

На правах рукописи

**Ковалев Павел Валерьевич**

**Совершенствование сквозной технологии  
производства холоднокатаного листа на основе  
исследования природы его дефектов**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2006

**Работа выполнена** в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

**Научный руководитель:**

Доктор технических наук, профессор

Казаков Александр Анатольевич

**Официальные оппоненты:**

Доктор технических наук, профессор

Дубровский Сергей Андреевич

Доктор технических наук, профессор

Дурнев Василий Дмитриевич

**Ведущая организация:**

ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2006 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.14 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, химический корпус, ауд. 51.

**С диссертацией можно ознакомиться** в фундаментальной библиотеке в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.14,

доктор технических наук, профессор

Кондратьев С.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Постоянно возрастающие требования, предъявляемые к качеству поверхности холоднокатаного листа, вызывают необходимость совершенствования технологии его производства, которое невозможно без использования современных методов контроля и правильной идентификации обнаруженных дефектов. Однако, как показал анализ литературы и опыта металлургических предприятий, в настоящее время нет полного единства в идентификации этих дефектов на основании их внешних и микроструктурных признаков, а обсуждаемые причины образования дефектов часто противоречивы. В заводской практике существует распространенное мнение о том, что неметаллические включения, найденные в теле дефекта или непосредственно возле него, являются однозначным признаком его сталеплавильной природы, что не всегда отвечает действительности.

Правильное понимание природы дефектов необходимо при разработке систем управления качеством металлопродукции. В настоящее время на современных предприятиях с полным металлургическим циклом достигнут высокий уровень мониторинга параметров технологических процессов. Однако, из-за огромного числа этих параметров выявление тех из них, которые ответственны за возникновение конкретных дефектов, а также построение моделей качества с использованием формальных методов статистики или современных алгоритмов искусственного интеллекта практически невозможно. Поэтому, только на основании однозначно установленной природы дефектов можно указать параметры технологического процесса, ответственные за образование дефектов, и на этой основе построить адекватные модели управления качеством в целом.

Таким образом, правильная идентификация и достоверное определение природы дефектов холоднокатаного листа является неперенным условием совершенствования технологии производства стали и может послужить основой систем управления качеством металлопродукции.

В связи с вышеизложенным, становится понятным **актуальность** проведенной работы, **целью** которой является определение природы поверхностных дефектов холоднокатаного листа для совершенствования сквозной технологии производства от внепечной обработки и разливки стали до холодной прокатки листа.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены **следующие задачи исследования**:

1. разработать методику металлургической экспертизы дефектов холоднокатаного листа;
2. найти или уточнить природу поверхностных дефектов холоднокатаного листа;

3. разработать классификатор дефектов холоднокатаного листа, как основу последующей разработки системы управления его качеством;
4. разработать рекомендации по устранению причин образования дефектов.

### **Научная новизна**

1. Разработана методика металлургической экспертизы дефектов холоднокатаного листа, включающая совместный анализ результатов, полученных при панорамных металлографических исследованиях дефекта с учетом технологических факторов, послуживших причиной его образования, а также с учетом состава неметаллических включений, декорирующих дефект, и результатов термодинамического моделирования процессов фазообразования, протекающих в стали по ходу сталеплавильного передела;
2. Разработан механизм образования в низкоуглеродистой стали неметаллических включений на основе герценита, ответственных за возникновение дефекта “плена”. Показана эволюция этих включений и самого дефекта по ходу всего металлургического передела. Выявлены технологические параметры, ответственные за образование этого дефекта.
3. Установлена сталеплавильная природа и предложен механизм образования поверхностного дефекта “выкрошка”, наследуемого от горячих трещин непрерывнолитой заготовки.
4. Установлено, что наряду с прокатной, имеются и сталеплавильные причины дефекта “черные штрихи”, которые обусловлены взаимодействием кремнезема из огнеупоров или шлака с углеродсодержащими добавками при разливке стали.
5. Показано, что образование светлых полос на поверхности листа вызвано нарушениями технологии пластической обработки стали, а не неметаллическими включениями, как считалось ранее.

### **Практическая ценность**

1. Определены внешние и микроструктурные идентификационные признаки дефектов холоднокатаного листа, послужившие основой для их надежного разделения между сталеплавильным и прокатным производством.
2. Произведена классификация и создан атлас дефектов холоднокатаного листа, принятый к использованию в промышленности.

3. Разработаны рекомендации по совершенствованию сквозной технологии производства холоднокатаного листа для минимизации или устранения причин образования дефектов.
4. Информация о природе дефектов и технологических параметрах, ответственных за их образование, могут послужить основой для разработки системы управления качеством холоднокатаного листа на всех этапах его получения.

### **Апробация работы**

Результаты работы были представлены и обсуждались на XV международной конференции по химической термодинамике в России, Москва, июнь – июль 2005 г.; на первой международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности”, Санкт-Петербург, май - июнь 2005 г; на международной научно-технической конференции “Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов”, Санкт-Петербург, сентябрь 2005 г.; на межвузовских научных конференциях «XXXII неделя науки СПбГПУ» 2003 г. и «XXXIII неделя науки СПбГПУ» 2004 г.

### **Публикации**

Основные положения диссертации опубликованы в 12 печатных работах.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы и 2 приложений. Материалы работы изложены на 185 страницах машинописного текста, содержат 8 таблиц, иллюстрированы 53 рисунками. Список литературы состоит из 133 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи диссертации, а также указаны научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** на основе критического анализа имеющихся публикаций, а также опыта работы ведущих промышленных предприятий рассмотрены дефекты холоднокатаного листа. Показано, что в настоящее время нет полного единства ни в их названиях, ни в описании характерных внешних и микроструктурных особенностей, ни в причинах образования и

возможных способах устранения дефектов. Исходя из этого анализа, показана актуальность работы и сформулированы основные цели и задачи настоящего исследования.

**Во второй главе** описана методика металлургической экспертизы дефектов холоднокатаного листа, включающая панорамные исследования микроструктуры и микрорентгеноспектральный анализ, термодинамическое моделирование процессов фазообразования в стали, а также анализ технологических факторов, послуживших причиной образования дефектов.

