

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(Национальный исследовательский университет)  
Политехнический институт  
Факультет «Заочный»  
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»  
Направление «Металлургия»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

\_\_\_\_\_ 2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ Г.Г. Михайлов  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ ЛИСТОВОГО  
МАТЕРИАЛА

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ - 22.04.02.2019.343 ПЗ ВКР

Руководитель работы,  
к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Н.А.Шабурова  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

Автор работы  
студентка группы ПЗ – 343

\_\_\_\_\_ М.С.Киштыкова  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

Нормоконтролер,  
к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Н.А.Шабурова  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

## АННОТАЦИЯ

Киштыкова М.С. Исследование природы внутренних дефектов листового материала.  
– Челябинск: ЮУрГУ, ПЗ–343, 63 с., 32 ил.,  
10 табл., библиогр. список – 17 наим.

Конечный комплекс свойств трубопрокатной металлопродукции формируется в ходе всей совокупности переделов, важнейшим из которых является сталеплавильный. Особенно это касается непрерывнолитой заготовки, т.к. ликвация литого металла, которая наследуется при последующей прокатке, приводит к образованию неоднородной структуры, и обуславливает снижение механических свойств.

В работе проведено исследование листового материала из стали марки К56, применяемого для изготовления электросварных труб для нефтепроводов. Отбраковка материала была проведена на готовом изделии – как в основном металле труб, так и в околошовной зоне при ультразвуковом контроле были обнаружены расслоения. Цель работы – установить природу наблюдаемых дефектов материала с помощью микроструктурного исследования средствами оптической и электронной микроскопии. Для достижения поставленной цели, были решены следующие задачи:

1. Исследована зона термического влияния вблизи сварного шва;
2. Исследована микроструктура основного металла труб и внутренних неполадок;
3. Проведено исследование химического состава различных структурных составляющих.

					<b>ЮУрГУ - 22.04.02.2019.343 ПЗ</b>			
<b>Изм.</b>	<b>Лист</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>				
Разраб.		Киштыкова М.			<b>Исследование внутренних дефектов листового проката</b>	<b>Лит.</b>	<b>Лист</b>	<b>Листов</b>
Провер.		Шабурова Н.А.					5	63
Н. Контр.		Шабурова Н.А.						
Утверд.								

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....	9
1.1 Общие принципы технологий непрерывного литья.....	9
1.2 Теоретические аспекты получения бездефектного металла .....	16
1.3 Основные виды литейных дефектов .....	19
1.4 Практические аспекты трансформации сталеплавительных дефектов..	25
2 МЕТОДИКИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	29
2.1 Описание и свойства стали 09Г2С .....	29
2.2 Приготовление микрошлифов .....	31
2.3 Методики исследования .....	35
2.2.1 Методика работы на РЭМ.....	35
2.2.2 Методика оптической микроскопии .....	38
2.2.3 Методика определения микротвердости .....	43
3 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАЗДЕЛ .....	46
3.1 Исследование микроструктуры на оптическом микроскопе.....	46
3.2 Исследование микроструктуры на РЭМ.....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	61
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	62

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценки надежности и ресурса металлоконструкций, работающих в тяжелых условиях, на сегодняшний момент является наиболее актуальной задачей обеспечения безопасности сложных технических систем. Для металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях низких климатических температур, одним из основных требований является обеспечение хладостойкости материала. Обеспечение достаточной хладостойкости означает предотвращение хрупких разрушений элементов конструкций при нагрузках, существенно ниже расчетных.

В то же время, не стоит забывать, что качество металлического изделия должно поддерживаться на высоком уровне на всех стадиях производства, поскольку в процессе изготовления металлические изделия проходят сложный технологический цикл. Он включает следующие основные операции: плавка, вакуумирование, выпечная обработка, литье, обработка давлением, термическая обработка, механическая обработка, соединение с другими деталями. На этапе изготовления, расплавленная сталь вступает в контакт с кислородом, расплавленным флюсом, раскислителями и инертными газами, вследствие чего при кристаллизации в ней образуются поры, пустоты, усадочные раковины, крупные неметаллические включения, которые при обработке давлением и изготовлении проката вытягиваются и расплющиваются, тем самым создавая трещины, расслоения, волосовины, становясь сильными концентраторами напряжений. В частности, ликвация литого металла, которая наследуется при последующей прокатке, приводят к образованию неоднородной структуры и обуславливают снижение механических свойств. Концентрационные изменения значительно влияют на термодинамику и кинетику фазовых превращений, на температуры критических точек, на диффузию, которая контролирует зарождение и рост карбидных частиц и формирование бейнита. Неоднократно показано, что в

малоуглеродистых сталях даже небольшие изменения химического состава вызывают изменения структуры и фазового состава, а также влияют на уровень механических свойств по сечению проката [5].

Ряд технологических операций могут вызвать раскрытие дефектов. Например, при сварке, которая является популярным методом соединения деталей, происходит локальный разогрев (в пределах зоны термического влияния), который, в случае попадания на ликвационные участки, может привести к оплавлению и образованию внутренних трещин.

В работе исследовали причины появления внутренних расслоений в материале сварных труб. Поскольку дефекты были обнаружены в области сварного шва, то основной причиной его появления можно было считать сварочный нагрев. Целью исследования было установить истинную причину появления дефектов.

# 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Общие принципы технологий непрерывного литья

Основной технологической функцией любой МНЛЗ является перевод стали из жидкого состояния в твердое с приданием получаемой заготовке определенной геометрической формы и обеспечением качественных показателей ее поверхности и внутренней структуры, регламентируемых соответствующими техническими условиями.

Для достижения твердого состояния заготовки необходимо отвести некоторое количество тепла в окружающую среду в течение определенного времени. Для нормального процесса охлаждения необходимо обеспечить движение заготовки с определенной скоростью при регламентированном отводе тепла (охлаждение водой) [6].

Общая схема разливки стали с обозначением основных функциональных узлов и механизмов представлена на рисунке 1:

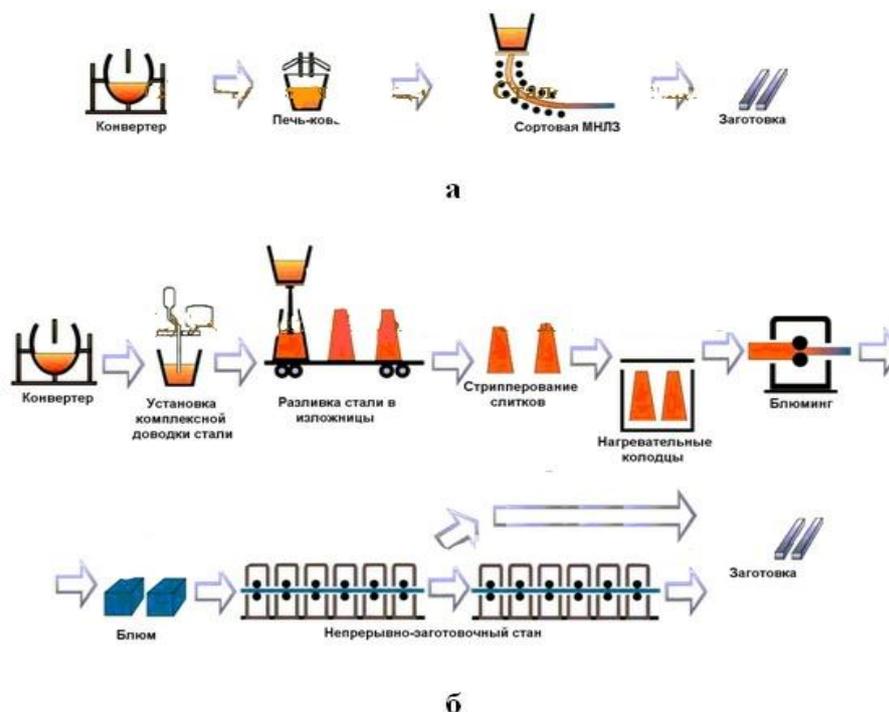


Рисунок 1 – Сравнение технологических схем производства сортовой заготовки с непрерывной разливкой (а) и с разливкой в слитки и последующей прокаткой (б)

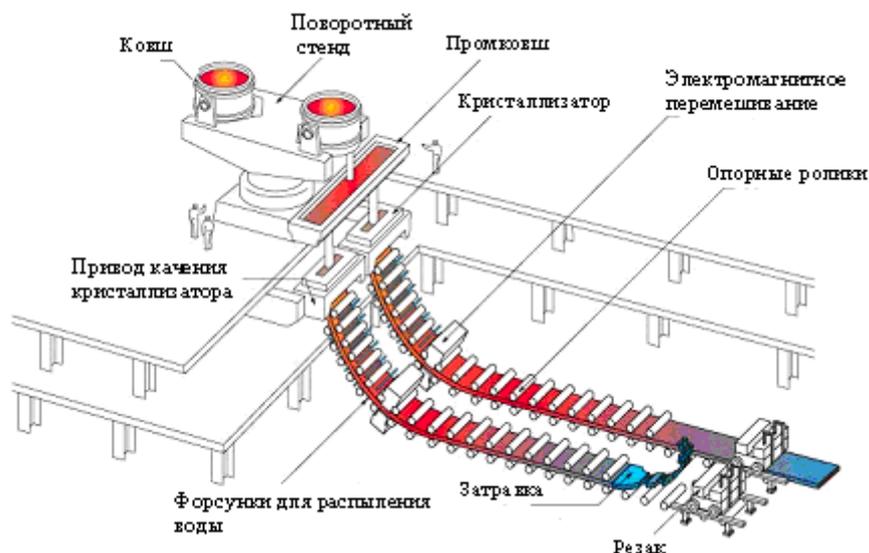


Рисунок 2 – Общая схема разливки стали на МНЛЗ

К основным функциональным элементам МНЛЗ можно отнести:

- поворотный стенд – предназначен для размещения на нем сталеразливочных ковшей, передачу их из резервного положения в положение разливки и обратно, обеспечения серийной разливки, подъема и опускания ковшей при разливке, а также для непрерывного взвешивания ковшей с металлом;
- тележка промежуточного ковша – служит для удержания его при разливке и перемещения из резервной позиции в рабочую;
- промежуточный ковш – обеспечивает поступление металла в кристаллизатор с определенным расходом хорошо организованной струей, позволяет разливать сталь в несколько кристаллизаторов одновременно и осуществлять серийную разливку методом «плавка на плавку» при смене сталеразливочных ковшей без прекращения и снижения скорости разливки; промежуточный ковш является буферной емкостью, так как с его помощью согласовывается поступление металла из сталеразливочного ковша в кристаллизатор;
- кристаллизатор – предназначен для приема жидкого металла, формирования слитка заданного сечения и первичного его охлаждения.

– механизм возвратно-поступательного движения кристаллизатора – создает условия, снижающие вероятность возникновения прорывов корки слитка на выходе из него, а также обеспечивает полное «залечивание» места разрыва, возникшего при движении слитка в кристаллизаторе;

– зона вторичного охлаждения (ЗВО) – позволяет создать оптимальные условия для полного затвердевания непрерывно отливаемого слитка, обеспечивающие равномерное охлаждение заготовки (распыления воды форсунками, поддержание ее геометрической формы роликами (предотвращение выпучивания) и требуемое качество металла;

– тянущее – правильная машина (ТПМ) – предназначена для вытягивания литой заготовки из кристаллизатора, выпрямления ее на радиальных и криволинейных устройствах и подачи к машине (механизму) для резки; ТПМ обеспечивает подачу затравки в кристаллизатор, удержание ее в кристаллизаторе на время уплотнения зазоров, вытягивание с непрерывнолитой заготовкой из кристаллизатора, отделение головки затравки от заготовки и т.п.;

– машина для резки заготовок (резак) – обеспечивает разделение непрерывнолитого металла на мерные длины в соответствии с требованиями потребителей;

– затравка – предназначена для образования временного «дна» в кристаллизаторе перед началом разлива и последующего вытягивания со сцепленной заготовкой ТПМ;

– устройство для электромагнитного перемешивания – позволяет повысить качество заготовки.

Процессу непрерывной разлива стали на МНЛЗ обязательно предшествует целый комплекс подготовительных и вспомогательных операций, основными из которых являются: футеровка промежуточного ковша, его сушка и подогрев до температуры 900–1100 °С; установка

промковша в рабочее положение над кристаллизаторами; установка затравок и холодильников во внутренней полости кристаллизаторов; транспортировка сталеразливочного ковша от установки внепечной обработки к МНЛЗ и установка его на поворотный стенд и пр. Еще раньше проверяется функционирование всех узлов и механизмов, а также КИП и автоматики.

Разливка стали начинается с открытия шиберного затвора сталеразливочного ковша. Подача металла из сталеразливочного в промежуточный ковш осуществляется открытой или закрытой струей через огнеупорную защитную трубу (рисунок 3).

После заполнения промковша металлом на 30-40 % его номинальной емкости начинается подача стали в кристаллизаторы. Регулирование расхода стали, вытекающей из промковша в кристаллизатор, может осуществляться посредством литья через калиброванные стаканы-дозаторы при поддержании заданной высоты налива металла в промковше, изменением положения головки стопора относительно стакана-дозатора в промковше.

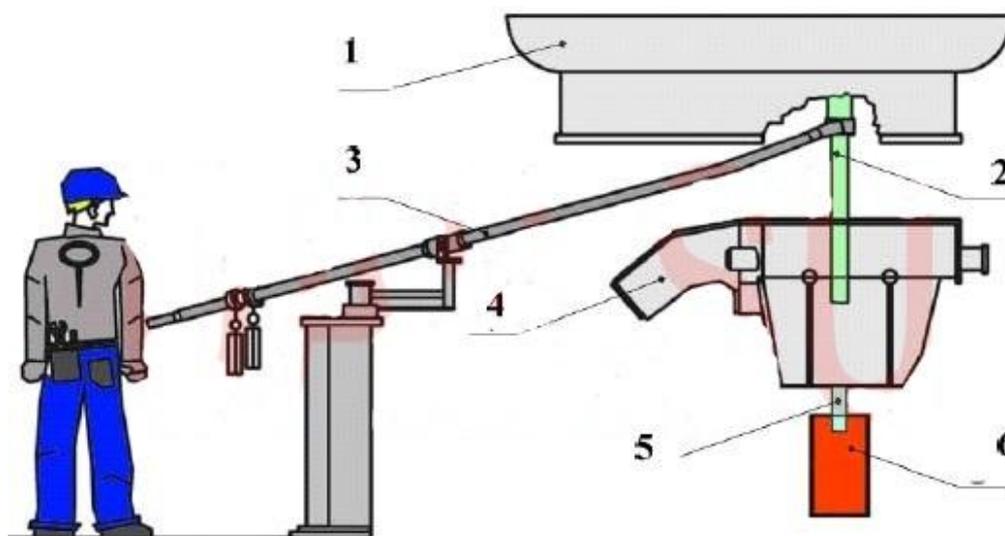


Рисунок 3 – Схема перелива стали из сталеразливочного ковша в промковш закрытой струей с применением защитной трубы, устанавливаемой манипулятором: 1 – сталеразливочный ковш; 2 – защитная труба; 3 – манипулятор; 4 – промежуточный ковш; 5 – погружной стакан; 6 - кристаллизатор

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

При наполнении внутренней полости кристаллизатора металлом начинается процесс движения затравки вниз. При этом скорость вытяжки заготовки определяется толщиной и механической прочностью твердой корочки заготовки на выходе из кристаллизатора, которая необходима для предотвращения прорывов жидкого металла по ходу разливки.

В процессе разливки кристаллизатор совершает возвратно-поступательные движения с определенной частотой и амплитудой, что предотвращает прилипание твердой корочки заготовки к поверхности кристаллизатора. Уровень металла в кристаллизаторе поддерживается постоянным, что обеспечивает повышение качества поверхности заготовки и стабилизирует процесс литья [6].

