

На правах рукописи



Кожевникова Елена Васильевна

ИЗУЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО
СОСТАВА ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА
ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ

Специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск - 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Завалицин Александр Николаевич

Официальные оппоненты: **Крылова Светлана Евгеньевна**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет», профессор кафедры материаловедения и технологии материалов

Перцев Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, акционерное общество «Пермский научно-исследовательский технологический институт», заместитель главного металлурга

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится «25» мая 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.111.05 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, проспект Ленина, 38, МГТУ, малый актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <http://www.magtu.ru/>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Полякова Марина Андреевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На протяжении последних десятилетий в России активно реализуются проекты по освоению нефтегазовых месторождений и строительству крупных магистралей для транспортировки углеводородов. Сложные эксплуатационные условия работы газонефтепроводов обуславливают растущие требования к трубной стали, включающие высокую прочность, вязкость, пластичность, хладостойкость и свариваемость.

Современная концепция получения таких потребительских свойств предполагает комплексный подход при производстве трубного металла, который включает: на этапе выплавки - снижение содержания углерода, легирование карбонитридообразующими элементами - ниобием, ванадием, титаном, обеспечение однородности непрерывнолитого сляба, контроль величины ликвации. А на этапе прокатки - применение схем контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением, обеспечивающих измельчение аустенитного зерна и последующее формирование дисперсной структуры. При этом в зависимости от требуемого уровня прочности стали необходимо получить ферритно-перлитную, ферритно-бейнитную либо бейнитную структуры. В некоторых случаях для получения высокой вязкости и коррозионной стойкости металла при производстве трубных сталей со специальными свойствами может применяться термическая обработка в виде отпуска как дополнительная технологическая операция.

Связь литой и горячекатаной структур и влияние сегрегации на конечные механические характеристики толстолистового трубного проката являются важными факторами получения потребительских свойств. Осевая химическая неоднородность в слябе приводит к снижению ударной вязкости и пластичности в осевой зоне толстолистового проката, а также способствует появлению трещин и внутренних расслоений. Одним из эффективных методов снижения ликвации в слябе является использование технологии мягкого обжатия при разливке стали.

В Российской Федерации контроль макроструктуры непрерывнолитых слябов трубных сталей производится по ГОСТ Р 58228-2018 «Заготовка стальная непрерывнолитая. Методы контроля и оценки макроструктуры» путем ее визуального сравнения с предложенной схематично изображенной шкалой баллов. Однако, учитывая значительное влияние осевой химической неоднородности на микроструктуру и свойства толстолистового трубного проката, качественные методы оценки необходимо заменять на количественные, используя современные методы компьютерного анализа структуры.

Целью работы является анализ и идентификация структур, уровня химической и структурной неоднородностей непрерывнолитого сляба и толстолистого проката для обеспечения требуемого комплекса потребительских свойств низколегированных сталей категорий прочности К60 и К65 в зависимости от технологии производства.

Задачи исследования:

1. Изучить особенности формирования структурно-фазового состава и выделения карбидов и нитридов в различных зонах кристаллизации непрерывнолитого сляба для производства толстолистого проката из низколегированных сталей категорий прочности К60 и К65; исследовать химическую и структурную неоднородности осевой зоны непрерывнолитого сляба.

2. Исследовать и идентифицировать структуру и свойства готового толстолистого проката категорий прочности К60 и К65 как результат трансформации структуры и химической неоднородности непрерывнолитого сляба.

3. Разработать методику определения величины осевой химической неоднородности в непрерывнолитых слябах сталей категорий прочности К60 и К65 и способ оценки структурной неоднородности толстолистого проката из низколегированной стали категории прочности К60.

4. Изучить влияние технологии мягкого обжатия на структуру и осевую химическую неоднородность непрерывнолитого сляба и структурную неоднородность толстолистого проката из низколегированных сталей категорий прочности К60 и К65.

5. Уточнить влияние режимов термообработки на структуру и твердость толстолистого проката категорий прочности К60 и К65 с учетом конкретных особенностей химических композиций и условий производства.

Научная новизна:

1. Впервые выполнено комплексное исследование трансформации структурно-фазового состава толстолистого проката категорий прочности К60 и К65 из низколегированных сталей для магистральных трубопроводов на каждом этапе технологического процесса его производства. Исследованы и идентифицированы типы структур, описаны и проиллюстрированы ферритно-бейнитные структуры с карбидными и нитридными выделениями в различных зонах непрерывнолитых слябов, ферритно-перлитная и ферритно-бейнитная структуры горячекатаного проката. Установлено влияние ликвации на формирование ферритно-мартенситной и ферритно-бейнитной полосчатости толстых листов категорий прочности К60 и К65.

