



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.771.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-75-81

ВЫБОР КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ НЕПРЕРЫВНОГО СОРТОВОГО СТАНА ДЛЯ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ ШХ15

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

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

Аннотация. Повышение требований к качеству катанки из подшипниковых сталей, предназначенной для последующего волочения и изготовления тел качения подшипников малотоннажных партий, обуславливает необходимость разработки технологических решений для компактных литейно-прокатных производств. При работе с квадратной заготовкой малого сечения (до 42×42 мм) возрастает влияние геометрических отклонений (вариативность размера по стороне и ромбовидность), температурных градиентов и нестабильности режимов нагрева и охлаждения на устойчивость процесса прокатки и качество продукции (геометрия, дефекты поверхности, формирование микроструктуры стали ШХ15). Цель работы – обоснование технологии прокатки катанки диаметром 5,0–18 мм преимущественно из стали ШХ15 и определение требований к составу оборудования непрерывного сортового стана с учетом ограничений производственных площадей и объема производства. Методы исследования включали анализ деформационных и скоростных условий прокатки, оценку технологических рисков, а также численное моделирование формоизменения и энергосиловых параметров в первых проходах при подборе размеров и формы заготовки. Получены зависимости заполнения первого калибра и энергосиловых показателей от размеров и температуры заготовки; уточнены предельные значения ромбовидности, при которых сохраняется устойчивость захвата и минимизируется риск дефектообразования. Обоснованы требования к индукционному нагреву, включая необходимость синхронизации темпа нагрева с минимальной скоростью начала прокатки, и к режимам двухстадийного охлаждения катанки (линия типа Стелмор) для обеспечения требуемого структурного состояния. Практическая значимость результатов заключается в возможности использования предложенных решений при проектировании и настройке оборудования линии «нагрев – прокатка – охлаждение – смотка» для высококачественной катанки из стали ШХ15.

Ключевые слова: катанка, сталь ШХ15, непрерывный сортовой стан, ромбовидность заготовки, индукционный нагрев, калибровка валков, линия Стелмор, энергосиловые параметры

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

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

Для цитирования

Выбор компоновочных решений непрерывного сортового стана для подшипниковой стали ШХ15 / Моллер А.Б., Тулупов О.Н., Левандовский С.А., Михалев С.В., Михалев А.В., Савва А.Д. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 75-81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-75-81>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SELECTION OF LAYOUT SOLUTIONS FOR A CONTINUOUS BAR MILL FOR SHKH15 BEARING STEEL

Moller A.B., Tulupov O.N., Levandovsky S.A., Mikhalev S.V., Mikhalev A.V., Savva A.D.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The increasing quality requirements for bearing steel wire rod intended for subsequent drawing and production of rolling elements for small-batch bearing manufacturing necessitate the development of technological solutions for compact casting and rolling facilities. When processing small-section square billets (up to 42×42 mm), the influence of geometric deviations (side dimension variation and rhomboidity), temperature gradients, and instability of heating and cooling conditions on rolling process stability and product quality (geometry, surface defects, and microstructure formation in ShKh15 steel) becomes increasingly significant. **Objectives.** The aim of this study is to substantiate the technology for rolling wire rod with diameters of 5.0-18 mm, primarily from ShKh15 bearing steel, and to determine the equipment requirements for a continuous bar mill considering the limitations of production area and output capacity. **Methods Applied.** The research methods included the analysis of deformation and speed conditions during rolling, assessment of technological risks, and numerical simulation of form change and power parameters in the initial passes when selecting billet dimensions and shape. **Result.** Dependencies between the filling of the first groove and the power parameters on the billet dimensions and temperature were established. The limiting values of billet rhomboidity, at which stable biting conditions are maintained and the risk of defect formation is minimized, were determined. Requirements for induction heating were substantiated, including the need to synchronize the heating rate with the minimum rolling start speed, as well as requirements for two-stage wire rod cooling (Stelmor-type line) to ensure the required microstructure state. **Practical Relevance.** The practical relevance of the results lies in the possibility of applying the proposed solutions in the design and adjustment of equipment for the integrated “heating-rolling-cooling-coiling” line intended for the production of high-quality wire rod from ShKh15 steel.

