

На правах рукописи



Ворожева Евгения Львовна

**Обеспечение микроструктуры и стабильных механических свойств
стального проката при повышении толщины заготовки в условиях
литейно-прокатного комплекса**

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

г. Нижний Новгород- 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (г. Нижний Новгород) и АО «Выксунский металлургический завод» (г. Выкса)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Хлыбов Александр Анатольевич

Официальные оппоненты: **Выбойщик Михаил Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, Тольяттинский государственный университет, профессор кафедры "Нанотехнологии, материаловедение и механика" (г.Тольятти)
Рингинен Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, руководитель экспертного направления ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (г.Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Защита состоится « 22 » декабря 2023 года в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.345.03 при ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» по адресу: 603155 г. Нижний Новгород, ул. Минина, д.24, корп. 1, ауд. 1313.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» и на сайте <https://www.nmtu.ru/structure/view/podrazdeleniya/fpsvk/obyavleniya-o-zashhitah>

Автореферат разослан «_____»

2023г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Нуждина Т.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Производство горячекатаного проката по технологии Литейно-прокатного комплекса (ЛПК) является современным направлением в металлургической практике. Основная концепция объединения непрерывной разливки и прокатки стали в одной технологической линии заключается в максимальном приближении геометрии профиля непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) к профилю конечной металлопродукции и поступлению НЛЗ на горячую прокатку сразу после разливки до того, как произойдёт превращение $\gamma \rightarrow \alpha$.

Конечные свойства горячекатаного проката в условиях ЛПК зависят от микроструктуры, формирование которой происходит на всех этапах производства. При этом микроструктура эволюционирует на каждом последующем технологическом этапе с учётом особенностей структуры, образованной в процессе затвердевания. В процессе ЛПК производство высокопрочного проката с достижением вязкостных и пластических свойств осложнено отсутствием фазовых превращений $\gamma \rightarrow \alpha$ во время охлаждения и $\alpha \rightarrow \gamma$ в ходе повторного нагрева сляба для рекристаллизации и измельчения структуры перед прокаткой. Поэтому структурное состояние НЛЗ является основным показателем получаемой микроструктуры и свойств в прокате. В производстве сталей с повышенными требованиями к хладостойкости и коррозионной стойкости решающее влияние играет микроструктура, на формирование которой оказывают влияние процессы рекристаллизации аустенитных зёрен и выделения дисперсных частиц микролегирующих элементов в ходе контролируемой прокатки. Горячекатаный прокат, произведённый из НЛЗ толщиной 90мм по технологии объединённой разливки и прокатки, стабильно обеспечивает вязкостные свойства при температуре испытания -20°C . При этом KCV^{-20} должно быть не менее 80 Дж/см^2 . Значение доли вязкой составляющей должно быть не менее 70%. В последнее время потребители металлопроката выставляют более высокие требования к ударной вязкости при более низких температурах испытания вплоть до -60°C , KCV^{-60} должно быть не менее 60 Дж/см^2 , а в некоторых случаях не менее 100 Дж/см^2 .

Литейно-прокатный комплекс (ЛПК) Выксунского металлургического завода производит горячекатаный прокат из слябов с проектной толщиной 90мм. Одной из основных задач дальнейшего развития ЛПК является повышение объёма выпускаемого проката. С 2019 по первую половину 2020г. была увеличена ёмкость дуговой сталеплавильной печи (ДСП) на 12,5% и выполнена модернизация роликовой проводки машины непрерывной разливки стали (МНРС). Модернизация МНРС обеспечила повышение производительности на 7%. Этого оказалось недостаточно для синхронизации с производительностью ДСП. Исходя из технических возможностей оборудования было принято решение о разработке технологии производства проката из непрерывнолитой заготовки увеличенной толщины. При использовании действующего кристаллизатора с толщиной сляба на выходе 112,5 мм, исключении схемы обжатия «Liquid Core Reduction» с жидкой сердцевиной при сохранении технологии мягкого обжатия с твёрдо-жидкой фазой стало возможным получать сляб на выходе из МНРС с толщиной 105 мм. Разработка и внедрение новой технологии непрерывной разливки и прокатки сляба увеличенной толщины обеспечит повышение производительности ЛПК за счет увеличения массовой скорости разливки.

Решению проблемы обеспечения механических свойств с учётом структурообразования посвящены многие работы учёных, таких как Погоржельский В.И., Настич С.Ю., Горелик С.С., Остапенко А.Л., Матросов Ю.И., Литвиненко Д.А. Известные исследования описывают технологию термомеханической прокатки. Однако не все вопросы удалось изучить достаточно подробно, в частности, степень влияния исходного состояния непрерывнолитых заготовок на процесс структурообразования при горячей деформации. Отсутствуют данные о структурных изменениях при повышении толщины сляба с 90 до 105мм в условиях непрерывной разливки, совмещённой с прокаткой. Отсутствуют сведения о параметрах дендритной структуры в слябах этих толщин.

Присутствует нестабильность механических свойств в готовом прокате трубных сталей при практической реализации технологии производства слябов повышенной толщины. Это отрицательно сказывается на качестве выпускаемой продукции.

Таким образом, изучение структурных изменений при реализации технологии производства сляба повышенной толщины в условиях непрерывной разливки, совмещённой с прокаткой, и разработка металлургических решений для формирования стабильных вязкостных и прочностных механических свойств в прокате является актуальной задачей.

Степень разработанности. Изучению металлургических основ термомеханической обработки стали в отечественной и зарубежной науке посвящено большое количество работ. Современный опыт производства говорит о необходимости достижения в прокате однородной дисперсной структуры способом контролируемой прокатки. Известный подход подразумевает использование термомеханической обработки, включающей в себя нагрев слябов, черновую стадию прокатки для измельчения исходного аустенитного зерна, чистовую стадию прокатки ниже температуры остановки рекристаллизации для наклепа аустенита, а также ускоренное охлаждение для формирования дисперсной микроструктуры готового проката. Как правило исследователи идут по пути разработки технологии моделированием, лабораторными и промышленными экспериментами на повторно подогретых образцах.