Разливка металла может одновременно осуществляться на 1–2 ручьях для слябовых МНЛЗ и на 1–8 ручьях для блюмовых и сортовых МНЛЗ. Выбор количества ручьев производится из соображений обеспечения требуемой производительности МНЛЗ и ритмичности функционирования сталеплавильных агрегатов применительно к конкретному сталеплавильному цеху.

После выхода из кристаллизатора заготовка проходит через ЗВО, протяженность которой может составлять 8–35 м в зависимости от условий разливки (сечение заготовки, марка стали, скорость разливки и пр.). Охлаждение заготовки осуществляется в основном водой или водовоздушной смесью, распыляемой специальными форсунками, которые установлены по ходу движения заготовки. Заготовка движется по поддерживающим роликам, установленным вдоль технологической оси.

После выхода из ЗВО заготовка проходит ТПМ, затем производится отделение затравки и заготовка подается на машину резки, где она делится на мерные длины и затем маркируется. Отрезанная мерная заготовка (как правило, 6–12 м) транспортируется к устройству поперечной транспортировки заготовок, где передается на холодильник (рисунок 4).



Рисунок 4 – Сталкиватель и холодильник сортовой МНЛЗ

Разливка стали осуществляется сериями из нескольких сталеразливочных ковшей (10–25 ковшей и более). При этом замена пустого сталеразливочного ковша на полный осуществляется путем изменения позиции поворотного станда. Эта операция называется перековшовкой. Время замены сталеразливочного ковша составляет, как правило, 90–120 с. В это время разливка продолжается в обычном режиме (или с уменьшением скорости движения заготовки) за счет металла, находящегося в промковше.

Регулирование скорости разливки (вытяжки заготовки) осуществляется двумя способами: путем регламентирования расхода металла, вытекающего из промковша и изменения скорости вытяжки заготовки.

Завершение процесса разливки осуществляется прекращением выпуска металла из сталеразливочного, а затем и из промежуточного ковша. При этом в промковше остается определенный остаток жидкого металла (высота слоя составляет 200–300 мм), который препятствует попаданию шлака из промковша в кристаллизатор. После прекращения подачи металла из промковша движение заготовки приостанавливается, что позволяет «застудить» верхнюю часть заготовки с целью предотвращения выливания металла через край. С этой целью с зеркала металла в кристаллизаторе

удаляется шлак и на него подается вода. Далее заготовка продолжает свое движение и полностью выводится из МНЛЗ.

Порезка на длины осуществляется в соответствии с заказом и производится в процессе разливки металла на МНЛЗ машинами газовой резки (МГР). После порезки проводится горячая маркировка слябов и отбор проб на химический анализ.

Нагрев слябов производится в методических печах (МП), удаление печной окалины производится гидросбивами клетки ДУО. Листы проходят контролируемую прокатку с ускоренным охлаждением с последующей термической обработкой – высокий отпуск. В потоке стана установлена правильная машина для горячей правки раскатов в автоматическом режиме. Для правки задаются профиль раската и прочностные характеристики листов. Контроль производится на автоматических ультразвуковых установках «Север 6-08-02800-ВТ» или «NUKEM» (рисунок 5).

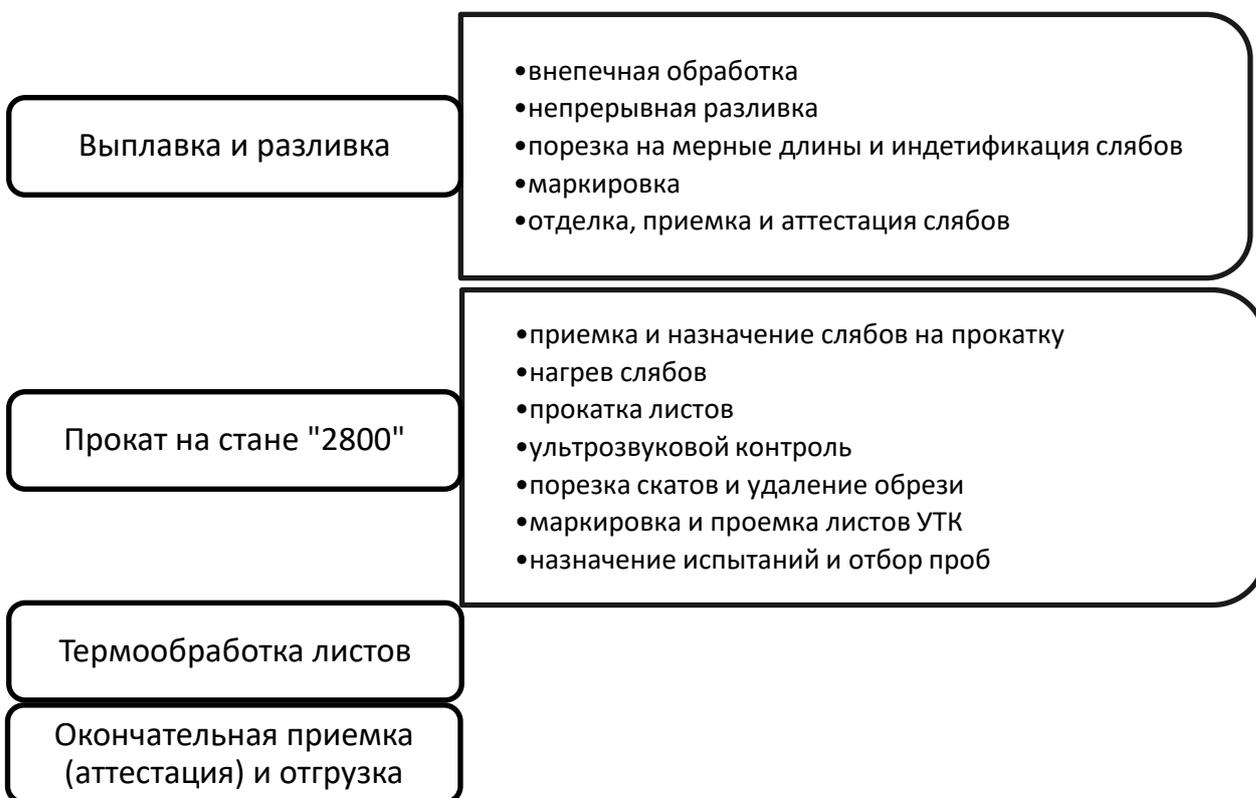


Рисунок 5 – Схема производства стали 09Г2С

## 1.2 Теоретические аспекты получения бездефектного металла

Одной из основных задач при непрерывной разливке стали является управление процессом кристаллизации металла с целью создания условий для формирования качественного слитка, обеспечивающего получение высоких показателей прокатки.

Несмотря на продолжительный срок эксплуатации МНЛЗ и большую работу, проведенную по ее модернизации, отбраковка листового проката по дефектам сталеплавильного происхождения недопустимо высока и наблюдается по дефектам: рванина, трещина и неудовлетворительные результаты ультразвукового контроля [14].

Перегрев металла в промковше поддерживался на верхнем пределе (20–25 °С) или превышал его, что могло неблагоприятно сказаться на качестве непрерывнолитой заготовки, а, следовательно, и на отбраковке листового проката. При повышении температуры разливаемого металла ухудшается качество заготовки по основным видам дефектов, при разливке металла с перегревом более 20 °С возрастает степень развития всех основных дефектов, особенно осевой рыхлости, осевой химической неоднородности и трещин. Ухудшение качества заготовок, отлитых при повышенной температуре металла в промковше, вызывает увеличение отбраковки листового проката на 0,8–1,2 %. Таким образом, перегрев металла в промежуточном ковше МНЛЗ более 20 °С вызывает снижение качества как литого металла, так и производимого из него горячекатаного листа. Непосредственное отрицательное влияние разливки металла с повышенным перегревом (более 20 °С) приводит к возникновению значительных термомеханических напряжений и зарождению микротрещин в заготовке, повышающих вероятность возникновения разрывов и трещин на листовом прокате [2].

Другой возможной причиной образования дефектов на заготовке, особенно наружных и внутренних трещин, является избыточное или недостаточное охлаждение отдельных участков поверхности слитков вследствие неправильно организованного режима вторичного охлаждения. Вместе с тем обеспечение постоянства температуры по периметру заготовки является одним из основных требований, обеспечивающих качество непрерывнолитой заготовки. Наличие переохлажденных участков (центральная и угловые зоны) и больших перепадов температуры по периметру заготовки ведет к увеличению термических напряжений, которые, суммируясь с механическими напряжениями в зоне разгиба, могут являться причиной образования поверхностных трещин. Таким образом, неравномерность охлаждения заготовки по периметру, а также переохлаждение угловых участков может являться одной из причин образования дефектов, проявляющихся на листовом прокате [14].

Литейное производство отличается от ряда других производств многооперационностью и разнообразием используемых в технологическом процессе материалов. Отклонение от требуемого качества одного из материалов или неправильное выполнение одной из операций может привести к несоответствию качества отливки предъявляемым требованиям. Качество отливки, в свою очередь, влияет на качество последующих операций металлопокрытий.

Своеобразие литейного производства состоит еще и в том, что большая часть его процессов лишена непосредственной наглядности и происходит при переменных физико-химических условиях. Все это затрудняет и усложняет технический контроль литейного производства.

В литейном производстве подлежат контролю: поступающие в производство основные и вспомогательные материалы; свойства полученных сплавов; модельно-опочная оснастка; формовочные и стержневые смеси; стержни; формы; отливки на различных стадиях изготовления и обработки.

Основные и вспомогательные материалы поступают в литейный цех преимущественно через склады формовочных материалов и шихты. Некоторые вспомогательные материалы поступают через цеховые кладовые. Задача контроля на этом участке - отбраковка поступающих некондиционных материалов [3-7].

Виды контроля в литейных цехах:

– контроль процесса плавки. Методы контроля плавильного процесса зависят от типа плавильного агрегата и рода металла.

– контроль режима заливки. Заливку формы контролируют по температуре заливаемого металла оптическим пирометром и по продолжительности заливки — секундомером. Система контроля выборочная; для крупных и ответственных отливок — сплошной контроль.

– контроль оснастки. Повышение требований к точности черновых размеров отливок определяет необходимость систематического контроля состояния моделей, ящиков, опок и другой оснастки. Чем выше класс точности отливок, тем меньше допускаемые отклонения на размеры оснастки и периодичность контроля.

– контроль качества смесей. Качество смесей, как и исходных материалов, определяется их подготовкой, шихтовкой и перемешиванием. Свойства смесей – влажность, газопроницаемость и прочность – подвергают систематическому контролю. Методика определения свойств смесей установлена ГОСТ 2189–78. Плотность литейных красок проверяют каждые 1,5–2 ч ареометром.

- контроль стержней. Контроль стержней является предупредительным по отношению к отливкам и в то же время приемочным по отношению к стержням как самостоятельным полуфабрикатам.

Такие дефекты, как осыпаемость, трещины, пережог, определяют внешним осмотром. Влажность крупных стержней можно проконтролировать влагомером или простукиванием. Шаблоны,

применяемые для контроля размеров стержней, как правило, предельные и лишь в отдельных случаях, преимущественно для массового производства, индикаторные [2].

Контроль качества формы. Качество изготовленной формы в значительной мере определяет качество последующей отливки. Степень и равномерность уплотнения формы определяют специальным твердомером, пригодным для проверки горизонтальных, вертикальных и наклонных поверхностей. Используя твердомер, можно организовать эффективный контроль плотности набивки форм и добиться резкого уменьшения брака по дефектам формовки.

Контроль правильности размеров формы распространяется главным образом на процесс установки стержней; контроль выполняют в большинстве случаев с использованием шаблонов, совмещающих производственное и контрольное назначение.

Многообразие причин, способных влиять на качество отливок, обуславливает эффективность статистического метода контроля в литейном производстве.

Бракованной называют такую отливку, которая имеет хотя бы один недопустимый по техническим условиям дефект. Причин возникновения брака очень много: некондиционные исходные формовочные материалы; плохое качество шихты для плавки металла; неудачная конструкция детали (деталь не технологична); неудачная конструкция литниковой системы и плохо продуманная литейная технология; низкое качество форм и стержней; слабый технологический контроль и многое другое [4-6, 14].

### 1.3 Основные виды литейных дефектов

В соответствии с ГОСТ 19200–73 принята классификация дефектов отливок, которая состоит из следующих групп (рисунок 6). Могут быть

дефекты по несоответствию микроструктуры, химического состава, физико-механических свойств.

Классификация дефектов отливок. Наиболее часто встречающиеся дефекты отливок можно разделить на четыре группы:

- внешние дефекты, обнаруживаемые непосредственно на поверхности отливки (несоответствие размеров и массы заданным, спай, залив и т. д.);
- объемные дефекты, расположенные внутри отливки и нарушающие ее сплошность (горячие и холодные трещины, газовые раковины и т. д.);
- несоответствие химического состава и структуры отливки;
- неудовлетворительные механические свойства.

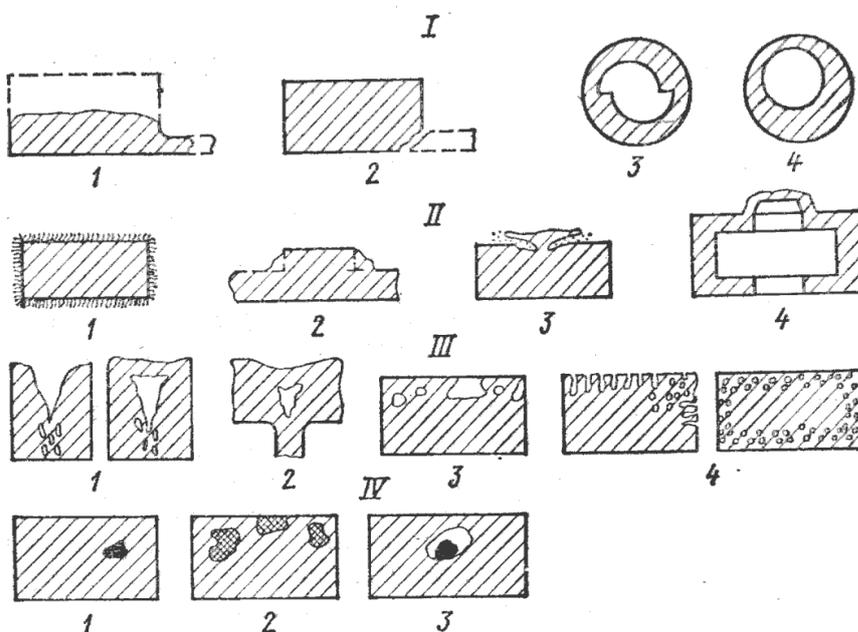


Рисунок 6 - Схемы основных видов литейных дефектов:

I – несоответствие по геометрии (недолив 1, разностенность 4, перекос 3, вылом 2); II – дефекты поверхности (пригар 1, ужимина 3, нарост 2, залив 4), III – несплошности в теле отливки (усадочные раковины 1, газовые раковины 3, пористость 4, утяжина 2); IV – включения (неметаллические 2, металлические 1, королек 3).

Несоответствие размеров отливки чертежу может быть следствием неправильно назначенной усадки при изготовлении модельного комплекта, а также неточной сборки формы. Этот дефект может быть устранен доводкой модельного комплекта, повышением точности сборки формы.

Несоответствие массы отливки заданной чертежом возникает чаще всего по тем же причинам, что и несоответствие размеров. Кроме того, увеличение массы возможно, вследствие деформации формы при заливке ее жидким металлом.

Спай и недолив в отливках образуются от неслившихся потоков металла, потерявших жидкотекучесть до заполнения всей формы. Такие потоки получаются при заливке формы недостаточно перегретым металлом через питатели малого сечения, при чрезмерно влажной формовочной смеси (в тонкостенных отливках) или большом количестве каменноугольной пыли в формовочной смеси.

Заливы на отливке возникают обычно по разъему формы вследствие изношенности опок, их коробления, а также из-за плохого крепления формы.

Перекося в отливках образуется при небрежной сборке формы в результате смещения полуформы или неправильной центровке опок, из-за износа втулок и штырей, несоответствия знаковых частей стержня на модели и в стержневом ящике. Отливка получается со смещенными частями.