Keywords: wire rod, ShKh15 steel, continuous bar mill, billet rhomboidity, induction heating, roll pass design, Stelmor line, power parameters.

The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant No26-19-20025 (Available at: <https://rscf.ru/project/26-19-20025/>)

For citation

Moller A.B., Tulupov O.N., Levandovsky S.A., Mikhalev S.V., Mikhalev A.V., Savva A.D. Selection of Layout Solutions for a Continuous Bar Mill for ShKh15 Bearing Steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 75-81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-75-81>

Введение

Одним из ключевых направлений развития современной металлургии является создание технологических цепочек, обеспечивающих выпуск высококачественной металлопродукции при снижении удельных затрат энергии и металлоемкости оборудования. Для подшипниковых сталей, в том числе ШХ15, требования к качеству особенно жесткие: контролируются неметаллические включения, глубина обезуглероженного слоя, карбидная неоднородность, структура после горячей прокатки и после последующих операций сфероидизирующего отжига и волочения [1].

Наличие дефектов поверхности, закатов, вкатанной окалины, а также микроструктурных неоднородностей приводит к надрывам и обрывам при волочении, увеличивает брак и снижает ресурс изделий. В условиях рассматриваемой технологии исходная заготовка должна быть получена методом непрерывного литья и деформации и иметь сечение не более 42×42 мм при длине порядка 19 м. Такая заготовка позволяет реализовать компактную линию, однако малое сечение повышает требования к точности гео-

метрии и к обеспечению достаточной вытяжки для получения проката диаметром 14–18 мм. Одновременно ограничения по площадям цеха вынуждают применять компоновочные решения с изменением направления потока, что дополнительно усложняет требования к синхронизации скоростей, надежности транспортировки и системам безопасности.

Цель работы и постановка задачи

Цель работы – обоснование технологии прокатки катанки и пруткового проката на непрерывном сорто-вом стане с ориентиром на выпуск катанки диаметром 5,0–18 мм в мотках преимущественно из стали ШХ15, предназначенной для последующего волочения, и определение состава основного оборудования линии. Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Проанализировать исходные данные и ограничения к заготовке, сортаменту, производительности и компоновке.
2. Выделить технические, технологические и организационные риски реализации производственной линии.

3. Исследовать влияние вариативности геометрических параметров заготовки и ромбовидности на заполнение первого калибра и энергосиловые параметры.

4. Оценить риски обеспечения требуемых режимов индукционного нагрева при последовательной задаче заготовок и синхронизации с минимальной скоростью начала прокатки.

5. Обосновать требования к охлаждению катанки на линии типа Стелмор для получения требуемой микроструктуры и технологичности при метизном переделе.

6. Сформировать требования к составу оборудования, включая черновые и чистовые группы клетей, ножницы, системы термоупрочнения (опционально), холодильники и бунтовую линию.

Исходные данные и ограничения

В качестве исходных данных приняты следующие положения и ограничения проектируемой линии.

Заготовка: квадрат не более 42×42 мм, длиной порядка 19 м, с радиусами скругления углов 4 мм; заготовка должна быть изготовлена методом непрерывного литья и деформации с минимизацией усадочных дефектов и пор, характерных для НЛЗ. Марочный сортамент включает углеродистые, низколегированные и легированные стали; приоритет – сталь ШХ15.

Продукция: горячекатаный круг диаметром 5,0–18 мм в мотках массой не менее 160 кг для ШХ15 и не менее 250 кг для других марок, а также арматурный профиль в прутках длиной 11,7 м (опция). Производительность: проектный выпуск порядка 30 тыс. т/год при одноручевой поштучной прокатке. Скорость начала прокатки в первой черновой клети должна составлять 0,15–0,2 м/с (предпочтительно не ниже 0,2 м/с), что критично для предотвращения остывания и формирования температурного градиента и быстрого образования сетки разгара [2, 3].