2. Установлен факт наследования готовым прокатом как отдельных карбидов, так и карбидов, выделившихся на сульфидах в осевой

зоне непрерывнолитого сляба, что приводит к увеличению количества крупных карбидных выделений в центральной области листа, но с уменьшением их размера от 70 мкм в слябе до 20 мкм в прокате.

3. Показано, что образование перлитной полосчатости в стали категории прочности К60 связано с перемещением плоского температурного фронта при охлаждении проката и $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения после снижения температуры ниже критической, в результате которого аустенит превращается в феррит с диффузией углерода в слой не превратившегося аустенита перед фронтом, стабилизируя его, с последующим перлитным превращением. Это дает основание исключить влияние междендритной ликвации на образовании перлитной полосчатости.

4. Определено, что в толстолистовом прокате категории прочности К65 твердость бейнитной структуры ниже (HV 187-195), чем твердость структуры мелкозернистой ферритной основы (HV 203-258), состоящей в совокупности из квазиполигонального феррита, границ и пограничных выделений. Поэтому дальнейшее повышение прочности целесообразно проводить измельчением структуры.

5. Определена величина прокаливаемости низколегированных трубных сталей категорий прочности К60 и К65, которая не превышает 8-9 мм.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Подтверждена целесообразность применения технологии мягкого обжатия непрерывнолитого сляба как способа повышения равномерности химического состава по его толщине, а также снижения осевой химической неоднородности и осевой рыхлости сляба, что способствует повышению вязкости толстолистового проката категорий прочности К60 и К65 из низколегированных марок сталей за счет снижения структурной и химической неоднородностей в готовом прокате.

2. Разработана компьютерная методика количественного определения величины осевой химической неоднородности в темплете непрерывнолитого сляба, используемого в производстве толстолистового проката категорий прочности К60 и К65.

3. Впервые разработана и применена в производстве толстолистового проката категории прочности К60 методика оценки структурной неоднородности по эталонной шкале, позволяющая охарактеризовать наличие, вид и степень неоднородности с пятиступенчатой градацией микроструктуры.

4. Уточнены критические точки фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, а также определены величина прокаливаемости, температуры закалки и отпуска низколегированных сталей с химическими композициями, которые применяются в условиях ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» при производстве толстолистового проката категорий

прочности К60 и К65 для магистральных трубопроводов.

5. Установлено, что для горячекатаного трубного проката категорий прочности К60 и К65 из марок сталей с химическими композициями, производимыми в ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», закалка с отпуском эффективна при толщине листов не более 20 мм.

Положения, выносимые на защиту:

1. Особенности формирования структур в зонах кристаллизации непрерывнолитых слябов из низколегированных сталей категорий прочности К60 и К65.

2. Результаты идентификации структур, образующихся в толстолистовом прокате из низколегированных сталей категорий прочности К60 и К65 для производства трубного проката.

3. Методика определения величины осевой химической неоднородности в непрерывнолитых слябах низколегированных сталей для толстолистого проката категорий прочности К60 и К65.

4. Эталонная шкала для оценки структурной неоднородности при контроле качества толстолистого проката категории прочности К60 для труб магистральных трубопроводов.

5. Результаты влияния технологии мягкого обжатия на химическую и структурную неоднородности осевой зоны непрерывнолитого сляба и толстолистого проката категорий прочности К60 и К65.

6. Влияние температуры нагрева под закалку и температуры отпуска на структуру и твердость толстолистого проката категорий прочности К60 и К65 из низколегированных сталей с химическими композициями, применяемыми в условиях ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Степень достоверности полученных результатов проведенных научных исследований обуславливается корректной постановкой цели и задач исследования, основанных на анализе требований к низколегированным трубным сталям категорий прочности К60 и К65, технологии их производства и изучении структурного и фазового состава указанных сталей с использованием современного исследовательского оборудования, а также публикациями в журналах различного научного уровня.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на следующих конференциях: XIX, XXI Уральская школа металлургов - термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», (г. Екатеринбург, 2008 г., г. Магнитогорск, 2012 г.), международная школа-семинар «Фазовые и структурные превращения в сталях» (г. Магнитогорск, 2008, 2010 гг.), VIII Конгресс прокатчиков (г. Магнитогорск, 2010 г.), XIX международная научно-техническая конференция «Трубы-2011» (г. Челябинск, 2011 г.), 71, 72, 77 Международные научно-

технические конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2013, 2014, 2019 гг.), XIII Международная конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.), Научно-технический семинар «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов» (г. Москва, 2014, 2016 гг.).