Особенности формирования структуры сталей применительно к условиям литейно-прокатного комплекса без этапов охлаждения и повторного нагрева подробно изучены в работах учёных Л.И.Эфрона, Д.В.Кудашова, А.В.Мунтина, А.В.Червонного. Преимущественно технологические усилия по достижению показателей физико-механических свойств в горячекатаном прокате сосредоточены на разработке химических составов и режимов термомеханической обработки. Российские учёные В.И. Никитин и К.В. Никитин в своих работах по изучению наследуемых признаков в литейно-металлургических технологиях подчёркивают склонность сплавов к наследованию структурной информации. Влияние сегрегаций на формирование структуры заявлены советскими учёными В.А.Ефимовым, А.И.Манохиным. На работы М.Флемингса с результатами изучения сегрегаций ссылаются большинство зарубежных исследователей процессов разливки и прокатки слябов. В монографии А.П.Белого рассмотрены методы изучения параметров непрерывнолитых заготовок.

Принципиальным отличием предполагаемых исследований в рамках данной работы является изучение закономерности формирования структуры стального проката в процессе его производства при непрерывной разливке и прокатке слябов без этапов $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$ превращения перед прокаткой в условиях с изменённой исходной структурой непрерывнолитой заготовки.

Цель диссертационной работы: Обеспечение стабильного комплекса механических характеристик стального проката при изменении толщины сляба с 90 до 105мм в условиях непрерывной разливки и прокатки трубных сталей.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить ряд **задач**:

1. Выполнить информационно-аналитический обзор и проанализировать основные металлургические закономерности при производстве плоского стального проката из непрерывнолитых слябов.
2. Изучить зональные, дендритные сегрегации и структуры в непрерывнолитых заготовках различных толщин.
3. Измерить параметры дендритной структуры в ходе деформации слябов разных толщин и определить необходимые степени обжатия для обеспечения равномерной проработки дендритной структуры и получения однородной аустенитной структуры.
4. Установить природу образования в структуре низкоуглеродистых микролегированных сталей областей с низким сопротивлением распространению трещины и предложить способы их снижения.

5. Разработать и внедрить металлургические решения для формирования микроструктуры и обеспечения заданных свойств в прокате класса прочности К52 при изменении толщины сляба с 90 до 105мм, оценить экономический эффект.

Объект исследования – слябы толщами 90 и 105мм, произведённые из них раскаты промежуточной толщины и готовый прокат из углеродистой низколегированной стали химического состава C-Si-Mn и низкоуглеродистой микролегированной стали химического состава C-Si-Mn-Nb.

Предмет исследования – структурные изменения в непрерывнолитой заготовке и прокате в совмещённом производстве стального проката в условиях литейно-прокатного комплекса.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Установлено, что при превращении $\delta \rightarrow \gamma$ в низкоуглеродистой микролегированной стали при температуре 1470°C формируется дендритная сегрегация Nb. Концентрация Nb увеличивается на оси дендрита в 1,3 раза по сравнению с содержанием элемента в расплаве.

2. Определено, что одним из факторов, влияющих на образование структурных областей со слабым сопротивлением распространению трещины, являются дендритные сегрегации Mn и Nb. Так содержание Mn по месту расположения дендритов меньше в 2,05 раза, чем в межосном промежутке. Содержание Nb по месту дендритов больше в 1,7 раза, чем в межосном промежутке. Соответственно содержание карбидов, выделившихся по месту расположения дендритов до прокатки больше в ~2,0 раза, чем после прокатки.

3. Установлен фактический диапазон расстояний между дендритными осями второго порядка в слябе толщиной 90мм, расстояния между дендритными осями второго порядка изменяются от поверхности к середине толщины от 22 до 180мкм.

4. Показано, что снижение скорости охлаждения на 0,5°C/сек в линии разливки при повышении толщины сляба с 90 до 105мм приводит к увеличению расстояния между дендритными осями второго порядка в преимущественном объёме сляба в среднем на 40мкм, уровень дендритных сегрегаций значительно не изменяется.

5. Показано, что при повышении температуры сляба при входе в туннельную печь с 950°C до 1005°C объёмная доля выделившихся в слябе частиц Nb уменьшилась с 0,000350 до 0,000300 на осях дендритов и в межосном промежутке с 0,000183 до 0,000137.

6. Установлено, что в объединённом процессе непрерывной разливки и прокатки без этапов охлаждения и нагрева после черновой прокатки рекристаллизованные аустенитные зёрна различаются в областях, соответствующих дендритам и междендритным пространствам. Более крупные зёрна размером ~110мкм формируются по месту вытянутых в ходе деформации дендритных остовов с пониженным содержанием Mn. В междендритных пространствах, обогащённых марганцем, присутствуют мелкие аустенитные зёрна размером менее 10мкм.

7. Экспериментами по имитации горячей прокатки установлена количественная связь между степенью деформации и относительным изменением расстояния между дендритными осями первого порядка.

Теоретическая значимость работы. Полученные результаты служат материалом для накопления эмпирических данных, используемых для математического моделирования литейных и деформационных процессов. Существенный вклад в управление микроструктурой для обеспечения комплекса заданных свойств в совмещённом процессе производства проката трубных сталей вносят следующие выявленные научные факты:

- фактические расстояния между дендритными осями второго порядка от 22 до 180мкм и уровень дендритных сегрегаций, сформированных при затвердевании слябов в линии МНРС;

- размер рекристаллизованных зёрен в зависимости от исходной дендритной структуры, после черновой прокатки: в участках, занятых вытянутыми дендритными остовами присутствуют полностью рекристаллизованные аустенитные зёрна размером около 110мкм, в междендритных пространствах зёрна мелкого размера менее 10мкм.

- установленные необходимые минимальные обжатия 55% для слябов толщиной 105мм при черновой прокатке и температуры конца прокатки 880°C для низкоуглеродистой микролегированной стали класса прочности K52.

Практическая значимость работы. Результаты исследований, проведенных в диссертационной работе, внедрены в производство для обеспечения стабильных механических характеристик проката. Также результаты использованы при внедрении технологии производства слябов повышенной (105 мм) толщины в условиях Литейно-прокатного комплекса АО «ВМЗ». Была обеспечена микроструктура и механические свойства горячекатаного проката трубных сталей из слябов повышенной толщины, а именно в горячекатаном прокате из низкоуглеродистой микролегированной Nb стали толщиной 7-8мм показатели ударной вязкости более 250 Дж/см² стабильно фиксируются до температуры -60°C. Доля вязкой составляющей проката при испытании продольных образцов также находится на стабильном и предельно высоком уровне 100%.

Разработка и внедрение новой технологии непрерывной разливки и прокатки сляба увеличенной толщины обеспечили повышение производительности в среднем на 4,0% за счет увеличения объема выпускаемого проката из стали марки 05ХГБ класса прочности K52. Экономический эффект составляет более 75 млн. руб.

