

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной и  
инновационной работе

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,  
доктор технических наук, профессор

 Тулупов О.Н.

«23» ноября 2023 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертацию Ворожевой Евгении Львовны

«ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СТАБИЛЬНЫХ  
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЬНОГО ПРОКАТА ПРИ  
ПОВЫШЕНИИ ТОЛЩИНЫ ЗАГОТОВКИ В УСЛОВИЯХ  
ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНОГО КОМПЛЕКСА»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов  
и сплавов

### Актуальность работы

Диссертационная работа Ворожевой Евгении Львовны посвящена решению актуальной научно-технической задачи направленной на обеспечение стабильного комплекса механических свойств стального проката при изменении толщины заготовки (сляба) в условиях непрерывной разливки и прокатки трубных сталей.

Актуальность решаемой в диссертации задачи обусловлена тем, что в настоящее время горячекатаная сталь относится к одному из наиболее востребованных видов продукции черной металлургии. Производство горячекатаного проката по технологии литейно-прокатного комплекса (ЛПК)

является современным направлением в металлургии, и конечные свойства проката зависят от микроструктуры, на формирование которой оказывают влияние процессы рекристаллизации аустенитных зерен и выделения дисперсных частиц микролегирующих элементов в ходе контролируемой прокатки. В процессе ЛПК производство проката с достижением высоких потребительских 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 непрерывнолитой заготовки является основным показателем получаемой микроструктуры и свойств проката.

Решению проблемы обеспечения механических свойств с учётом структурообразования посвящены многие работы известных ученых, однако, несмотря на их успехи в области теории и технологии производства горячекатаного проката, в настоящее время многие вопросы, связанные с технологиями разлива и прокатки, в частности, степень влияния исходного состояния непрерывнолитых заготовок на процесс структурообразования при горячей деформации, структурные изменения при повышении толщины сляба в условиях непрерывной разлива, совмещённой с прокаткой, а также нестабильность механических свойств в готовом прокате трубных сталей при практической реализации технологии производства слябов повышенной толщины, остаются не до конца изученными.

Поэтому исследования, проведенные Ворожевой Е.Л., направленные на изучение структурных изменений при реализации технологии производства сляба повышенной толщины в условиях непрерывной разлива, совмещённой с прокаткой, и разработку металлургических решений для формирования стабильных вязкостных и прочностных механических свойств в прокате является актуальной задачей.

## **Объем и структура диссертации**

Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, список литературы и приложение. Объем работы составляет 152 страницы машинописного текста, в том числе 73 рисунка, 15 таблиц, 1 приложение. Объем библиографии составляет 127 наименований.

В диссертационной работе Ворожевой Е.Л. выполнен комплекс экспериментальных и теоретических исследований, направленных на изучение структуры непрерывнолитых заготовок и эволюцию ее в процессе прокатки, а также разработан металловедческий подход при производстве проката. В работе четко поставлена цель: обеспечение стабильного комплекса механических характеристик стального проката при изменении толщины сляба с 90 до 105 мм в условиях непрерывной разливки и прокатки трубных сталей. Для достижения поставленной цели, автором последовательно решаются следующие задачи:

1. Выполнить информационно-аналитический обзор и проанализировать основные металловедческие 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 металловедческие решения для формирования микроструктуры и обеспечения заданных свойств в прокате класса прочности K52 при изменении толщины сляба с 90 до 105мм, оценить экономический эффект.

**Основные результаты, полученные автором и определяющие  
научную новизну 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°/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° до 1005° 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.

Научные положения, выводы и рекомендации достаточно обоснованы и аргументированы. Достоверность их обеспечивается корректностью поставленных задач, применением современных методик, программных продуктов, сертифицированного оборудования, а также достаточным количеством экспериментальных данных для статистической обработки и сопоставления их с полученными теоретическими результатами.