Публикации. По теме диссертации имеется 22 научные публикации, в т.ч. 7 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 3 статьи проиндексированы в наукометрической базе Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 154 страницах текста (без приложений), состоит из 5 глав, содержит 109 рисунков, 16 таблиц, 3 приложения на 14 страницах. Библиографический список включает 152 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи, решаемые в работе, научная и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен аналитический обзор отечественных и зарубежных источников по теме диссертации. Основываясь на изучении трудов Матросова Ю.И., Эфрона Л.И., Морозова Ю.Д., Настича С.Ю., Шабалова И.П., Смирнова М.А., Пышминцева И.Ю., Хлусовой Е.И., Счастливцева В.М., Казакова А.А. и других ученых, отмечено, что для формирования требуемых потребительских свойств толстолистового трубного проката необходим комплексный подход при его производстве. Обоснована необходимость изучения влияния осевой химической неоднородности (ОХН) на структуру и конечные механические свойства толстолистового трубного проката. Описана технология мягкого обжата, показан недостаток сведений о ее влиянии на структурные изменения в готовом трубном толстолистовом прокате. Проведен анализ существующих методов оценки структурной неоднородности непрерывнолитого сляба и толстолистового трубного проката. Показано, что для контроля ОХН в непрерывнолитом слябе трубных сталей недостаточно применения существующих методов оценки ОХН. Также отсутствуют сведения об оценке структурной неоднородности в толстолистовом трубном прокате, формирующейся в результате химической неоднородности, наследуемой от сляба. Изучены данные о влиянии термической обработки на структуру и свойства трубных сталей.

Во второй главе представлены характеристика материалов и методики проведения экспериментов. В исследовании использовали низкоуглеродистые низколегированные стали категорий прочности К60 и К65,

предназначенные для производства толстолистового трубного проката в условиях ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»).

Для изучения литой макро- и микроструктуры сталей категорий прочности К60 и К65 и влияния технологии мягкого обжатия на ОХН в непрерывнолитых слябах отбирали темплеты в соответствии с ГОСТ Р 58228-2018. Исследования трансформации структуры непрерывнолитых слябов и химической неоднородности в структуру готового проката из сталей категорий прочности К60 и К65 проводили на образцах, отобранных из горячекатаных листов толщиной от 17 до 30 мм, прокатанных на стане 5000 ПАО «ММК» по технологии контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением. Изучение влияния технологии мягкого обжатия на микроструктуру и свойства горячекатаного проката, полученного из слябов, разлитых с применением технологии мягкого обжатия и без использования технологии, проводили на листах толщиной 25,8 мм (К60) и 27,7 мм (К65). Пробы отбирали из середины и от концов готового проката.

Металлографические исследования проводили методами оптической и электронной (просвечивающей и растровой) микроскопии, используя оборудование: световые микроскопы Zeiss Axio Observer, Neophot-2, Leica DM IRM 1, электронные микроскопы и рентгеноспектральный анализ JEOL JSM-6490 LV с приставкой Oxford Instruments X-Max 50 и системой энергодисперсионного спектрального анализа INCA Energy 450, волновой спектрометр Tescan Vega II, EDX Oxford INCA, просвечивающий электронный микроскоп JEM-200CX.

Выявление фазового состава карбидов в горячекатаном прокате категорий прочности К60 и К65 проводили путем растворения металла электролитическим методом. Дальнейшее исследование полученного анодного осадка проводили на рентгеновских дифрактометрах «Дрон-1УМ», D8 ADVANCE.

Для *исследования микроструктуры сталей категорий прочности К60 и К65 после термообработки* образцы трубных сталей отбирали от горячекатаного проката толщиной 21,7 мм (К60) и 27,7 мм (К65). Структуру сталей изучали в поперечном сечении листа. Далее нагрев образцов под закалку проводили в лабораторной печи при температурах 800 - 1100 °С с интервалом 50 °С и охлаждением в воде. Отпуск предварительно закаленных образцов от 900 °С (для К60) и 930 °С (для К65) проводили в лабораторной печи по режиму: нагрев до температур 300 - 700 °С с интервалом 50 °С, выдержкой 45 минут и охлаждением на воздухе.

В третьей главе показано, что после кристаллизации в непрерывнолитом слябе низколегированных трубных сталей категорий прочности К60 и К65 формируются три зоны: корковая зона на поверхности шириной до 25 мм, зона с вытянутыми столбчатыми кристаллами, осевая зона рав-

ноосных кристаллов. Структура поверхности в корковой зоне стали категории прочности К60 состоит из мелких зерен полиэдрического и игольчатого ферритов, а несколько глубже - из равноосных зерен феррита, образовавшегося по границам бывших мелких аустенитных зерен с игольчатыми структурами внутри этих зерен. Далее в зоне столбчатых кристаллов наблюдаются крупные бывшие аустенитные зерна, вытянутые параллельно теплоотводу и имеющие различные структурные составляющие: пограничный феррит, а внутри бывшего аустенитного зерна - видманштеттов феррит, игольчатый феррит, гранулярный бейнит (бейнитный феррит), пластинчатый перлит, мартенситно-аустенитная (М/А) структурная составляющая. Твердость по Виккерсу с нагрузкой 5 кг по сечению от поверхности к центру для стали категории прочности К60 находится в пределах HV 195 - 230 МПа в зависимости от вида структурной составляющей.

