

На правах рукописи

ДАНИЛЕНКО АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ГРАНЕЙ  
СЛЯБОВ НА ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНОМ КОМПЛЕКСЕ

Специальность 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

A handwritten signature in black ink on a light blue background. The signature is stylized and appears to read 'Андрей Даниленко'.

Москва 2024

Работа выполнена в АО «Выксунский металлургический завод», федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева"

Научный руководитель: Хлыбов Александр Анатольевич,  
доктор технических наук, профессор, Нижегородский  
государственный технический университет им. Р.Е.  
Алексеева

Официальные оппоненты: Дёма Роман Рафаэлевич,  
доктор технических наук, профессор, Федеральное  
государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Магнитогорский  
государственный технический университет им. Г.И.  
Носова» (г. Магнитогорск)

Болобанова Наталия Леонидовна,  
доктор технических наук, Федеральное  
государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Череповецкий  
государственный университет» (г. Череповец)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Липецкий государственный технический  
университет»

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г. в \_\_ часов \_\_ минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.01 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Телефон для справок: 8 (499) 263-66-33 доб. 36-28

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Плохих А.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Производство листового (рулонного проката) находит широкое применение в тяжелой промышленности, при производстве труб и занимает особое место в металлургии. Многолетний мировой опыт показывает, что при производстве проката металлургии нередко сталкиваются с проблемой возникновения поверхностных дефектов, характер и природа образования которых различная. Из наиболее распространенных дефектов можно выделить: прокатные и металлургические (сталеплавивильные плёны, деформационные рванины, трещины и др). Практически на каждом листе или полосе, после прокатки, дефекты можно обнаружить в прикромочной зоне. Обычно они располагаются на небольшом расстоянии от боковой кромки до 5 – 10 мм, в отдельных случаях до 40 мм и более. Их наличие недопустимо. Для их устранения проводят обрезку боковой кромки. Такой подход борьбы с дефектами влечёт за собой увеличение расходного коэффициента металла (РКМ), а, следовательно, и повышение себестоимости продукции.

В классификаторах хорошо описаны основные признаки дефектов металлургической природы. Используя описание признаков дефектов, можно с высокой точностью определить причины их образования и способы борьбы с ними. Признаки дефектов, связанных с прокатной природой, описаны поверхностно. В основном их связывают с нарушением технологии прокатки (захолаживанием кромки), что для современных станов маловероятно из-за наличия систем контроля процесса прокатки. Так, например, М.А. Матвеевым показано, что стали класса прочности Х42 и К60 обладают высоким запасом пластичности на протяжении всего цикла прокатки, начиная от черновой группы клетей до смотки на участке моталок, и тем не менее в прикромочной зоне наблюдается разрушение металла. Вопрос об истинных причинах нарушения качества поверхности проката остается открытым и требует дополнительного изучения. Особенно остро этот вопрос стоит при производстве в условиях литейно-прокатных комплексов (ЛПК), в которых процессы выплавки, разливки, последующей прямой прокатки и смотки в рулон совмещены в одном непрерывном цикле. В условиях ЛПК отсутствует возможность инспектирования и устранения исходных пороков перед прокаткой слябов. Соответственно, борьба с дефектами является трудной проблемой. При этом в доступной научно-технической литературе особенности образования дефектов при горячей прокатке в литейно-прокатных комплексах мало изучены.

В исследованиях М.А. Матвеева показано, что для сталей с большим запасом прочности (пластичности) для трубного передела разрушение вероятнее всего связано с грубым нарушением технологии (подстуживанием кромок) или наличием несплошности металла, а разрыв шейки пластичного образца при испытаниях на растяжение аналогичен разрыву перемычки внутренних дефектов на кромках листового проката. В работах И.П. Шабалова, Д.О. Пустовойтова, Н.Л. Болобановой, А.В. Полякова установлены зависимости влияния формы калибра эджера и величины обжатия, величины коэффициента трения и натяжения (подпора) вертикальными и горизонтальными валками на перетекание металла с боковых кромок и отмечается важность повышения стойкости прокатных валков.

Таким образом, совершенствование технологии горячей прокатки в условиях литейно-прокатного комплекса на основе комплексного исследования закономерностей дефектообразования в прикромочной зоне, предупреждение и снижение дефектов в зоне кромок с одновременным повышением стойкости прокатных валков является актуальной задачей.

**Целью диссертационной работы является** снижение количества образования дефектов в прикромочной зоне стальной горячекатаной полосы и повышение стойкости валкового комплекта эджера при прокатке сляба в условиях литейно-прокатного комплекса.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить ряд задач:

1. Выполнить литературно-аналитический обзор, определить основные виды дефектов в прикромочной зоне рулонного проката в условиях ЛПК. Провести анализ причин их образования и установить признаки, характерные для тонких слябов.

2. Выполнить промышленные и лабораторные исследования технологической наследственности дефектов непрерывнолитого сляба в процессе черновой и чистовой прокатки на литейно-прокатном комплексе для раскрытия закономерностей их распространения.

3. Разработать новую методику оценки склонности металла к трещинообразованию в прикромочной зоне для определения температурно-деформационных режимов прокатки, обеспечивающих снижение образования прикромочных дефектов на стальной горячекатаной полосе.

4. Оценить эффективность работы эджера с различной формой калибра и режимов работы вертикальной клетки в условиях литейно-прокатного комплекса. Разработать новый подход к выбору рациональной формы калибра эджера для снижения образования прикромочных дефектов на стальной горячекатаной полосе и повышения стойкости валка.

**Объект исследования** – горячекатаный рулонный прокат, произведенный по совмещённой схеме «разливка – прокатка» в условиях ЛПК АО «ВМЗ».

**Предмет исследования** – закономерности образования и распространения прикромочных дефектов на горячекатаном рулонном прокате при производстве по «совмещенной технологии разливка – прокатка».

#### **Научная новизна.**

1. Определены основные закономерности распространения прикромочных дефектов сляба при прокатке в условиях литейно-прокатного комплекса. Установлено различие в раскрытии дефектов узкой и широкой граней сляба при прокатке: дефекты узкой грани сляба при переходе на широкую грань раскрываются в виде трещины с вершиной, направленной к центру сечения полосы; дефекты широкой грани сляба приводят к нарушению сплошности материала в виде трещины с вершиной, направленной в сторону кромки полосы. Впервые доказано противоположное распространение дефектов узкой и широкой граней сляба при прокатке в условиях литейно-прокатного комплекса и на реверсивном толстолистовом стане горячей прокатки. Установлено, что такие дефекты, как «продольная трещина», «грубые единичные пленки» с прокатной природой образования, являются следствием грубых следов качания кристаллизатора на узких гранях сляба глубиной более 6 мм.

2. Разработана новая методика оценки склонности металла к трещинообразованию, основанная на испытаниях на растяжение образцов с проточками при фактических температурах прокатки и на аналитическом расчете относительной деформации кромок широких горячекатаных полос при прокатке.

3. Разработан новый подход к выбору рациональной формы калибра эджера, обеспечивающий снижение образования дефектов на угловых участках при прокатке сляба и уменьшение смещения дефектов от кромки на широкую грань с одновременным повышением стойкости валков. Подход основан на численном моделировании влияния угла наклона полок, высоты и выпуклости дна калибра эджера, на полноту заполнения зева калибра, перемещения острых угловых участков и пятна контакта наклонных полок калибра с поверхностью сляба.

**Практическая значимость работы.** В условиях ЛПК АО «ВМЗ» разработана, испытана и внедрена новая калибровка вертикальных валков, которая обеспечивает увеличение стойкости валкового комплекта с 300 тыс. т до 500 тыс. т, снижение в 2 раза величины снимаемого слоя при переточке, уменьшение величины обрезки кромок с 25 мм до 20 мм без изменения температурно-деформационных режимов прокатки. Деформация сляба в вертикальных валках с новой формой калибра позволила снизить на всем сортаменте образование дефектов по грубым следам качания кристаллизатора на 95 – 98 %.