Пригар – прочное соединение поверхности отливок с формовочной или стержневой смесью образуется вследствие недостаточной огнеупорности формовочных материалов, их засоренности вредными примесями, плохого качества литейных красок, недостаточного уплотнения формы.

Ужимины – узкие и длинные вмятины в теле отливки, покрытые слоем металла, отделенного от тела отливки прослойкой формовочного материала. Они образуются обычно на плоских больших поверхностях отливок, особенно при сильном уплотнении сырых форм. Ужимины появляются вследствие теплового воздействия жидкого металла на стенки формы, в результате чего поверхностные слои последней разогреваются и деформируются, образуя в отливке вмятину. Иногда деформации поверхностного слоя формы настолько велики, что поверхностная корочка ее отслаивается, образуется трещина, в которую попадает расплав.

Чтобы предотвратить образование ужимин, следует не переуплотнять форму, заливать ее металлом с нормальной температурой, увеличивать скорость заливки металла, применять специальные формовочные краски, исключая появление трещин в форме при прогреве металлом. Ужиминны можно устранять нанесением, рисок (в виде сетки пересекающихся линий) на поверхность формы ланцетом или выполнением специальных противоужимных ребер на модели. Риски уменьшают деформацию поверхности форм, препятствуют ее отслаиванию.

Горячие трещины возникают в отливках при высокой температуре заливаемого металла, повышенной усадке отливки, неправильной конструкции литниковой системы и прибылей, при плохой податливости стержня формы, неправильной конструкции литниковой системы и прибылей, при плохой податливости стержня и формы, неправильной конструкции отливок, неравномерном охлаждении, вызывающем внутренние напряжения в отливке, а также при отклонениях химического состава металла от заданного. Горячие трещины имеют темную окисленную поверхность.

Холодные трещины могут быть следствием как неравномерной усадки отдельных частей отливки, так и просто механических повреждений при выбивке и очистке. Холодные трещины имеют светлую металлическую не окисленную поверхность. Для устранения холодных трещин необходимо обеспечивать равномерное охлаждение отливки в тонких и утолщенных местах.

Газовые раковины – пустоты в теле отливки, имеющие чистую и гладкую поверхность. Они бывают открытые (наружные) или закрытые (внутренние) и возникают при чрезмерной газотворности и недостаточной газопроницаемости формовочной смеси, плохой вентиляции формы и стержня или неправильном ее устройстве, низкой температуре заливаемого металла, плохой просушенности формы и стержня, высоком содержании

газов в металле, неправильном подводе металла. Устранение этих причин снижает возможность образования газовых раковин.

Обвал формы происходит в основном из-за слабого уплотнения формы, недостаточной прочности формовочной смеси, а, также, неисправностей формовочного оборудования и сильных толчков и ударов по опоке во время сборки формы.

Песочные раковины возникают вследствие низкой прочности и влажности формовочной смеси, недостаточной поверхностной прочности стержня, слабого уплотнения и плохой продувки формы сжатым воздухом перед ее сборкой; кроме того, отдельные комочки и песчинки смываются струей металла во время заливки и заносятся в отливку. Этот брак можно устранить нормальным уплотнением формы, тщательной ее продувкой перед сборкой, тщательной отделкой литниковой воронки; не следует допускать длительного выстаивания формы перед заливкой.

Шлаковые включения могут находиться внутри тела отливки или на ее поверхности. Шлаковые раковины (включения) всегда полностью или частично заполнены шлаком, попадающим в отливку во время заливки металла в форму. Они образуются вследствие недостаточно тщательной очистки расплава от шлака в ковше, низкой огнеупорности футеровки ковшей и неправильной конструкции литниковой системы [2, 6].

Усадочные раковины возникают вследствие недостаточного питания массивных узлов отливки, нетехнологичной конструкции отливок, неправильной установки литников и прибылей, заливки чрезмерно перегретым металлом, а также повышенной усадки. Усадочные раковины имеют неправильную форму и шероховатую поверхность, большей частью окисленную.

Рыхлота и усадочная пористость в отливках образуются при недостаточном питании отливки жидким металлом в процессе кристаллизации, а также в утолщенных местах отливки. Для исключения

местной рыхлоты рекомендуют в утолщенных местах отливки ставить холодильники, изменять конструкцию отливки, выравнять толщину ее стенок.

Несоответствие химического состава металла отливок заданному может произойти вследствие неправильного взвешивания шихтовых материалов, смешивания различных сортов материалов, неправильного ведения процесса плавки. Чтобы устранить брак по химическому составу, необходимо контролировать исходные шихтовые материалы, строго соблюдать порядок их взвешивания, следить за ходом плавки.

Несоответствие (ухудшение) механических свойств отливок наблюдается обычно при несоответствии химического состава и структуры металла заданным. Ликвацией называют химическую неоднородность, возникающую при кристаллизации слитка под влиянием физико-химических процессов и особенностей, сопровождающих охлаждение стали в изложнице. Ликвация проявляется в виде повышенной концентрации некоторых химических элементов в определенных локализованных зонах слитков на макро- и микроуровнях.

На практике различают дендритную ликвацию в пределах одного дендрита (микроуровень) и зональную ликвацию в пределах слитка (макроуровень). Внутри дендрита наблюдают различный химический состав сплава в осях, в межосных пространствах и по его границам [6].

Процесс ликвации обуславливается диффузионными явлениями, которые проявляются в зоне перехода жидкого металла в твердый. Жидкий металл, находящийся в непосредственном контакте с растущими кристаллами, обогащается ликвирующими примесями. Перемещение металла из области затвердевания, в которой сосуществует твердая и жидкая фазы, в жидкую область слитка определяется, во-первых, механическим захватом жидкости осями растущих дендритов (зона столбчатых кристаллов) и ее вытеснением, во-вторых, диффузией (молекулярной и конвективной),

осуществляющей перенос загрязненной жидкости. Оба эти фактора действуют независимо от природы ликвирующих примесей.

Дендритная и зональная ликвация тесно взаимосвязаны: чем больше в данном сплаве дендритная ликвация, тем меньше зональная ликвация, и наоборот. В данном случае проявляется влияние ширины двухфазной зоны. Чем эта зона уже, тем меньше дендритная ликвация.

Характерное расположение основных ликвационных зон приведено на рисунке 7:

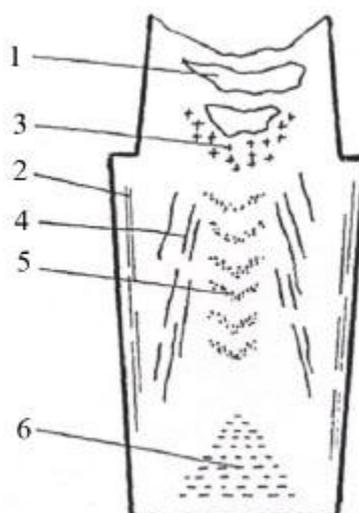


Рисунок 7 - Схематическое расположение основных видов дефектов в крупном слитке: 1 - усадочная раковина; 2- полосчатость; 3 - подусадочная ликвация (ликвационное пятно); 4 - внецентренная (А-образная) ликвация; 5 - осевая (V-образная) ликвация; 6 - конус осаждения

#### 1.4 Практические аспекты трансформации сталеплавительных дефектов

По природным признакам дефекты можно разделить на дефекты сталеплавильного, прокатного и последующего (например, трубного) переделов. Каждому дефекту присущи определенный внешний вид и расположение на поверхности или во внутренних слоях металла, форма и расположение структурных составляющих. Дефекты имеют характерные признаки, морфологические и генетические (структурные), которые выявляются при металловедческих исследованиях [2, 8].

К характерным морфологическим признакам дефектов относятся:

- конфигурация на поверхности и в поперечном сечении;
- расположение и повторяемость в изделии;
- размеры;
- расположение и строение структурных составляющих и неметаллических включений.

К характерным генетическим признакам относятся:

состав структурных составляющих вокруг дефекта;

- обезуглероживание;
- ликвация P, S, As, Mn и других элементов;
- определенные неметаллические включения внутри дефекта, на его продолжении и вокруг него;
- науглероживание.

Важнейшей частью всех исследований и практической деятельности в этом направлении является анализ трансформации дефектов из заготовки в прокат. Например, каждый дефект сляба в том случае, если он не удален, трансформируется в дефекты поверхности листового проката (за исключением случаев, когда его размер в направлении толщины проката невелик и он переходит в окалину при нагреве под прокатку). Поперечные трещины по следам качания выкатываются в пленообразные дефекты (фактически это раскатанные трещины), иногда их называют  $\mu$ -дефектами.

При наличии продольных трещин возникают узкие пленообразные дефекты – вытянутые вдоль направления прокатки на значительную длину. Сетчатые и паукообразные трещины после прокатки имеют вид широкооткрытых развитых в различных направлениях грубых трещин. Очень важно: четко определить вид дефектов, выявить источники и механизм их образования [1, 6, 7].

Качество исходной заготовки напрямую определяет качество конечного продукта – трубы. Дефекты исходной заготовки сохраняются на

трубе и зачастую усугубляются. Поэтому к макроструктуре, поверхностным дефектам, дефектам формы исходной заготовки предъявляются достаточно высокие требования. Несмотря на более высокий процент отбраковки по дефектам, способ производства труб из непрерывнолитых заготовок менее дорогостоящий, чем производство из горячекатаных заготовок.

Поступательно-вращательное движение заготовки при изготовлении труб вскрывает и развивает малейшие несплошности металла с образованием дефектов поверхности в виде плен или расслоений по толщине стенки.

Ликвационные полосы и трещины образуются при нарушении температурно-скоростного режима разлива. Внутренние трещины представляют собой надрывы, распространяющиеся по межосным пространствам дендритной структуры, обогащенные ликватами и сопровождающиеся скоплениями сульфидов и ликвацией фосфора. Такие дефекты однозначно приведут к разрушению металла в процессе прошивки.

При прошивке дефектных заготовок с ликвационными полосками более 2 баллов на наружной и внутренней поверхности образуются грубые плены и раскатанные трещины.

Подкорковые пузыри – дефект макроструктуры поверхностной и подповерхностной зон, характерный для недораскисленного металла. В зависимости от степени развития дефекта (глубины залегания, размера и количества пузырей) на поверхности гильзы образуются плены по раскатанным пузырям. Подкорковые пузыри с непрерывнолитой заготовки более 1 балла трансформируются в недопустимые для трубы дефекты поверхности (сталеплавиальная плена по раскатанному пузырю) и дефекты макроструктуры.

Наиболее опасный дефект металлургического происхождения - неметаллические шлаковые включения, которые очень сложно трансформировать в приемлемые по форме и распределению даже интенсивной пластической деформацией. Скопление неметаллических

включений эндогенного и экзогенного происхождения приводит к образованию такого дефекта макроструктуры, как краевое точечное загрязнение. Загрязненность металла неметаллическими включениями может быть различной по ручьям и неодинакова по периметру, неметаллические включения могут скапливаться у малого радиуса или распределяться по всему сечению, что приводит к образованию дефектов как на наружной, так и внутренней поверхности трубы. Шлаковые включения потенциально опасны как концентраторы напряжений, которые приводят к возникновению трещин и плен при пластической деформации [1, 2, 3].

Включения в теле трубы снижают ее эксплуатационные свойства. При прошивке заготовки по скоплениям неметаллических включений образуются сталеплавильные вздутия и плены продольной ориентации. Степень грубости плен зависит от величины скоплений неметаллических включений. Форма полости плен зависит от вида неметаллических включений.

## 2 МЕТОДИКИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Описание и свойства стали 09Г2С

Прокат из данной марки стали используется для разнообразных строительных конструкций благодаря высокой механической прочности, что позволяет использовать более тонкие элементы чем при использовании других сталей. Устойчивость свойств в широком температурном диапазоне позволяет применять детали из этой марки в диапазоне температур от -70 до +450°С. Также легкая свариваемость позволяет изготавливать из листового проката этой марки сложные конструкции для химической, нефтяной, строительной, судостроительной и других отраслей. Применяя закалку и отпуск изготавливают качественную трубопроводную арматуру. Высокая механическая устойчивость к низким температурам также позволяет с успехом применять трубы из 09Г2С на севере страны. Конструкции, изготавливаемые из стали 09Г2С экономичны по цене и достаточно легки по сравнению с аналогами, выпускаемыми из других сталей.

Также марка широко используется для сварных конструкций. Сварка может производиться как без подогрева, так и с предварительным подогревом до 100-120 °С. Так как углерода в стали мало, то сварка ее довольно проста, причем сталь не закаливается и не перегревается в процессе сварки, благодаря чему не происходит снижение пластических свойств или увеличение ее зернистости. К плюсам применения этой стали можно отнести также, что она не склонна к отпускной хрупкости и ее вязкость не снижается после отпуска. Вышеприведенными свойствами объясняется удобство использования 09Г2С от других сталей с большим содержанием углерода или присадок, которые хуже варятся и меняют свойства после термообработки. Свойства стали 09Г2Г во многом определяются химическим составом сплава и механическими свойствами (таблица 1 и 2):

					ЮУрГУ - 22.04.02.2019.343 ПЗ ВКР	29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 1 – Химический состав стали 09Г2С

Fe	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Nb	V
основа	0,10	0,42	1,52	≤0,040	≤0,035	0,08	0,05	0,06	0,003

Таблица 2 – Механические свойства при T=20 °С

Механические свойства стали 09Г2С при T=20°С					
ГОСТ	Состояние поставки	Сечение, мм	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	$\sigma_B$ (МПа)	$\delta_5$ (%)
19281-73	Сортовой и фасонный прокат	до 10	345	490	21
19282-73	Листы и полосы (Образцы поперечные)	от 10 до 20 вкл.	325	470	21
		от 20 до 32 вкл.	305	460	21
		от 32 до 60 вкл.	285	450	21
		от 60 до 80 вкл.	275	440	21
		от 80 до 160 вкл.	265	430	21
19282-73	Листы после закалки, отпуска (Образцы поперечные)	от 10 до 32 вкл.	365	490	19
		от 32 до 60 вкл.	315	450	21
17066-80	Листы горячекатаные	2-3,9	–	490	17

Обозначения:

$\sigma_B$  – предел кратковременной прочности, [МПа];

$\delta_5$  – относительное удлинение при разрыве, [ % ];

$\sigma_{0,2}$  – предел текучести условный, [МПа].

Постоянные (технологические) примеси являются обязательными компонентами сталей и сплавов, что объясняется трудностью их удаления как при выплавке (P, S). Так и в процессе раскисления (Si, Mn) или из шихты - легированного металлического лома (Ni, Cr и др.).

При увеличении содержания углерода до 1,2% возрастают прочность, твердость, порог хладноломкости (0,1% С повышает температуру порога

хладноломкости на 20 °С). При этом снижаются плотность, теплопроводность, вязкость, пластичность, величины относительных удлинения и сужения, а также величина остаточной индукции.

Кремний увеличивает прочность, коррозионную стойкость, жаропрочность стали, снижает вязкость и способствует графитизации стали.

Медь увеличивает антикоррозионные свойства, Хром, никель и медь слабо влияет на положение критических точек  $A_1$  и  $A_3$ , увеличивает прочность, снижает пластичность и ударную вязкость. Никель и хром сообщает стали коррозионную стойкость, высокую прочность и пластичность, увеличивает прокаливаемость, повышает сопротивление удару [10, 11].

## 2.2 Приготовление микрошлифов

Исследования структуры позволяют описать тип, форму, размер и взаимное расположение обнаруженных фаз и структурных составляющих. Задача состоит в изучении характеристик пространственного строения структуры путем измерения численных параметров микроскопического изображения.