Результаты диссертационной работы используются в ВФ НИТУ «МИСиС» при проведении занятий по дисциплине «Компьютерная металлография».

Методология и методы исследования. Предложенный комплекс количественного и качественного анализа структур, измерения содержания химических элементов, определения механических свойств позволяет выполнить поставленные задачи диссертационной работы. Металлографические исследования выполнены методами количественной металлографии на программно-аппаратном комплексе Thixomet Pro. Математическое моделирование выполнено при помощи современного программного обеспечения Thermo-Calc. Испытание на растяжение по ГОСТ 1497 и ударный изгиб по ГОСТ 9454 выполняли на оборудовании Zwick Roell.

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты:

1. Результаты изучения параметров структуры непрерывнолитых заготовок для различных толщин.
2. Закономерности формирования аустенитных зёрен применительно к процессу ЛПК.
3. Результаты оценки местных деформаций по толщине раскатов методом количественной металлографии, предлагаются необходимые обжатия для достижения равномерных местных деформаций и получения равномерного аустенитного зерна.
4. Закономерности формирования в структуре низкоуглеродистых микролегированных сталей областей с низким сопротивлением распространению трещины и предложения по их снижению.
5. Результаты разработки металлургических решений для достижения заданных свойств проката класса прочности K52 при освоении технологии изменения толщины сляба с 90 до 105мм применительно к процессу ЛПК.

Содержание диссертации соответствует формуле и пунктам 1. «Изучение взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм, в том числе диаграммами состояния) с физическими, механическими, химическими и другими свойствами сплавов», 2 «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях, включая технологические воздействия, и влияние

с
в
а
р
о
ч
н
о
г
о

в том числе для работы в экстремальных условиях» паспорта специальности 2.6.1 –

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов подтверждается использованием современного сертифицированного оборудования и их воспроизводимостью. Точность измерений методами количественной металлографии на программно-аппаратном комплексе Thixomet Pro составляет $\pm 1\%$, представительность полученных результатов гарантируется анализом площадей металлографических шлифов не менее 400мм^2 . Математическое моделирование выполнено при помощи современного программного обеспечения Thermo-Calc, защищённого лицензией. Погрешность при измерения механических характеристик при испытании на растяжение на оборудовании составляет 0,1 Дж. Представительность полученных результатов гарантируется увеличенным количеством образцов по сравнению с требованиями ГОСТ 9454.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и рассмотрены на следующих семинарах и конференциях: «XIV международная научная конференция «Физико-химические основы металлургических процессов» им. Академика А.М.Самарина металлов» (г.Екатеринбург, 2021 г.), «Международная научно-практическая конференция «Материаловедение и металлургические технологии» RusMetalCon» (г.Челябинск, 2021 г.), процессов» им. Академика А.М.Самарина (г.Выкса, 2022 г.), «XVII международный конгресс сталеплавильщиков и производителей металлов» (г.Магнитогорск, 2023 г.), научно-практический семинар «Инновационные инженерные решения в металлургии и заготовительных производствах машиностроения», посвящённый 115-летию со дня рождения профессора А.А. Скворцова (НГТУ им. Р.Е. Алексеева г. Нижний Новгород, 2023 г.)

Личный вклад автора. В диссертации представлены результаты исследования, полученные автором самостоятельно. Автор выполнял поиск и анализ научно-технической литературы по теме работы, определял задачи исследования, разрабатывал методики проведения экспериментальных исследований, подготавливал образцы, выполнял экспериментальные исследования и анализировал результаты экспериментов, формулировал практические рекомендации. Постановка задач исследований и обсуждение результатов выполнены при непосредственном участии автора совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 14 печатных работах, из них 9 рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, в том числе 6 публикаций Scopus. По результатам работы получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023661645 РФ.

Объём и структура. Текст диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 127 наименований, содержит 152 страницы текста,

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, а также отличие подхода к исследованиям в данной работе от существующих на сегодняшний день. Показано, что целью работы является обеспечение микроструктуры со стабильным комплексом механических свойств в стальном прокате при практической реализации изменения толщины сляба с 90 до 105 мм в условиях непрерывной разливки, совмещённой с прокаткой.

В первой главе «Информационно-аналитический обзор» приведён обзор российских и зарубежных литературных источников, посвящённых вопросу формирования микроструктуры и свойств стали в процессах непрерывной разливки и горячей прокатки. На настоящий момент большинство усилий сосредоточено на использовании

термомеханической обработки для преобразования исходной крупной и неоднородной литой структуры в тонкую однородную структуру. Подчёркнуто, что при разработке технологии термомеханической обработки следует рассматривать влияние не только зональной химической неоднородности на формирование микроструктуры, но и дендритные сегрегации. Экспериментальные исследования по изучению процессов роста зёрен и фазовых превращений проводятся на повторно подогретых образцах. В таких экспериментах микроструктура претерпевает вторичную рекристаллизацию при охлаждении и повторном нагреве, что не в полной мере воспроизводит совмещённый процесс. Отмечена ограниченность публикаций, раскрывающих закономерности формирования структуры и свойств проката в зависимости от исходной дендритной сегрегации в непрерывнолитых заготовках в производственном цикле без этапа охлаждения и повторного нагрева перед прокаткой. Для обеспечения стабильного комплекса свойств в условиях ЛПК необходимо изучить структурное состояние на каждой стадии совмещённого производства стального проката. На основании аналитического обзора поставлены цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе «Материалы и методы исследования» приведён план предполагаемых исследований, их цели, описание методик и оборудования для их выполнения. Материалом для исследования служили слябы толщинами 90 и 105 мм и произведённые из них раскаты и прокат углеродистой стали марки 30Г химического состава C-Si-Mn и прокат стали марки 05ХГБ с системой легирования на основе марганца, кремния и микролегирования на основе ниобия. Горячекатаный прокат стали марки 30Г группы прочности K55 предназначен для производства высокопрочных обсадных труб ответственного назначения по ГОСТ Р 53366. Горячекатаный прокат стали марки 05ХГБ класса прочности K52 относится к низкоуглеродистым сталям для изготовления сварных нефте- и газопроводов, пригодных к эксплуатации при низких температурах. В таблице 1 представлен химический состав исследуемых сталей.