**Методы исследования.** Физическое моделирование закономерностей распространения прикромочных трещин проводилось на лабораторном прокатном стане дуо 300. Математическое моделирование было реализовано в программных комплексах Qform и Deform. Испытание на растяжение образцов с проточками при фактических температурных параметрах для оценки склонности металла к трещинообразованию выполнялось на

имитационном комплексе Gleeble 3180. Промышленные эксперименты проводились в условиях литейно-прокатного комплекса АО «ВМЗ».

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Закономерности развития прикромочных дефектов сляба при прокатке в условиях литейно-прокатного комплекса и принципы образования дефектов на горячекатаном рулонном прокате для разработки решений по их минимизации и уменьшения негативного влияния на качество горячекатаного проката.

2. Методика оценки склонности металла к трещинообразованию, основанная на испытаниях на растяжение образцов с проточками при фактических температурных параметрах, на аналитическом расчете относительной деформации кромок широких горячекатаных полос при прокатке и обеспечивающая оценку температурно-деформационных режимов прокатки для исключения достижения предельной деформации разрушения металла в прикромочной зоне.

3. Новый подход к определению рациональной формы калибра эджера, обеспечивающий расширение возможностей деформирования боковых граней сляба для уменьшения образования дефектов на угловых участках при прокатке с одновременным повышением стойкости валков.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов диссертационного исследования основана на применении математического описания, базирующегося на современных достижениях в области теории обработки металлов давлением, статистической обработке данных, подтверждается экспериментами в условиях литейно-прокатного комплекса и реализацией предложенных технических и технологических решений в промышленных условиях на АО «ВМЗ».

Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на научно-технических конференциях различных уровней: ежегодные научно-технические конференции молодых специалистов ОМК им. С.З. Афоина АО «Выксунский металлургический завод» (2017 – 2021 гг.), XV международная молодежная научно – техническая конференция «Будущее технической науки» «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (г. Нижний Новгород 27 мая 2015 г.), всероссийская научно-техническая конференция «Вопросы металловедения и термической обработки в машиностроении» (г. Москва 15 – 16 апреля 2021 г.), VIII региональная научно-практическая конференция «Творчество молодых родному региону» (г. Выкса 4 июня 2021 г.), XIII – XIV Конгрессы прокатчиков (25 – 27 октября 2022г, 16 – 18 апреля 2024г).

**Личный вклад автора.** Даниленко А.В. лично провел литературный анализ и исследование дефектообразования в прикромочной зоне рулонного проката в условиях ЛПК АО «ВМЗ». Разработал методику проведения экспериментальных исследований. Принимал участие в проведении экспериментов. Провел обработку, анализ результатов экспериментов и математического моделирования в программном комплексе Qform и определил критерии формы калибра эджера. Принимал участие в подготовке документации на изготовление и внедрение валкового комплекта новой формы в производственных условиях АО «ВМЗ». Разработал метод оценки склонности металла к трещинообразованию, который применим к реальному производству горячекатаного рулонного проката.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, из них пять в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы из 109 наименований. Работа изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 85 рисунков и 12 таблиц.

**ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** отражена актуальность работы, определены цели и поставлены задачи, сформулирована научная новизна и практическая значимость работы, методы подходы исследования, приведены данные об апробации и внедрении работы.

**В первой главе** представлен анализ современного состояния исследований дефектообразования при горячей прокатке, который подтвердил, что дефекты в прикромочной зоне рулонного (листового) проката образуются, как на этапе формирования непрерывнолитой заготовки, так и при прокатке. Высокие скорости разливки стали вызывают искажение узкой грани сляба, наличие острых углов, что является факторами зарождения прикромочных трещин. Учитывая опыт ОАО «Уральская Сталь», МНЛЗ ОАО «ММК» и ОАО «НТМК» для уменьшения дефектообразования на кромках, снижают перегрев стали в промежуточном ковше, изменяют конусность узких плит кристаллизатора с заменой прямолинейных на параболические или профилированные. При этом нужно учитывать конструкционные особенности МНЛЗ. Так, например, в условиях ЛПК АО «ВМЗ» г. Выкса опыт опробования новых конструкций кристаллизатора показал, что использование увеличенной конусности боковых плит и замена их на параболические привели к повышению числа «прорывов» корочки слябов, исполнение фасок – к износу боковых плит, повреждению на угловых участках сляба и образованию дефектов «закат». Поэтому задачи по снижению дефектообразования требуют дополнительного изучения.

Анализ многочисленных исследований влияния формы калибра эджера на дефектообразование показал, что появление дефектов в прикромочной зоне так же может быть связано с конструктивными особенностями вертикальных валков. В мировой практике известно достаточно много конструкций вертикальных валков. Рассмотренные формы калибра эджера имеют как преимущества, так недостатки. Калибровка в одном случае позволяет снизить количество дефектов в прикромочной зоне, в другом случае – может являться причиной их образования. Поэтому для выбора рациональной формы необходимо учитывать технологические и конструктивные особенности стана горячей прокатки, а также понимать, что внедрение новой калибровки требует больших капиталовложений.

Несмотря на многообразие используемых калибровок эджерных валков, вопрос выбора рациональной формы калибра эджера для снижения образования прикромочных дефектов на стальной горячекатаной полосе не раскрыт, при этом отсутствует научно-обоснованный подход к выбору формы калибра эджера.

В условиях промышленного производства особо трудной задачей является прогнозирование дефектообразования. Выполненный литературный обзор показал, что для оценки стойкости металла к разрушению разработано ряд методик. Так, например, оценка относительного сужения цилиндрических образцов после испытаний на растяжение при повышенных температурах, позволяет разработать для стали требуемого химического состава температурные режимы разливки и прокатки, которые учитывают наличие температурных интервалов с пониженной пластичностью металла. Недостатком данного метода является отсутствие учета влияния формы дефектов. В работах И.М. Павлова и Г. Нейбера показано, что нанесением проточек на цилиндрические образцы можно имитировать наличие дефектов на заготовке. При этом результаты исследования не имеют привязки к реальному процессу прокатки. Учитывая перспективность применения физических методов оценки склонности металла к трещинообразованию, требуется их дальнейшее развитие.

Таким образом, решение перечисленных научно-технических проблем направлено на раскрытие новых закономерностей дефектообразования в прикромочной зоне для совершенствования технологии горячей прокатки в условиях литейно-прокатного комплекса.

**Во второй главе** описаны оборудование, особенности технологического процесса производства на литейно-прокатном комплексе и материалы, необходимые для проведения исследований по выявлению закономерностей дефектообразования в прикромочной зоне при прокатке в условиях литейно-прокатного комплекса.

Изучение причин образования дефектов в прикромочной зоне проката связывается с проблематикой наличия на исходной заготовке трещин, вдавов, глубоких следов качания. Для исследования влияния их формы на разрушение металла разработана и предложена новая методика оценки склонности металла к трещинообразованию. В основе первой части методики лежит способ испытания на горячую пластичность образцов с нанесенными

проточками, которые имитируют форму дефектов на исходной заготовке. В этом случае можно учитывать разную форму дефектов на основе варьирования радиуса наносимой проточки. Во второй части производится расчет уширения металла в зоне кромки для различных температурно-деформационных режимов прокатки с использованием формулы А.И. Целикова:

$$\Delta b = 0,5 \left( \sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right) \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (1)$$

Стоит отметить, что поперечном направлении смещаются только краевые участки полосы на расстоянии  $b=1,1h$  от кромки и расчет уширения производится для данных участков. По результатам испытания строятся зависимости величины предельной деформации от радиуса проточки (дефекта), температуры и величины деформации. Определяются температурно-деформационные режимы прокатки, при которых вероятность разрушения металла минимальна.

Для решения задач выбора рациональной формы калибра эджера и оценки напряженного состояния металла в прикромочной зоне при прокатке в первой клетки чистовой группы литейно-прокатного комплекса представлено описание численного моделирования в программах конечно-элементного анализа.