В работе исследовали образцы литого металла, отобранные по ходу сталеплавильного производства, наросты погружных стаканов, используемые при непрерывной разливке, темплеты, вырезанные из слябов, а также горячекатаный подкат и более 100 дефектных образцов холоднокатаного листа из сталей 08Ю, 08КП, 08ПС, 01ЮТ, DC01, DC03, DC04, DC05. Кроме того, как возможные источники дефектов, исследованы абразивные материалы, используемые для зачистки поверхности рабочих прокатных валков и слябов, шлам после зачистки валков, а также поверхность рабочих валков станов горячей и холодной прокатки.

Для выявления морфологии и характера расположения поверхностных дефектов холоднокатаного листа была разработана оригинальная методика подготовки шлифов с использованием современного оборудования для пробоподготовки фирмы “Buehler”. Для металлографических исследований методами оптической металлографии использовали микроскоп Nikon Epihot, оснащенный анализатором изображения “Thixomet”, который позволяет изготавливать сколь угодно большие по площади панорамы изображений, охватывающие полностью весь макродефект, но с высоким разрешением, достаточным для правильного распознавания всех неметаллических включений, сопровождающих этот дефект. Поэтому панорамные исследования послужили основой не только правильной идентификации неметаллических включений, но и оценки их роли в образовании и развитии дефектов холоднокатаного листа.

Микрорентгеноспектральный анализ проводился на микроскопе REM ABT-55 (AKASHI), оснащенный микрозондом Link AN 10000/85S(GB), и микроскопе CamScan MV2300D SEM, который позволяет проводить количественный анализ не только металлической составляющей включений, но и кислорода, углерода и азота. Программное обеспечение этих микроскопов, настроенное с помощью соответствующих эталонов, позволило рассчитывать массовые концентрации элементов в составе неметаллических включений, что дало возможность однозначно оценить их стехиометрический состав. Определен состав более 500 различных неметаллических включений, найденных во всех исследованных образцах.

Термодинамическое моделирование, как инструмент исследования, был использован для анализа природы сталеплавильных дефектов холоднокатаного листа. Результаты термодинамических расчетов представлены в виде диаграмм состояния многокомпонентных многофазных систем, представляющих собой поверхность растворимости компонентов в металле (ПРKM). С использованием оригинального программного обеспечения ChemX и баз термодинамических данных SGTE были проведены расчеты вероятности взаимодействия кварцевых защитных материалов со шлаком в процессе разливки.

Статистический анализ влияния технологических факторов внепечной обработки и разливки на дефектообразование был проведен в программной среде "STATISTICA" с использованием регрессионного анализа, а также современным методом "нечётких моделей", которые в отличие от традиционных статистических методов обладают широкими возможностями для моделирования реальных систем в условиях помех и погрешностей измерения.

**Третья глава** посвящена исследованию качества поверхности холоднокатаного листа. Рассмотрены следующие поверхностные дефекты: "плена", "сквозные разрывы", "черные штрихи", "выкрошка", "светлая полоса без надрыва", "светлая полоса с надрывами", "серая полоса", "вкатанная металлическая частица", "механическое повреждение поверхности листа" и "пятна ржавчины".

**Дефект "плена"** однозначно трактуется как сталеплавильный дефект, однако в литературе отсутствует детальная информация о природе его образования и последующей эволюции по ходу всего металлургического передела от разливки и кристаллизации стали до холодной прокатки листа.

Металлографические исследования поперечного сечения листов, пораженных дефектом "плена", представляющего собой тонкие, чешуйчатые, языкообразные отслоения пластинок металла от поверхности листа, позволили выявить в районе дефекта многослойное распределение неметаллических включений, ответственных за его образование. Результаты микрорентгеноспектрального анализа показали, что включения, декорирующие этот дефект, можно разделить на два типа: мелкие темно-серые оксиды размером 3-10 мкм, состоящие из ~30% Al и ~3% Fe, а также более крупные светлые оксиды размером до 25 микрон, в состав которых входят до 20% Al и столько же Fe. Включения с малым содержанием железа были обнаружены преимущественно в приповерхностных зонах дефекта, тогда как включения с высоким содержанием железа располагались, как правило, дальше от поверхности листа.

Оба типа оксидов, обнаруженных в дефекте холоднокатаного листа "плена", являются продуктами раскисления, образовавшимися на этапе сталеплавильного передела, что

подтверждается близостью их состава и состава неметаллических включений, найденных в образцах, последовательно отобранных по ходу всего металлургического передела стали, начиная от ее выпечки и разлива (рис. 1а), далее из точечной неоднородности на малом радиусе сляба и, наконец, из горячекатаного подката в одноименном дефекте “плена” (рис. 1б), где включения вытянулись в строчки, а в отдельных местах вышли на поверхность листа.