*Практическая ценность* работы не вызывает сомнений. Результаты исследований, проведенные в диссертационной работе Ворожевой Е.Л., внедрены в производство для обеспечения стабильных механических характеристик проката. Полученная технология производства слябов повышенной (105 мм) толщины в условиях Литейно-прокатного комплекса АО «ВМЗ» позволяет обеспечить микроструктуру и механические свойства горячекатаного проката трубных сталей из слябов повышенной толщины, а именно в горячекатаном прокате из низкоуглеродистой микролегированной Nb стали толщиной 7-8 мм показатели ударной вязкости более 250 Дж/см<sup>2</sup> стабильно фиксируются до температуры -60°С. Доля вязкой составляющей проката при испытании продольных образцов также находится на стабильном и предельно высоком уровне 100%. Внедрение разработанной технологии непрерывной разливки и прокатки сляба увеличенной толщины обеспечили повышение производительности в среднем на 4,0% за счет увеличения объёма выпускаемого проката из стали марки 05ХГБ класса прочности К52. Экономический эффект составляет более 75 млн. руб.

Результаты исследований внедрены не только на ЛПК ВМЗ, но и используются в образовательном процессе ВФ НИТУ «МИСиС», что на сегодняшний день немаловажно при подготовке квалифицированных бакалавров и магистров по направлению «Металлургия».

Основные положения работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах, в том числе международных, по результатам которых опубликовано 14 печатных работ в научно – технических изданиях, 9 из которых в журналах, входящих в перечень рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК, 6 статей в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах Scopus, а также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023661645 РФ.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Разработки соискателя могут быть использованы на различных металлургических предприятиях, (в частности, на АО «Выксунский металлургический завод»), имеющих литейно-прокатные комплексы.

#### **Замечания по диссертационной работе**

По содержанию работы имеются следующие замечания:

1. В работе на стр.51 заявлено, что горячекатаный прокат класса прочности К52 относится к низкоуглеродистым сталям для изготовления сварных нефте- и газопроводов, пригодных к эксплуатации при низких температурах. На стр.130 приведены результаты испытаний образцов от проката на ударный изгиб при пониженных температурах, следует отметить, что отсутствуют не менее важные результаты коррозионных испытаний.

2. Согласно концепции контролируемой прокатки, черновую прокатку следует заканчивать выше температуры полной рекристаллизации аустенита. В работе на стр.92 приводятся размеры средневзвешенного диаметра рекристаллизованного зерна аустенита в промышленных раскатах и

сообщается, что в участках, занятых вытянутыми дендритными остовами присутствуют зёрна крупнее 100 мкм. Для установления закономерности структурообразования требуется привести диапазоны размеров зёрен для двух областей дендритной структуры.

3. В 5 главе говорится о крупных частицах карбидов ниобия по месту бейнитных областей с повышенным содержанием малоугловых границ (МУГ) в микроструктуре горячекатанного проката. Какова взаимосвязь крупных карбидов ниобия с МУГ? Не представлены данные по разбросу размеров карбидов ниобия в прокате. Не раскрыт механизм образования крупных карбидов ниобия более 200 нм, температурный интервал выделения которых обозначен «при затвердевании и охлаждении» (стр. 125).

4. Непонятно, почему грубый аустенит не прошёл рекристаллизацию (стр. 122).

5. В разделе 5.1 в тексте на стр. 117-118 затруднительно воспринимаются рассчитанные объёмные доли выделений при охлаждении. Значительно наглядней объёмные доли, выделенные до поступления сляба в туннельную печь, выделить на графике рис.5.8

6. В работе установлены температуры завершения деформации проката стали марки 05ХГБ и скорость охлаждения после завершения деформации на стр.128-129, однако отсутствует фотография вида микроструктуры, обеспечивающей высокие механические свойства

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертационная работа Ворожевой Евгении Львовны «Обеспечение микроструктуры и стабильных механических свойств стального проката при повышении толщины заготовки в условиях литейно-прокатного комплекса», представляет собой научную квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение эффективности работы Литейно-прокатных комплексов, а именно повышение производительности за счет применения

новой технологии непрерывной разливки сляба толщиной 105 мм и последующей прокатки, имеющие существенное значение для развития страны.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и существенно не снижают ее ценности.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», а её автор, Ворожева Евгения Львовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Отзыв рассмотрен, обсужден и одобрен на заседании кафедры литейных процессов и материаловедения ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» «23» ноября 2023 г., протокол № 3.

Заведующий кафедрой  
литейных процессов и  
материаловедения,  
кандидат технических  
наук,  
доцент

 Николай Александрович Феокистов

Адрес: 455000, Челябинская область, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38; тел.: 8(3519)298402 ; e-mail: mgtu@magtu.ru;

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»)