Для подтверждения полученных результатов математического моделирования выполнили физическое моделирование трансформации искусственно нанесенных поверхностных дефектов при прокатке на лабораторном стане горячей прокатки. Дефекты наносили на узкую и широкую грани непрерывно-литой заготовки (НЛЗ) толщиной 90 мм промышленного производства из стали 09Г2С.

**В третьей главе** рассмотрены морфологические и генетические признаки природы образования дефектов прикромочной зоны горячекатаного рулонного проката. Для повышения качества готовой продукции необходимо не только контролировать состояние поверхности, но и идентифицировать дефекты, что представляется достаточно проблематичным из-за многообразия поверхностных дефектов и общего их описания в технической литературе.

В рамках исследования более 300 горячекатаных рулонов из сталей 09Г2С, 22ГЮ, 20, произведенных в условиях ЛПК, выявлено, что основными пороками исследуемых металлов являются грубая (мелкая) плена и трещина, на долю которых приходится порядка 70 и 10 % от общего числа соответственно. Большинство дефектов (~ 92 %) располагается на расстоянии до 20 мм от кромки, оставшиеся ~ 8 % на расстоянии 20 мм и более, что приводит к увеличению величины боковой обрезки.

Как известно, дефекты могут быть как литейной, так и прокатной природы образования. Для трещин металлургического происхождения основные признаки – расширение полости дефекта поверхности и сужение вглубь листа; разветвленность трещины; наличие окалины, сателлитных включений (на основе FeO) и обезуглероживания структуры в районе дефекта. Для несплошностей в виде трещин прокатного происхождения – симметричность расположения на поверхности листа относительно его кромок; отсутствие разветвленности; волнообразный внешний вид; направление вдоль прокатки; приближение контура трещины к незамкнутой дуге. Однако в промышленных условиях ЛПК встречаются дефекты, которым не свойственны описанные выше признаки. Металлографический анализ дефектов указывает, что в основном металл по ширине проката характеризуется однородной ферритно-перлитной структурой, видимых отличий в металле по ширине от кромки до сердцевины полосы не наблюдается. При данных условиях для дефектов прокатной природы образования захлаживание кромки или грубое нарушение режимов прокатки не являются причинами образования рассматриваемых дефектов и требует дополнительных исследований.

В процессе изучения формообразования узкой грани слэбов толщиной  $h=90$  мм установлено, что узкая грань бывает трех видов: в первом случае грань имеет правильную прямоугольную форму  $b=1800-1500$  мм (Рисунок 1, а); во втором случае имеет правильную прямоугольную форму по центру узкой грани, а по углам имеется наличие острых выступов

(углов)  $b = 1450 - 1300$  мм (Рисунок 1, б); в третьем случае имеет бочкообразную форму по центру узкой грани и по углам имеется наличие острых выступов  $b = 1250 - 1000$  мм (Рисунок 1, в). С уменьшением ширины сляба количество дефектов увеличивается. Острые угловые участки холоднее, чем основной металл, что может привести к образованию продольных (поперечных) трещин или дефекту закат (Рисунок 1, г – ж). Наличие искажения узкой грани приводит к увеличению расстояния от кромки до дефекта.

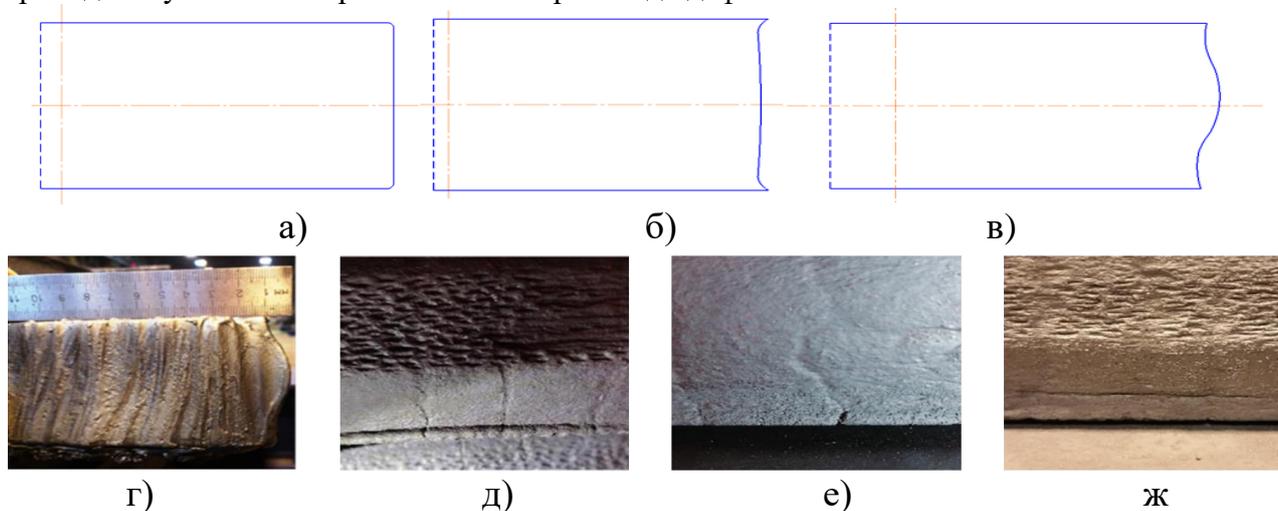


Рисунок 1. Узкая грань сляба: а) – правильной прямоугольной формы; б) – правильной прямоугольной формы с острыми выступами на углах сляба; в) – бочкообразный выступ в середине узкой грани и острые выступы на углах сляба, г) – острые угловые участки, д) – закат, е) – поперечная трещина по грубому следу качания на кромке, ж) – продольная прикромочная трещина

При детальном изучении угловых участков раската при прокатке в черновой группе клетей установлено, что разрывы металла (по следам качания) в прикромочной зоне сляба характеризуются образованием мелких, грубых плен и продольных трещин без признаков литейной природы образования. На Рисунке 2, а представлена схема трансформации единичного грубого следа качания кристаллизатора. В начале на угловых участках сляба по грубому следу качания образуется поперечная трещина и при последующей чистовой прокатке вытягивается в направлении прокатки, образуя единичную грубую плену, либо трещину длиной до 50мм (Рисунок 2, б). Группа грубых следов качания – трансформируется в трещину, вытянутую в направлении прокатки более 50мм (Рисунок 2, в).

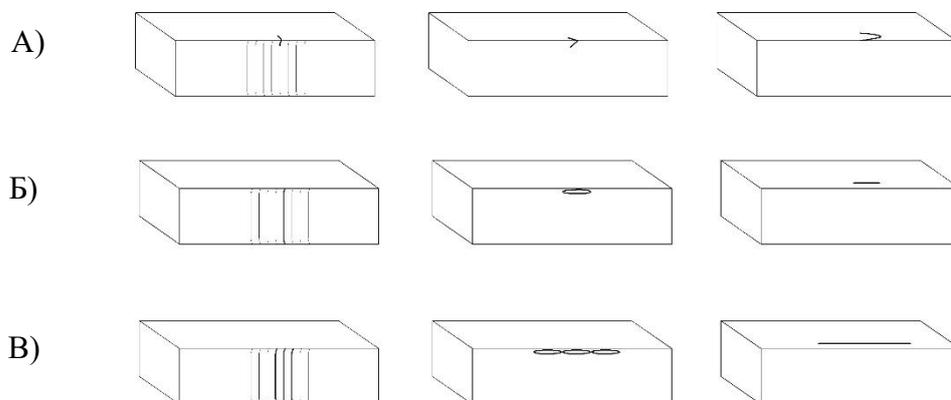


Рисунок 2. Трансформация грубого следа качания на угловых участках (а) –, по центру узкой грани единичные (б) и групповые (в)

Данные нарушения качества поверхности имеют единую природу образования и связаны с технологической наследственностью слябовой заготовки на участке МНЛЗ. Дефекты, которые раскрываются по грубым следам качания, ошибочно идентифицируют как прокатные (ввиду отсутствия признаков сталеплавильной природы образования). Для получения зависимости влияния глубины грубого следа качания на разрушение металла в прикромочной зоне необходимо провести дополнительные исследования.