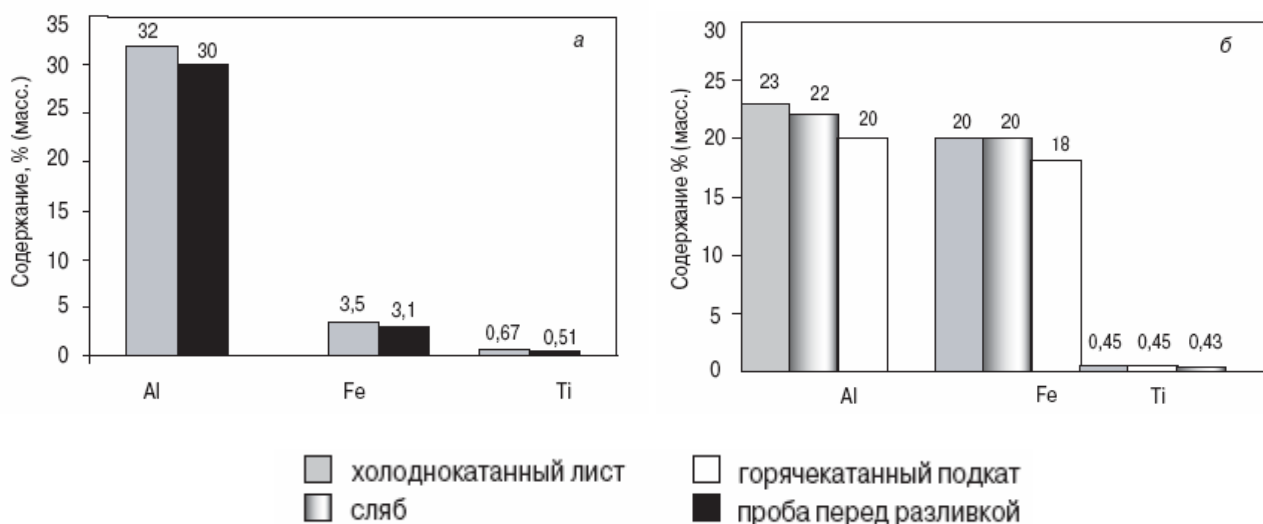


Рис. 1. Сравнительный анализ состава неметаллических включений по ходу металлургического передела стали:

а – включения типа FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (~ 3 % Fe) в холоднокатаном листе и пробе перед разливкой;

б - включения типа FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (~ 20 % Fe) в холоднокатаном листе, слябе и горячекатаном подкате

Как следует из результатов термодинамического расчета равновесия, представленных в виде поверхности растворимости компонентов в металле (рис. 2), фигуративная точка состава, отвечающая реальному составу раскисленной стали, расположена в области существования Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. То есть, при концентрации алюминия 0,01-0,04% в жидкой стали должны образоваться продукты раскисления, состоящие исключительно из чистого Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Однако, в условиях реального производства стали невозможно ввести в нераскисленный расплав алюминий, распределив его равномерно по всему объему мгновенно. Когда алюминий в виде пирамидок или проволоки задается в нераскисленный стальной расплав, в различных локальных точках этого расплава возникают все возможные сочетания концентраций алюминия и кислорода, в том числе попадающие в область существования герценита (рис. 2). Образовавшиеся в перекисленной стали со «следами» алюминия такие включения под действием конвективных



потоков расплава попадают в раскисленный металл, где становятся неравновесными и будут с поверхности восстанавливаться алюминием до соединений типа  $m\text{FeO}\cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$ . Массообменные процессы на поверхности неравновесных в раскисленном металле включений  $m\text{FeO}\cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$  обеспечивают их значительную адгезию к расплаву, поэтому такие включения трудно удалить из металла в отличие от включений, образовавшихся в раскисленном металле и имеющих состав чистого  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Кроме того, чем больше оксида железа останется в составе включений  $m\text{FeO}\cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$  и чем больше размер исходного включения герценита, тем медленнее он восстанавливается до корунда и тем устойчивее в расплаве.

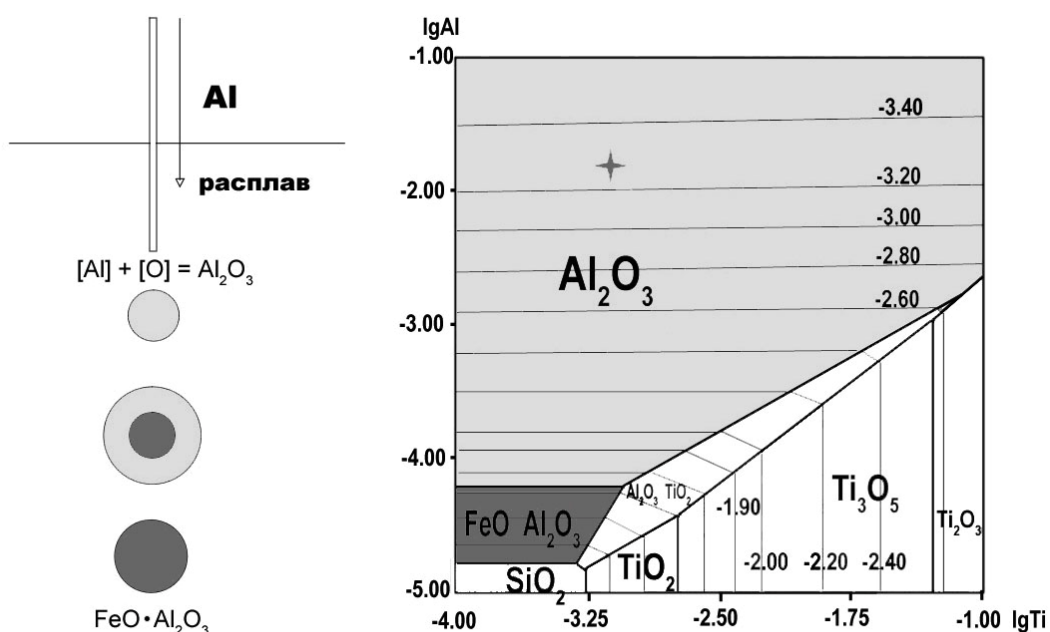


Рис.2. Механизм образования неметаллических включений в стали системы  $\text{FeO}\text{-Al}_2\text{O}_3$

Необходимо отметить, что в результате оценки загрязненности стали неметаллическими включениями по ASTM E 1245 было установлено снижение их содержания по ходу выпечной обработки вплоть до 0,0006..0,0013 об.% в пробе, отобранной из кристаллизатора, что практически совпадает с результатами, полученными при моделировании процессов образования неметаллических включений в жидком и затвердевающем расплаве, проведенных в рамках принципов локально-равновесной термодинамики: 0,0006..0,0010 об. %. В связи с этим можно сделать вывод о достаточно полном удалении основной массы первичных неметаллических включений при существующей технологии выпечной обработки стали. В пользу этого вывода говорит и состав включений в пробах металла на разливке, где обнаружены только мелкие включения с небольшим содержанием оксидов железа. В этих исследованиях не удалось зафиксировать крупных

первичных включений с повышенным содержанием оксидов железа в пробах перед разливкой (рис. 1а), однако они все же остаются в жидком металле, так как такие включения были обнаружены в точечной неоднородности сляба и в дефекте “плена” при последующем переделе стали при горячей и холодной прокатке (рис. 1б). Более того, скопления оксидов алюминия с повышенным содержанием оксидов железа были найдены в большом количестве в корольках металла, захлопнутых в наростах на поверхности погружного стакана, подводящего стальной расплав в кристаллизатор МНЛЗ.