Структура непрерывнолитого сляба стали категории прочности К65 имеет строение аналогичное К60. Однако, в связи с повышенным количеством легирующих элементов (Nb) по сравнению со сталью К60 слой пограничного феррита более тонкий, а внутри бывших аустенитных зерен наблюдается игольчатый и пакетный бейнит, а также повышенное количество гранулярного бейнита по сравнению со сталью К60. Для стали категории прочности К65 твердость по Виккерсу находится в пределах HV 220 - 250 МПа в зависимости от вида структурной составляющей.

В осевой части слябов трубных сталей категорий прочности К60 и К65 присутствует развитая центральная сегрегация, которая влечет за собой появление внутренних дефектов – осевой рыхлости (ОР) и ОХН, имеющих вид темных пятен, объединенных в цепочки либо расположенных на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга. Технология мягкого обжата непрерывнолитого сляба трубных сталей категорий прочности К60 и К65 позволяет получить сляб с низким уровнем центральной сегрегации и обеспечивает требуемые свойства горячего проката. Без мягкого обжата в слябах возникает существенная сегрегация по осевой линии с максимальным баллом по ОХН и ОР, а также наблюдается структурная неоднородность в виде «белой» полосы, состоящей из полиэдрического феррита с небольшими участками бейнита и повышенным содержанием крупных карбидов и нитридов размером до 70 мкм.

Мелкие частицы карбидов и нитридов типа NbTi (C,N) длиной до 6,5 мкм и толщиной до 1 мкм выделяются по границам бывших аустенитных зерен. В осевой части слябов сталей категорий прочности К60 и К65 расположены скопления отдельных крупных кубических и вытянутых карбидов и нитридов на основе ниобия и титана длиной до 70 мкм и толщиной до 10 мкм. Наблюдается примыкание этих частиц к сульфидам и окисульфидам, что свидетельствует об их зарождении на поверхности

ранее образовавшихся сульфидов (оксисульфидов) как на подложках. По результатам рентгеноструктурного анализа карбидного осадка карбидные и нитридные фазы представлены соединениями: Nb_2C , NbN , $NbCrN$, TiC , TiN , Mo_2C , V_2C , Nb_2N , NbC , VC , V_2N , $TiVC$, Cr_3C_2 .

В диссертационной работе для трубных сталей категорий прочности К60 и К65, используя многочисленные результаты контроля макроструктуры темплетов непрерывнолитых слябов, проводимые в макротемплетной лаборатории ПАО «ММК», разработана методика контроля ОХН, в которой балл химической неоднородности может определяться упрощенным методом путем сравнения контролируемой макроструктуры с предложенной оцифрованной шкалой ОХН с реальным изображением точек ОХН. В шкале все виды макроструктуры сгруппированы от 1 до 5 балла. Для каждого балла сопоставлены несколько изображений структур, несущественно отличающихся друг от друга. Например, балл 1 соответствует макроструктуре, на которой визуальна ОХН не наблюдается, балл 5 - крупным цепочкам темных пятен, переходящих в сплошные полосы. Пример визуальной шкалы ОХН представлен на рисунке 1.

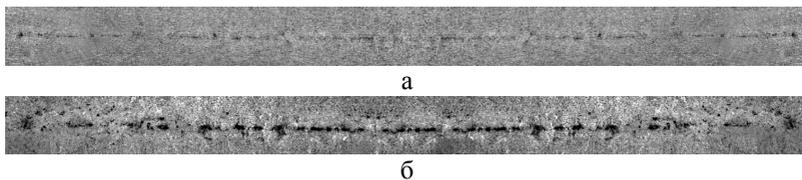


Рисунок 1 – Пример визуальной шкалы осевой химической неоднородности: 2 балл – пониженная степень ОХН (а), 5 балл – высокая степень ОХН (б)

Таблица 1 – Величина химической неоднородности в относительных долях

Балл химической неоднородности	Обозначение	Поверхностная доля неоднородности
Балл 1	A-0	0-0,5
-----	-----	-----
Балл 5	A-IV	> 3,5

Количественная оценка ОХН проводится с использованием компьютерной программы анализа изображения «Thixomet PRO», с помощью которой каждый балл шкалы оцифрован, т.е. каждому баллу ОХН сопоставляется интервал значений, которым соответствует доля площади, зани-

маемая темными пятнами, относительно площади соответствующей толщине темплета 20 мм на рисунке 1 (таблица 1). Реальный темплет фотографируется цифровой фотокамерой, изображение обрабатывается на компьютере по указанной программе. Методика разработана в рамках НИОКТР (номер государственного учета НИОКТР: АААА-А17-117011210076-5) и принята к рассмотрению и использованию в ПАО «ММК».