**В четвертой главе** металлографические исследования наиболее характерных поверхностных дефектов прикромочной зоны типа трещина, плена показали, что в поперечном сечении они могут распространяться как в сторону узкой грани, так и в сторону середины ширины полосы

В целях получения зависимостей направления раскрытия поверхностных дефектов в ходе термомеханической обработки (ТМО) непрерывнолитого сляба от места их расположения (узкая/широкая грань) выполнено математическое и физическое моделирование. Математическое моделирование координационной сетки при горячей прокатке сляба толщиной  $h = 90$  мм с применением конечно-элементного программного комплекса QForm показало, что на расстоянии от кромки, меньшем, чем толщина заготовки  $h$ , наблюдается значительная неравномерность деформации: она более явно выражена ближе к кромке, а на расстоянии от кромки, равном  $h$  и более, неравномерность деформации минимальна (Рисунок 3, а). По результатам анализа выдвинуто предположение, что отличительной особенностью дефектов узкой и широкой граней является направление их раскрытия при прокатке. Дефекты узкой грани при переходе на широкую грань раскрываются по касательной в сторону центра раската, дефекты широкой грани наоборот – раскрываются под острым углом в сторону кромки (Рисунок. 3, б).

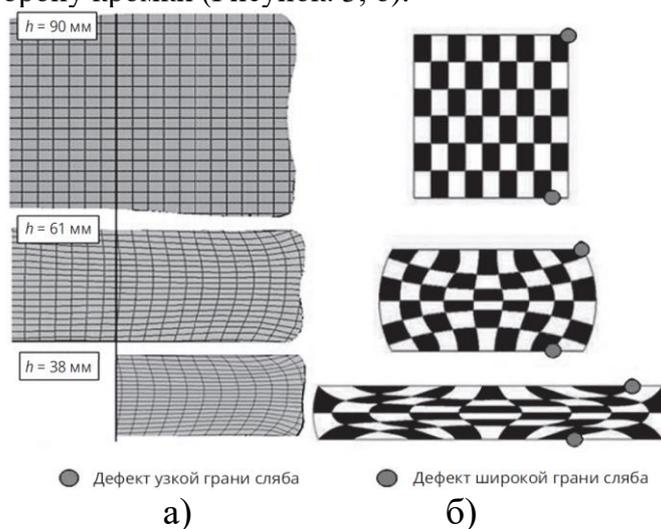


Рисунок 3. Математическое моделирование в Qform искажений координационной сетки при прокатке сляба толщиной 90 мм с обжатием в первом проходе 32 % и во втором 38 % (а), направление раскрытия дефектов по линиям течения металла (б)

Для подтверждения полученных результатов выполнили физическое моделирование трансформации искусственно нанесенных поверхностных дефектов при прокатке на лабораторном стане горячей прокатки ДУО 300 в ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина». Стоит отметить, что при прокатке в горизонтальных валках до толщины 41 мм дефекты, расположенные в приконтактной зоне, имеют меньший размер, чем по центру узкой грани сляба (Рисунок 4, а). Это связано с выпучиванием узкой грани в процессе выпучивания узкой грани при прокатке. При последующей деформации дефекты, находящиеся на приконтактных участках, переходят на поверхность раската, образуя трещину с вершиной, направленной к центру полосы с последующим раскрытием (Рисунок 4, б – в). Веерообразный вид распространения сохраняется на протяжении всего процесса прокатки.

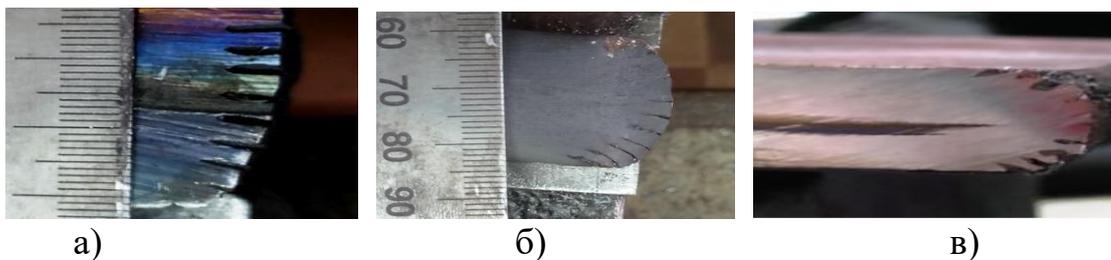


Рисунок 4. Трансформация поверхностных трещин при горячей прокатке на лабораторном стане Дуо 300 при прокатке от толщины 50мм (а) → 25 мм (б) → 11 мм (в)

На Рисунке 5 показано, как меняется рисунок разрушения кромки при изменении глубины залегания 2 мм; 4 мм и 6 мм. Чем глубже основание дефекта, тем более критичные разрушения кромки. Для 2 мм и 4 мм дефекты находятся в зоне подрезки (<20 мм), для 6 мм трещина трансформируется в рваную кромку с наличием грубых плен. В данном случае расстояние от кромки более 25 мм, что делает невозможным удаление данных пороков.

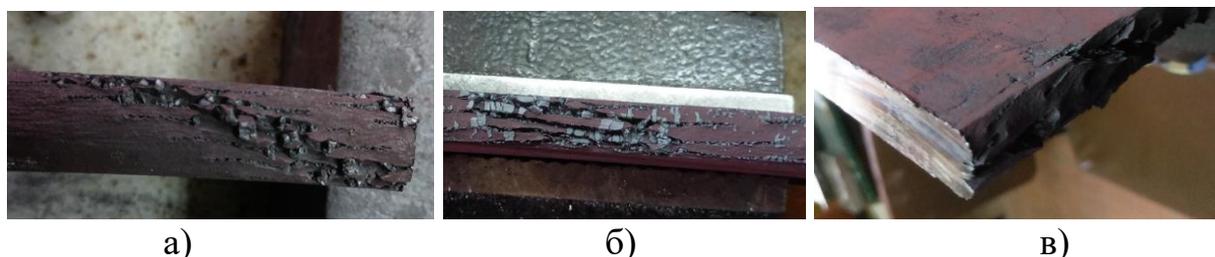


Рисунок 5. Изменение рисунка разрушения пороков узкой грани сляба при изменении глубины залегания 2мм (а), 4мм (б) и 6мм(в)

Характер трансформации дефектов на широкой грани сляба несколько иной. В процессе прокатки с уменьшением толщины раската уменьшается их глубина залегания, при этом вершина направлена под углом от поверхности к кромке прокатываемой полосы. В данном случае раскрытия и разветвления трещин не происходит. На Рисунке 6, а – в продемонстрировано образование дефекта «закат» на широкой грани сляба при прокатке. Установлено, что проточки, расположенные на широкой грани сляба (для слябов толщиной  $h=90$  мм), при глубине залегания 2 мм, 4 мм полностью выкатываются, повреждений поверхности нет (Рисунок 6, г – д). Для 6мм выявлено наличие заката в виде вытянутой линии вдоль кромки проката (Рисунок 6, е).