Таблица 1. Химический состав исследуемых сталей (масс.%)

Сталь	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	N	Al	Ca	Nb
30Г (K55)	0,30	0,30	1,32	0,001	0,008	0,11	0,08	0,16	0,008	0,022	0,001	-
05ХГБ (K52)	0,05	0,24	0,78	0,001	0,005	0,66	0,08	0,17	0,006	0,024	0,001	0,029

Сталь выплавляли в дуговой сталеплавильной печи и обрабатывали на установке печь-ковш и двухместном вакууматоре камерного типа. Процесс непрерывной разливки стали выполняли на одноручьевой машине непрерывной разливки стали в слябы толщиной 90 мм и экспериментальные слябы увеличенной толщины 105 мм. После порезки на гидравлических маятниковых ножницах слябы поступали в туннельную печь роликового типа длиной 200 м и находились в ней 30 минут при температуре 1150 °С. После нагрева слябы прокатывали в контролируемых режимах.

Макроструктуру слябов оценивали по стандартным шкалам ГОСТ Р 58228. Содержание элементов по толщине слябов измеряли спектральным методом ГОСТ Р 54153-2010 на оптико-эмиссионном спектрометре ARL4460.

Все металлографические исследования проведены на металлографических шлифах на инвертированном оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer.Dlm, оснащённым моторизованным предметным столиком и программой анализа изображения Thixomet Pro. Шлифы изготавливали из металлопродукции на разных этапах производства: слябы, раскаты, горячекатаный рулонный прокат, также шлифы изготавливали из дилатометрических образцов. Расстояние между дендритными осями второго порядка использовали для расчёта скорости охлаждения. Для выявления дендритной структуры полированные поверхности образцов травили в свежеприготовленном водном растворе пикриновой кислоты, подогретом до температуры 70-90 °С с добавлением 1-10% поверхностно-активных веществ в течение 2-5 минут. Для компьютерного моделирования процесса формирования микросегрегаций основных и микролегирующих элементов

использовали программный пакет Thermocalc с диффузионным модулем DICTRA. Измеренные параметры дендритной структуры и рассчитанные скорости охлаждения использовали для моделирования распределения химических элементов между осью дендритов и междендритным пространством. Результаты математического моделирования микросегрегаций сопоставляли с картограммами распределения марганца по сечению остовов дендритов и междендритного пространства, полученными методом микрорентгеноспектрального анализа. В структуре непрерывнолитых заготовок измерение зёрен выполняли по методам подсчёта пересечений границ зёрен по ГОСТ 5639 в сечениях параллельных и перпендикулярных широким граням слябов.

Кинетику превращения аустенита в лабораторных условиях на образцах выполняли на dilatометре DIL 805 A/D с возможностью деформации образца. Образцы нагревали до аустенитной области и охлаждали со скоростью от 2°С/сек до 60°С/сек. Из образцов изготавливали металлографические шлифы, изучали микроструктуру с применением оптической и электронной микроскопии и определяли твердость. Для изучения изменений в исходной дендритной структуре в ходе черновой горячей прокатки на образцах из участков сляба с разной дисперсностью дендритной структуры имитировали деформацию в черновой группе клетей на dilatометре DIL 805 A/D. Далее на этих образцах изучали дендритную и аустенитную структуры.

Исследование микроструктуры на образцах от горячекатаного проката конечной толщины выполняли с использованием метода дифракции обратнорассеянных электронов (ДОЭ) с помощью растрового электронного микроскопа. На полученных картах выполнена обработка при помощи функции локальной разориентации. Малоугловые границы (МУГ) проводили при углах разориентировки решеток от 2° до 15°, а большеугловые границы (БУГ) – при углах разориентировки более 15°. Размеры зерна оценивали по размерам участков, ограниченных БУГ. Микрорентгеноспектральным анализом с помощью электронного микроскопа изучали химический состав частиц микролегирующих элементов.

Испытание на растяжение проводили по ГОСТ 1497-87 на пропорциональных плоских образцах типа I на испытательной машине Zwick/Roell с максимальным усилием 600кН. Испытания на ударный изгиб при разных температурах проводили по ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре Zwick/Roell RKP450 с максимальной энергией 450Дж. Образцы изготавливали в соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78 наибольшего размера сечения приближенного к толщине проката.

Третья глава «Структура непрерывнолитых заготовок разных толщин» посвящена результатам изучения структурных особенностей в непрерывнолитых заготовках разных толщин.

Условия разливки слябов толщинами 90 и 105мм обеспечивают уровень макросегрегаций химических элементов по толщине слябов в пределах погрешности измерений спектрального анализа. Полученное состояние непрерывнолитых слябов является близким к химически однородному в макрообъёмах. Обнаруженное локальное повышение содержания химических элементов является характерным в большей степени для дендритной сегрегации, чем для зональной химической неоднородности в макрообъёме.

Установили, что с ростом толщины слябов и снижением скорости охлаждения расширяется зона из дендритов столбчатой формы и уменьшается зона из равноосных дендритов. Расстояние между дендритными осями второго порядка λ_2 в слябах толщиной 90мм изменяется от поверхности к середине толщины от 22 до 180мкм (рис. 1А). Для сравнения в слябе толщиной 355мм размер дендритов крупнее в 2 раза, λ_2 изменяется от 57 до 350мкм. Для сравнения показано, что при технологии разливки слябов в толщину более 200мм формируется более грубая дендритная структура (рис. 1Б).

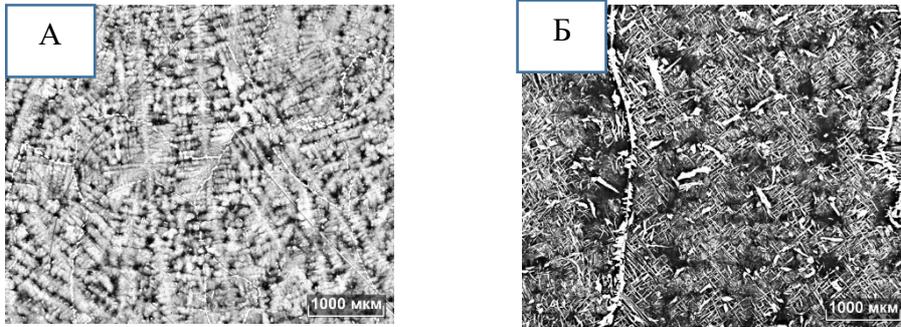


Рисунок 1. Вид дендритной структуры от поверхности к середине толщины слябов: А) сляб толщиной 90мм, Б) сляб толщиной 355мм