Нагрев: горячий и холодный посад с подогревом заготовок в проходном индукционном нагревателе. Температура начала прокатки принята 1020°C (допуск уточняется при наладке). Компонка: ограничения по длине и ширине цеха требуют отказа от классической прямолинейной компоновки и использования решений с поворотом потока металла на участках черновой/чистовой прокатки, транспортер витков или холодильника.

Ключевые технологические риски и подходы к их анализу

Для рассматриваемой линии выделены риски, оказывающие наибольшее влияние на качество катанки и устойчивость процесса.

Риск недостаточной деформационной проработки металла при малом сечении заготовки. Для обеспечения качественных показателей в верхнем диапазоне сортамента (диаметр 14–18 мм) требуется достаточная вытяжка. При сечении 42×42 мм площадь заготовки составляет 1764 мм². Для круга диаметром 14 мм

площадь 153 мм², что соответствует коэффициенту вытяжки около 11,5; для диаметра 16 мм – около 8,8 мм², что ниже требуемого уровня и не обеспечивает необходимой величины окува.

Риск дефектов поверхности при разделении литого полупродукта и наличии облоя/заусенцев. Такие дефекты могут закатываться в калибрах и делать катанку непригодной к волочению [4, 5].

Риск неустойчивости процесса из-за вариативности размеров и ромбовидности. Отклонения геометрии изменяют условия захвата, заполнения калибров, натяжения в непрерывной группе и износ инструмента.

Риск несоответствия режимов нагрева и прокатки. Скорость нагрева в индукторе и минимально допустимая скорость начала прокатки должны быть согласованы; при понижении скорости прокатки возрастает остывание и неравномерность температурного поля по длине.

Риск недостижения требуемой микроструктуры ШХ15 после прокатки и охлаждения. Для последующего метизного передела критично получение структурного состояния, обеспечивающего технологичность сфероидизирующего отжига и волочения. Ошибки режима охлаждения приводят к повышенной твердости и неоднородности структуры [6, 7].

Влияние вариативности размеров заготовки на заполнение первого калибра и энергосиловые параметры

Первый проход черновой группы является наиболее чувствительным к отклонениям размеров заготовки, поскольку именно здесь формируется первичная геометрия раската, задаются условия устойчивого захвата и определяется риск переполнения калибра. Рассмотрена прокатка квадрата «на сторону» в первом овальном калибре 36×48 мм при варьировании размеров квадрата 41×41, 42×42 и 43×43 мм. Численное моделирование показало, что при увеличении стороны квадрата возрастает степень заполнения калибра и растут энергосиловые показатели. При стороне 43 мм появляется риск переполнения и формирования заката в последующих проходах (табл. 1). При уменьшении стороны до 41 мм снижается заполнение и изменяются условия вытяжки и уширения, что негативно влияет на воспроизводимость размеров.

Таблица 1. Энергосиловые параметры прокатки в первом проходе при изменении размеров заготовки

Table 1. Power and energy parameters of rolling in the first pass at different billet dimensions

Размер квадратной заготовки, мм	Сила, кН	Момент, кН·м	Мощность, кВт
41×41	171	3,98	4,87
42×42	199	4,86	5,96
43×43	225	5,70	6,99

Как видно из данных **табл. 1**, увеличение стороны квадрата на 1 мм приводит к росту усилия и мощности, а также к ухудшению условий заполнения. Для обеспечения устойчивости процесса и снижения дефектообразования требуется строгая стабилизация размеров исходной заготовки и контроль износа бойков/валков, влияющих на действительные проходные размеры калибров.

Предварительный анализ влияния ромбовидности заготовки

Ромбовидность (разность диагоналей) квадратной заготовки является одним из наиболее опасных факторов для сортовой прокатки, поскольку она изменяет геометрию контакта в калибре, смещает нейтральную линию и может приводить к асимметрии деформации, скручиванию раската и локальному износу инструмента. Для практики сортовой прокатки характерны ограничения ромбовидности порядка нескольких процентов от стороны квадрата [8, 9]. Рассмотрены два граничных случая подачи ромбовидной заготовки в один и тот же первый ромбический калибр: первый – совпадение диагоналей заготовки и калибра (**рис. 1**); второй – несовпадение диагоналей (**рис. 2**). В обоих случаях выполняется условие, что входящее сечение раската выше и уже самого калибра.