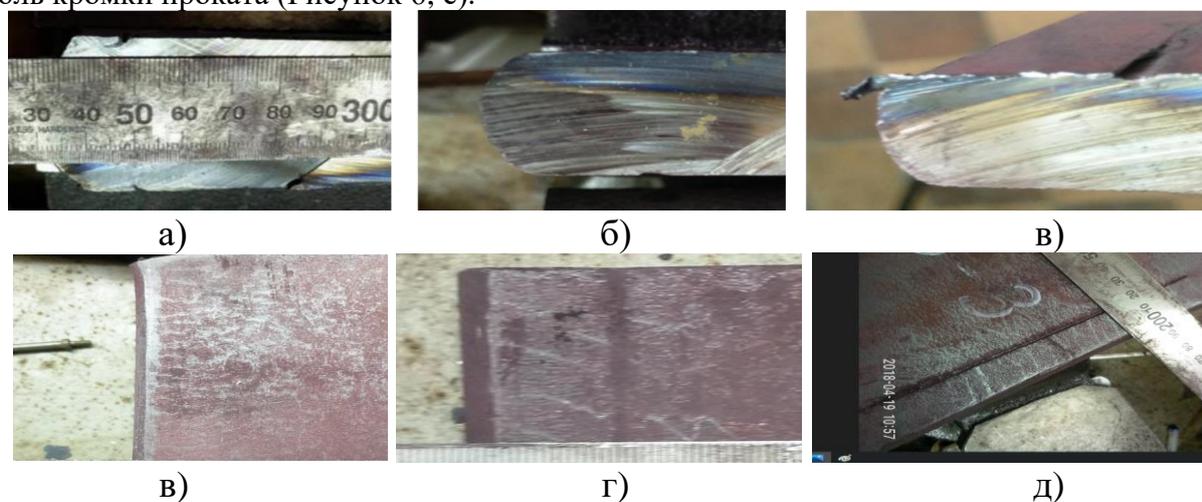


Рисунок 6. Трансформация поверхностных трещин при горячей прокатке на лабораторном стане дуо 300 при прокатке от толщины 50мм (а) → 25 мм (б) → 11 мм (в).

Таким образом, математическим путем установлено и физическим моделированием подтверждено, что направление раскрытия дефектов прикромочной зоны рулонного проката определяется их расположением на исходной заготовке. Дефекты узкой грани сляба при последующей горячей прокатке переходят на широкую грань и раскрываются в виде трещины с вершиной, направленной к центру сечения раската, дефекты широкой грани сляба приводят к нарушению сплошности материала в виде трещины с вершиной, направленной в сторону кромки полосы. Стоит отметить, что распространение прикромочных дефектов для толстолистовых станов (стан 5000 МКС АО «ВМЗ») имеют обратную зависимость.

Проведение оценки влияния изменения параметров прокатки на форму и глубину залегания данных дефектов на ЛПК не предоставляется возможным в виду производства совмещенной технологии разлива-прокатка. Удаления дефектов перед прокаткой не производится, а значит риск получения несоответствующей продукции возрастает. Так как расположение дефектов хаотичное и не имеет закономерностей их образования актуальным вопросом остается оценка влияния параметров прокатки на дефектообразование (кроме случаев нарушения технологии прокатки). В процессе прокатки дефекты уменьшаются по высоте, вытягиваются вдоль направления прокатки, принимая форму «рисок», которые переходят на верхнюю поверхность раската, что приводит к уменьшению радиуса дна дефекта и уменьшению угла наклона боковых полок дефекта. Это приводит к повышению концентрации напряжений и увеличивает вероятность разрушения металла.

Для изучения влияния формы дефекта на дефектообразование показан пример расчета по методике, представленной в Главе 2. Проведенный анализ поверхности узкой грани сляба показал, что в 85 % случаев форма кривизны дефекта  $R_d$  находится в интервале от 0,2 мм – 8 мм. Путем нанесения проточки  $R_{пр}$  на цилиндрические образцы имитируем радиус дефекта ( $R_d = R_{пр}$ ). Температура испытания образцов  $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Скорость испытания  $V= 5\text{ мм/с}$ . По результатам испытаний для марки стали 22ГЮ зависимости величины максимальной относительной деформации  $\varepsilon_1^{пред}$  и максимального напряжения  $\sigma$  при растяжении от температуры испытания и радиуса проточки  $R_{пр}$  (Рисунок 7), полученные при температуре испытаний  $T= 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

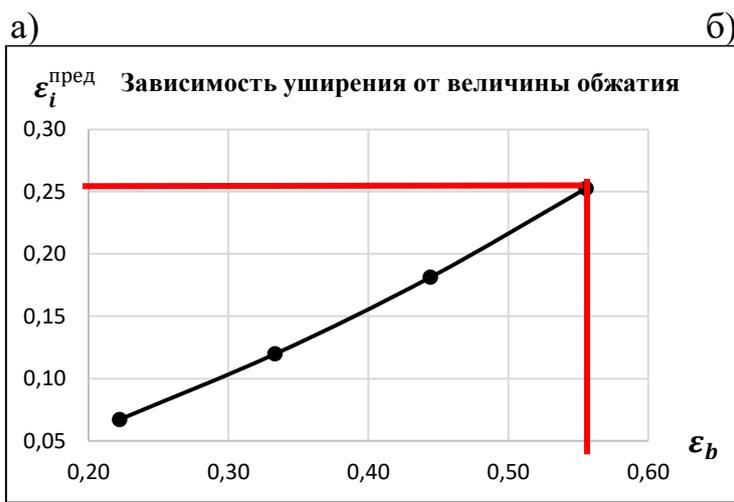
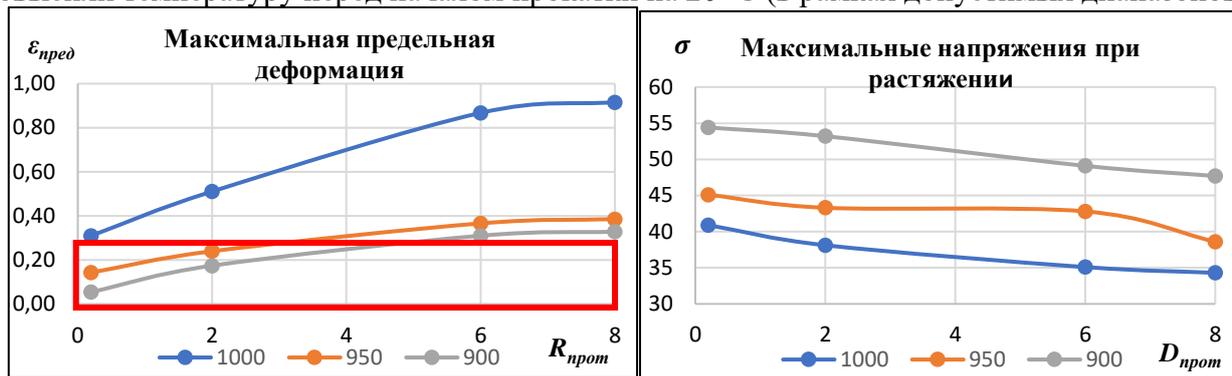
Зависимости полученные на Рисунке 7, а – б указывают, что с уменьшением температуры испытания с  $T= 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $T= 950\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдается резкое снижение максимальной предельной деформации с  $\varepsilon_{пред} = 0,92$  до  $\varepsilon_{пред} = 0,39$ , а при  $T= 900\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\varepsilon_{пред} = 0,33$ . Уменьшение радиуса проточки с  $R_{пр} = 8\text{ мм}$  до  $R_{пр} = 0,2\text{ мм}$  также снижает максимальную относительную деформацию для  $T= 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  с  $\varepsilon_{пред} = 0,92$  до  $\varepsilon_{пред} = 0,31$ ;  $T= 950\text{ }^{\circ}\text{C}$  с  $\varepsilon_{пред} = 0,39$  до  $\varepsilon_{пред} = 0,14$ ;  $T= 900\text{ }^{\circ}\text{C}$  с  $\varepsilon_{пред} = 0,33$  до  $\varepsilon_{пред} = 0,05$ . Максимальные напряжения имеют обратную зависимость. С уменьшением температуры и радиуса проточки увеличиваются максимальные напряжения. Так для  $T= 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  с  $\sigma_{min} = 34,3\text{ МПа}$  до  $\sigma_{max} = 40,9\text{ МПа}$ ;  $T= 950\text{ }^{\circ}\text{C}$  с  $\sigma_{min} = 38,6\text{ МПа}$  до  $\sigma_{max} = 45,1\text{ МПа}$ ;  $T= 900\text{ }^{\circ}\text{C}$  с  $\sigma_{min} = 47,7\text{ МПа}$  до  $\sigma_{max} = 54,4\text{ МПа}$ .