Расчёты скоростей охлаждения показали, что в целом основной объём слябов толщинами 90 и 105мм охлаждается быстрее более, чем в 4 раза по сравнению со слябами толщиной 355мм. Установлено, что при увеличении толщины слябов от 90 до 105мм, скорость охлаждения в линии разливки снижается на $0,5^{\circ}\text{C}/\text{сек}$ и вызывает изменения в параметрах дендритной структуры. Расстояние между дендритными осями второго порядка в основных объёмах сляба увеличивается в среднем на 40мкм. Расчёты в Thermo-Calc показали, что в расплаве стали марки 30Г фазовое превращение $\delta \rightarrow \gamma$ происходит при достижении δ -феррита в жидкости около 40%. Дендритная сегрегация в этой стали представлена градиентом концентраций марганца и кремния. При увеличении толщины сляба скорость охлаждения снижается на $0,5^{\circ}\text{C}/\text{сек}$, расстояние между дендритными осями увеличивается и создаётся предпосылка для изменения дендритной сегрегации. Коэффициенты сегрегации - отношение локально измеренных концентраций к содержанию элемента в плавке незначительно увеличиваются с 1,75, до 1,85. Массовое содержание Mn в межсосновом пространстве достигает 2,45%, на оси дендрита – 0,95% при содержании Mn в плавке 1,32%. Массовое содержание Si в межсосновом пространстве увеличивается до 0,56%, на оси – 0,23% при содержании Si в плавке – 0,24%. (рис.2А). Результаты расчётов дендритной сегрегации в Thermo-Calc подтверждены экспериментальными данными микрорентгеноспектрального анализа (рис.2Б).

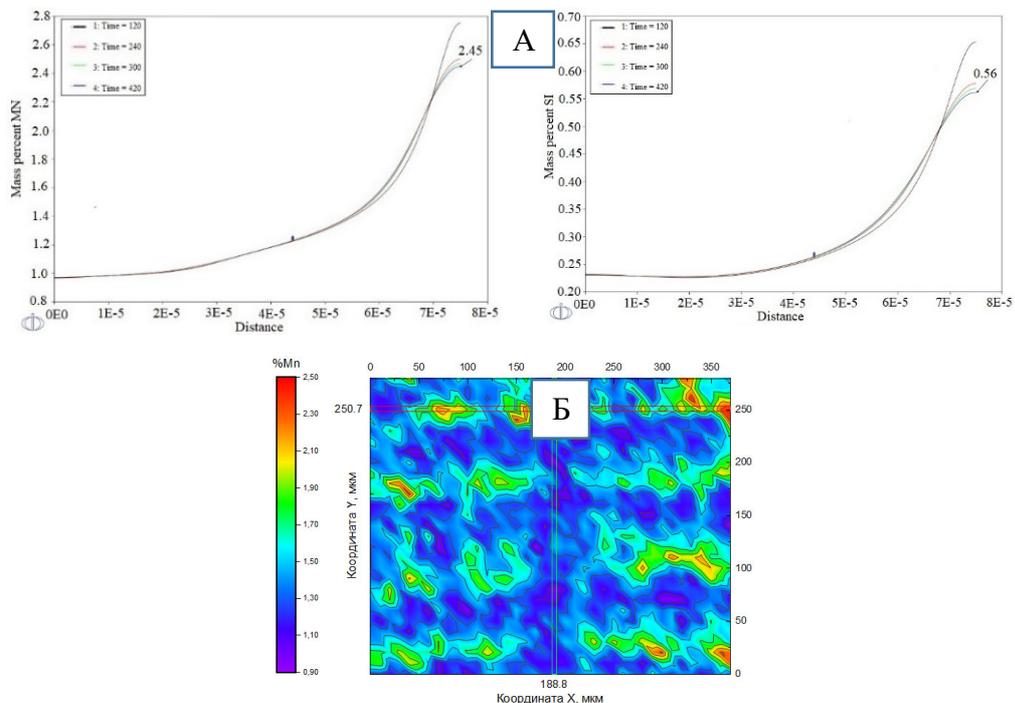


Рисунок 2. Расчёты дендритной сегрегации Т-С (А) и результаты МРСА (Б)

Ориентация дендритной структуры в первую очередь обуславливает направление роста аустенитных зёрен. Полной тождественности границ дендритов и литых зёрен не обнаружено.

Сформированный при затвердевании уровень дендритной сегрегации не изменяется после выдержки сляба в туннельной печи в течение 30 минут при 1150°C перед прокаткой. Дилатометрические исследования образцов от слябов с разной исходной дисперсностью дендритов показали зависимость продуктов распада аустенита от характера исходной дендритной структуры в образцах.

Четвёртая глава «Эволюция структуры в процессе прокатки» посвящена изучению структурообразования в процессе прокатки.

Лабораторными исследованиями доказано, что в классической схеме нагрева под прокатку при охлаждении сляба и повторном высокотемпературном нагреве до 1150°C в ходе фазовых превращений $\gamma \rightarrow \alpha$ и $\alpha \rightarrow \gamma$ происходит равномерное измельчение зерна до среднего размера 30 мкм с долей менее 5 % зёрен размером 50 мкм, независимо от исходного состояния слябов толщинами 90 и 105 мм. Коэффициент разнотерности равен 1,7. В промышленных раскатах, наоборот, действительная аустенитная структура неоднородная. Установлено, что в ходе прокатки в двух клетях quarto черновой группы размер зёрен рекристаллизованного аустенита различается в областях, соответствующих осям дендритов и междендритным пространствам. В участках, занятых вытянутыми дендритными остовами присутствуют полностью рекристаллизованные аустенитные зёрна размером 108,7 мкм в 3,9 раза крупнее, чем средневзвешенный размер зёрен аустенита 27,9 мкм. В междендритных пространствах зёрна мелкого размера менее 10 мкм. Сопоставление изображений после черновой прокатки аустенитных зёрен с деформированной дендритной структурой приведены на рисунке 3. Расположение мелких рекристаллизованных зёрен на рис. 3А соответствует тёмным, вытянутым в направлении прокатки, междендритным промежуткам на рис. 3Б. Крупные рекристаллизованные зёрна на рис. 3А соответственно расположены в участках светлых вытянутых остовах дендритов на рис. 3Б.