Для выполнения металлографических исследований необходимы специально подготовленные образцы – металлографические шлифы. Исследования этих образцов проводятся с помощью микроскопов, работающих в отраженном свете. Изготовление образцов для оптической микроскопии включает следующие операции: вырезка образца, шлифование, полирование, травление (при необходимости). Хорошо подготовленный микрошлиф должен отвечать ряду требований:

– прежде всего, он должен быть представительным для структуры и свойств изучаемого объекта (детали);

- вырезка, шлифование и полирование образца должны осуществляться таким образом, чтобы на его поверхности оставался минимальный слой металла, деформированного шлифоприготовлением;
- на поверхности шлифа не должно быть царапин, рисок, ямок и загрязнений;
- в процессе приготовления шлифа не должно происходить выкрашивания неметаллических включений, карбидных и других фаз;
- поверхность шлифа должна быть плоской и гладкой для обеспечения исследования его при больших увеличениях.

Место вырезки выбирают так, чтобы образец был типичен для данной детали. При неоднородной структуре образцы вырезают из каждой характерной зоны. Образцы для оптической микроскопии вырезают на специальных отрезных станках алмазными и эльборовыми кругами. Чтобы избежать искажений структурного состояния образца в процессе вырезки, стараются избежать нагрева образцов до высоких температур (с помощью применения охлаждающей жидкости). Быстро и качественно пробы можно вырезать абразивно-проволочной пилой или электроискровым способом [10].

Образцы вручную или на специальных станках шлифуют крупнозернистой шлифовальной шкуркой с постепенным переходом к мелкозернистой. Для сухого шлифования применяют шкурку, выпускаемую промышленностью по ГОСТ 6456-82, для мокрого – водостойкую бумажную шкурку (ГОСТ 10054-82).

При ручном шлифовании шкурку помещают на плоское твердое основание (обычно толстое стекло). Образец прижимают шлифуемой поверхностью к шкурке и ритмично перемещают вперед и назад по прямой линии. При механическом шлифовании шкурку закрепляют на вращающемся круге с помощью зажимных колец или клеевого покрытия на обратной стороне шкурки, а образец прижимают к шкурке вручную или устанавливают в зажимное приспособление станка.

Шлифование проводят в одном направлении до тех пор, пока не исчезнет рельеф от обработки шкуркой предыдущего номера (т. е. поворачивать образец на 90° можно только при переходе к шлифованию шкуркой другой зернистости). После шлифования для удаления остатков абразива шлиф промывают водой, а затем полируют.

В качестве промежуточной операции между тонким шлифованием и полированием используют притирку. В этом случае абразив наносят на шлифовальный (притирочный) круг, изготовленный из чугуна или таких материалов, как дерево, свинец, нейлон, парафин, бумага или специальная ткань.

Полирование служит для удаления мелких рисок, оставшихся после шлифования, и получения гладкой зеркальной поверхности шлифа. Полирование осуществляется вручную или на автоматических станках. Применяют механический, электрохимический и химико-механический методы полирования. Чаще полирование проводят на специальном полировальном станке, диск которого обтянут тканью (фетр, сукно, бархат). В качестве абразива применяют окислы железа, алюминия, хрома и т. д. с водой.

Важное условие получения качественных шлифов - тщательное соблюдение чистоты при полировании. После каждой операции приготовления шлифа образец необходимо хорошо промыть под струей воды, чтобы исключить загрязнение полировального круга абразивными частицами и продуктами резания, внесенными с предыдущих операций. Если в образце имеются мелкие поры и трещины, а также, если для полирования используются алмазные пасты, желательно применять ультразвуковую очистку.

На анализ представлены образцы различных участков труб (сварные соединения и фрагменты, вырезанные на различном расстоянии от линии сплавления ЗТВ), изготовленных из непрерывнолитых заготовок трех плавок:

№Z76279, №Z76277, №Z76278, перечень шлифов основного металла и сварного соединения труб из стали 09Г2С приведен в таблице 3:

Таблица 3 - Перечень шлифов основного металла и сварного соединения труб из стали 09Г2С

Шифр	№ трубы	№ плавки	Описание
Основной металл			
1-1	1014- 1015	Z76279	Продольный шлиф. Исследуемая поверхность на расстоянии 40мм от линии сплавления шва
1-2			Продольный шлиф. Исследуемая поверхность на расстоянии 80мм от линии сплавления шва
2-1	1074- 1075	Z76277	Поперечный шлиф. Протяженность исследуемой поверхности 20-60 от линии сплавления шва
2-4			Продольный шлиф. Исследуемая поверхность на расстоянии 20мм от линии сплавления шва
2-5			Продольный шлиф. Исследуемая поверхность на расстоянии 60мм от линии сплавления шва
3-1	828-833	Z76278	Поперечный шлиф. Протяженность исследуемой поверхности 20-60мм от линии сплавления шва
3-2			Продольный шлиф. Исследуемая поверхность на расстоянии 20мм от линии сплавления шва
3-3			Продольный шлиф. Исследуемая поверхность на расстоянии 60мм от линии сплавления шва
Сварное соединение			
2	1074- 1075	Z76277	Поперечный шлиф сварного соединения
3	828-833	Z76278	Поперечный шлиф сварного соединения

Цель исследования: исследовать структуру металла, определить наличие ликвационных зон и несплошностей в них, определить распределение химических элементов в области несплошностей и ликвационных зон, определить возможность образования несплошностей в ликвационных зонах вследствие термического воздействия.

### 2.3 Методики исследования

Растровые электронные микроскопы с системой микроанализа широко применяются в материаловедении для исследования поверхности твердых металлических и неметаллических образцов. Благодаря своей большой глубине резкости и возможности локального микроанализа в микрообъеме выбранного участка образца растровые электронные микроскопы находят применение на всех стадиях контроля технологических процессов в промышленности.

Исследование проводилось на оптическом Микроскопе Axio Observer D1.m, на растровом электронном микроскопе (РЭМ) фирмы JEOL модификации JSM-6460LV, оснащенный спектрометром энергетической дисперсии фирмы «Oxford Instruments» для проведения качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере FM-800.

#### 2.2.1 Методика работы на РЭМ

Растровые электронные микроскопы нашли широкое применение в материаловедении, так как из-за особенностей конструкции линз и принципа формирования изображения они имеют ряд преимуществ по сравнению с любыми оптическими микроскопами:

– большая глубина резкости, что позволяет исследовать не только шлифы, но и объекты с рельефной поверхностью (изломы, порошки, т и т.п.);

– возможность получения существенно больших увеличений. Даже на самых современных оптических микроскопах граница предельных увеличений составляет порядка  $\times 2000$  крат, в то время как растровые электронные микроскопы позволяют получать увеличения до  $\times 1\ 000\ 000$  крат;

– возможность получения более четких и наглядных контрастных изображений многофазовых образцов благодаря тому, что контраст изображения в растровых электронных микроскопах формируется в зависимости от атомного номера вещества.

Электроны зонда, обладающие высокой энергией, с огромной скоростью падают на поверхность образца и проникают на некоторую глубину, испытывая многочисленные взаимодействия, как с ядрами атомов вещества, так и со связанными и слабосвязанными электронами. При этом они постепенно теряют первоначальную энергию и направленность движения.

В качестве источников электронов, применяемых в РЭМ, могут выступать: вольфрамовый прямонакальный катод; гексаборид-лантановый катод; катод Шоттки; вольфрамовый катод с холодной полевой эмиссией электронов. Последние отличаются высокой яркостью и контрастностью, а также достаточно долгим сроком службы. Однако в отличие от вольфрамового прямонакального катода эти катоды требуют повышенного значения вакуума в системе и имеют высокую стоимость [12].

В этих приборах поверхность образца обследуется очень узким пучком электронов (зондом), который последовательно строчками пробегает по изучаемой поверхности. В каждой точке объекта под воздействием электронного зонда возникает несколько видов излучения: вторичные электроны, рассеянные электроны, рентгеновские лучи и т. д. Эти излучения, преобразованные в электрические сигналы, используются для получения увеличенного изображения на экранах электроннолучевых трубок.

Разрешение при этом достигает 30 - 50 нм. Схема растрового электронного микроскопа приведена на рисунке 8.

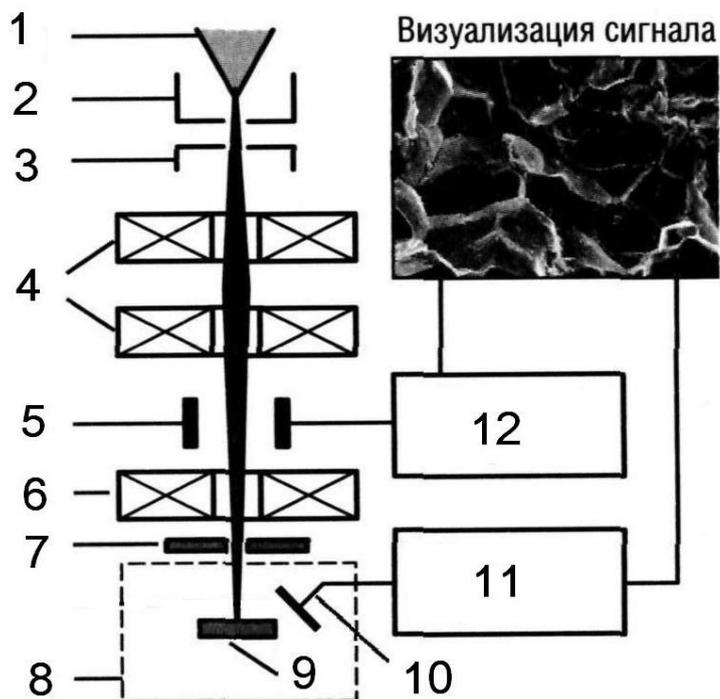


Рисунок 8 - Схема растрового электронного микроскопа:

- 1 – катод; 2 – управляющий электрод; 3 – анод;  
 4 – конденсорные линзы; 5 – система отклонения электронного луча;  
 6 – объективная линза; 7 – диафрагма; 8 – рабочая камера; 9 – образец;  
 10 – детектор эмитированных из образца электронов;  
 11 – усилитель видеосигнала; 12 – генератор сканирования.

Основное достоинство растровых электронных микроскопов состоит в том, что с их помощью можно очень быстро изучить большое число образцов, так как подготовка их весьма несложна, исследованию подвергаются практически обычные металлографические шлифы. Растровые электронные микроскопы, снабженные детектором возбуждаемого в образце рентгеновского излучения, используются для локального рентгеноспектрального количественного анализа микроучастков образца. Такие приборы иначе называют рентгеноспектральными микроанализаторами или микрозондами.

Характеристическое рентгеновское излучение, возбужденное в точке, на которую воздействует электронный зонд, попадает на кристалл-

анализатор, разлагающий рентгеновское излучение в спектр. Из этого спектра можно выделить линии, характерные для заданного химического элемента. По интенсивности линий по отношению к эталонному образцу можно определить содержание данного элемента в исследуемом участке образца. Этот же сигнал, показывающий интенсивность линий характеристического спектра какого-либо элемента, можно направить в видеоблок и при сканировании электронного зонда по поверхности образца получить растровое изображение в рентгеновских лучах. При таком изображении яркость отдельных участков будет пропорциональна содержанию выбранного компонента сплава. Метод позволяет исследовать участки размером до 3-5 мкм, чувствительность определения концентраций доходит до 0,1-0,5% [12].

### 2.2.2 Методика оптической микроскопии

Металлографический микроскоп позволяет рассматривать при увеличении непрозрачные тела в отраженном свете. В этом основное отличие металлографического микроскопа от биологического, в котором рассматриваются прозрачные тела в проходящем свете.

В качестве источника света используют низковольтные электрические лампы накаливания и реже лампы напряжения 110-120 В переменного и постоянного тока. В последнее время применяют мощные кварцевые лампы с иодным циклом (галогенные лампы) и ксеноновые лампы высокого давления. Для уменьшения рассеивания световых лучей и повышения четкости изображения в осветительную систему введен коллектор 2. Светофильтры 4 (цветные, матовые или дымчатые стеклянные пластинки) отбирают лучи требуемой длины волны, т.е. определенного цвета, и позволяют установить нужную интенсивность освещения с тем, чтобы избежать излишнего утомления глаз наблюдателя.

Человеческий глаз обладает неодинаковой чувствительностью к разным цветам спектра; наибольшей чувствительностью он обладает к желтозеленым цветам. Поэтому применение желто-зеленого светофильтра, отфильтровывающего другие составляющие белого цвета, позволяет более четко наблюдать особенности структуры. Желто-зеленые светофильтры уменьшают хроматическую aberrацию (неодинакового преломления линзой лучей разного цвета (различной длины волны), которые не имеют одной точки схода – фокуса) и, кроме того, выделяя лучи с меньшей длиной волны, повышают разрешающую способность объектива.

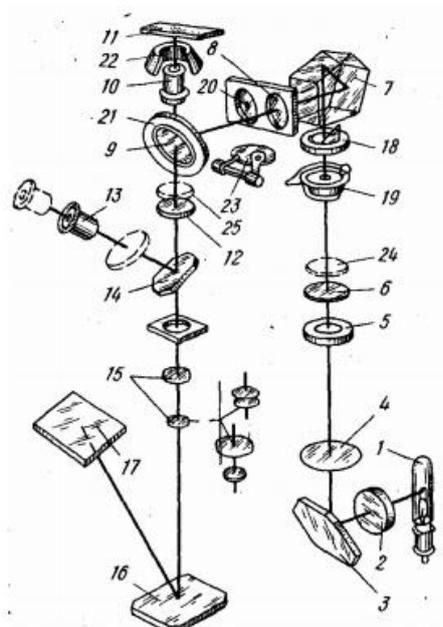


Рисунок 9 - Оптическая схема и работа металлографического микроскопа: 1 – осветитель (лампа); 2 – коллектор; 3 – зеркало; 4 – светофильтр; 5 – апертурная диафрагма; 6 – линза; 7 – призма; 8 – линза для работы в светлом поле; 9 – отражательная пластинка; 10 – объектив; 11 – объект; 12 – ахроматическая линза; 13 – окуляр; 14 – зеркало; 15 – фотоокуляр; 16 – зеркало; 17 – фотопластинка; 18 – полевая диафрагма; 19 – затвор; 20 – линза для работы в темном поле; 21 – кольцевое зеркало; 22 – параболическое зеркало; 23 – заслонка (включается при работе в темном поле); 24 – поляризатор; 25 – анализатор

Апертурная диафрагма 5 (рисунок 9) необходима для ограничения светового пучка и получения большей четкости изображения, полевая

диафрагма 18 – для ограничения освещенного поля рассматриваемого участка на микрошлифе.

Структуры исследуются в темном и светлом поле. При микроанализе для большинства металлов и других непрозрачных материалов и сплавов применяют наблюдение в светлом поле, т.е. при вертикальном освещении. Световые лучи, преломляясь пентапризмой 7, проходят через линзу светлого поля, попадают на отражающую пластинку 9 и направляются через объектив 10 на микрошлиф, установленный на предметном столике. Отразившись от микрошлифа, лучи вновь проходят через объектив и, выходя через него параллельным пучком, попадают на отражательную пластинку и ахроматическую линзу 12. Зеркало 14 отклоняет лучи в сторону окуляра 13.

Окуляры не только дают мнимое увеличение (т.е. увеличение промежуточного изображения), но и исправляют оптические дефекты, которые полностью не устраняются даже в объективах сложной конфигурации. Увеличение окуляра должно быть меньше, чем объектива, и подбирается таким образом, чтобы можно было достаточно четко рассмотреть изображение, создаваемое объектом. Если увеличение окуляра слишком мало, детали структуры, имеющиеся в изображении, полученном объективом, не будут выявлены; в то же время при слишком большом увеличении окуляра новые особенности структуры не выявляются, а ухудшается четкость изображения и уменьшается поле зрения.

Практически увеличение микроскопа определяется произведением увеличения окуляра на увеличение объектива, при использовании следующих характеристик: фокусного расстояния, числовой апертуры объектива и увеличения окуляра.