В четвертой главе представлены результаты исследования микроструктуры толстолистового проката категорий прочности К60 и К65 толщиной 17-30 мм, рассмотрено влияние технологии мягкого обжатия слябов на структуру и свойства горячекатаного трубного проката категорий прочности К60 и К65, разработана методика оценки (контроля) осевой структурной неоднородности в прокате из стали категории прочности К60.

В толстолистовом прокате стали категории прочности К60 формируется ферритно-перлитная структура: феррит представлен полигональными и квазиполигональными зёрнами 20-30 мкм вытянутыми в направлении прокатки; перлитные зёрна (HV 285 - 318 МПа) формируют полосчатость, которая усиливается ближе к центру, а в центре листа образуется полосчатость со смешанной мартенситно - ферритной структурой с твердостью HV 356 - 429 МПа (рисунок 2, а).

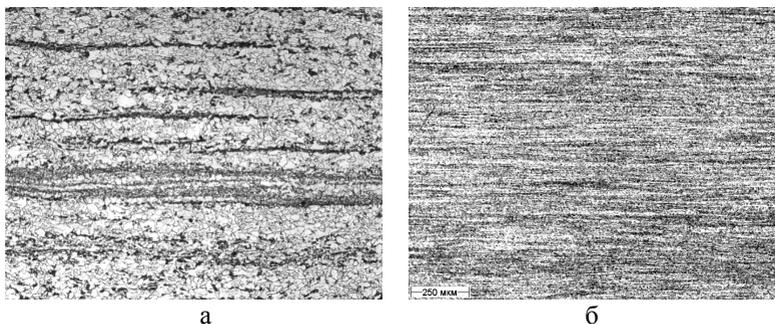


Рисунок 2 – Микроструктура осевой зоны горячекатанного листа: перлитная и мартенситная полосчатость в стали К60, $\times 200$ (а); ферритно - бейнитная полосчатость в стали К65, $\times 50$ (б)

Микроструктура горячекатаного листа стали категории прочности К65 состоит из полигонального феррита размером до 6 мкм на поверхности, и далее в глубину наблюдается смесь полигонального и квазиполигонального ферритов с зёрнами размером 15-25 мкм и твердостью ферритной матрицы HV 203 - 258 МПа, а также реэчный бейнит, имеющий твер-

дость HV 187 - 195 МПа, расположенный в виде полос (рисунок 2, б). В осевой части листа наследование сегрегации от непрерывнолитого сляба повышает устойчивость аустенита к распаду и способствует формированию участков мартенсита и бейнита. Наличие такой структурной неоднородности, имеющей повышенную твердость и низкую пластичность, приводит к расслоению при испытаниях падающим грузом (ИПГ).

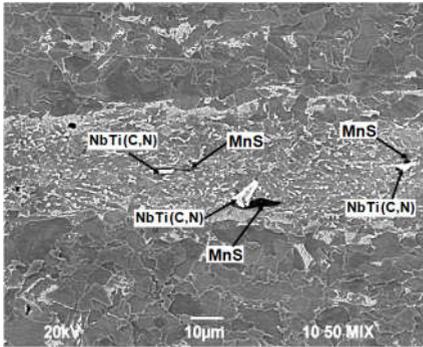


Рисунок 3 – Участок микроструктуры толстолистного проката К60 с включениями NbTi(C,N)

проката показало, что применение мягкого обжатия при производстве непрерывнолитого сляба снижает структурную неоднородность осевой зоны горячекатаного проката и повышает количество вязкой структурной составляющей в изломе при испытании ИПГ.

Для низколегированной трубной стали категории прочности К60 разработана методика оценки осевой структурной неоднородности с пятибалльной градацией структуры по шкале, состоящей из изображений реальных микроструктур с целью контроля качества горячекатаного проката. Химическая неоднородность, ответственная за образование ферритно-мартенситных/бейнитных полос в осевой части раската, наследованная от осевой ликвации сляба, проявляется в виде двух типов осевой структурной неоднородности (ОСН). К первому типу относится структурная неоднородность, которую предложено называть в данной методике «рассеянной» (C_1), состоящей из множества темных полос на светлом фоне остальной ферритной структуры в области осевой зоны раската и занимающей около половины поля зрения микроскопа при увеличении 100. Ко второму типу отнесена ОСН, которая названа «сосредоточенной» (C_2), состоящая из нескольких до 3-5 темных полос на светлом фоне остальной структуры по оси раската при увеличении 100. Оба типа ОСН состоят из смешанных

Повышенное содержание карбидных и нитридных частиц в осевой зоне сляба наследуется горячекатаным прокатом. В связи с этим в центральной части горячекатаных листов из сталей категорий прочности К60 и К65 наблюдается увеличение количества крупных (до 20 мкм) карбидов ниобия и титана различной формы, расположенных в ферритно - мартенситно / бейнитных полосах. Часто встречается их примыкание к сульфидам, наследуемое от сляба (рисунок 3).