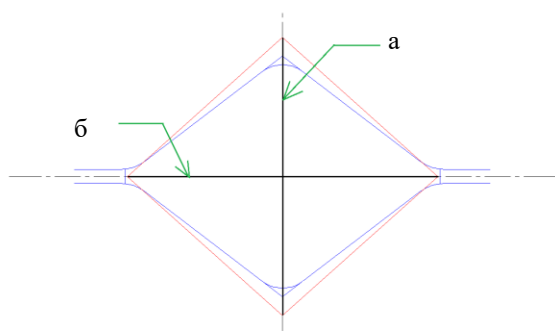


Рис. 1. Совпадение малой (а) и большой (б) диагоналей заготовки и калибра
Fig. 1. Alignment of the minor (a) and major (б) diagonals of the billet and the roll pass

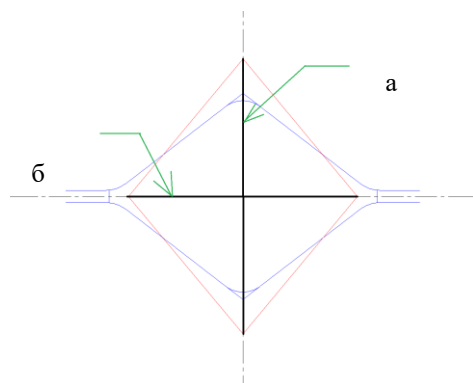


Рис. 2. Несовпадение малой (б) и большой (а) диагоналей заготовки и калибра
Fig. 2. Misalignment of the minor (б) and major (а) diagonals of the billet and the roll pass

При первом способе с ростом ромбовидности калибр и заготовка стремятся к самоподобию, увеличивается площадь контакта и улучшаются условия захвата, однако возрастает чувствительность к переполнению. При втором способе уменьшается площадь контакта и усиливается неравномерность деформации, что может приводить к интенсивной локальной выработке калибра и повышению вероятности дефектов.

На основании расчетных оценок и результатов моделирования принято, что ромбовидность порядка 6% от стороны является предельно допустимой с позиций энергосиловых параметров и устойчивости процесса. При этом для обеспечения стабильности необходимо применение удерживающих и направляющих устройств, а также готовность к компенсации возможного скручивания профиля.

Влияние температуры заготовки на энергосиловые показатели и требования к индукционному нагреву

Температурный фактор является ключевым для устойчивости прокатки в непрерывной группе, особенно при малых скоростях начала процесса. При снижении температуры заготовки возрастает сопротивление деформации и, как следствие, увеличиваются усилие, момент и требуемая мощность приводов. Моделирование проводилось с применением программного комплекса DEFORM 3D (лицензия №TES-135/2009-AS) и показало, что снижение температуры от 1150 до 1000°C приводит к росту энергосиловых показателей приблизительно на 50%, а при снижении до 900°C – до 100% (**табл. 2**). Это соответствует общим положениям ОМД и обосновывает требования к проходному индукционному нагревателю: необходимы индукторы адаптированной формы для квадратного сечения (снижение перегрева ребер), пирометрический контроль температуры между секциями, автоматизированное управление мощностью и синхронизация темпа выдачи заготовок с минимальной скоростью начала прокатки [3, 10, 11].

Таблица 2. Энергосиловые параметры первого прохода при изменении температуры нагрева заготовки 42×42 мм

Table 2. Power and energy parameters of the first pass at different heating temperatures of the 42×42 mm billet

Температура нагрева T, °C	Уширение, мм	Сила, кН	Момент, кН·м	Мощность, кВт
900	23,80	317	7,75	9,50
950	23,87	273	6,65	8,15
1000	23,93	228	5,53	6,77
1050	23,91	199	4,86	5,96
1100	23,92	166	4,03	4,93
1150	23,90	146	3,52	4,32

Данные **табл. 2** демонстрируют необходимость минимизации потери тепла перед задачей в первую

клеть. С учетом последовательной подачи заготовок важны технологические теплосберегающие «демпферы» и организационные решения, исключающие длительное ожидание соседних заготовок до нагрева.