Исследования наростов погружных стаканов показали, что корундовые включения, поглощенные шлаком, практически не содержат железа, тогда как включения на основе корунда в захваченных корольках металла наряду с единичными включениями практически чистого корунда, содержат большое число включений на основе герценита. Это еще одно свидетельство того, как трудно удалить герценитоподобные включения из стали из-за их хорошей смачиваемости последней. Отметим, что корольки металла замкнуты в довольно грубой оболочке оксидов железа, что свидетельствует о наличии вторичного окисления при разливке.

Необходимо отметить, что главным источником частиц корунда, прилипающих к стенкам стакана, являются продукты раскисления, а также продукты вторичного окисления расплава. Непосредственно у поверхности стакана из-за трения стальной поток затормаживается. Частицы корунда, попадающие в этот практически неподвижный поверхностный слой, выходят на границу с огнеупором. Так как смачивание частицы  $Al_2O_3$  жидкой сталью невелико, а адгезия между включением и огнеупором значительна, включения будут удерживаться на внутренней поверхности стакана. В результате такого взаимодействия частиц корунда между собой и с огнеупором происходит высокотемпературное спекание включений с образованием наростов, уменьшающих живое сечение стакана и тормозящих стальной поток. Учитывая вышеприведенные исследования состава наростов на поверхности погружных стаканов, можно добавить, что частицы шлакообразующих смесей, захваченные при разливке, а также ошлакованные этими смесями продукты раскисления, являются активными участниками формирования этих наростов. Достигнув значительных размеров, наросты уже не могут сопротивляться набегающему потоку расплава и сформировавшиеся скопления частиц корунда в определенный момент времени отрываются от стенок стаканов и уносятся потоком в металл, образуя точечную неоднородность вблизи малого радиуса сляба. В дальнейшем скопления неметаллических включений в точечной неоднородности при пластической деформации металлической матрицы дробятся и выстраиваются в виде строчек в направлении прокатки, образуя многослойную структуру дефекта “плена”.

Исследование технологических параметров плавки, в которых на поверхности холоднокатаного листа был обнаружен дефект “плена” показало, что количество алюминия, введенного в жидкую сталь на разных этапах сталеплавильного передела, значительно превышает значения, указанные в технологических инструкциях и заметно больше присадок алюминия в других плавках, не пораженных дефектом “плена”. Вероятность образования дефекта “плена” повышается, когда суммарное содержание присаженого в сталь алюминия превышает критическое значение, причем, чем больше алюминия вводится в жидкую сталь на всех этапах сталеплавильного передела, тем больше неметаллических включений обнаруживается в самом дефекте, тем сложнее его морфология и грубее внешний вид. Повышенный расход алюминия на различных этапах сталеплавильного передела приводит к увеличению количества продуктов раскисления, которые при разливке приводят к зарастанию сталеразливочного и погружного стаканов. Данный факт подтверждается повышенными значениями окисленного в процессе разливки алюминия в плавках, пораженных дефектом “плена” (до 0,051%), тогда как в плавках без “плены” это значение не превышает 0,005-0,010%. На основании проведенного анализа технологических параметров внепечной обработки и разливки были определены значимые факторы, ответственные за образование дефекта “плена”: перегрев металла над температурой ликвидус, количество алюминия, окислившегося при разливке (вторичное окисление) и расход алюминия на тонну стали.

**Дефект “сквозные разрывы”.** Природа данного дефекта, представляющего собой сквозные несплошности металла в виде крупных разрывов поверхности листа с расходящимися в разные стороны от них рваными лучами, аналогична “плене” и связана со скоплениями неметаллических включений, залегающих в непосредственной близости от поверхности проката. Эти строчечные неметаллические включения, декорирующие дефект, относятся к системе  $FeO - Al_2O_3$  и представляют собой образовавшиеся на этапе сталеплавильного передела продукты раскисления стали алюминием.

**Дефект “черные штрихи”.** Наименование дефекта “черные штрихи” весьма условно, так как в заводской практике один и тот же дефект может называться в зависимости от его размеров и как “черные мазки”, и как “черные пятна”. Чаще всего это пятна сажи, эмульсии и масла, загрязненные оксидами железа или продуктами износа валков. Иными словами этот дефект, как правило, прокатного происхождения, однако встречаются “черные штрихи”, образовавшиеся на этапе сталеплавильного производства.

Дефект имеет сложное многослойное строение, а на его поверхности найдены остатки выгоревшей эмульсии, а также включения оксидов железа, карбидов и оксидов кремния. Для поиска причин образования этого дефекта были исследованы технологические параметры

соответствующих плавков. Из анализа этих данных следует, что в ряде исследованных плавков, пораженных этим дефектом, использовался погружной стакан из кварца, а в остальных плавках, как и в некоторых плавках первой группы, отмечено введение в сталеразливочный ковш карбида кремния, используемого для раскисления шлака. Таким образом, в исследованных плавках жидкая сталь сосуществовала с кремнеземом или карбидом кремния, что является одним из источников присутствия SiC или SiO<sub>2</sub> в дефекте “черные штрихи”. Присутствие карбида кремния в дефекте “черные штрихи” также может быть связано с реакцией взаимодействия углерода коксика, входящего в состав шлакообразующих смесей, с кварцем погружного стакана. Термодинамическое моделирование процессов взаимодействия в этой системе показало, что, начиная с 1510 °С и выше, кварц взаимодействует с углеродом с образованием карбида кремния. Принимая во внимание температуру разливки, равную 1550-1580 °С, можно заключить, что шлак может иметь температуру, при которой идет взаимодействие кремнезема с углеродом. Таким образом, в реальных условиях разливки взаимодействие углерода шлакообразующей смеси с кварцем погружного стакана является достаточно вероятным. Более того, далее карбид кремния, обладая высокой адгезией к жидкой стали может переходить из шлака на границу с металлом. Химически неустойчивый в стали карбид кремния снова будет взаимодействовать с кислородом, растворенным в стали, с образованием оксида кремния и монооксида углерода.