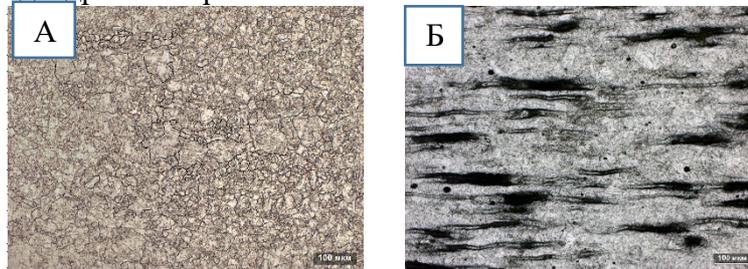


Рисунок 3. Аустенитная структура после черновой прокатки (А), дендритная структура после черновой прокатки (Б)

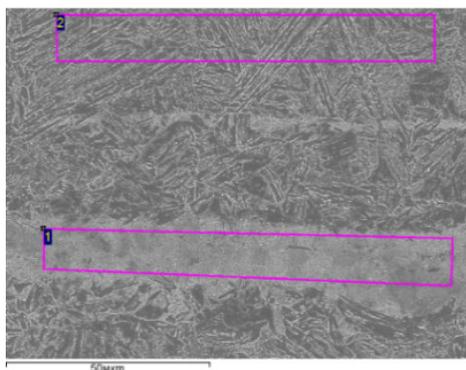
Имитацией горячей прокатки с заданными степенями обжатий образцов на дилатометре и измерением параметров дендритной структуры, выявленной на образцах после деформации, установлено, что уменьшение междендритных расстояний относительно исходного состояния являются близкими по значению фактическим степеням деформации. Измерение дендритной структуры в ходе обжатий может охарактеризовать равномерность местных деформаций важных для образования однородной структуры аустенита под действием термомеханической обработки. Данный подход использовали для изучения особенностей механизма деформирования по толщине слябов. Измерением дендритной структуры в продольных сечениях промышленных раскатов установлено, что для воздействия на структуру в середине слябов толщинами 90 и 105 мм необходимы обжатия не менее 15 и 30% соответственно. Для равномерного уменьшения расстояния между первичными дендритами, а, следовательно, формирования однородных аустенитных зёрен, по всей толщине раскатов необходимо достижение деформации минимум 45 и 55% соответственно для слябов толщинами 90 и 105 мм.

На основании построенной термокинетической диаграммы распада деформированного аустенита для исследуемой стали 30Г рекомендованной температурой завершения деформации при проведении контролируемой прокатки в условиях стана 1950 ЛПК является температура 840°C. После деформации образование структуры с обеспечением комплекса свойств происходит при скорости охлаждения около 5°C/сек. После прокатки в шести клетях кварто чистой группы в контролируемых заданных режимах фактические механические свойства готового горячекатаного проката толщиной 8мм из стали 30Г, прокатанного из разных слябов, достигаются с запасом от требуемого уровня (таблица 2).

Таблица 2. Механические свойства горячекатаного проката стали марки 30Г

σ_s , Н/мм ²	$\sigma_{0.2}$, Н/мм ²	δ , %	К С
Требования нормативной документации			
Не менее 655		Не менее 23	

В прокате стали марки 30Г получена двухфазная микроструктура с вытянутыми в направлении прокатки участками шириной около 20мкм из структурной фазы с повышенной микротвёрдостью 475HV0,01. МРСА подтвердил повышенное содержание Mn и Si тождественное дендритной сегрегации по месту структур с повышенной твёрдостью (рис.4). Микротвёрдость основной структуры составляет 275HV0,01.



Спектр	Si	Mn	Fe
1	0.55	2.88	92.45
2	0.30	1.34	94.35

Рисунок 4. Результаты измерения микрорентгеноспектрального анализа по толщине проката стали марки 30Г

Стабильные свойства в прокате подтверждены результатами аттестационных испытаний 335тыс.тонн за 2022г.

Пятая глава «Разработка металлургических подходов при производстве проката из низкоуглеродистой микролегированной стали» посвящена разработке металлургических подходов для обеспечения заданного комплекса механических свойств в низкоуглеродистой стали микролегированной ниобием с требованиями к хладостойкости при увеличении толщины сляба.

Показано, что концентрации химических элементов в низкоуглеродистых микролегированных сталях находятся в допустимом критическом диапазоне погрешности для параллельных измерений. Для сравнения в слябе толщиной 250мм низкоуглеродистой стали отношение наибольшего и наименьшего значения концентрации углерода достигает 2,5 раза.

Микрорентгеноспектральный анализ по сечению дендритной ячейки слябов подтвердил присутствие микросегрегации марганца. Расстояния между экстремумами на картах распределения концентраций марганца являются параметрами дендритной структуры. Математическим моделированием, подтверждённым экспериментальными данными,

установлено, что при превращении $\delta \rightarrow \gamma$ концентрация ниобия увеличивается на оси дендрита в 1,31 раза по сравнению с содержанием элемента в расплаве. Градиент концентрации ниобия в дендритной структуре является предпосылкой карбидной неоднородности, подтвержденной расчётом выделений соединений Nb при охлаждении сляба. Доля фаз, выделенных на осях, больше в два раза по сравнению с межосным промежутком.

Фрактографический анализ изломов образцов с низким сопротивлением разрушению показал хрупкий транскристаллитный скол. Формирование этих участков обусловлено присутствием в дисперсной феррито-бейнитной матрице протяженных удлиненных вдоль направления прокатки аномальных структурных областей с повышенным содержанием малоугловых границ (МУГ) с низким сопротивлением распространению трещины. Эти структурные области образовались из грубых аустенитных зерен, которые приобретали удлиненную форму в чистовой стадии прокатки. С помощью микрорентгеноспектрального анализа сравнили содержание основных легирующих химических элементов в структурах с разной разориентировкой углов границ зёрен. Области с повышенным содержанием малоугловых границ (рис.5А) «обеднены» марганцем по сравнению с матрицей из дисперсной ферритной структуры (рис. 5Б) и обогащены крупными карбидами ниобия размером до 200нм (рисунок 5В). Крупные частицы являются характерными для частиц, образованных в стали в линии МНРС. Сегрегация по месту областей с МУГ является тождественной дендритной сегрегации. Установлено, что одним из факторов образования в ходе прокатки аномальных структурных областей со слабым сопротивлением распространению трещины являются микросегрегации Mn и Nb.