Для толщины поката 45мм и величины обжатия  $\varepsilon_b = 0,55$  деформация уширения составит  $\varepsilon_1^{пред} = 0,25$ . На Рисунке 7, в показана зависимость величина уширения от обжатия на исследуемом этапе производства. На Рисунке 7, а красной линией выделена зона. Точки, которые находятся рядом с линией и ниже ее являются зоной риска (вероятного) разрушения металла.

Таким образом, установлена адекватность получаемых в результате численного моделирования напряжений в прикромочной зоне при прокатке экспериментальным данным при физических испытаниях на Gleeble 3180, а также подтверждена сходимость результатов определения относительной деформации кромок широких горячекатаных полос с учетом уширения с данными измерений при прокатке.

Реализация методики оценки склонности металла к трещинообразованию при прокатке, позволила дать практические рекомендации – снизить образование дефектов, для марки стали

22ГЮ наблюдалось после уменьшения величины обжатия в первой клетке чистой группы и повысили температуру перед началом прокатки на 20 °С (в рамках допустимых диапазонов).



в)

Рисунок 7. Зависимость величины максимальной предельной деформации  $\epsilon_i^{пред}$  (а), максимального напряжения при растяжении  $\sigma$  от радиуса проточки и температуры испытания 900 °С, 950 °С, 1000 °С (б) и номограмма зависимости уширения от величины обжатия для стали 22ГЮ (в)

**В пятой главе** приведены результаты разработки на основе численного моделирования нового подхода для определения рациональной формы калибра эджера, направленного на достижение высоких показателей качества в прикромочной зоне прокатываемых широких стальных полос, на примере производства рулонного проката из тонких слябов в условиях ЛПК.

Для оценки эффективности работы эджера выполнены промышленные исследования влияния калибра и режимов работы вертикальной клетки на форму угловых участков и формирование узкой грани раската при прокатке в черновой группе стана горячей прокатки 1950 ЛПК. Промышленный эксперимент включал оценку формообразования раскатов в черновой группе с обжатием и без обжатия эджера. Проведенный анализ показал, что при прокатке без использования эджера угловые участки имеют острую форму, наличие следов качания кристаллизатора приводят к образованию периодических утонений в виде полосок, расположенных под углом к поверхности, создавая тем самым благоприятные условия для разрушения металла на кромках.

Установлено, что при прокатке слябов в черновой группе, как с использованием эджера с калибром высотой 110 мм и выпуклым дном, так и без вертикальной клетки, на раскате остаются недеформируемыми верхний угловой участок (высота калибра больше толщины сляба) и при наличии грубых следов качания на острой грани образуются трещины. Производство рулонного проката с использованием эджерной клетки с высотой калибра  $h_k = 90$

мм позволяет снизить вероятность образования дефектов на кромках раската. Утонения на угловых участках уменьшаются по глубине и вытягиваются вдоль направления прокатки, плавно переходят на узкую грань, при этом отсутствуют острые участки (после обжатия в вертикальных валках). Основным недостатком данной формы является повышенный износ поверхности валка, который приводит к образованию мелких плен в прикромочной зоне на расстоянии до 50мм от кромки (Рисунок 8). Стойкость валкового комплекта составляет 230 – 300 тыс. т.



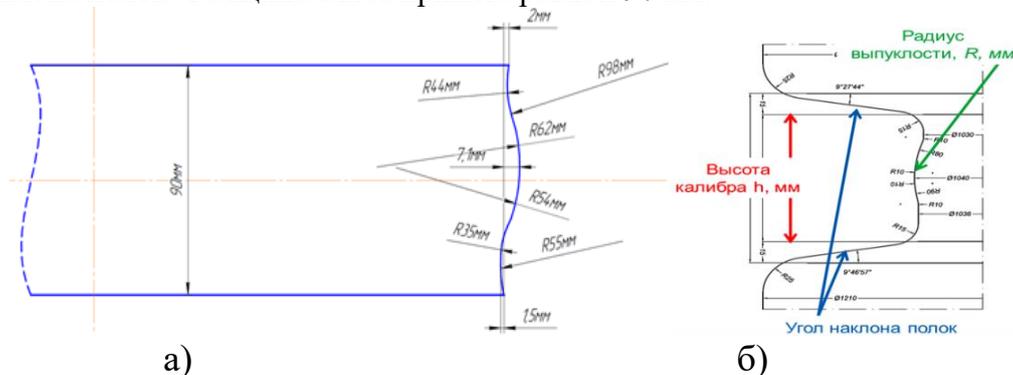
а) б) в) г)

Рисунок 8. Трансформация «вдавов» в процессе прокатки. Износ валка (а), на узкой грани сляба (б), широкой грани (в), «мелкие плены» на готовом прокате

Проведенный анализ показал, что используемые в условиях АО ВМЗ, ЛПК формы калибра эджера в полной мере не позволяют устранить все недостатки и требуют доработки. В качестве исходной заготовки для моделирования рассматривались слябы прямоугольной формы без искажений боковых граней, с острыми выступами на углах и слябы с выпуклостью в середине боковой грани и острыми выступами в угловой зоне. Было получено, что искажение узкой грани сляба оказывает отрицательное влияние на заполнение калибра эджерного валка, приводит к неполной проработке прикромочной области сляба и способствует переходу существующих или зарождающихся на ней дефектов на верхнюю или нижнюю поверхность полосы. На основании полученных данных выбрана форма с максимальным искажением узкой грани, установленным во время исследований (Рисунок 9, а).

Для обеспечения снижения в условиях ЛПК образования дефектов на угловых участках сляба, уменьшение их расстояния от кромки с одновременным повышением стойкости валков разработан подход по определению рациональной формы калибра эджера. Подход основан на численном моделировании и построения зависимостей влияния угла наклона полок, выпуклости дна и высоты калибра эджера на полноту заполнения зева калибра, перемещения острых угловых участков и пятна контакта наклонных полок калибра с поверхностью сляба.

Был реализован численный эксперимент прокатки в эджере и двух клетях черновой группы. Принята высота дна калибра 90 мм, 95мм и 110 мм с углом наклона полок 10°, 20°, 30°. Рассмотрены 4 варианта исполнения выпуклости дна калибра с радиусом, равным 0, 50 мм, 90 мм и 130 мм. Величина обжатия для всех вариантов выбрана одинаковой – 20 мм. На Рисунке 9, б показаны основные параметры калибра: высота, радиус кривизны (выпуклости) и угол наклона полок. Толщина сляба принята равной 90 мм.



а) б)

Рисунок 9. Форма узкой грани сляба для математического моделирования (а), параметрами исследования формы калибра эджера (б)

Для анализа влияния формы калибра выбраны три параметра: величина заполнения калибра; расстояние от кромки до угловых участков на раскате за клетью №2 черновой группы; длина дуги контакта полок калибра с поверхностью сляба.

На Рисунке 10 показан процесс трансформации выпуклой узкой грани при деформации в эджерной клетке и клетях №1, 2 черновой группы.



Рисунок 10. Параметры оценки формы калибра эджера: Точки 1-1' указывают месторасположение верхнего и нижнего углового участка узкой грани; Точки 2-2' - длину контакта полок калибра с поверхностью сляба;  $\Delta l_1$ , мм - расстояние от торца раската до угловых участков, обозначенных на слябе;  $\Delta l_2$ , мм - расстояние от торца раската до точек контакта полок калибра с поверхностью сляба.

На основании полученных данных построены зависимости влияния выпуклости дна калибра на перемещение угловых точек после прокатки в клетях №2 (Рисунок 11).