Исследование влияния технологии мягкого обжатия на структуру и свойства толстолистного

зерен феррита и мартенсита (бейнита). В таблице 2 по каждой шкале назначается класс ОСН – от 0 до IV. Каждому классу в соответствие приводится одна или две близкие микроструктуры, сравнение с которыми определяет класс химической неоднородности проката как одну из его качественных характеристик. Методика разработана в рамках НИОКТР (номер государственного учета НИОКТР: АААА-А17-117011210076-5) и принята к использованию в ПАО «ММК».

Таблица 2 – Характеристика эталонной шкалы оценки осевой структурной неоднородности в толстолистовом прокате трубных сталей

Шкала	Обозначение	Степень ОСН	Описание
C ₁	C ₁ -0.	Отсутствие	ОСН визуально не наблюдается
	-----	-----	-----
	C ₁ -IV	Высокая	Длинные, прерывистые, часто расположенные полосы в осевой зоне проката
C ₂	C ₂ -0.	Отсутствие	ОСН визуально не наблюдается
	-----	-----	-----
	C ₂ -IV	Высокая	3-5 параллельно расположенных сплошных полос в осевой зоне проката

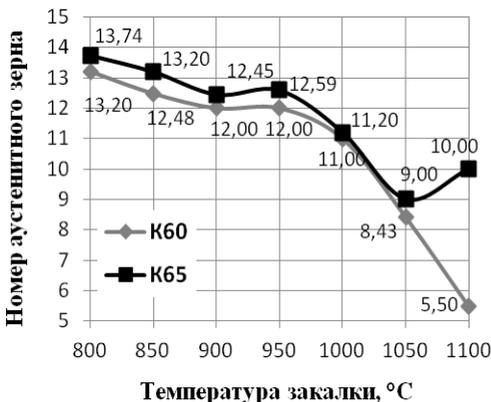


Рисунок 4 – Зависимость номера аустенитного зерна от температуры нагрева под закалку для сталей категорий прочности К60 и К65

В пятой главе показано влияние температур закалки и отпуска на микроструктуру и твердость низколегированных трубных сталей категорий прочности К60 и К65.

Зависимость номера аустенитного зерна от температуры нагрева под закалку для сталей категорий прочности К60 и К65 представлена на рисунке 4.

Корреляция между изменением твердости и количеством остаточного аустенита при различных температурах закалки

определяется растворением карбонитридов на основе ниобия, приводящее к стабилизации аустенита и снижению твердости и выделению карбидов титана при температурах более 1050 °С, вызывающее снижение количества остаточного аустенита и дисперсионное твердение (рисунки 5 и 6).

Максимальные значения твердости HRC 34 и 35 для сталей категорий прочности K60 и K65, соответственно, наблюдаются при температуре закалки 900 °С. При этом стали обладают невысокой прокаливаемостью с мартенситной структурой на глубине до 4 мм и мартенситно-бейнитной структурой до 8 - 9 мм в глубину.

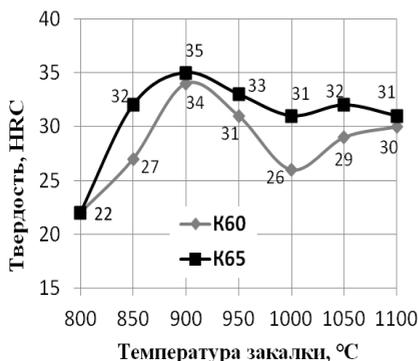


Рисунок 5 – Зависимость твердости от температуры нагрева под закалку для K60 и K65

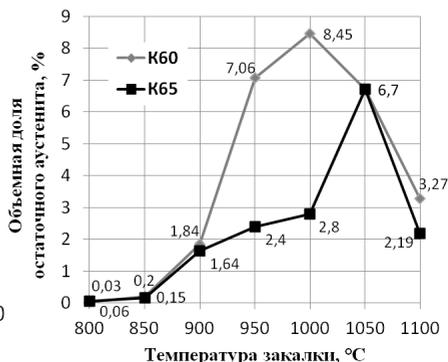


Рисунок 6 – Зависимость доли остаточного аустенита от температуры нагрева под закалку для K60 и K65

Изменение микроструктуры исследуемых сталей категорий прочности K60 и K65 при различных температурах отпуска было сопоставлено с твердостью. С повышением температуры отпуска твердость падает, что обусловлено изменением структурных составляющих – увеличением доли квазипolygonального и polygonального ферритов и уменьшением доли игольчатых структур.

