

## ОТЗЫВ

Официального оппонента Рингинена Дмитрия Александровича, Руководителя экспертного направления дирекции по исследованиям и разработке новых продуктов группы «Новолипецкий металлургический комбинат», кандидата технических наук на диссертационную работу Ворожевой Евгении Львовны на тему «Обеспечение микроструктуры и стабильных механических свойств стального проката при повышении толщины заготовки в условиях литейно-прокатного комплекса» по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

### Актуальность темы диссертации

По мнению автора, актуальность темы обусловлена повышением в последнее время со стороны потребителей металлопроката требований к ударной вязкости при более низких температурах испытания вплоть до  $-60^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{KCV}^{-60}$  должно быть не менее  $60\text{Дж}/\text{см}^2$ , а в некоторых случаях не менее  $100\text{Дж}/\text{см}^2$ . Основная концепция литейно-прокатного комплекса заключается в объединении непрерывной разливки и прокатки стали в одной технологической линии. После разливки непрерывнолитая заготовка поступает на горячую прокатку без этапа охлаждения до того, как произойдет превращение  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Автор пишет, что для повышения производительности принято решение об увеличении толщины непрерывнолитой заготовки с 90 до 105мм. Толщина 105мм является максимально возможной для конструктивных особенностей кристаллизатора машины непрерывной разливки стали в условиях литейно-прокатного комплекса. При практической реализации технологии производства слябов повышенной толщины наблюдается нестабильность механических свойств в готовом прокате трубных сталей. Это связано в первую очередь с отсутствием данных о структурных изменениях при повышении толщины сляба с 90 до 105мм. Отсутствуют сведения о параметрах дендритной структуры в слябах этих

толщин, необходимых в расчётах математического моделирования для прогнозирования уровня микросегрегаций при затвердевании расплавов и охлаждении слябов, а также для количественной оценки выделений частиц микролегирующих элементов.

Согласно вышесказанному 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.

### **Оценка основного содержания диссертации**

Представленная на отзыв диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Текст диссертации изложен на 152 страницах, содержит 73 рисунка, 15 таблиц, список литературы включает 127 наименований. Автореферат объективно приводит основные результаты диссертации. Текст диссертации изложен современным научным литературным языком. Материал построен в форме последовательного изложения итогов и их соотношения с целью и задачами, сформулированными во введении. Текст диссертации достаточно иллюстрирован представительным графическим материалом. Таким образом, по структуре, объёму и оформлению диссертация и автореферат в целом соответствуют требованиям ГОСТ 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления».

Тема диссертации, её содержание и выводы соответствуют формуле и пунктам 1-3 и 9 паспорта специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Введение. Здесь автором обоснована актуальность диссертационной работы, основные отличия в подходе автора к исследованиям в данной работе от методики других исследований. Показано, что обеспечение стабильного комплекса механических характеристик стального проката при изменении

толщины сляба с 90 до 105мм в условиях непрерывной разливки и прокатки трубных сталей является целью работы.

Первая глава. Приведён информационно-аналитический обзор российских и зарубежных литературных источников, в которых освещены вопросы формирования микроструктуры и свойств стали в процессах непрерывной разливки и горячей прокатки. Определено, что при разработке технологии термомеханической обработки следует рассматривать влияние не только зональной химической неоднородности на формирование микроструктуры, но и дендритной сегрегации. На основании аналитического обзора поставлены цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава. Представлены 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 ниобием.

Третья глава. Здесь представлены результаты фактических измерений дендритной структуры в слябах разных толщин и результаты математического моделирования дендритных сегрегаций основных легирующих элементов.

Результаты расчётов дендритной сегрегации в Thermo-Calc, подтверждены экспериментальными данными микрорентгеноспектрального анализа.

Дилатометрические исследования образцов от слябов с разной исходной дисперсностью дендритов показали зависимость продуктов распада аустенита от характера исходной дендритной структуры в образцах.

Сформированный при затвердевании уровень дендритной сегрегации не изменяется в ходе выдержки сляба в туннельной печи перед прокаткой.

Четвёртая глава. Приведены результаты изучения структурообразования в процессе прокатки. Показано, что в ходе предварительной черновой прокатки

размер зёрен рекристаллизованного аустенита различается в областях, соответствующих осям дендритов и междендритным пространствам.

Особо можно подчеркнуть, что автор установил закономерность в изменениях междендритных расстояний относительно исходного состояния и фактическими степенями деформации. Измерение дендритной структуры в ходе обжатий характеризует равномерность местных деформаций важных для образования однородной структуры аустенита под действием термомеханической обработки.

Пятая глава. Приведены результаты математического моделирования и микрорентгеноспектрального анализа дендритных сегрегаций ниобия. Особо можно подчеркнуть хорошую сходимость результатов математического моделирования и экспериментальных данных. Показано, что расстояния между экстремумами на картах распределения концентраций марганца являются параметрами дендритной структуры. Для слябов толщиной 105 мм 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.

В «Заключении» сформулированы основные научные положения, результаты и выводы, достигнутые в ходе выполнения диссертационной работы. В приложении приведён акт промышленного внедрения.