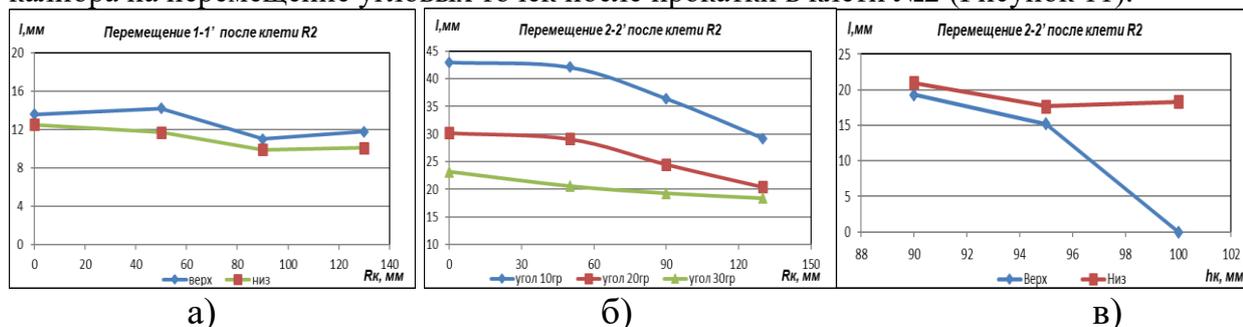


Рисунок 11. Зависимость изменения расстояния от угловых ребер до кромки раската от величины выпуклости дна (а), высоты калибра (б) и длины контакта от угла наклона полок калибра эджера (в)

Полученные зависимости указывают, что более рационально использовать выпуклость радиусам  $R=90$  мм (Рисунок 11, а). Увеличение угла наклона полок калибра с  $\alpha=10^\circ$  до  $\alpha=30^\circ$  оказывает существенное влияние и позволяет сократить длину дуги контакта полок калибра и сляба (Рисунок 11, б), полное заполнение без участков не подверженных деформации характерно для калибра  $h_k=95$  мм (Рисунок 11, в).

Промышленное опробование новой калибровки эджера, полученной с применением разработанного подхода, выполнено на ЛПК АО «ВМЗ» при прокатке сляба толщиной 105 мм. В виду отсутствия разницы температуры по высоте сляба выбрана симметричная форма калибра, радиус выпуклости дна калибра  $R=90$  мм; угол наклона полок калибра  $\alpha=30^\circ$ ; высота дна калибра увеличена до  $h_k=110$  мм. На Рисунке 12 представлена форма профиля, построенная по результатам моделирования.

Для практического исполнения полученной формы калибра, кривая профиля была разделена на три участка (Рисунок 12, б), каждый из участков был аппроксимирован уравнением:

– левый участок профиля  $y = 0,0062x^3 + 0,6875x^2 + 22,131x + 220,2$ ;

– средний участок профиля:  $y = -0,0107x^2 + 5,205$ ;

– правый участок профиля  $y = -0,0062x^3 + 0,6875x^2 - 22,131x + 220,2$ .

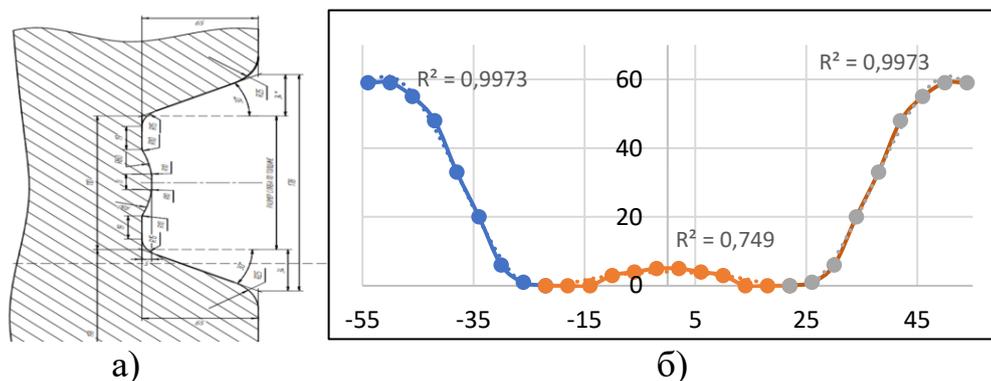


Рисунок 12. Рациональная форма калибра эджера построенная по результатам моделирования (а), подбор кривой формы калибра вертикального валка (б)

Промышленное опробование показало, что новая калибровка эджера обеспечивает равномерное заполнение калибра, минимальную длину контакта валка с полками и их износ (Рисунок 13, а), а также обеспечивает получение симметричной формы боковой грани подката с характерной вогнутостью по центру и округлые угловые участки узкой грани раската (Рисунок 13, б – в). Полученная форма боковой грани подката после черновой группы является наиболее благоприятной с точки зрения повышения качества проката в прикормочной зоне готовой полосы. Для сравнительного анализа произведена прокатка на валковых комплектах новой и старой формы калибра эджера в одинаковых условиях. Общий «накат» на валках новой формы составил 515 тыс. т (против 230 – 300 тыс. т).

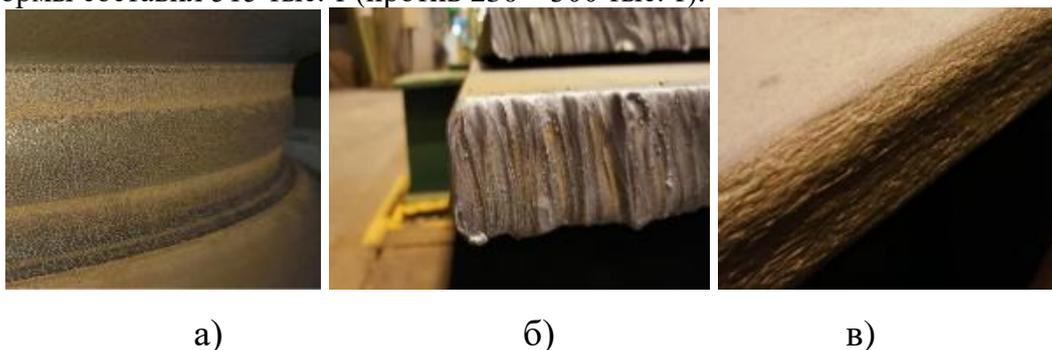


Рисунок 13. Равномерное заполнение калибра эджера (а) внешний боковая грань подката: вид с торца (б) и вид сбоку (в)

На Рисунке 14 наглядно показано, что новая форма позволяет уменьшить дугу контакта нижней полки калибра эджера с поверхностью сляба с 50 мм до 20 мм. Все перечисленное способствует уменьшению расстояния от кромки до дефекта и снижению вероятности образования дефектов вдавы, которые трансформируются на конечном прокате в мелкие плены (данные дефекты остаются в зоне обрезаемой кромки) и позволяет увеличить срок службы валкового комплекта. РКМ на всем сортаменте снизился в среднем на 1,5 кг/т. Снимаемый слой рабочей поверхности при переточке эджера уменьшился в 2 раза.

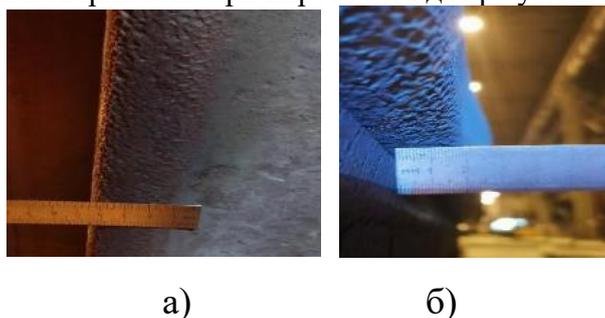


Рисунок 14. Расстояние от кромки до дефекта при используемой (а) и при новой (б) форме калибра эджера

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе обзора научно-технической литературы и практического состояния проблемы дефектообразования установлено, что основными дефектами в прикромочной зоне горячекатаного рулонного проката, производимого в условиях литейно-прокатного комплекса, являются «трещина» и «плена». Показано, что при прокатке слябов из конструкционной стали толщиной 90 мм на долю дефекта «трещина» приходится до 10 % от общего числа дефектов, «плена» – 70 %. Определены и обоснованы основные факторы образования прикромочных дефектов горячекатаной рулонной стали в условиях ЛПК: поверхностные и внутренние дефекты сляба, включая следы качания кристаллизатора; отклонения по геометрии сляба, связанные с острыми углами и искажением боковых граней, неравномерность деформации в прикромочной зоне, форма и износ калибра эджера, влияющие на переход металла с боковой грани на поверхность.