**Дефект “выкрошка”.** Необходимо отметить, что большая часть дефектов, внешне похожих на “выкрошку”, имеют прокатное происхождение и называются “вкаты”, “вдавы”, “раскаты надрывов” и т.д. Однако, встречается достаточно редкий дефект “выкрошка”, который имеет сталеплавильную природу.

Металлографические исследования поперечного сечения листа, пораженного данным дефектом, позволили выявить в районе дефекта большое количество сателлитных (четвертичных) неметаллических включений, образовавшихся в твердом металле на эндогенных включениях-продуктах раскисления в условиях высокотемпературного контакта металла с окалиной. По мере удаления от поверхности контакта с источником кислорода размер сателлитных включений закономерно уменьшается. Наряду с диффузионным способом доставки кислорода к сателлитным включениям по телу первичного зерна, кислород доставлялся в глубь дефекта и по поврежденным границам зерен.

Данный дефект наследуется от дефекта “раскатанная горячая трещина”, обнаруженного на поверхности горячекатаного листа, в котором веерообразный характер распределения сателлитных включений полностью соответствует неравномерному течению металла при горячей деформации с учетом формы горячей трещины, заполненной окалиной (рис. 4). При

последующей холодной деформации такого листа, локальные приповерхностные участки, содержащие недеформируемые сателлитные включения, будут отделены от основного металла, образуя дефект “выкрошка”.

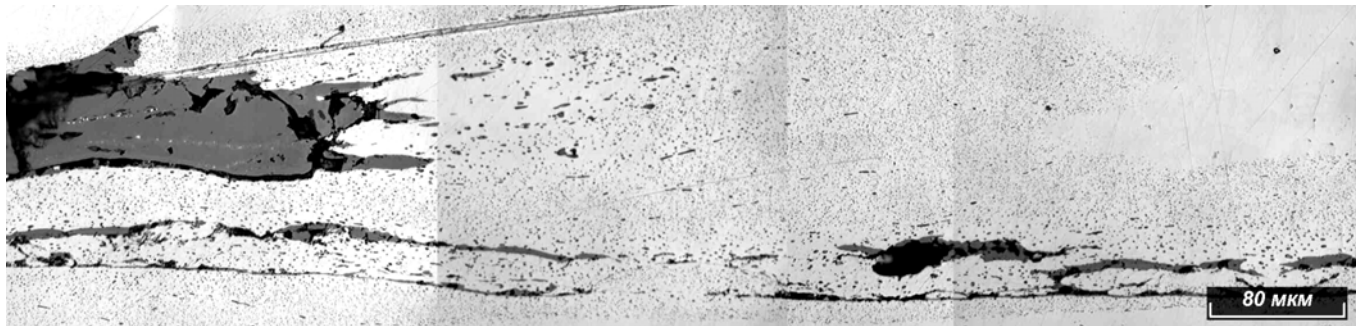


Рис. 4. Сателлитные включения в дефектных образцах горячекатаного подката

Причиной образования дефекта “раскатанная горячая трещина” является наличие продольной горячей трещины, образовавшейся на поверхности непрерывнолитой заготовки. Трещина частично заполнена окалиной, вдоль окисленных границ наблюдается зона внутреннего окисления, состоящая из мелкодисперсных сателлитных включений, локализованных непосредственно вокруг трещины, а в окрестности, примыкающей к трещине, наблюдаются крупные зерна феррита. Данные металлографические признаки указывают на высокотемпературную природу образования трещины. Действительно, анализ технологических параметров разливки показал, что причиной данной трещины, образовавшийся в кристаллизаторе, являются низкое качество поверхности кристаллизатора, повышенная влажность используемой шлакообразующей смеси и высокая температура разливки. Все эти факторы приводят к нарушению контакта между корочкой затвердевающего слитка и стенками кристаллизатора, что в свою очередь обуславливает формирование ее разнотолщинности, разогрева и последующего надрыва с образованием продольной трещины.

**Дефект “светлая полоса без надрыва”** является одним из наиболее распространенных и часто встречающихся дефектов холоднокатаного листа. Металлографические исследования образцов, пораженных этим дефектом, показали его значительное разнообразие: от небольших изъянов до грубых повреждений с расслоениями на поверхности листа. В полостях таких дефектов обнаружены металлические частицы, выкрошившиеся с поверхности валков и содержащие до 0,9% хрома, а также включения карбида кремния.

Несмотря на такое разнообразие поверхности дефекта, практически на всех образцах, пораженных этим дефектом, удалось обнаружить мельчайшие строчечные скопления оксидных включений, вытянутых вдоль границ зерен и расположенных на глубине до 10-15

мкм вдоль поверхности листа. Кроме того, исследования на электронном микроскопе позволили выявить на поверхности дефекта сотовую структуру, образованную окисленными границами зерен, а также большое количество микронадрывов (рис. 5).

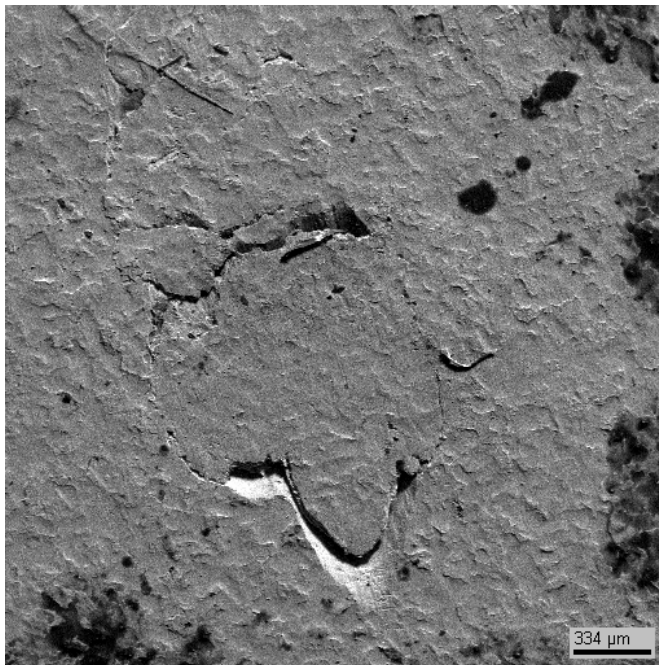


Рис. 5. Фрагмент поверхности дефекта “светлая полоса без надрыва”,  
электронный микроскоп