Риск недостижения требуемой микроструктуры катанки из стали ШХ15 и требования к охлаждению

Для стали ШХ15 решающим является обеспечение структурного состояния, пригодного для дальнейшего сфероидизирующего отжига и волочения. Неприемлемыми являются выраженная пластинчатая перлитная структура, карбидная сетка и высокая карбидная неоднородность, поскольку они вызывают неравномерный износ и снижение ресурса изготовленных впоследствии подшипников. В технологической схеме производства катанки важна двухстадийность охлаждения: первичное ускоренное охлаждение (как правило, водяное) до заданного уровня температуры в зоне виткообразователя и последующее регулируемое охлаждение в витках на транспортере с принудительной вентиляцией (линия Стелмор). Далее целесообразна выдержка под термоизолирующими крышками для выравнивания температурного поля и стабилизации превращений. Особое значение имеет временной интервал между окончанием деформации и началом интенсивного охлаждения: в этот период протекают процессы рекристаллизации и роста зерна. Следовательно, выбор расположения секций водяного охлаждения и настройка режима вентиляции должны учитывать не только диаграммы аустенитного превращения, но и кинетику разупрочнения после деформации, зависящую от формулы легирования стали [12].

Разработка технологической схемы прокатки и требования к оборудованию

Исходя из первоначальной технологической информации, целесообразна компоновка непрерывного прокатного стана 180 с черновой группой клетей 300–350, промежуточной группой 250 и чистовой 180. Прокатка осуществляется поштучно в одну нитку. После черновой группы предусматривается разделение потоков на направление «катанка» и (опционально) «арматура».

Подготовка и подача заготовки. Заготовка 42×42 мм длиной 6–20 м подается поштучно через стол инспекции. Поверхность должна быть без трещин, раковин и заусенцев. Химический состав ШХ15 – по ГОСТ на подшипниковую сталь. Для повышения устойчивости захвата и снижения влияния ромбовидности рекомендуется организовать направляющие проводки, обеспечивающие целенаправленную ориентацию заготовки при задаче. Нагрев заготовок осуществляется проходным индукционным нагревателем квадратной формы. Температура на выходе должна составлять 1020±(уточняемый допуск) °С.

Для расчета времени нагрева необходима формулировка технического задания, обеспечивающая скорость, скоординированную с прокаткой в первой клетке.

Черновая прокатка. Черновая группа реализует схему «овал – круг» с чередованием горизонтальных и вертикальных клетей или кантованием раската. На выходе предусмотрены ножницы для удаления переднего и заднего концов (150–200 мм), а также аварийная резка при бурении. Рекомендуется унификация калибровки так, чтобы после черновой группы формировался универсальный размер раската (например, круг диаметром 22 мм) для дальнейшей прокатки всего сортамента.

Промежуточная и чистовая прокатка катанки. Предчистовые клетки обеспечивают подготовку раската и стабилизацию натяжений; чистовые клетки формируют конечный диаметр. Система АСУ ТП обеспечивает регулировку частоты приводов клетей, создавая регламентированные минимальные натяжения и регулируя накопление петель между клетями. На выходе предусматриваются водяное охлаждение и линия воздушного охлаждения типа Стелмор, виткообразователь и бунтоукладчик.

Опция «арматура». Для направления «арматура» после чистового калибра предусматривается установка термомеханического упрочнения проходного типа с возможностью быстрой переналадки на диаметр 12–18 мм и позицию «без обработки». Далее – трайб-аппарат, делительные ножницы и холодильник прутков.

Заключение

На основе анализа исходных данных и исследований ключевых технологических рисков сформированы обоснованные требования к технологии прокатки катанки из стали ШХ15 и составу оборудования непрерывного сортового стана. Установлено, что стабильность геометрии исходной заготовки, полученной слиттинг-процессом [13], в том числе ограничение вариативности подачи заготовок с учетом ромбовидности, является критическим условием предотвращения переполнения первого калибра и дефектообразования.