2. Раскрыты и описаны закономерности распространения прикромочных дефектов при прокатке в условиях ЛПК. В промышленных условиях ЛПК получено и лабораторными исследованиями подтверждено, что при прокатке слябов толщиной 90 мм направление распространения дефекта в прикромочной зоне является критерием местоположения дефекта на исходной заготовке. Установлено, что дефекты узкой грани сляба при переходе на широкую грань раскрываются в виде трещины с вершиной, направленной к центру сечения полосы, дефекты широкой грани сляба приводят к нарушению сплошности материала в виде трещины с вершиной, направленной в сторону кромки полосы. Впервые доказано противоположное распространение дефектов узкой и широкой граней сляба при прокатке в условиях литейно-прокатного комплекса и на реверсивном толстолистовом стане горячей прокатки. Показано, что наличие грубых единичных следов качания кристаллизатора глубиной более 6 мм приводит к формированию трещин на угловых участках раската при деформации в черновой группе клетей ЛПК с последующей трансформацией в крупные единичные плены при чистовой прокатке.

3. Разработана новая методика оценки склонности металла к трещинообразованию в прикромочной зоне, интегрирующая испытания на растяжение образцов с проточками (при фактических температурных параметрах) и аналитический расчет относительной деформации кромок широких горячекатаных полос при прокатке. Радиус дна проточки выбран в соответствии с формой дефектов прикромочной зоны. Численно и экспериментально обоснована применимость аналитического расчета относительной деформации кромок широких горячекатаных полос (величина уширения по формуле А.И. Целикова), для оценки режимов прокатки и исключения достижения предельной деформации разрушения металла в прикромочной зоне.

4. Разработан новый подход к выбору рациональной формы калибра эджера, основанный на численном моделировании влияния угла наклона полок, высоты и выпуклости дна калибра эджера на полноту заполнения зева калибра, перемещения острых угловых участков и пятна контакта наклонных полок калибра с поверхностью сляба. Практически доказано, что применение такого подхода позволяет разработать рациональную форму калибра эджера, обеспечивающую повышение стойкости валков и уменьшение образования дефектов на готовой горячекатаной полосе. В условиях ЛПК АО «ВМЗ» для сляба толщиной  $h = 105$  мм рациональной является симметричная форма калибра, радиус выпуклости дна калибра  $R = 90$  мм; угол наклона полок калибра  $\alpha = 30^\circ$ ; высота дна калибра до  $h_k = 110$  мм. Промышленными экспериментами обосновано использование обжатия в эджерной клетке для предотвращения образования прикромочных дефектов.

5. Практическое применение методики позволило усовершенствовать технологический процесс прокатки горячекатаных полос из марки стали 22ГЮ в условиях литейно-прокатного комплекса и снизить на всем сортаменте данной стали образование дефектов. Внедрение в условиях литейно-прокатного комплекса АО «ВМЗ» разработанной формы калибра эджера позволило увеличить стойкость валкового комплекта с 300 тыс. т до 500 тыс. т, снизить в два раза величину снимаемого слоя при переточке валкового комплекта,

уменьшить риск получения плен, трещин, закатов на кромках готовой полосы и обеспечить экономический эффект не менее 3,8 млн руб. в год и снижение РКМ на 1,5 кг/т.

### **Основные публикации по теме диссертации**

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Даниленко А.В. Особенности формирования прикромочных трещин при производстве горячекатаного проката на современных толстолистовых, широкополосных станах и литейно-прокатных комплексах Часть 1 / В.А. Скуднов, А.В. Мунтин, В.В. Науменко // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. №8. С. 361-369. (1,25 п.л. / 0,33 п.л.).
2. Даниленко А.В. Особенности формирования прикромочных трещин при производстве горячекатаного проката на современных толстолистовых, широкополосных станах и литейно-прокатных комплексах. Часть 2 / В.А. Скуднов, А.В. Мунтин, В.В. Науменко // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. №10. С. 462-468. (1 п.л. / 0,27 п.л.).
3. Даниленко А.В. Исследование природы образования поверхностных дефектов горячекатаного проката в прикромочной зоне / В.В. Науменко, А.В. Мунтин, О.А. Баранова // Сталь. 2020. №1. с. 40 – 45. (0,75 п.л. / 0,19 п.л.)
4. А.В. Даниленко, А.В. Мунтин, В.В. Науменко, В.М. Максимов Совершенствование формы калибра эджерного вала черновой группы широкополосного стана литейно-прокатного комплекса // Сталь. 2021. №4. с. 18 – 23. (0,75 п.л. / 0,19 п.л.).
5. Даниленко А.В. Методика оценки склонности металла к трещинообразованию при различных режимах прокатки А.В. Мунтин, А.А. Хлыбов // Черные металлы. 2023г. №10. С. 85-93. (1,13 п.л. / 0,43 п.л.).

В других печатных изданиях:

1. Даниленко А.В. Влияние формы калибра эджера на образование дефектов в прикромочной зоне прокатываемой полосы в условиях ЛПК АО «ВМЗ» / Д.В. Даниленко, В.М. Максимов // Сборник тезисов X научно-практической конференции молодых специалистов ОМК им. С.З. Афонина. – г. Выкса, 27-29 ноября 2017. С. 30-31. (0,25 п.л. / 0,08 п.л.).
2. Даниленко А.В. Разработка новой формы калибра эджера на черновой группе стана 1950 ЛПК АО «ВМЗ» / И.А. Шкретов, В.В. Науменко // Сборник тезисов XIII научно-практической конференции молодых специалистов ОМК им. С.З. Афонина. – г. Выкса, 2-3 декабря 2020. С. 33-34. (0,25 п.л. / 0,08 п.л.).
3. Даниленко А.В. Исследование особенностей трансформации поверхностных дефектов в прикромочной зоне горячекатаного рулонного проката В.В. Науменко, А.В. Мунтин // Сборник тезисов. Москва 2021г. с. 44 - 47. (0,5 п.л. / 0,17 п.л.).
4. Даниленко А.В. Исследование особенностей трансформации поверхностных дефектов в прикромочной зоне горячекатаного рулонного проката / В.В. Науменко, А.В. Мунтин // Сборник тезисов Всероссийской научно-технической конференции «Вопросы металловедения и термической обработки». - г. Москва, 15-16 апреля 2020. С. 44-48. (0,63 п.л. / 0,21 п.л.).
5. Даниленко А.В. Конструктивные мероприятия по уменьшению прикромочных трещин рулонного проката / Скуднов В.А. // Сборник материалов XV международной научно-технической конференции. Нижний Новгород. 2016. С. 336-337. (0,25 п.л. / 0,08 п.л.).
6. Даниленко А.В. Особенности трансформации поверхностных дефектов прикромочной зоны рулонного проката / В.В. Науменко, А.В. Мунтин, И.А. Шкретов // Сборник материалов VIII региональной межвузовской научно-практической конференции «творчество молодых – родному региону». Выкса. 2021. С. 21 – 27. (0,88 п.л. / 0,25 п.л.).
7. Даниленко А.В. Закономерности трансформации дефектов прикромочной зоны в зависимости от формы и расположения на слябе ЛПК АО «ВМЗ» / И.А. Шкретов, В.В. Науменко // Тезисы докладов научно-практической конференции молодых специалистов ОМК им. С.З. Афонина. Выкса, 2021. С. 44 – 45. (0,25 п.л. / 0,08 п.л.).

8. Даниленко А.В. Оценка склонности металла к трещинообразованию / А.В. Мунтин, А.А. Хлыбов // Труды XIII Конгресса прокатчиков (том II). Сборник статей. Москва: Грин Принт, 2022. – С. 67 – 77. (0,88 п.л. / 0,30 п.л.).