Определено, что для толстолистового проката категорий прочности K60 и K65 для ожидаемого повышения вязкости и пластичности при сохранении достаточной твердости можно использовать закалку от температуры 900 °С (для K60) и 930 °С (для K65) с последующим отпуском при 450 °С. Учитывая низкую прокаливаемость указанных сталей, данную термическую обработку рекомендуется проводить для проката толщиной не более 20 мм.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Макроструктура непрерывнолитого сляба из низколегированных сталей категорий прочности К60 и К65 образована тремя зонами кристаллизации – корковой, столбчатой и равноосных кристаллов с темными ликвационными пятнами в осевой зоне сляба. Конечная микроструктура формируется при охлаждении в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, при котором по границам исходных аустенитных зерен образуется полигональный (полиэдрический) феррит, а внутри – видманштеттов и игольчатый ферриты, гранулярный бейнит (бейнитный феррит), пластинчатый перлит, мартенситно-аустенитная составляющая. Мелкие выделения карбидов и нитридов титана и ниобия наблюдаются по границам зерен, крупные – в основном, в осевой зоне сляба.

2. В толстолистовом горячекатаном прокате стали категории прочности К60 формируется полигональный и квазиполигональный феррит с ферритно-перлитной полосчатостью, усиливающейся к центру. В осевой части проката ферритно-перлитная полосчатость переходит в ферритно-мартенситную. В стали категории прочности К65 увеличивается доля квазиполигонального феррита, и в большом количестве образуется речечный бейнит, расположенный в виде полос. Обогащение осевой зоны проката ликвирующими элементами, унаследованное от непрерывнолитого сляба, формирует осевую структурную неоднородность из ферритно-мартенситных/бейнитных полос с повышенным количеством крупных карбидов ниобия и титана.

3. Технология мягкого обжатия снижает сегрегацию в осевой зоне слябов и, соответственно, в толстолистовом прокате, обеспечивая нормативные свойства при испытании падающим грузом.

4. На основе современных технологий анализа структуры с цифровыми фотокамерами и компьютерной обработкой данных о структуре разработана методика объективного количественного определения величины осевой химической неоднородности в непрерывнолитом слябе низколегированных сталей К60 и К65 по оценочной шкале. Для толстолистового проката из стали категории прочности К60 разработана пятибалльная шкала из эталонных реальных структур для идентификации вида и степени структурной неоднородности, что позволяет оценить возможное поведение проката при испытании падающим грузом.

5. Учитывая низкую прокаливаемость сталей категорий прочности К60 и К65, для ожидаемого повышения вязкости с сохранением прочности при твердости HRC 34-35, рекомендуется термическая обработка проката толщиной до 20 мм в виде закалки от 900 и 930 °С для К60 и К65, соответственно, и отпуск при 450 °С.

Основные публикации по теме диссертационного исследования.

В журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Кожевникова, Е.В. Изменение структуры стали К60 на различных этапах технологии производства / Е.В. Кожевникова, А.Н. Завалищин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2013. – №2(2). – С. 96-101.

2. Изменение структуры низколегированной стали в процессе производства / А.Н. Завалищин, Е.В. Кожевникова, С.В. Денисов, М.И. Румянцев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – №3 (43). – С. 51-54.

3. Кожевникова, Е.В. Анализ структурных изменений низколегированной стали при производстве листового проката из литой заготовки / Е.В. Кожевникова, А.Н. Завалищин // Вопросы материаловедения. – 2015. – №1(81). – С. 12- 19.

4. Кожевникова, Е.В. Влияние технологии непрерывной разливки на структуру низколегированной стали на различных этапах производства / Е.В. Кожевникова, А.Н. Завалищин // Металлург. – 2017. – №12. – С. 13-19.

5. Влияние мягкого обжатия на структуру непрерывнолитого слитка и свойства проката микролегированной стали / А.Н. Завалищин, Е.В. Кожевникова, М.И. Румянцев, Д.Н. Чикишев, М.В. Ефремова // Металлург. – 2019. – № 3. – С. 23-30.

6. Кожевникова, Е.В. Методика оценки макроструктуры непрерывнолитых слябов трубных сталей категории прочности К60 и К65 / Е.В. Кожевникова, А.Н. Завалищин, Д.Н. Чикишев // Сталь. – 2020. – № 1. – С. 8-11.