Образование оксидов вдоль границ зерен по механизму внутреннего окисления произошло из-за механических повреждений поверхности листа при горячей прокатке. Такие микроповреждения могли быть нанесены как собственно поверхностью поврежденных валков, так и металлическими частицами, выкрошившимися с их поверхности. Частицы карбида кремния из шлама в оборотной воде, подаваемой под высоким давлением на поверхность металла для сбива окалины, также могли нанести механические повреждения поверхности листа. Данный факт подтверждается результатами микрорентгеноспектрального анализа частиц карбида кремния и металлических частиц, близких по составу, соответственно, к материалу валков и абразиву, которые были обнаружены в теле дефекта. Поврежденные области листа, обладая развитой поверхностью, более подвержены внутреннему окислению по сравнению со “здоровой” ровной поверхностью металла, поэтому в таких приповерхностных слоях металла наблюдаются окисленные границы зерен, вытянутые вдоль линий прокатки. При дальнейшей холодной прокатке тонкий приповерхностный слой, представляющий собой, по сути, хрупкий слоистый композит, деформируется с образованием множества микронадрывов.

**Дефект “светлая полоса с надрывами”, обусловленными синусоидальным характером течения металла.** Главным отличительным признаком этого дефекта является наличие периодически расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга серпообразных надрывов, расположенных вдоль светлой сплошной полосы, ориентированной в направлении прокатки. Установлено, что клинообразные надрывы поверхности листа представляют собой транскристаллитные трещины и располагаются под углом  $45^\circ$  относительно направления прокатки. Металлографические исследования позволили выявить значительную разнотекучность металла в районе повреждения, а также синусоидальный характер течения металла в приповерхностных областях с образованием транскристаллитных надрывов в тех местах, где синусоида течения металла выходит на поверхность листа (рис. 6).

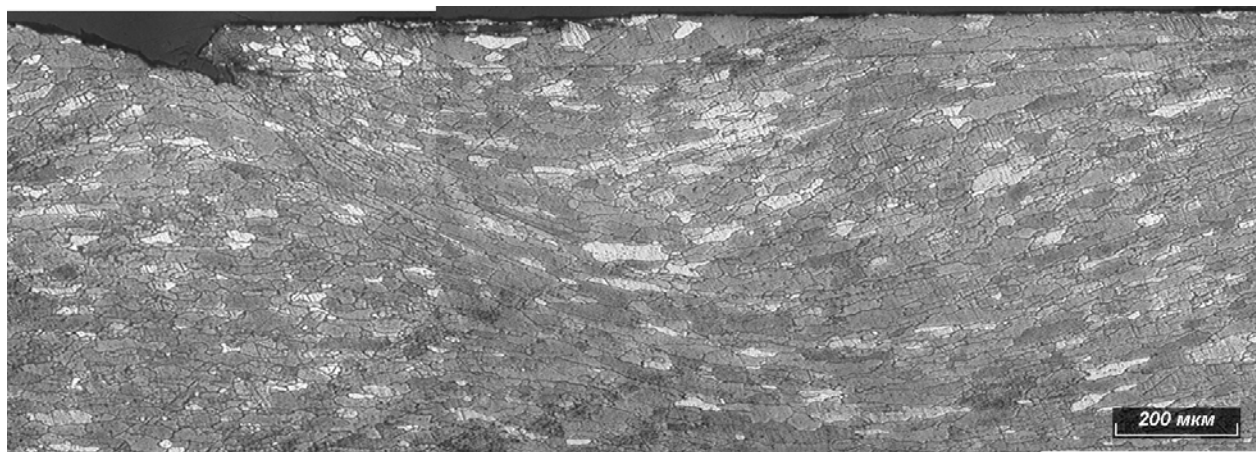


Рис. 6. Микроструктура дефекта “белая полоса с надрывом”, образец после травления

Линия надрыва отделяет зону основного здорового металла с рекристаллизованным оладеобразным зерном от трудно деформируемой приповерхностной зоны, где процессы рекристаллизации не завершены. Упорядоченное синусоидальное течение металла в тонком поверхностном слое позволяет совершенно определенно отнести данный дефект к дефектам прокатного производства. Причиной такой неравномерной деформации может быть вибрация стана или его валков, а также рассогласование скорости валков при холодной прокатке.

**Дефект “светлая полоса с надрывами”, образованная при раскате механических повреждений.** Металлографические исследования данного дефекта показали, что микроструктура металла в районе дефекта отличается значительной неоднородностью: наряду с вытянутыми вдоль линии надрыва зернами основного металла имеются мелкие равноосные зерна в теле самого дефекта. Установлено, что дефект возникает вследствие механического повреждения поверхности подката в процессе горячей деформации. В процессе образования

надрывов возможно отслаивание и отрыв частиц металла, которые тут же вкатываются в поверхность полосы, образуя дефект “вкатанная металлическая частица”.

**Дефект “светлая полоса с надрывами”, обусловленными наличием карбидной сетки по границам зерен**, представляет собой незначительные надрывы и углубления на фоне светлой полосы, ориентированной в направлении прокатки, возникает там, где расположены крупные выделения структурно-свободного цементита или карбидной сетки по границам ферритных зерен. Образование карбидной сетки по границам ферритных зерен и выделение крупных включений структурно-свободного цементита могут быть связаны с низкой скоростью охлаждения листа после горячей прокатки, близостью температуры смотки к точке  $Ar_1$ , а также малой степенью деформации листа при холодной прокатке. Наличие такой неблагоприятной структуры вызывает повышение хрупкости стали и ухудшение ее пластических свойств, что в свою очередь приводит к падению технологической деформируемости листа и образованию надрывов на его поверхности.