Для выявления отдельных мелких рельефных частиц на гладком поле, например, при исследовании неметаллических включений, целесообразно применять темнопольное освещение. Работа микроскопа для исследования в темном поле будет отличаться от описанной схемы исследования в светлом

поле тем, что вместо линзы 8 устанавливается линза 20. Центральная часть одной из поверхностей линзы 20 покрыта черным непрозрачным лаком в виде диска, задерживающего центральную часть светового пучка и пропускающего краевые лучи, проходящие через прозрачную часть линзы 20 и попадающие на кольцевое зеркало 21. Для того чтобы световые лучи не попадали на отражающую пластинку, используется заслонка 23. При исследовании в темном поле применяют эпиобъективы, имеющие вокруг оправы с объективными линзами параболическое зеркало 22. Отразившись от кольцевого зеркала, световые лучи падают на внутреннюю зеркальную поверхность параболического зеркала и, отразившись от него, концентрируются на микрошлифе. От поверхности шлифа в объектив отразится только часть лучей, имеющих диффузный характер. Эти лучи обычно отражаются от выступающих над остальной поверхностью объекта фаз. То есть исследование в темном поле не дает полной характеристики структуры и его следует рассматривать как дополняющее основное исследование в светлом поле.

При фотографировании зеркало 14 выключается выдвиганием тубуса вместе с окуляром и зеркалом, и лучи направляются непосредственно к фотоокуляру 15, проходят через него на зеркало 16, от которого отражаются и попадают на матовое стекло, где и дают изображение. Отраженные от микрошлифа световые лучи могут направляться на матовое стекло через проекционный окуляр. Для фиксации микроструктуры матовое стекло заменяется кассетой с фотопластинкой 17.

После фотографирования применяют обычные в фотографии приемы: проявление, фиксирование, промывание негатива и печатание позитивного изображения на фотобумагу.

Для зрительного наблюдения и фотографирования применяют также и поляризованный свет, т.е. свет, волны которого находятся в одной определенной плоскости. Для наблюдения в поляризованном свете

металлографические микроскопы имеют два полярофильтра; один из них, являющийся поляризатором 24, устанавливают близко к источнику света на пути хода лучей, другой полярофильтр – анализатор 25, концентрирующий отраженные микрошлифом поляризованные лучи, укрепляют перед окуляром или между объективом и окуляром. Если объект оптически изотропен, то при соответствующем взаимном положении поляризатора и анализатора можно добиться полного поглощения света. Однако если кристаллиты оптически анизотропны, то в указанном случае полного погашения света не происходит, и одни кристаллиты оказываются светлыми, а другие темными. С помощью поляризованного света изучают сплавы, состоящие из фаз с кристаллической решеткой некубической системы, а также неметаллические включения. Если включения прозрачны, отраженный свет частично преломляется на их внешней и внутренних поверхностях и не поляризуется. По прозрачности включения, по его окрашиванию или анизотропности можно судить о его природе.



Рисунок 10 – инвертированный микроскоп Axio Observer

Металлографический микроскоп имеет штатив, тубус и предметный столик (рисунок 10). Шлиф устанавливают на предметном горизонтальном столике, так, чтобы обеспечить перпендикулярное расположение подготовленной для исследования поверхности шлифа по отношению к оптической оси объектива. В центре столика устанавливают сменные подкладки с отверстием разного размера, через которое лучи света попадают на микрошлиф и отражаются от него. Предметный столик можно перемещать

в двух взаимно перпендикулярных горизонтальных плоскостях с помощью специальных винтов; это позволяет перемещать микрошлиф на нужное расстояние и просматривать микроструктуру в различных участках без изменения выбранного фокусного расстояния.

Для получения более четкого изображения шлиф, установленный на столике, находят на фокус. Для этой цели в штативе микроскопа имеется макроскопический винт, вращением которого поднимают или опускают столик, обеспечивая приблизительное фокусирование. Точное фокусирование достигается микроскопическим винтом, один оборот которого смещает объектив к шлифу на доли миллиметра (в большинстве конструкций микроскопов деление барабана микровинта равно 2 мкм). Чем больше увеличение объектива, тем меньше должно быть расстояние между шлифом и объективом [12].

### 2.2.3 Методика определения микротвердости

Метод определения микротвердости предназначен для оценки твердости очень малых (микроскопических) объемов материалов. Его применяют для измерения твердости мелких деталей, тонкой проволоки или ленты, тонких поверхностных слоев, покрытий и т. д. Главное назначение – оценка твердости отдельных фаз или структурных составляющих сплавов, а также разница в твердости отдельных участков этих составляющих.

Метод стандартизован (ГОСТ 9450–76). В качестве индентора при измерении микротвердости чаще всего, как и в случае определения твердости по Виккерсу, используют правильную четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136 °С. Эта пирамида плавно вдавливаются в образец при нагрузках 0,05–5 Н. Глубина вдавливания индентора при определении микротвердости составляет несколько микрометров и соизмерима с глубиной получаемого в результате механической шлифовки и полировки

наклепанного поверхностного слоя. Поэтому методика удаления этого слоя особенно важна.

Наклепанный слой удаляют обычно одним из трех методов: электрополировкой, отжигом готовых шлифов в вакууме или инертной атмосфере и глубоким химическим травлением. При использовании любого метода экспериментально устанавливают режим (время электрополировки или травления, плотность тока и концентрацию реактива, температуру и время отжига и т.д.), при котором полностью снимается наклеп в поверхностном слое образца. [12].

Фактически метод микротвердости – это разновидность метода Виккерса (HV) и отличается от него только использованием меньших нагрузок и соответственно меньшим размером отпечатка. Поэтому физический смысл числа микротвердости аналогичен твердости HV. Для гомогенных однофазных материалов с крупным зерном  $H_{\mu} \sim HV$ . Часто наблюдаемые отклонения от этого равенства, особенно в области  $F < 0,05 - 0,1$  Н, объясняются в основном большими погрешностями измерения микротвердости. Источники этих погрешностей – вибрации, инструментальные ошибки в измерении длины диагонали отпечатка, неидентичность условий ручного нагружения, искажения структуры поверхностного слоя и др. По мере уменьшения нагрузки все погрешности возрастают. Поэтому не рекомендуется работать с нагрузками, которые дают отпечатки с  $d < 8 - 9$  мкм.

Принцип действия приборов основан на статическом вдавливании алмазного пирамидального наконечника Виккерса с последующим измерением длин диагоналей восстановленного отпечатка. На основе средней длины диагоналей отпечатка вычисляется твердость по Виккерсу.

Приборы представляют собой стационарное средство измерений, состоящее из устройства приложения нагрузки, рабочего столика для

размещения образцов и измерительного оптического блока. Приборы поставляются с автоматической револьверной головкой, на которую могут быть установлены 2 наконечника и 4 объектива. Окуляр имеет увеличение 10. В стандартной поставке прибор комплектуется наконечником Виккерса и двумя объективами, обеспечивающими общее увеличение 100 и 500. Подсветка осуществляется галогеновой лампой. Модификация FM800 имеет большие возможности по статистической обработке и хранению результата измерений (рисунок 11).

Микропроцессор твердомера позволяет задавать параметры измерительного цикла и автоматически вычисляет числа твёрдости на основе среднего измерений длины диагоналей отпечатка. Сенсорной панель предназначена для ввода информации и отображения результатов измерений.

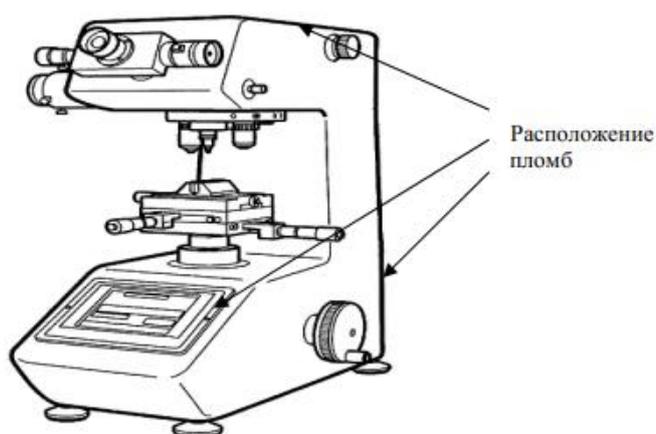


Рисунок 11 – Внешний вид микротвердомера FM–800 и места расположения пломб.

Программное обеспечение поддерживает функции по заданию параметров измерений согласно фиксированной блок схеме, используется также для статистической обработки результатов измерений, позволяет хранить в памяти до 1000 измерений, менять единицы измерения, производить пересчет результатов.

### 3 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАЗДЕЛ

Исследовали образцы листового материала толщиной 14 мм, изготовленного из трубной стали класса прочности K52. Для исключения влияния сварочного нагрева на образование внутренних дефектов из готовой трубы вырезались образцы на разном расстоянии от сварного шва: 20, 40 и 60 мм, дополнительно исследовались сами сварные швы. Структуру сплавов, после травления 4-% раствором азотной кислоты в этиловом спирте методами оптической и сканирующей электронной микроскопии.

Оптическая металлография проводилась на микроскопе Axio Observer D1m, оснащенного программой для анализа изображений Thixomet.Pro. Состав микрообъемов сплавов этих образцах определяли на растровом микроскопе JEOL JSM-6460LV с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа Oxford Instruments Inca Energy. Измерение твердости элементов структуры проводилось на микротвердомере FM-800 при нагрузке 300 г.

#### 3.1 Исследование микроструктуры на оптическом микроскопе

Плавка №Z76279, номер трубы 1014-1015

Для исключения влияния сварочного нагрева на появление внутренних дефектов в листах, предварительно проводилось исследование сварных швов. Результаты исследования показали, что ширина зоны термического влияния сварного шва составляет 4-5 мм. Следовательно, нагрев при сварке не мог спровоцировать появление дефектов. Все исследуемые образцы листового материала имеют идентичную феррито-бейнитную структуру. Характерный вид микроструктуры показан на рисунке 1. Видно, что структура металла неоднородна, размер ферритного зерна колеблется от 9,5 до 12 балла (по ГОСТ 5639-82). Кроме того, отмечена полосчатость структуры 4 балла (по ГОСТ 5640-68).

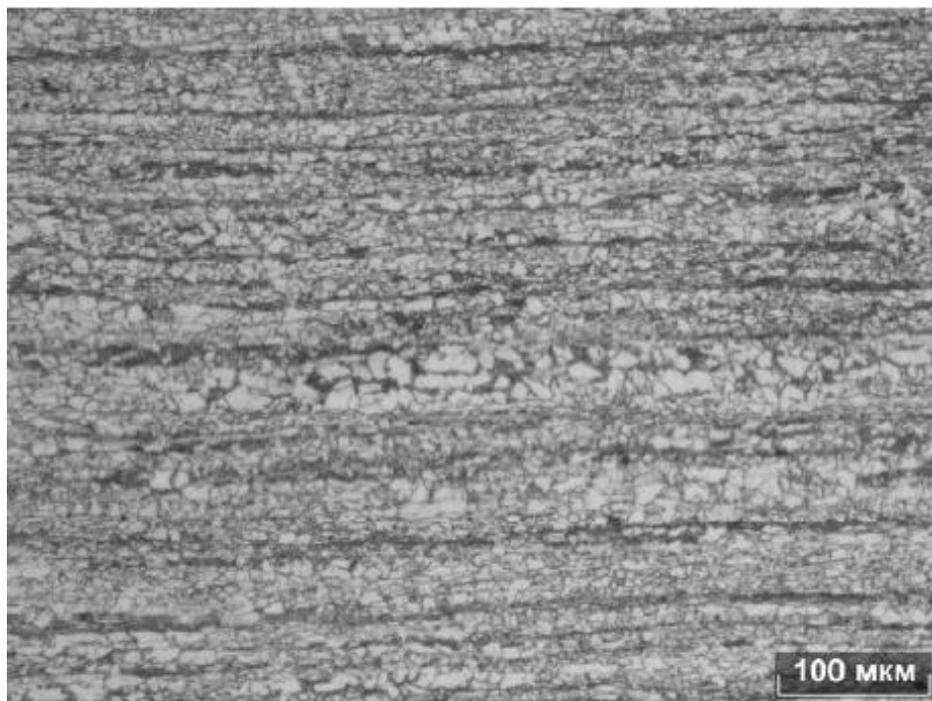


Рисунок 12 – Микроструктура образца 1-1, x200

В осевой зоне образца 1–1 имеется участок структурной неоднородности с микротрещиной, частицами карбида ниобия (рисунок 13) и строчечными сульфидами (рисунок 14):

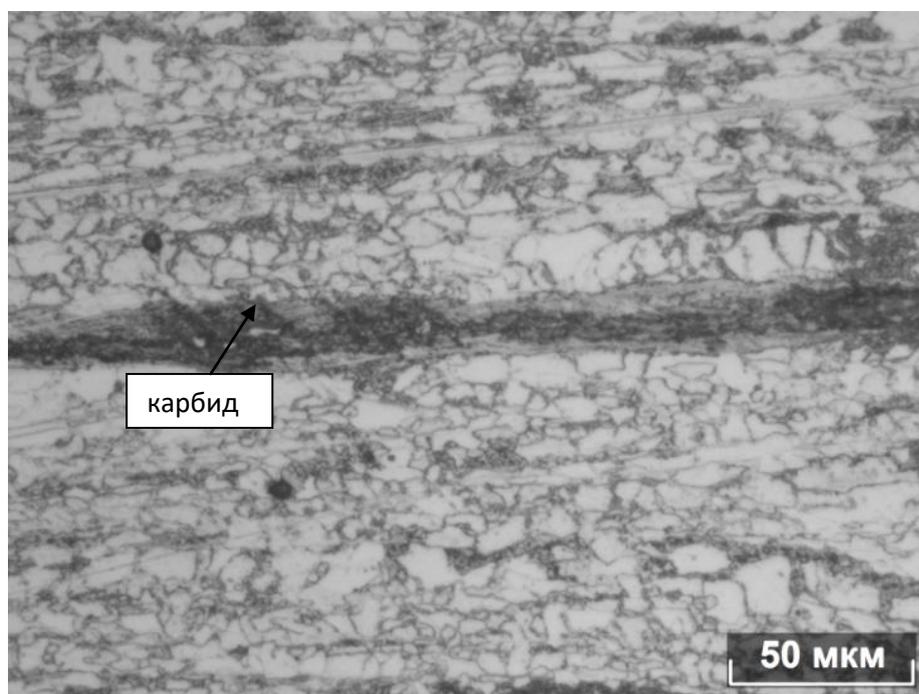


Рисунок 13 – Структурная неоднородность в образце 1-1 с включениями карбидов, x500

Таблица 4 – Состав карбидов:

Спектр	C	Si	Ti	Mn	Fe	Nb	Итого
Спектр 3	11.19		2.20		3.76	82.85	100.00

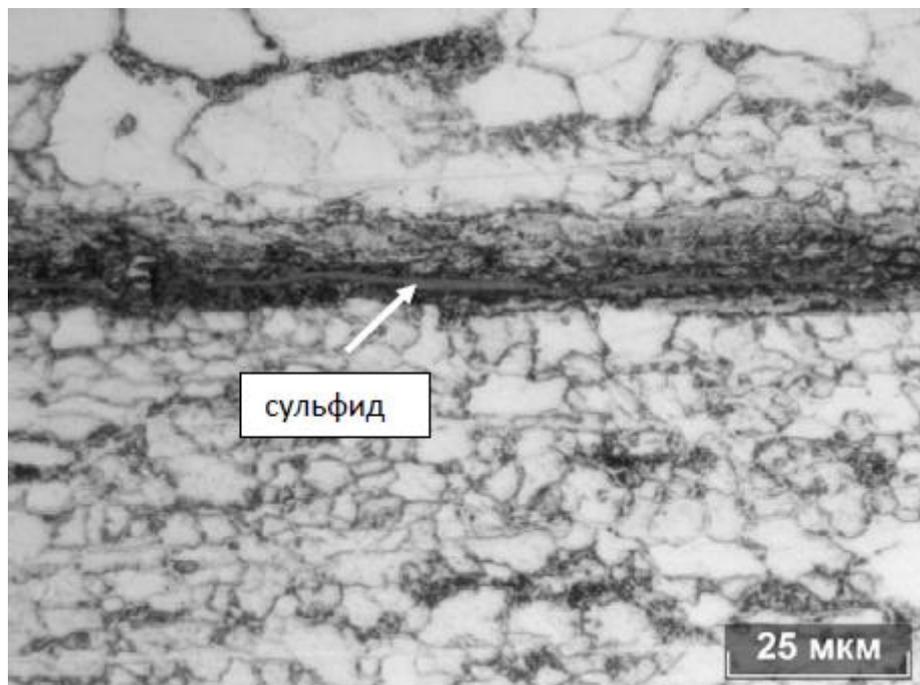


Рисунок 14 – Структурная неоднородность в образце 1-1 со строчечным сульфидом, x500

