovoj MNLZ / E. N. Smirnov, V. A. Sklyar, D. I. Bogadevich [i dr.] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya metallurgiya. – 2020. – T. 63. – № 1. – S. 19-26.
5. *Fastykovskij, A. R.* Ocenka vozmozhnostej kalibrov, formiruyushchih sochlenennye profili, dlya realizacii tekhnologii

prokatki - razdeleniya / A. R. Fastykovskij, V. A. Vahrolomeev, A. G. Nikitin // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya metallurgiya. – 2022. – T. 65. – № 4. – S. 294-297.
6. *Lekhov, O. S.* Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie metalla v ochage deformacii pri poluchenii sortovyh zagotovok iz stali na ustanovke sovmeshchennogo processa nepreryvnogo lit'ya i deformacii. Soobshchenie 2 / O. S. Lekhov, A. V. Mihalev // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya metallurgiya. – 2020. – T. 63. – № 9. – S. 730-734.
7. *Sidel'nikov, S.B.* Tekhnologiya prokatki / S.B. Sidel'nikov, I.L. Konstantinov, D.S. Voroshilov. – 3-e izd., dop. i pererab. – M.: INFRA-M, 2020. – 180 s.
8. *Savchenko, S. A.* Vliyanie gomogeniziruyushchego otzhiga nepreryvnolitoj zagotovki na uroven' karbidnoj segregacii v buntovom prokate iz podshipnikovoj stali / S. A. Savchenko, I. A. Kovaleva, I. V. Astapenko, A. B. Sychkov // Metallurg. – 2025. – № 6. – S. 17-21.
9. *Pankovec, I. A.* Issledovanie faktorov, sposobstvuyushchih snizheniyu karbidnoj neodnorodnosti v podshipnikovyh markah stali / I. A. Pankovec, S. A. Savchenko, V. I. Voznaya, M. N. Vereshchagin, I. V. Astapenko // Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoj i ekonomicheskoj informacii. 2021. – T. 77. – № 7. – S. 804–810.
10. *Moller, A. B.* Sovershenstvovanie linii uskorennogo ohlazhdeniya katanki s ispol'zovaniem cifrovoj modeli processa / A. B. Moller, O. N. Tulupov, S. A. Levandovskij, D. F. Celikanov // Chernye metally. – 2022. – № 6. – S. 29-34.
11. *Vitushkin, M. Yu.* Vybor sposoba termicheskoj obrabotki kanatnoj katanki / M. Yu. Vitushkin, V. A. Haritonov // Modelirovanie i razvitie processov OMD. – 2019. – № 3(30). – S. 33-34.
12. *Sychkov, A. B.* Tekhnologiya termicheskoj obrabotki armaturnogo i fasonnogo prokata: Teoriya i metallurgicheskaya praktika / A. B. Sychkov, E. V. Parusov, A. B. Moller [i dr.]. – Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2017. – 264 s.
13. *Savchenko, S. A.* Sovershenstvovanie tekhnologii sferoidiziruyushchego otzhiga buntovogo prokata iz podshipnikovoj stali / S. A. Savchenko, I. A. Kovaleva, I. V. Astapenko, A. B. Sychkov // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. – 2025. – T. 23. – № 1. – S. 62-72.

Alexander Moller, DrSc (Eng.), Professor. E-mail: amoller@mail.ru
Oleg Tulupov, DrSc (Eng.), Professor. E-mail: o.tulupov@mail.ru
Sergey Levandovsky, Cand. of Sciences in Engineering, Associate Professor. E-mail: s.levandovsky@magtu.ru
Sergey Mihalev, Graduate Student. E-mail:s.mihalev85@mail.ru
Alexander Mihalev, DrSc (Eng.). Professor. E-mail:mialex@trubprom.com
Arkadiy Savva, Master's Student. E-mail: savva.arkadiy@mail.ru