**Дефект “серая полоса”**. “Серая полоса” – единственный из всех исследованных дефектов, в котором обнаружены исключительно включения карбида кремния. На основании микрорентгеноспектрального анализа абразивного материала, применявшегося для шлифовки валков горячей прокатки, можно утверждать, что именно карбид кремния из абразива вкатывается в поверхность листа и вызывает образование дефекта “серая полоса”.

Небольшое количество частиц карбида кремния могут попадать на поверхность листа при горячей прокатке с поверхности рабочих валков. Установлено, что эти частицы имеются в поверхностном слое валка непосредственно после его шлифовки и отсутствуют после его кампании перед следующей шлифовкой. Известно также, что при нештатной работе очистных сооружений сгустки шлама могут попадать в систему водоснабжения. Поэтому основной источник карбида кремния в рассматриваемых дефектах – это шлам, поступающий из оборотной воды, используемой для сбива окалины с поверхности листа и охлаждения валков. Идентичность состава включений из шлама ( $Si = 63,52\%$ ,  $C = \text{ост.}$ ) и частиц, обнаруженных в дефекте ( $Si = 64,36\%$ ,  $C = \text{ост.}$ ), было подтверждено микрорентгеноспектральными исследованиями. Эти частицы попадают на поверхность листа на этапе горячей прокатки, поэтому закатываются в эту поверхность на различную глубину без значительных повреждений. При холодной прокатке металл, который не имеет прочной адгезионной связи с инородными частицами абразива, обтекает последние, раскрывая дефект в виде обширных полостей, заполненных не только этими частицами, но и стружкой основного металла, нарезанной острыми кромками карбида кремния при образовании полостей дефекта.



**Дефект “вкатанная металлическая частица”** представляет собой вкатанные в лист и частично приварившиеся к его поверхности частицы металла в виде металлической стружки, крошки или отслоений от прокатываемого листа. Эти частицы впоследствии могут выкрашиваться с образованием раковин на поверхности листа. Характерным внешним признаком данного дефекта является наличие четко выраженной сплошной границы по всему периметру вкатанной частицы. Металлографические исследования показали, что вкатанная металлическая частица состоит из сильнодеформированных зерен, вытянутых в направлении прокатки, в то время как основной металл под частицей, состоящий из оладеобразных зерен, обтекает вкатанную металлическую частицу.

Исследования дефектов **“механическое повреждение поверхности листа”** и **“пятна ржавчины”** показали, что они образовались на этапе прокатного производства.

**В четвертой главе** на основании установленных причин возникновения исследованных дефектов проведена их классификация и разделение на дефекты, образовавшиеся на этапе сталеплавильного производства, и дефекты, возникшие на этапе прокатного передела. Предложены рекомендации по их предотвращению.

Классификация и разделение дефектов проведено на основании их внешних признаков, а также микроструктурных особенностей, так как идентификация большинства дефектов только по внешнему виду осложняется их большим сходством друг с другом и отсутствием явных внешних признаков. В связи с этим только для следующих пяти рассмотренных дефектов можно произвести их разделение по внешнему виду: “плена”, “сквозные разрывы”, “вкатанная металлическая частица”, “светлая полоса с надрывами, обусловленными синусоидальным характером течения металла” и “пятна ржавчины”.

Для остальных дефектов, идентификация которых по внешним признакам не представляется возможным, установлены дополнительные микроструктурные особенности, включающие: глубину залегания и количество слоев в дефекте, тип и морфологию неметаллических включений, ответственных за его образование, а также характер течения металла в районе дефекта.

Созданные базы данных изображений внешнего вида и микроструктуры исследованных дефектов легли в основу классификатора поверхностных дефектов холоднокатаного листа, на основании которого может производиться объективная оценка природы дефектов и, соответственно, на каждом переделе планироваться и реализовываться мероприятия, направленные на устранение причин их образования.

Для предотвращения образования неблагоприятных по форме и морфологии неметаллических включений – продуктов раскисления системы  $FeO - Al_2O_3$ , приводящих к

образованию “плен” и “сквозных разрывов” на поверхности листа, раскисление стали необходимо проводить таким образом, чтобы избежать ввода алюминия в переокисленную сталь. Для этого следует перед присадками алюминия производить предварительное раскисление стали, например, ферросилицием. Не допускаются присадки алюминий в нераскисленную сталь в виде чушек и брикетов. Введение алюминия с помощью трайб-аппарата в виде катанки необходимо организовать таким образом, чтобы исключить взаимодействие небольших его концентраций с переокисленным металлом. Исключить образование включений системы  $FeO - Al_2O_3$  можно не только предварительным раскислением кремнием, но и небольшими присадками более сильных раскислителей, например, мишметалла. Кроме того, следует не допускать необоснованного перерасхода алюминия в процессе раскисления, в том числе и за счет химического подогрева, а также большого перегрева металла над температурой ликвидуса (не более 30 °С).

Для предотвращения зарастания погружных и сталеразливочных стаканов, а также вторичного окисления металла в процессе непрерывной разливки, приводящих к образованию “плен” и “сквозных разрывов”, необходимо принять следующие меры:

- наведение покровного шлака в промежуточном ковше с использованием качественных шлакообразующих смесей (ШОС) типа К-1 (влажность смеси не более 0,50%, срок хранения не более 3-х дней);

- применение корундографитовой защитной трубы между сталеразливочным ковшом и промежуточным ковшом с подачей аргона в стыковочный узел (коллектор) и трубу;

- использование между промежуточным ковшом и кристаллизатором корундографитового погружного стакана с подачей аргона в стыковочный узел;

Для предотвращения образования “черных штрихов” необходимо избегать присадок карбида кремния при раскислении шлака, а также исключить использование кварцевой защитной трубы и кварцевого погружного стакана.

Для получения высококачественной поверхности сляба без трещин, приводящих к образованию “выкрошки”, необходимо не допускать превышения температуры разливки для низкоуглеродистых марок сталей выше  $T_L + 30$  °С, следить за качеством шлакообразующей смеси (влажность, срок хранения) и состоянием внутренней поверхности кристаллизатора. При контроле качества поверхности слябов в случае обнаружения трещин последние должны быть полностью удалены зачисткой.