Показано существенное влияние температуры нагрева на энергосиловые параметры прокатки, что требует точного контроля индукционного нагрева и синхронизации темпа нагрева с минимальной скоростью начала прокатки. Предусмотрена необходимость двухстадийного охлаждения катанки на линии типа Стелмор для формирования микроструктуры, обеспечивающей технологичность при последующем метизном переделе.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, модернизации и настройке литейно-прокатных агрегатов и непрерывных сортовых станов для производства высококачественной катанки.

Список источников

1. Оценка напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки при волочении в монолитной волоке на основе моделирования / Д. В. Терентьев, М. Ю. Усанов, Е. С. Шеметова [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22, № 3. С. 170-177.
2. Сидельников С.Б., Константинов И.Л., Ворошилов Д.С. Технология прокатки. 3-е изд., доп. и перераб. М.: ИНФРА-М, 2020. 180 с.
3. 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.
4. Кинзин Д.И., Моллер А.Б., Рычков С.С. Выбор методики расчета уширения при моделировании прокатки сортовых профилей простой формы // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2012. № 10. С. 32-35.
5. Метод автоматизированного проектирования калибровок валков для прокатки круглых профилей по системе калибров овал-круг / С.А. Снитко, Н.П. Денищенко, А.В. Яковченко [и др.] // Физика и техника высоких давлений. 2021. Т. 31, № 2. С. 101-113.
6. Термическое упрочнение фасонного проката в потоке сортового стана / О.Н. Тулупов, А.В. Наливайко, А.Б. Сычков [и др.] // Сталь. 2019. № 4. С. 64-70.
7. 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.
8. Захаров Е. А., Моллер А. Б., Тулупов О. Н. Определение диапазона допустимой ромбовидности литой заготовки с целью снижения дефектообразования при прокатке в калибрах // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2006. № 1. С. 125-129.
9. Развитие векторной модели формоизменения металла при сортовой прокатке / А.Н. Луценко, В.А. Монид, О.Н. Тулупов, А.И. Трайно // Труды пятого конгресса прокатчиков, Череповец, 21–24 октября 2003 года. Москва: [Черметинформация], 2004. С. 278-283.
10. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях: монография. Москва: ИНФРА-М, 2020. 273 с.
11. Сычков А.Б., Савченко С.А. Влияние предварительной термической обработки непрерывнолитой заготовки на структурообразование в бунтовом прокате из стали ШХ15 // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2024. № 23. С. 152-162
12. 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.
13. Совершенствование технологии прокатки периодических профилей слитинг-процессом на стане 370 ОАО «ММК» / С.Ю. Саранча, Г.К. Рожков, С.А. Левандовский [и др.] // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2016. № 22. С. 116-120.