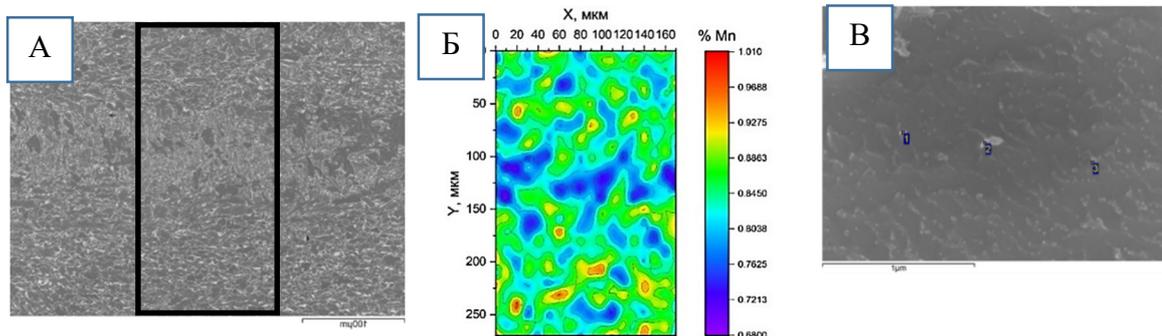


Рисунок 5. Микроструктура горячекатаного проката: А) Области с высоким содержанием МУГ на фоне дисперсной матрицы; Б) распределение Mn по месту разных структур; В) карбиды Nb по месту областей с высоким содержанием МУГ

Увеличение толщины сляба в линии разливки до 105 мм приводит к снижению скорости охлаждения и повышению температуры сляба с 950 до 1005°C перед входом в туннельную печь. Благодаря повышению температуры сляба объёмная доля выделившихся в слябе соединений Nb уменьшилась с 0,000350 до 0,000300 на осях дендритов, в межосном промежутке с 0,000183 до 0,000137. Следовательно, увеличилась доля частиц в 1,3 раза, которыми возможно воздействовать на структурообразование при термомеханической обработке для достижения заданного комплекса свойств в прокате.

Таким образом, для слябов толщиной 105мм создана концепция снижения доли выделившихся до прокатки частиц Nb в линии МНРС и равномерного воздействия на дендритную структуру, относительно которой формируется рекристаллизованное аустенитное зерно при черновой прокатке.

На основании построенных термокинетических диаграмм рекомендованной температурой завершения деформации при проведении контролируемой прокатки в условиях стана 1950 ЛПК является температура 880°C. После деформации полное подавление перлитного превращения происходит при повышении скорости охлаждения до 15°C/сек. В готовом прокате формируется микроструктура из феррита полигональной и

квазиполигональной формы. Это обеспечивает высокий уровень вязкости, пластичности и хладостойкости. Показатели ударной вязкости более 250 Дж/см² стабильно фиксируются до температуры -60°C. Результаты испытаний ударной вязкости на острых образцах Шарпи (КСУ) в интервале температур от -20 до -80°C приведены на рис. 6.

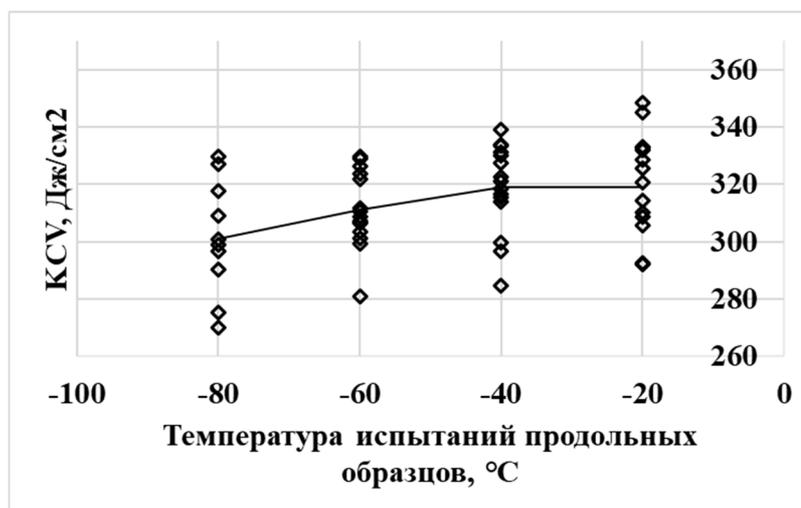


Рисунок 6 - Кривые хрупковязкого перехода при испытании на ударный изгиб образцов из проката стали марки 05ХГБ класса прочности К52

За счёт увеличения объёма стали обеспечено повышение производительности в среднем на 4,0 %. Экономический эффект составил более 75 млн. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Информационно-аналитический обзор показал, что в непрерывнолитых слябах первичная микроструктура не претерпевает фазовых превращений перед прямой прокаткой. При изучении структурообразования следует рассматривать влияние не только зональной химической неоднородности, но и дендритные сегрегации химических элементов. Для обеспечения стабильных механических свойств проката вопросы структурообразования в зависимости от исходных сегрегаций недостаточно изучены.

2. Показано, что:

-в слябе толщиной 90мм фактические расстояния между дендритными осями второго порядка λ_2 изменяются от поверхности к середине толщины от 22 до 180мкм,

-в слябе толщиной 105мм в основных объёмах сляба λ_2 увеличивается в среднем на 40мкм,

-при увеличении толщины сляба от 90 до 105 мм скорость охлаждения стали в линии разливки снижается на 0,5°C/сек,

-дендритные сегрегации элементов представлены градиентами концентраций Mn, Si и Nb,

-ограничить процесс выделения частиц микролегирующего элемента Nb в слябе до прокатки возможно за счёт снижения скорости охлаждения на 0,5°C/сек и увеличения температуры заготовки с 950 до 1005°C,

-при увеличении толщины сляба на осях дендритов объёмная доля карбонитридов снизилась с 0,000350 до 0,000300, в межосном промежутке снизилась с 0,000183 по 0,000137. При этом доля карбонитридов, необходимых для измельчения структуры при термомеханической обработке повысилась в 1,3 раза.

3. Экспериментально установлено, что при обжати слябов относительные изменения расстояний между дендритными осями первого порядка показывают степень местных деформаций. Определено, что для равномерного уменьшения расстояния между первичными дендритами по всей толщине раскатов и формирования однородного рекристаллизованного аустенитного зерна необходимы обжатия минимум 45 и 55% для слябов толщинами 90 и 105мм соответственно.