Образующуюся в процессе горячей прокатки окалину необходимо удалять хорошо очищенной водой, подаваемой на поверхность раската под большим давлением. Обратная

вода не должна содержать сгустков шлама и остатков абразива, что достигается путем установки фильтров в системе водоснабжения.

Для предотвращения образования большого количества крупных неравномерно распределенных карбидов или цементитной сетки, приводящих к возникновению надрывов на поверхности листа, необходимо обеспечивать высокую температуру конца горячей прокатки (выше  $A_{r3}$ ), сверхкритические степени последнего обжатия (15-17%) а также быстрое охлаждение материала от температуры конца прокатки до температуры смотки листа в рулон (550 – 620 °С).

Необходимо отметить, что наличие вибрации стана горячей прокатки, а также рассогласование скоростей вращения валков при холодной прокатке будут способствовать синусоидальному характеру течения металла в приповерхностной зоне листа, что приводит к образованию надрывов на поверхности листа. Отслоение частиц металла от некачественно обрезанных кромок, а также попадание на поверхность листа металлической крошки, налипшей на поверхность валков, способствует вкату этих частиц в поверхность листа и вызывает возникновение дефекта “вкатанная металлическая частица”.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана методика металлургической экспертизы дефектов холоднокатаного листа, включающая совместный анализ результатов, полученных при панорамных металлографических исследованиях дефекта, технологических параметров, послуживших причиной образования этого дефекта, состава неметаллических включений, декорирующих дефект, и результатов термодинамического моделирования процессов фазообразования, протекающих в стали по ходу сталеплавильного передела.
2. Изучена природа поверхностных дефектов холоднокатаного листа, на основании которой проведено их разделение между переделами, а также предложены меры по совершенствованию сквозной технологии производства холоднокатаного листа от внепечной обработки и разливки стали до прокатки.
3. Установлена сталеплавильная природа поверхностных дефектов “плена”, “сквозные разрывы”, “черные штрихи” и “выкрошка”.
4. Установлена прокатная природа поверхностных дефектов “светлая полоса без надрывов”, “серая полоса”, “светлая полоса с надрывами”, “вкатанная металлическая частица”, “механическое повреждение поверхности листа” и “пятна ржавчины”.

5. Предложены меры по устранению исследованных поверхностных дефектов холоднокатаного листа, а также разработаны технологические рекомендации по совершенствованию технологии его производства.

**Основные положения диссертации отражены в следующих работах:**

1. Неметаллические включения и природа дефектов холоднокатаного листа, Часть 1. Дефект “Плена” [Текст] / П.В. Ковалев [и др.] // Черные металлы.-2006.-№2.-С.32-37
2. Неметаллические включения и природа дефектов холоднокатаного листа, Часть 2. Дефекты, образовавшиеся на этапе прокатного производства [Текст] / П.В. Ковалев [и др.] // Черные металлы.-2006.-№2.-С.38-42
3. Неметаллические включения и природа дефектов холоднокатаного листа, Часть 3. Труднораспознаваемые дефекты холоднокатаного листа [Текст] / П.В. Ковалев [и др.] // Черные металлы.-2006.-№2.-С.42-46
4. Неметаллические включения и природа некоторых прокатных дефектов холоднокатаного листа [Текст] / П.В. Ковалев [и др.] // Сталь.-2006.-№2.-С.59-62
5. Ковалев, П.В. Термодинамическое моделирование как инструмент исследования природы неметаллических включений в стали [Текст] / П.В. Ковалев, А.А. Казаков // Сборник трудов XV международной конференции по химической термодинамике в России, тезисы докладов, том II, Москва, 27 июня – 2 июля. 2005.-С.241
6. Ковалев, П.В. Термодинамическое моделирование как инструмент исследования природы неметаллических включений в стали [Текст] / П.В. Ковалев, А.А. Казаков, Е.И. Казакова // Сборник трудов международной научно-технической конференции “Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов”, тезисы докладов, Санкт-Петербург, 20 - 22 сентября. 2005.-С.257-260
7. Ковалев, П.В. Комплексный анализ дефектов как основа системы контроля качества металлопродукции [Текст] / П.В. Ковалев, А.А. Казаков, Е.И. Казакова // Сборник трудов первой международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности”, Санкт-Петербург, май – июнь. 2005.-С.230-231
8. Ковалев, П.В. Комплексная методика исследования дефектов холоднокатаного листа [Текст] / П.В. Ковалев, А.А. Казаков, А.А. Дробинин // Материалы межвузовской научной конференции, 32-ая неделя науки СПбГТУ, Санкт-Петербург, 24 – 29 ноября. 2003.-С.153-155
9. Ковалев, П.В. Исследование дефектов холоднокатаного листа, имеющих сталеплавильную природу [Текст] / П.В. Ковалев, А.А. Казаков // Материалы межвузовской научной конференции, 33-я неделя науки СПбГТУ, Санкт-Петербург, 29 ноября – 4 декабря. 2004.-С.153-155
10. Ковалев, П.В. Влияние технологических параметров плавки и разливки автолистовой стали на образование поверхностного дефекта “черные штрихи” [Текст] / П.В. Ковалев, В.А. Овсов // Материалы межвузовской научной конференции, 33-я неделя науки СПбГТУ, Санкт-Петербург, 29 ноября – 4 декабря. 2004.-С.155-157
11. Ковалев, П.В. Исследование природы и причин образования поверхностного дефекта “плена” [Текст] / П.В. Ковалев, В.Г. Пикула // Материалы межвузовской научной конференции, 33-я неделя науки СПбГТУ, Санкт-Петербург, 29 ноября – 4 декабря. 2004.-С.157-158
12. Ковалев, П.В. Влияние температурно-скоростных параметров разливки автолистовой стали на вероятность возникновения дефекта “выкрошка” [Текст] / П.В. Ковалев, С.А. Юриков // Материалы межвузовской научной конференции, 33-я неделя науки СПбГТУ, Санкт-Петербург, 29 ноября – 4 декабря. 2004.-С.164-165