#### **Практическая значимость**

Полученные результаты служат материалом для накопления эмпирических данных, используемых для математического моделирования литейных и деформационных процессов. Результаты исследований, проведенных в диссертационной работе использованы при внедрении технологии производства слябов повышенной (105 мм) толщины в условиях Литейно-прокатного комплекса АО «ВМЗ» для обеспечения стабильных механических характеристик проката. В горячекатаном прокате низкоуглеродистой микролегированной ниобием стали из слябов повышенной

толщины обеспечена микроструктура и механические свойства горячекатаного проката трубных сталей, а именно показатели ударной вязкости более 250 Дж/см<sup>2</sup> стабильно фиксируются до температуры -60°C. Доля вязкой составляющей проката при испытании продольных образцов также находится на стабильном и предельно высоком уровне 100%.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна**

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, которые содержатся в диссертации, подтверждается согласованностью полученных теоретических результатов с результатами исследований отечественных и зарубежных авторов, а также внутренней непротиворечивостью результатов и логической целостностью работы, использованием значительного объема эмпирического материала. Достоверность полученных результатов подтверждена комплексными исследованиями с применением современного сертифицированного оборудования и их воспроизводимостью. Основные результаты диссертационной работы представлены в 14 печатных работах, из них 9 рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, в том числе 6 публикаций Scopus. Представленные в диссертации научные результаты доложены и рассмотрены на различных российских и международных конференциях.

Положениями, обладающими научной новизной, являются полученные эмпирические данные для математического моделирования литейных и деформационных процессов. Показано, что снижение скорости охлаждения на 0,5 °C/c в линии разливки при повышении толщины сляба с 90 до 105 мм приводит к увеличению расстояния между дендритными осями второго порядка в преимущественном объёме сляба в среднем на 40 мкм. Рассчитано, 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. Определено, что одним из факторов, влияющих на образование структурных областей со слабым сопротивлением распространению трещины в прокате, 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. Рассчитано, что при повышении температуры сляба при входе в туннельную печь с 950 °С до 1005 °С объёмная доля выделившихся в слябе частиц Nb уменьшилась на осях дендритов с 0,000350 до 0,000300, а в межосном промежутке с 0,000183 до 0,000137. Экспериментально установлена количественная связь между степенью деформации и относительным изменением расстояния между дендритными осями первого порядка.

Техническая новизна заключается в разработке и внедрении новой технологии непрерывной разливки сляба толщиной 105 мм и прокатки стали марки 05ХГБ класса прочности К52, что обеспечило увеличение производительности в среднем на 4,0 % за счет увеличения объёма стали.

Автор достаточно обосновывает выводы своего исследования. Научные положения, выводы и рекомендации соответствуют целям и задачам диссертационного исследования.

Сказанное выше характеризует рецензируемую диссертационную работу с положительной стороны, вместе с тем необходимо сделать следующие замечания:

1. На с.71 диссертации на рис. 3.4. приведено сравнение зависимостей межосных расстояний второго порядка от расстояния от охлаждающей поверхности. Такая форма представления данных в абсолютных величинах неправильна, вернее было бы анализировать эти величины в приведенных значениях толщины сляба.
2. Рис. 3.11 называется "градиент концентраций...". Градиент должен, в данном случае иметь размерность %/мкм, здесь показано распределение концентрации по сечению дендритной ячейки.

3. При описании методики моделирования сегрегаций недостаточно полно описано информационное обеспечение моделирования - какая форма закона Фика была использована, как ставилась задача, какие использованы коэффициенты диффузии и их температурные зависимости, и т.д.
4. Из описания методики непонятно - при получении слябов 90 и 105 мм использовали разные кристаллизаторы, или все таки разные обжатия в ЗВО? Если второе, то говорить о разных скоростях охлаждения из-за изменения сечения неправильно, так как на момент обжатия не менее 90% сляба полностью должно затвердеть.
5. Автор рассчитывает скорости охлаждения, используя измеренные значения межосных промежутков. Но расчет проводит, используя эмпирическое уравнение, полученное для стали, разлитой по совершенно другой технологии.
6. Автор провел измерения протяженных бейнитных областей методом EBSD. Какова статистическая ценность этих ограниченных измерений?

### **Заключение**

На основании изложенного выше считаю, что диссертационная работа Ворожевой Евгении Львовны «Обеспечение микроструктуры и стабильных механических свойств стального проката при повышении толщины заготовки в условиях литейно-прокатного комплекса» удовлетворяет критериям, предъявляемым к кандидатским работам. В целом диссертация является законченной научно-квалификационной работой, которая обладает научной новизной и практической значимостью и содержит решение научной задачи, имеющей значение для развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов.

Указанные замечания не снижают ценности результатов исследования, которые имеют практическое внедрение. Работа соответствует паспорту научной специальности, отвечает требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утверждённым Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября

2013г., а её автор - Ворожева Евгения Львовна заслуживает присуждение учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Руководитель экспертного направления  
дирекции по исследованиям и  
разработке новых продуктов группы  
«Новолипецкий металлургический комбинат»,  
кандидат технических наук



Дмитрий Александрович Рингинен

Дата 20.11.2023

119017 г.Москва, ул. Большая Ордынка, 40 с.3

**Email:** [ringinen\\_da@nlmk.com](mailto:ringinen_da@nlmk.com)

Подпись Д.А. Рингинена заверяю:

И.о. директора дирекции по исследованиям  
и разработке новых продуктов



А.В. Митрофанов