Общий вид микроструктуры образца 1-2 (продольный шлиф 80 мм от линии сплавления шва) показан на рисунке 15:

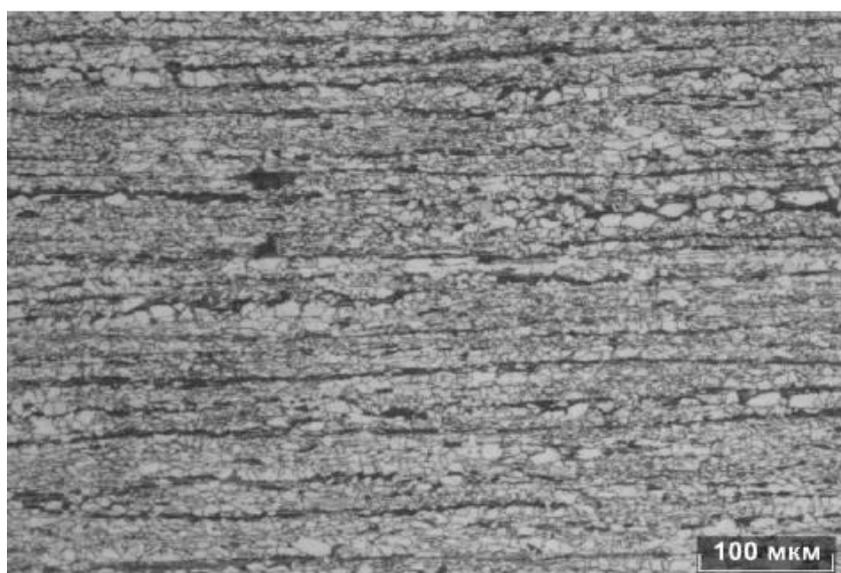


Рисунок 15 - Микроструктура образца 1-2, x20

Микроструктура металла феррито-бейнито-перлитная, полосчатость структуры 4 балла (ГОСТ 5640), наблюдается разнорзернистость структуры (от 9,5 до 12 балла по ГОСТ 5639). Явной структурной неоднородности в осевой зоне листа на образце 1–2 не обнаружено, встречаются лишь небольшие по протяженности участки (рисунок 16):

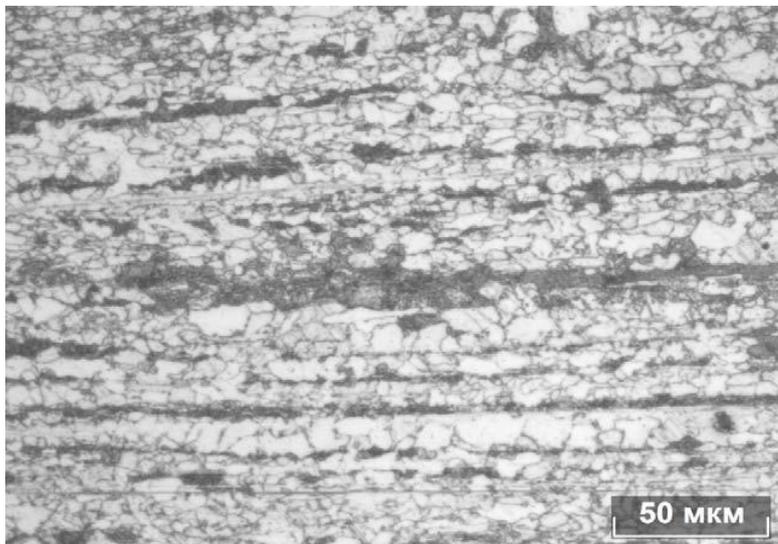


Рисунок 16 - Участок структурной неоднородности в образце 1-2, х500

Плавка №Z76277, номер трубы 1074-1075

Исследование сварного соединения. На рисунке 17 показана панорама участка ЗТВ сварного шва. Глубина ЗТВ в образце составляет порядка 4,5-5 мм. Структура основного металла листа трубы феррито-перлитно-бейнитная, балл зерна 12 с отдельными участками крупных зерен 10 балла (по ГОСТ 5639), полосчатость структуры 4 балла по ГОСТ 5640 (рисунок 18). Несплошностей в основном металле листа трубы и сварном шве не обнаружено:

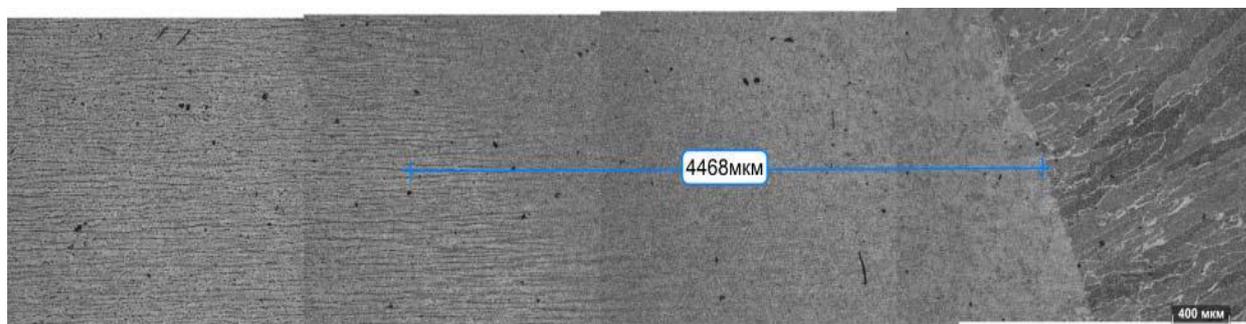


Рисунок 17 – ЗТВ сварного шва, х50

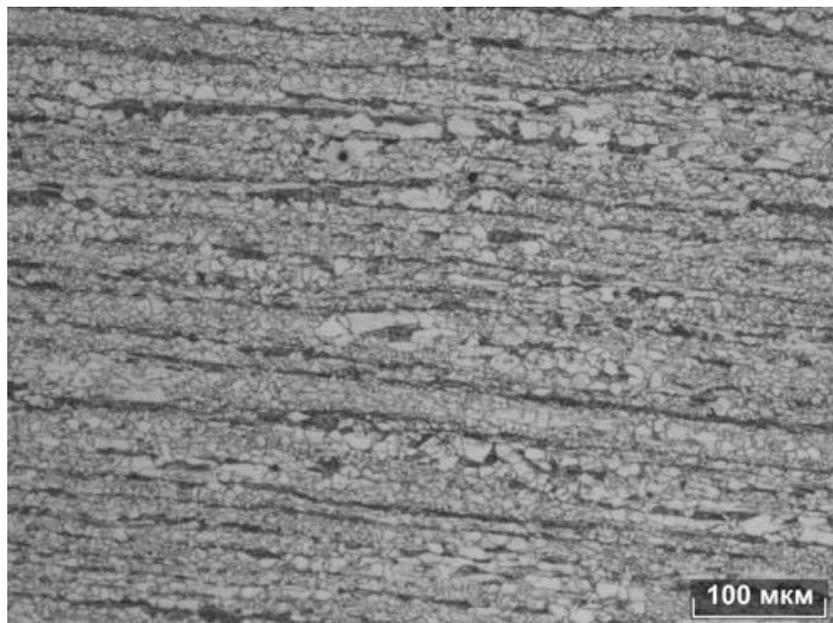


Рисунок 18 – Основной металл сварного шва, х200

Исследование образцов трубы. Образец 2-4 - продольный шлиф. Исследуемая поверхность на расстоянии 20 мм от линии сплавления. Полосчатость структуры 4 балла (ГОСТ 5640). Разнозернистость структуры от 9,5 до 12 балла по ГОСТ 5639 (рисунок 19):

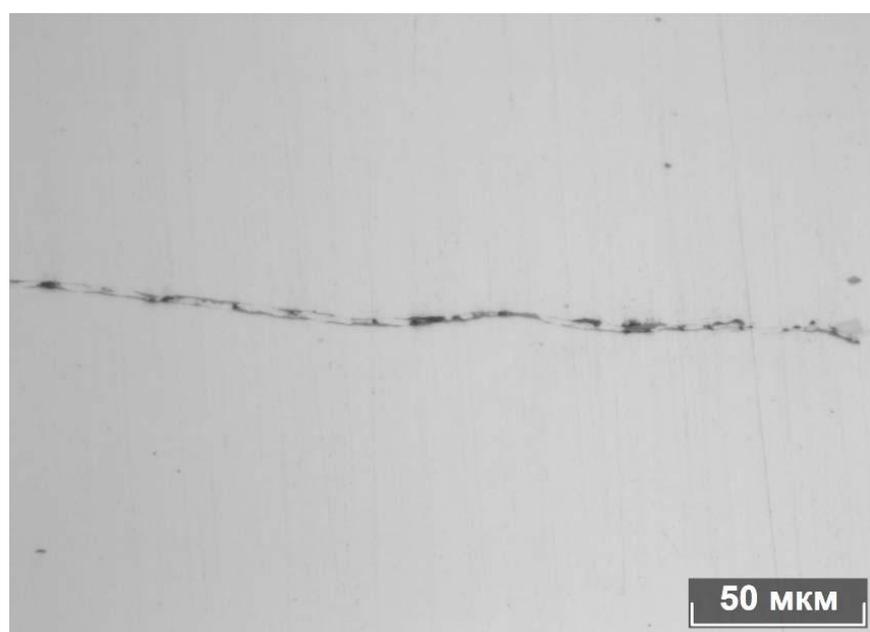


Рисунок 19 – Микроструктура образца 2-4

В осевой зоне металла листа имеется участок структурной неоднородности, видимый на нетравленном шлифе в виде микротрещины, которой располагаются карбиды ниобия и строчечные сульфиды (рисунок 20).

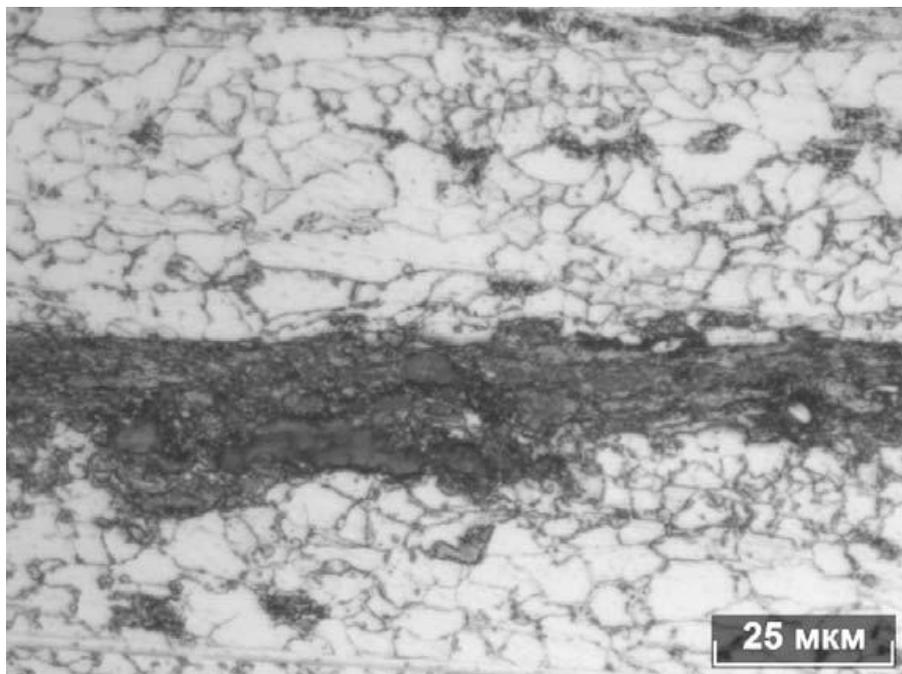


Рисунок 20 – Участок структурной неоднородности на средней линии листа, x500

Образец 2–1 (поперечный шлиф. 20–60 мм от линии сплавления). Полосчатость структуры 4 балла (ГОСТ 5640). Разнозернистость структуры от 9,5 до 12 балла (ГОСТ 5639). В осевой зоне (средняя линия) металла листа имеется участок структурной неоднородности (рисунок 21). Однако в отличие от образца 2–4, структурная неоднородность на осевой линии встречается фрагментарно.

В полосе структурной неоднородности встречаются карбиды ниобия (рисунок 22). Микроструктура металла феррито- бейнито-перлитная. Твердость структуры у поверхности листа составляет 214–224 НВ, в обнаруженной в осевой зоне структурной неоднородности 265–270 НВ.

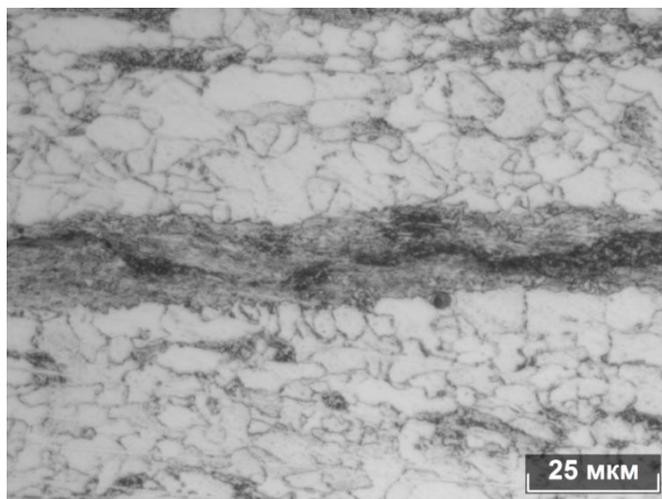
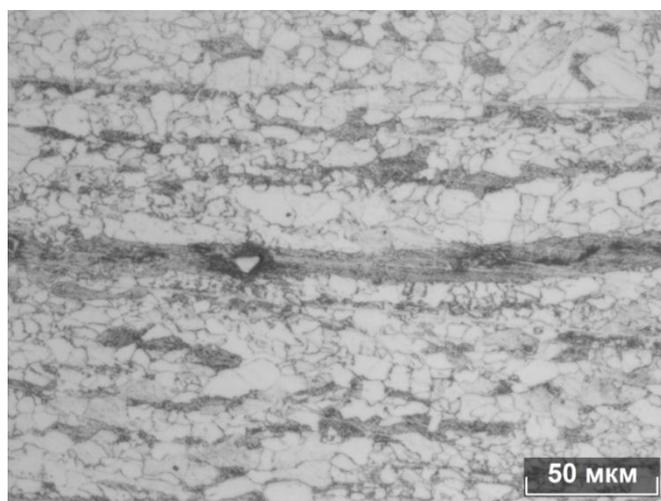
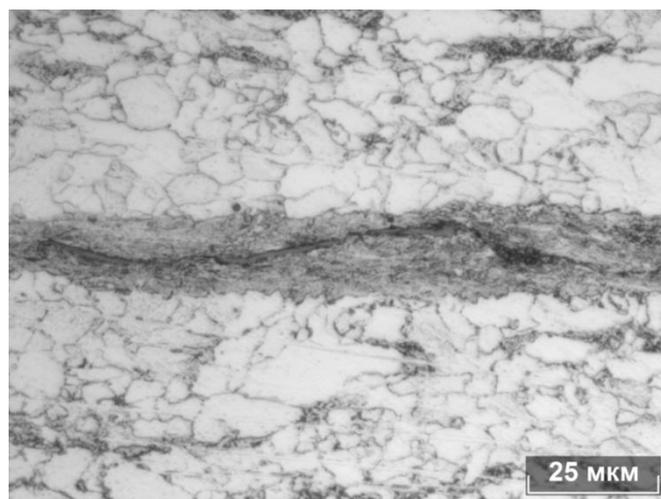


Рисунок 21 – Структурная неоднородность на средней линии листа (образец 2-1), x1000



а – карбид ниобия, x500



б – строчечный сульфид в микротрещине, x1000

Рисунок 22 – Структурная неоднородность на средней линии листа (образец 2-1)

Образец 2–5 (продольный шлиф. 60 мм от линии сплавления). Структура образца 2–5 феррито-бейнито-перлитная. Как и в предыдущих образцах наблюдается разнотерность, балл зерна меняется от 9,5 до 12 (ГОСТ 5639), полосчатость структуры по ГОСТ 5640 – 4–5 балла (рисунок 23). Участка с явно выраженной структурной неоднородностью вдоль осевой линии листа на образце не обнаружено.