4. Дендритные сегрегации Mn и Nb являются одними из центров образования структурной неоднородности после прокатки стали марки 05ХГБ. Градиент концентрации Mn и локальное выделение соединений Nb до прокатки способствует неоднородности размеров аустенитных зёрен в ходе термо-деформационной обработки.
5. В работе формирование однородного рекристаллизованного аустенитного зерна обеспечено равномерным уменьшением расстояний между дендритами при черновой прокатке. Снижение доли ранее выделившихся карбонитридов в 1,3 раза обусловило измельчение зерна аустенита в ходе прокатки благодаря присутствию Nb в твёрдом растворе. На основании построенных термокинетических диаграмм определены температура завершения деформации 880°C при проведении контролируемой прокатки в условиях стана 1950 ЛПК и скорость охлаждения 15°C/сек. В готовом прокате показатели ударной вязкости более 250 Дж/см² стабильно фиксируются до температуры -60°C.
6. Разработка и внедрение новой технологии непрерывной разливки сляба толщиной 105мм и прокатки стали марки 05ХГБ класса прочности K52 обеспечили повышение производительности в среднем на 4,0 % за счет увеличения объёма стали. За 2022 год произведено свыше 80тыс. тонн проката стали марки 05ХГБ класса прочности K52 из слябов толщиной 105мм. Экономический эффект за счёт увеличения объёма стали составил около 75 млн. руб.
7. Результаты представленной диссертационной работы могут быть использованы для совершенствования технологии производства горячекатаного проката применительно к условиям ЛПК других промышленных предприятий.
8. Перспективы развития темы диссертации связаны с разработкой оптимальных режимов мягкого обжатия непрерывнолитой заготовки в линии МНРС для измельчения дендритной структуры и снижения дендритных сегрегаций.

Список основных публикаций по теме диссертации

Публикации в научных изданиях, индексируемых в Международных базах данных, перечень которых определен в соответствии с рекомендациями ВАК Минобрнауки РФ

1. E.L.Vorozheva. Studying on the internal quality of steel at various stages of production: Slab-rolled metal / A.A. Hlybov, E.L. Vorozheva // Materials Science Forum – 2022 – 1052 MSF – p.p.377–383. (SCOPUS)
2. Кислица В.В. Повышение производительности литейно-прокатного комплекса. / Кислица В.В., Максаев Е.Н., Бойко А.С., Солдатов Е.Н., **Ворожева Е.Л.** // Металлург. – 2022. – №4. – С.18-24. – DOI 10.52351/0026827_2022_04_18. (SCOPUS)
3. Ворожева Е.Л. Методы изучения структурного состояния непрерывнолитых слябов и горячекатаного металла, произведённого на литейно-прокатном комплексе. / Ворожева Е.Л., Кудашов Д.В., Хлыбов А.А., Сметанин К.С. // Металлы. – 2022. – №3 – С.40-48. (SCOPUS)
4. Ворожева Е.Л. Особенности формирования структуры тонких слябов, разлитых с разными скоростями, их влияние на структуру и свойства горячекатаного проката. / Ворожева Е.Л., Кудашов Д.В., Хлыбов А.А., Сметанин К.С. // Черные металлы. – 2022. – Июль. – С.27-33. (SCOPUS)
5. Ворожева Е.Л. Металлографическое исследование особенностей строения тонкого сляба и произведённого из него проката. / Ворожева Е.Л., Сметанин К.С., Кислица В.В., Кудашов Д.В. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2023 – 66(1) – С.105-111 – DOI 10.17073/0368-0797-2023-1-105-111. (SCOPUS)
6. Ворожева Е.Л. Оценка характера деформации тонких слябов методом количественной металлографии. / Ворожева Е.Л., Кудашов Д.В., Хлыбов А.А., Сметанин К.С., Подтёлков В.В. // МиТОМ. – 2023. – №4. – С.34-40. (SCOPUS)

Публикации в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Хлыбов А.А. Влияние исходной литой структуры на качество горячекатаного проката доэвтектоидной стали. / Хлыбов А.А., **Ворожева Е.Л.** // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2021. – Т.19. – №1. – С. 48–59. – <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-48-59>. (К1)

2. Кислица В.В. Условия для увеличения производительности тонкослябовой МНЛЗ без снижения качественных показателей / Кислица В.В., **Ворожева Е.Л.**, Лавров В.Н., Бойко А.С., Максаев Е.Н. // Сталь. – 2021. – №5. – С.8-10. (К1)

3. Кислица В.В. Оценка качественных показателей сляба и проката при повышении толщины непрерывнолитой заготовки / Кислица В.В., Максаев Е.Н., Бойко А.С., **Ворожева Е.Л.**, Сметанин К.С. // Сталь. – 2021. – №8. – С.17-21. (К1)

Публикации в прочих изданиях.

1. Ворожева Е.Л. Разработка методических решений оценки макроструктуры непрерывнолитого сляба толщиной 90мм / Ворожева Е.Л., Кислица В.В., Бойко А.С. // Сборник трудов Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов имени академика А.М.Самарина» / Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН. – 2019. – С.97-98

2. Ворожева Е.Л. Металлографическое исследование закономерностей изменения внутренней структуры непрерывнолитого «тонкого» сляба при различных условиях разливки / Ворожева Е.Л., Максаев Е.Н., Сметанин К.С., Бойко А.С. // Сборник трудов XVI международного конгресса сталеплавильщиков и производителей металлов / Межрегиональная общественная организация «Ассоциация сталеплавильщиков» – 2021 – С.99-104

3. Ворожева Е.Л. Особенности формирования внутренней структуры тонкого сляба и её наследование в прокате в условиях литейно-прокатного комплекса / Ворожева Е.Л., Сметанин К.С., Кислица В.В., Кудашов Д.В. // Сборник трудов Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов имени академика А.М.Самарина» / Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН. – 2022. – С.307-313

4. Ворожева Е.Л. Моделирование процесса формирования микросегрегаций при затвердевании и охлаждении слябов в линии непрерывной разливки стали / Ворожева Е.Л., Хлыбов О.С., Максаев Е.Н., Сметанин К.С., Кудашов Д.В. // Сборник трудов XVII международного конгресса сталеплавильщиков и производителей металлов / Межрегиональная общественная организация «Ассоциация сталеплавильщиков» – 2023 – С.339-345.

Патенты на изобретения и полезные модели, свидетельства на базы данных и программы для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023661645 Российская Федерация. Программа оценки механических свойств горячекатаного проката ультразвуковым методом: №2023660190: заявл. 23.05.2023: опубл. 01.06.2023 / А.А.Хлыбов, А.Л.Углов, Е.Л.Ворожева

Подписано в печать _____ Формат 60x48 1/17. Бумага офсетная
Печать офсетная. Уч.-Изд.Л.1,0. Тираж: _____. Заказ _____.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Типография НГТУ. 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.