References

1. Terentyev D.V., Usanov M.Yu., Shemetova E.S. et al. Assessment of the stress-strain state of steel-copper wire during drawing in a monolithic die based on modeling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;22(3):170-177. (In Russ.)
2. Sidelnikov S. B., Konstantinov I.L., Voroshilov D.S. *Tekhnologiya prokatki. 3-e izd., dop. i pererab* [Rolling technology. 3rd ed., supplemented and revised]. Moscow: INFRA-M, 2020, 180 p. (In Russ.)
3. Sychkov A.B., Parusov E.V., Moller A.B. et al. *Tekhnologiya termicheskoy obrabotki armaturnogo i fasonnogo prokata: Teoriya i metallurgicheskaya praktika* [Technology of heat treatment of reinforcing and shaped rolled products. Theory and metallurgical practice]. Beau Bassin: Palmarium Academic Publishing, 2017, 264 p. (In Russ.)
4. Kinzin D.I., Moller A.B., Rychkov S.S. Selection of a method for calculating broadening in modeling the rolling of simple-shaped sections. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2012;(10): 32-35. (In Russ.)
5. Snitko S.A., Denishchenko N.P., Yakovchenko A.V. et al. Method of automated design of roll calibrations for rolling round sections using the oval-round calibration system. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy* [High pressure physics and engineering]. 2021;31(2):101-113. (In Russ.)
6. Tulupov O.N., Nalivaiko A.V., Sychkov A.B. et al. Thermal hardening of rolled sections in a rolled section mill flow. *Stal* [Steel]. 2019;(4): 64-70. (In Russ.)
7. Savchenko S.A., Kovaleva I.A., Astapenko I.V., Sychkov A.B. Improving the technology of spheroidizing annealing of rolled coils made of bearing steel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025;23(1):62-72. (In Russ.)
8. Zakharov E.A., Moller A.B., Tulupov O.N. Determination of the range of permissible diamond shape of a cast blank in order to reduce defect formation during rolling in calibers *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD* [Modeling and development of metal forming processes]. 2006;(1):125-129. (In Russ.)
9. Lutsenko A.N., Monid V.A., Tulupov O.N., Traino A.I. Development of a vector model of metal forming during section rolling *Trudy pyatogo kongressa prokatchikov* [Proceedings of the fifth congress of rolling mills]. Cherepovets, Moscow: Chermetinformatiya, 2004, pp. 278-283. (In Russ.)
10. Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R. *Skorostnye rezhimy induktsionnogo nagreva i termonapryazheniya v izdeliyakh: monografiya* [High-speed modes of induction heating and thermal stress in products: monograph]. Moscow: INFRA-M, 2020, 273 p. (In Russ.)
11. Sychkov A.B., Savchenko S.A. Influence of preliminary heat treatment of continuously cast billets on structure formation in rolled products made of SH15 steel *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialoobrabotki* [Technologies of metallurgy, mechanical engineering and materials processing]. 2024;(23):152-162. (In Russ.)

12. Savchenko S.A., Kovaleva I.A., Astapenko I.V., Sychkov A.B. The influence of homogenizing annealing of continuously cast billets on the level of carbide segregation in rolled products made of bearing steel. *Metallurg* [Metallurgist]. 2025;(6):17-21. (In Russ.)
13. Sarancha S.Yu., Rozhkov G.K., Levandovsky S.A. et al. Improving the technology of rolling periodic sections by the slitting process on mill 370 of PJSC ММК. *Modelirovanie i razvitiye protsessov OMD* [Modeling and development of metal forming processes]. 2016;(22): 116-120. (In Russ.)

Поступила 02.03.2026; принята к публикации 17.04.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 02/03/2026; revised 17/04/2026; published 30/06/2026

Моллер Александр Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры обработки материалов давлением имени М.И. Бояршинова, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: amoller@mail.ru. ORCID: 0000-0001-9090-2080

Тулупов Олег Николаевич – доктор технических наук, проректор по научной и инновационной работе, профессор кафедры обработки материалов давлением имени М.И. Бояршинова, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: o.tulupov@mail.ru.

Левандовский Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры обработки материалов давлением имени М.И. Бояршинова, директор Проектного офиса (НИС-RnD), Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: s.levandovsky@magtu.ru. ORCID: 0000-0002-8650-2241

Михалев Сергей Викторович – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: s.mihalev85@mail.ru

Михалев Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: mialex@trubprom.com

Савва Аркадий Дмитриевич – магистрант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: savva.arkadiy@mail.ru

Alexander B. Moller – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Materials Pressure Treatment named after M.I. Boyarshinov, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: amoller@mail.ru. ORCID: 0000-0001-9090-2080

Oleg N. Tulupov – DrSc (Eng.), Vice Rector for Research and Innovation, Professor of the Department of Materials Pressure Treatment named after M.I. Boyarshinov, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: o.tulupov@mail.ru.

Sergey A. Levandovsky – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Pressure Treatment named after M.I. Boyarshinov, Head of Project Office (RnD), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. s.levandovsky@magtu.ru. ORCID: 0000-0002-8650-2241

Sergey V. Mikhalev – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: s.mihalev85@mail.ru

Alexander V. Mikhalev – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Machines and Technologies of Pressure Treatment and Mechanical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: mialex@trubprom.com

Arkadiy D. Savva – Master's Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: savva.arkadiy@mail.ru