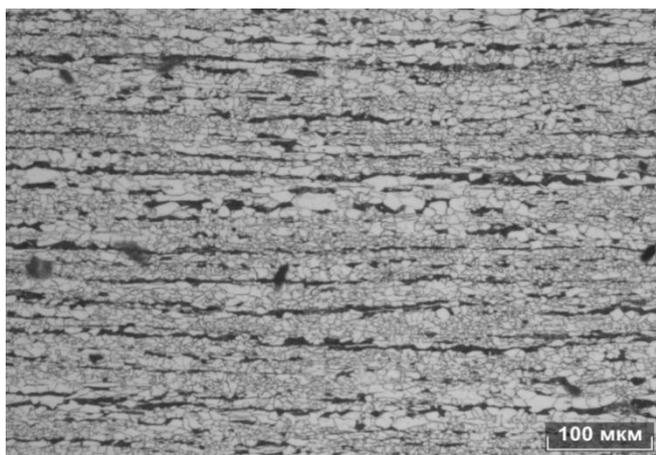


Рисунок 23 – Микроструктура образца 2–5, x200

Плавка №Z76278, номер трубы 828– 833

Исследование сварного соединения. На рисунке 29 показана панорама участка ЗТВ сварного шва. Глубина ЗТВ в образце составляет порядка 4,5-5 мм. Структура основного металла листа трубы (рисунок 25) феррито-перлитно-бейнитная, балл зерна 12 с отдельными участками крупных зерен 10 балла (по ГОСТ-5639), полосчатость структуры 4 балла по ГОСТ 5640 (рисунок 24). Несплошностей в основном металле листа трубы и сварного шва не обнаружено.

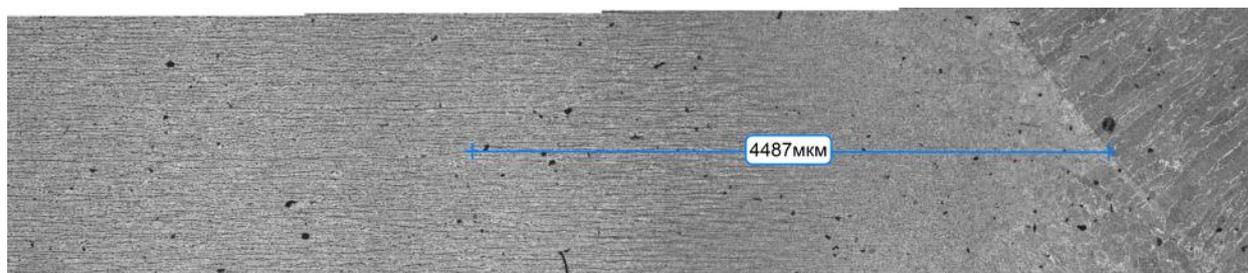


Рисунок 24 - Панорама ЗТВ сварного шва трубы №828-833, x50

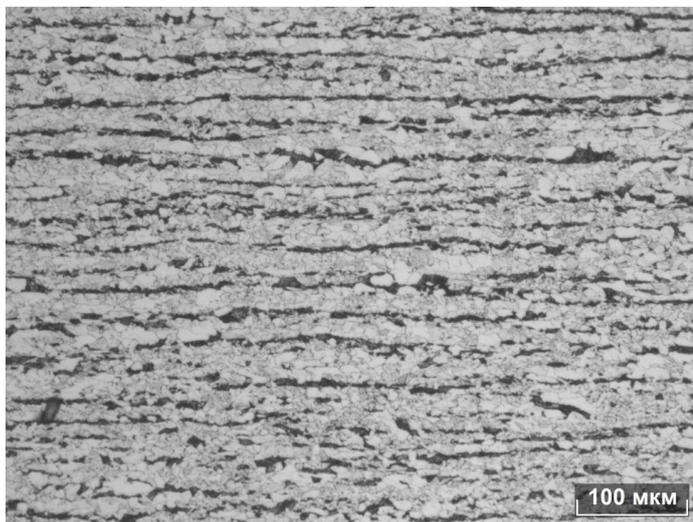


Рисунок 25 - Основной металл сварного шва, х200

Исследование образцов трубы. Образец 3-1 (поперечный шлиф. 20-60 мм от линии сплавления шва). Полосчатость структуры 4 балла (ГОСТ 5640). Как и в предыдущих образцах наблюдается разноструктурность структуры, балл зерна от 9,5 до 12 по ГОСТ 5639.

В осевой зоне металла листа имеется несколько характерных участков структурной неоднородности, расположенных на расстоянии порядка 700 мкм друг от друга (рисунок 26), линии структурной неоднородности расположены фрагментарно вдоль осевой линии листа (рисунок 27, а, б). Как и в образцах других плавов в полосе структурной неоднородности встречаются карбиды ниобия (рисунок 28).

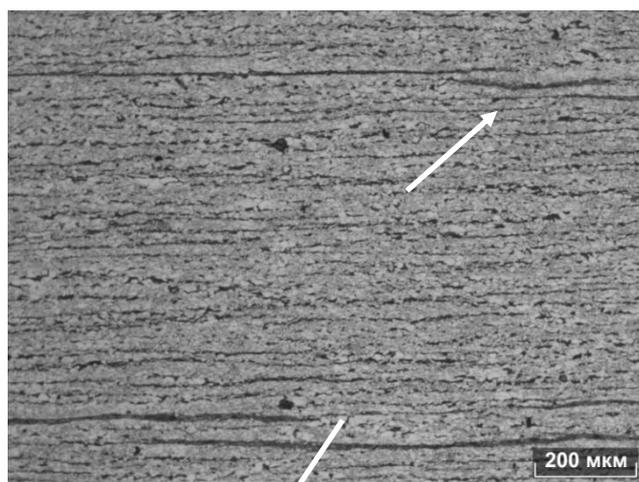


Рисунок 26 – Участки структурной неоднородности в центре листа, х100

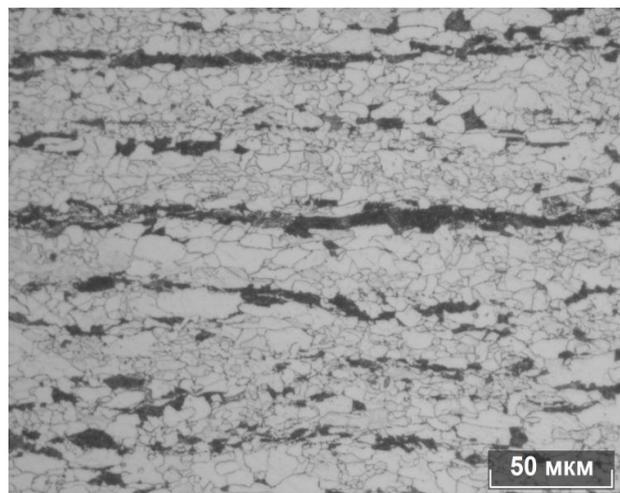
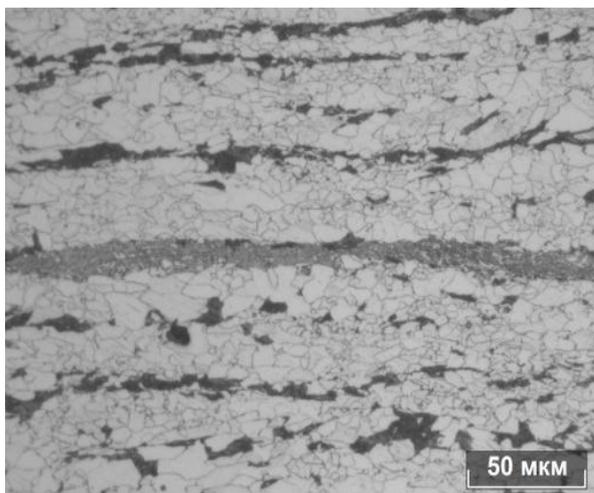


Рисунок 27 – Микроструктура осевой линии образец 3-1, x500: а – со структурной неоднородностью, б – без структурной неоднородности

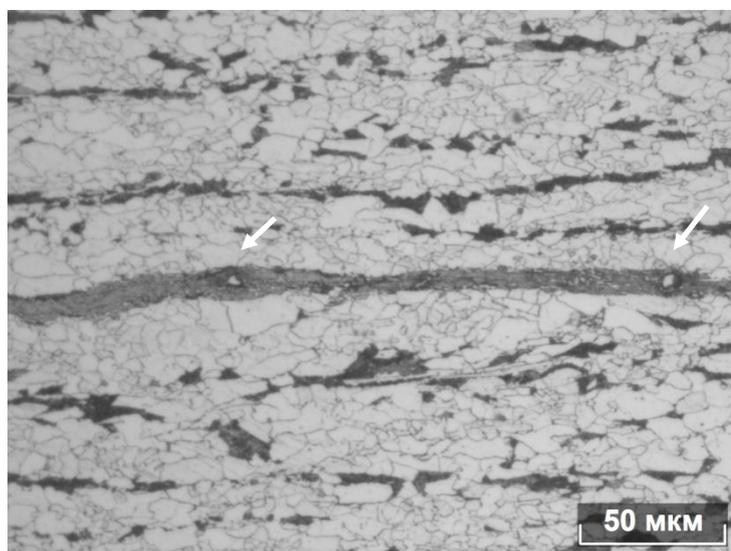


Рисунок 28 - карбиды ниобия в осевой зоне образца 3-1, x500

Микроструктура металла феррито-бейнито-перлитная. Твердость структуры у поверхности листа составляет 214–224 HV, в обнаруженных в осевой зоне участках структурной неоднородности 265-270 HV.

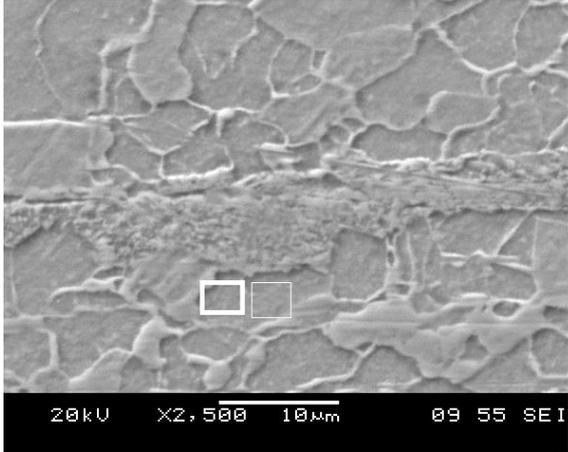
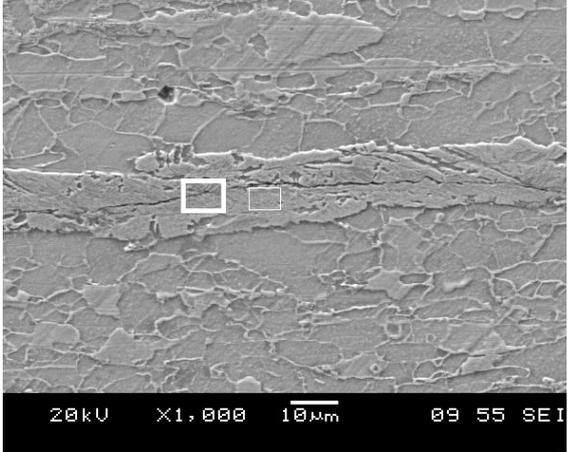
Образец 3–2, 3–3 (продольные шлифы. 20 и 60 мм от линии сплавления шва, соответственно). Микроструктура образцов идентична: феррито-бейнито-перлитная, полосчатость структуры 4 балла, разноструктурность от 9,5 до 12 балла.

### 3.2 Исследование микроструктуры на РЭМ

Плавка №Z76279, номер трубы 1014-1015

На РЭМ анализировался состав ферритных и бейнито-перлитных полос по толщине листа образца 1–1 в направлении от осевой зоны к поверхности. Результаты химического анализа и примеры участков химического анализа показаны в таблице 4. Результаты анализа свидетельствуют о химической неоднородности элементов структурных составляющих по толщине листа:

Таблица 5 – Химический анализ элементов структуры образца 1–1, масс. %

 <p>20kV X2,500 10µm 09 55 SEI</p>		 <p>20kV X1,000 10µm 09 55 SEI</p>					
Участок анализа ферритной фазы		Участок анализа бейнито-перлитной структуры					
Спектры в таблице № 2,3, 5, 7, 9, 10		Спектры в таблице № 1, 4, 6, 8, 10					
Спектр	C	Si	Ti	Mn	Fe	Nb	Итог
Спектр 1		0.94		2.96	96.10		100.00
Спектр 2		0.51		1.64	97.86		100.00
Спектр 3		0.46		1.59	97.95		100.00
Спектр 4		0.56		1.67	97.77		100.00
Спектр 5		0.62		1.77	97.61		100.00
Спектр 6		0.60		1.97	97.43		100.00
Спектр 7		0.46		1.78	97.76		100.00
Спектр 8		0.53		1.69	97.78		100.00
Спектр 9		0.51		1.56	97.92		100.00
Спектр 10		0.47		1.84	97.69		100.00
Спектр 11		0.50		1.70	97.80		100.00

Плавка №Z76277, номер трубы 1074-1075

При исследовании на РЭМ установлено, что участок структурной неоднородности несколько отличается по химическому составу от остальных участков. На рисунке 29 и 30 показаны участки химического анализа и спектры:

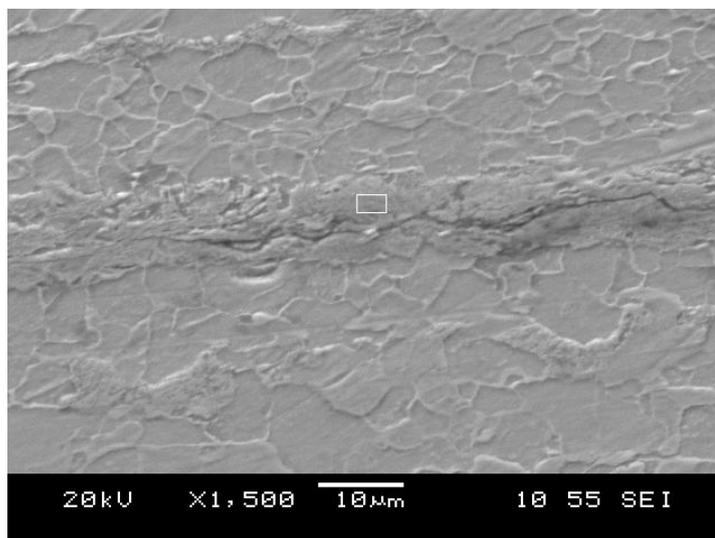


Рисунок 29 – Участок структурной неоднородности

Таблица 6 - Химический состав участка структурной неоднородности мас. %:

спектр	Si	Mn	Fe
Спектр 10	0.74	2.61	96.66

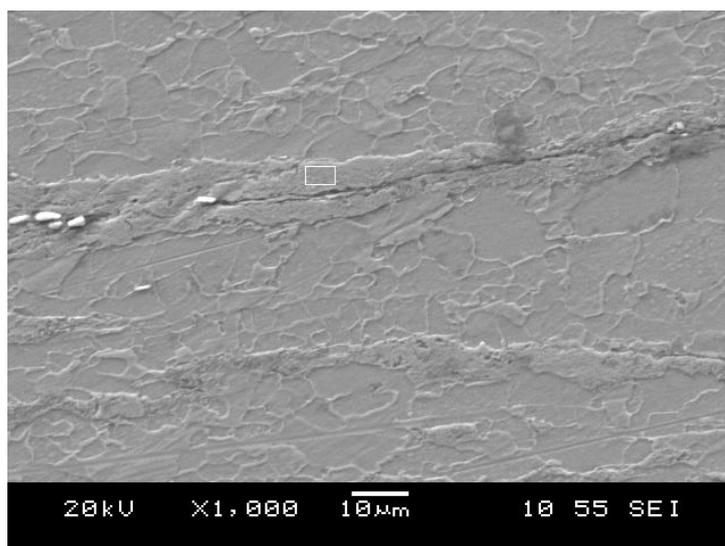
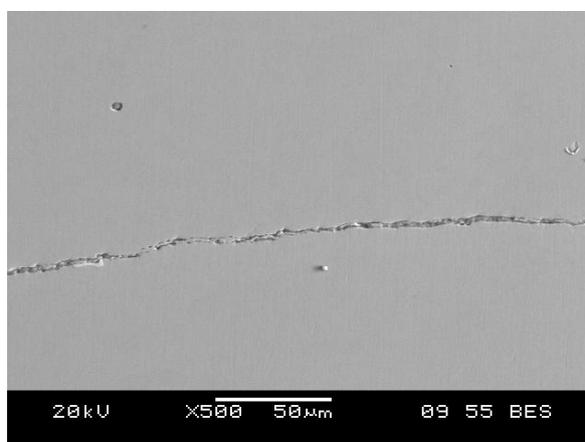


Рисунок 30 – Участок структурной неоднородности

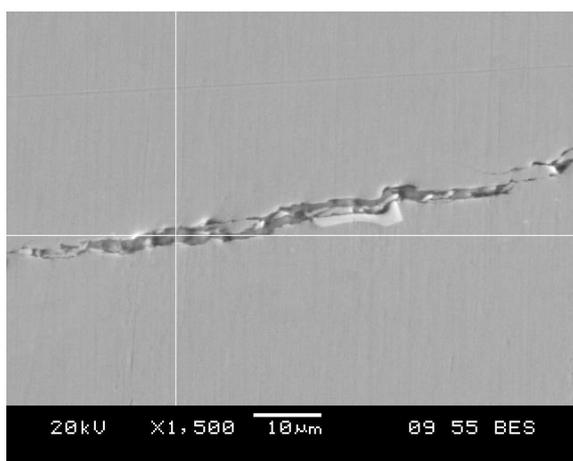
Таблица 7 - Химический состав участка структурной неоднородности, мас. %:

спектр	Si	Mn	Fe
Спектр 12	0.92	2.46	96.62

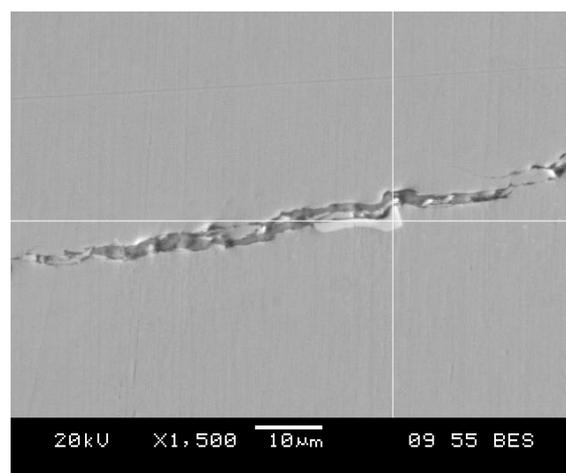
Участки с бейнитной структурой схоже состава встречаются не только вдоль оси листа, но и в других участках (рисунок 31), хотя в целом для строчек с бейнитной структурой вне осевой зоны характерно меньшее содержание марганца и кремния (рисунок 32). Существенным отличием полосы структурной неоднородности в осевой зоне является наличие выделений карбида ниобия (рисунок 30, светлые частицы в полосе).



а – общий вид осевой трещины



б – сульфид в трещине(спектр 3)

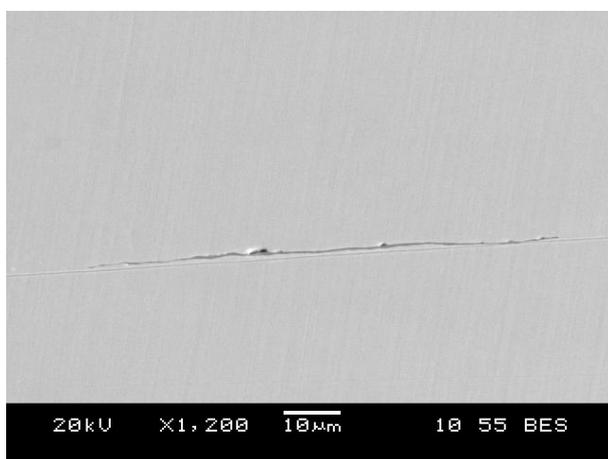


в – карбид ниобия (спектр 4)

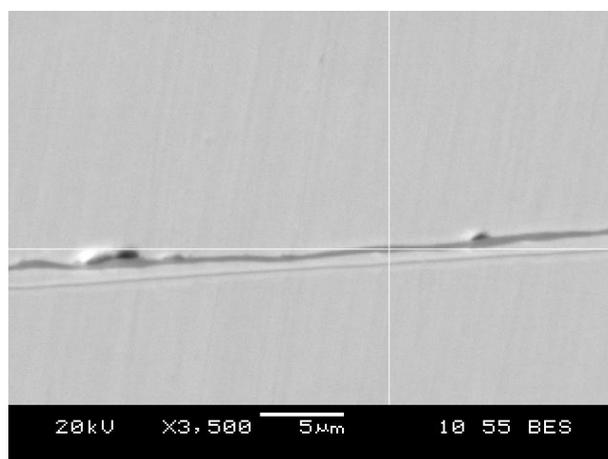
Рисунок 31 – Общий вид микротрещины вдоль оси листа (а) и ее фрагменты (б, в)

Таблица 8 - Химический состав участка структурной неоднородности, мас. %:

Спектр	C	S	Ti	Mn	Fe	Nb
Спектр 3	23.29		44.89	31.82		100.00
Спектр 4		6.07		4.84	77.82	100.00



а – общий вид



б - фрагмент

Рисунок 32 – Сульфидное включение вдоль оси листа

Таблица 9 – Состав включения:

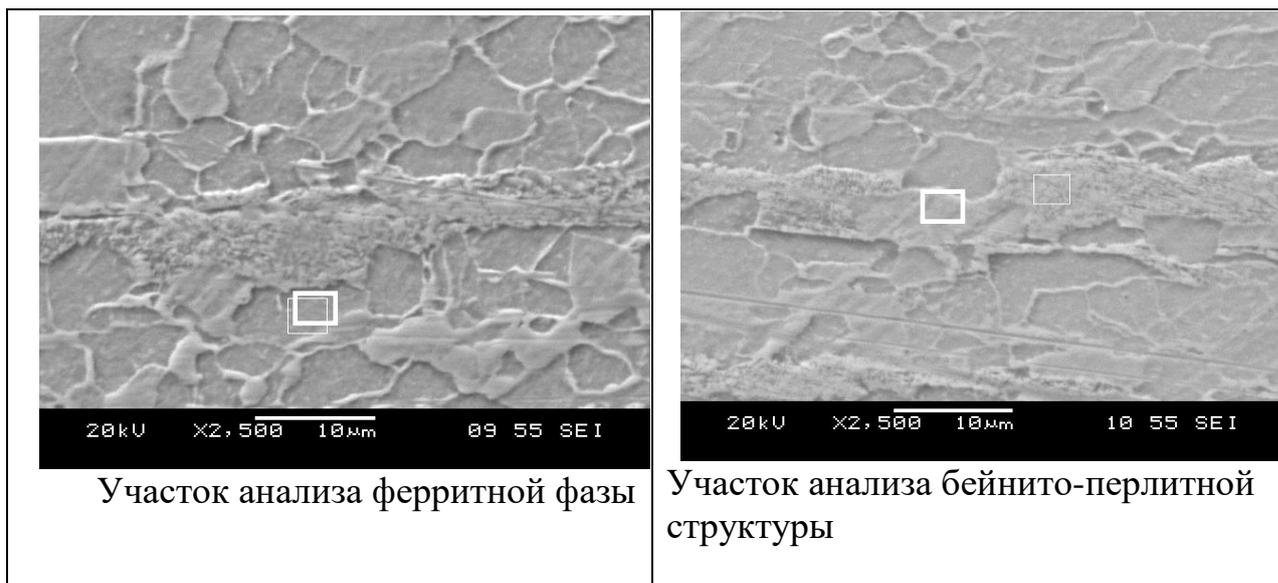
Спектр	S	Mn	Fe	Итог
Спектр 1	11.99	26.79	61.22	100.00

Исследование шлифов на электронном микроскопе показывает, что несплошность в осевой зоне – микротрещина, в которой располагаются карбиды ниобия и строчечные сульфиды. Фото трещины и спектры включений показаны на рисунке 31. Так же строчечные сульфидные включения встречаются и вне осевой линии (рисунок 32).

Плавка №Z76278, номер трубы 828–833

На РЭМ исследовался состав ферритных и бейнито-перлитных полос по толщине листа образца 3–3. Результаты химического анализа и примеры участков химического анализа (в направлении от оси листа к поверхности) показаны в таблице 10. Результаты анализа свидетельствуют о химической неоднородности элементов структурных составляющих по толщине листа:

Таблица 10 – Химический анализ элементов структуры образца 3–3, масс. %



Участок анализа ферритной фазы

Участок анализа бейнито-перлитной структуры

Спектры в таблице № 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 17, 19, 21

Спектры в таблице № 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 18, 20

Спектр	Si	Mn	Fe	Итого
Спектр 1	0.64	1.82	97.53	100.00
Спектр 2	0.56	1.31	98.13	100.00
Спектр 3	0.60	1.85	97.55	100.00
Спектр 4	0.61	1.64	97.75	100.00
Спектр 5	0.70	1.85	97.44	100.00
Спектр 6	0.48	1.81	98.01	100.00
Спектр 7	0.71	1.97	97.31	100.00
Спектр 8	0.50	1.02	97.48	100.00
Спектр 9	0.52	1.55	97.94	100.00
Спектр 10	0.49	1.78	97.73	100.00
Спектр 11	0.70	1.80	97.50	100.00
Спектр 12	0.59	1.59	97.83	100.00
Спектр 13	0.54	1.81	97.65	100.00
Спектр 14	0.41	1.74	97.86	100.00
Спектр 15	0.65	1.68	97.67	100.00
Спектр 16	0.42	2.01	97.58	100.00
Спектр 17	0.53	1.72	97.75	100.00
Спектр 18	0.47	1.63	97.90	100.00
Спектр 19	0.46	1.56	97.97	100.00
Спектр 20	0.59	1.55	97.86	100.00
Спектр 21	0.57	1.47	97.97	100.00

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования свидетельствуют:

1. Материал труб не соответствует требованиям ТС 13657842-455-2016 по таким показателям как полосчатость структуры (по ТС не более 3 балла, по факту 4 балл) и микротвердость (по требованиям ТС микротвердость не более 240 HV<sub>10</sub>, по факту в центре листа микротвердость 260-270 HV<sub>10</sub>).

2. Результаты анализа химического состава свидетельствуют о существенной ликвации по толщине листа таких элементов как Mn и Si. Наиболее высоко содержание этих элементов в обнаруженных в осевой зоне листов участков структурной неоднородности.

3. Указанная ликвация на образцах исследуемых плавок проявляется не только в формировании структурной неоднородности повышенной твердости, но и в формировании микротрещины в осевой зоне.

4. На образцах двух плавок в осевых микротрещинах обнаружены карбиды ниобия и строчечные сульфидные включения.

5. На образцах трубы, изготовленной из заготовки плавки Z76278 осевая ликвация выражена не столь явно, неоднородность химического состава структурных составляющих наблюдается по всей толщине листа.

Таким образом, наблюдаемые в осевой зоне образцов участки структурной неоднородности и микротрещины следует отнести к дефектам ликвационного характера, сформировавшимся в процессе изготовления непрерывно-литой заготовки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голиков, И.Н., Дендритная ликвация в сталях и сплавах / С.Б. Масленков, И.Н. Голиков. – М.: Металлургия, 1977. – 224 с.
2. Штадлер, П. Формирование литой структуры и макроликвации в непрерывнолитых слябах / П. Штадлер, К. Хаген, П. Хаммершмид, К.Швердтфегелр // Черные металлы. – 1982. – №9. – С.12-21.
3. Функе, П. Влияние первичной структуры на конечные свойства горячекатанных листов и полос / П. Функе, М. Эльсайед // Черные металлы. – 1988. – №22. – С.53 – 61.
4. Филипов, Е.С. Строение, физика и химия металлических расплавов. / Е.С. Филипов – М.: Металлургия, 1995. – 304 с.
5. Чернов, Д.К. Избранные труды по металлургии и металловедению. / Д.К Чернов – М.: Наука, 1983. – 448 с.
6. Теория и практика непрерывного литья заготовок / А.Н. Смирнов, А.Я. Глазков, В.Л. Пилюшенко и др. – Донецк: ДонНТУ, 2000. – 371 с.
7. Хуанг, Л. Возникновение макроликвации при непрерывной разливке сортовых заготовок / Л. Хуанг, К. Вердфегер // Черные металлы. – 1981. – №3. – С. 19 – 23.
8. Особенности изменения структуры по сечению листового проката из высокопрочных штрипсовых сталей / А.И. Ковалев, Д.Л. Вайнштейн, А.Ю. Рашковский, Е.И. Хлусова, В.В. Орлов // Металлург. – 2011. – №11. – С. 61 – 68.
9. Дюдкин, Д.А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки. / Д.А Дюдкин – Киев: Техника, 1988. – 253 с.
10. Марочник сталей и сплавов: справочник / под ред. А.С. Зубченко, – 2-е изд., - доп. и испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

11. Карева, Н.Т., Лапина. И.В., Ильин. С.И. Термическая обработка сталей и сплавов: Учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. / Н.Т. Карева, И.В. Лапина, С.И. Ильин – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2006- 98 с.
12. Пашкеев, И.Ю. Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ: учебное пособие / И.Ю. Пашкеев, О.В. Самойлова, В.И. Гераскин, Т.М. Лонзингер; под общ. ред. Г.Г. Михайлова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 47 с.
13. Пфанн, В. Дж. Зонная плавка / Дж. В. Пфанн. – М. : Metallurgizdat, 1960 – 272 с.
14. Систематизация критериев комплексной оценки качества непрерывнолитой заготовки / А.Н. Смирнов, В.В. Несвет, А.Я. Глазков и др. // *Металлы и литье Украины*. – 2001. – №709. – С. 32–36.
15. Денисов, С.В. Изменение структуры низколегированной стали в процессе производства / С.В. Денисов, А.Н.Завалищин, Е.В. Кожевникова, М.И.Румянцева // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2013. – №3. – С.51–54.
16. Завалищин, А.Н. Изменение структуры стали К60 на различных этапах технологии производства / А.Н.Завалищин, Е.В. Кожевникова // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского*, 2013. – №2. – С.96-101.
17. Казаков, А.А. Природа дефектов горячекатаного листа из трубных марок стали. Часть 1. Дефекты, имеющие сталеплавильную природу / А.А. Казаков, П.В.Ковалев, Л.С.Чигинцев и др. // *Черные металлы*. – 2007. – № 11. – С. 8-15.