7. Причины образования полосчатости в сталях категории прочности К60 / А.Н. Завалищин, Е.В. Кожевникова, О.Н. Тулупов, М.И. Румянцев // Черные металлы. – 2020. – № 12. – С. 55-60. (SCOPUS)

Другие публикации:

8. Kozhevnikova, E.V. Effect of continuous casting technology on low-alloy steel structure in different production stages / E.V. Kozhevnikova, A.N. Zavalishchin // Metallurgist. – 2018. – vol. 61. – № 11-12. – P. 1048-1054. (SCOPUS)

9. Influence of "soft" reduction on the structure of continuous cast ingot and the properties of rolled products of microalloyed steels / E.V. Kozhevnikova, A.N. Zavalishchin, M.I. Rumyantsev, D. N. Chikishev, M.V. Efremova // Metallurgist. - 2019. – vol. 63. – № 3 - 4. – P. 238-248. (SCOPUS)

10. Шапкина, Е.В. (Кожевникова Е.В.) Влияние условий охлаждения на структуру и свойства трубных сталей / Е.В. Шапкина (Е.В.

Кожевникова), А.Н. Завалицин // Сборник научных трудов XIX международной научно-технической Уральской школы металлургов – термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», посвященная 100-летию со дня рождения академика В.Д. Садовского. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ. – 2008. – С. 103.

11. Шапкина, Е.В. (Кожевникова Е.В.) Марки сталей и технологии производства подката для производства труб / Е.В. Шапкина (Е.В. Кожевникова), В.Н. Дегтярев // Сборник научных трудов «Фазовые и структурные превращения в сталях». Под ред. В.Н. Урцева. – Магнитогорск. – 2008. – Вып. 5. – С. 542-554.

12. Кожевникова, Е.В. Исследование карбидов в стали К60 для труб магистральных трубопроводов / Е.В. Кожевникова, С.В. Денисов, А.Н. Завалицин // Труды VIII международного конгресса прокатчиков. – Магнитогорск. – 2010. – Т 2. – С. 539-542.

13. Кожевникова, Е.В. Исследование влияния скоростей охлаждения на структуру трубных сталей / С.В. Денисов, А.Н. Завалицин, Е.В. Кожевникова // Сборник научных трудов «Фазовые и структурные превращения в сталях». Под ред. В.Н. Урцева. – Магнитогорск. – 2010. – Вып. 6 – С. 387-392.

14. Кожевникова, Е.В. Структура и свойства сталей К60, К65 для труб магистральных трубопроводов / Е.В. Кожевникова, С.В. Денисов, А.Н. Завалицин // Труды XIX международной научно-технической конференции «ТРУБЫ – 2011». – Челябинск: РосНИТИ. – 2012. – Ч. 2. – С. 101-107.

15. Кожевникова, Е.В. Влияние режимов термообработки на структуру и свойства сталей К60, К65 для труб магистральных трубопроводов / Е.В. Кожевникова, А.Н. Завалицин // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXI Уральской школы металлургов-термистов». – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. – 2012. – С. 207- 208.

16. Кожевникова, Е.В. Исследование карбидов в сталях К60, К65 для труб магистральных трубопроводов / Е.В. Кожевникова, С.В. Денисов, А.Н. Завалицин // Материаловедение и термическая обработка металлов: Межвузовский сборник научных трудов. Под ред. А.Н. Емельюшина. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. – 2012. – С. 31-38.

17. Влияние термообработки на структуру трубной стали / Е.В. Кожевникова, А.Н. Завалицин, Г.Я. Камалова, М.А. Лошкарева // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 71-й межрегиональной научно-технической конференции. Под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. – 2013. – Т. 1. – С. 230 – 233.

18. Кожевникова, Е.В. Анализ структурных изменений низколегированной стали при производстве листового проката из литой заготовки / Е.В. Кожевникова // Тезисы докладов XIII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». - Санкт-Петербург: ЦНИИКМ «Прометей». – 2014. – С. 59.

19. Микроструктура коррозионностойкой стали типа 13ХФА / Е.В. Кожевникова, А.В. Шмаков, В.Н. Дегтярев, Е.Д. Мокшин, В.Н. Урцев // Сборник тезисов научно-технического семинара «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов». – М: НИТУ «МИСиС». – 2014. – С. 105.

20. Влияние температурного режима прокатки на структуру НЛС и механические свойства проката из низкоуглеродистых микролегированных сталей / Е.В. Кожевникова, М.В. Ефремова, И.В. Макаренко, А.Н. Завалицин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 72-й межрегиональной научно-технической конференции. Под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. – 2014. – Т. 1. – С. 165-168.

21. Исследование структуры поверхностных дефектов труб горячей прокатки / Е.В. Кожевникова, В.Н. Урцев, В.Н. Дегтярев, А.В. Шмаков, С.А. Муриков // Сборник тезисов научно-технического семинара «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов». – М: НИТУ «МИСиС». – 2016. – С. 134.

22. Кожевникова, Е.В. Оценка макро- и микроструктуры сталей категории прочности К60 и К65 / Е.В. Кожевникова, Р.К. Биктагиров, А.Н. Завалицин // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: материалы Уральской школы металловедов-термистов. – Магнитогорск: МГТУ им.Г. И. Носова. – 2018. – С. 168-170.