

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»

На правах рукописи



Суфьянов Дим Вадимович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ
ДЛЯ ИНТЕНСИФИЦИРОВАНИЯ УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ
НЕПРЕРЫВНОЛИТАЯ ЗАГОТОВКА-ГОРЯЧЕКАТАНАЯ ПОЛОСА**

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Николай Николаевич Огарков

Магнитогорск, 2017

Содержание	
Введение.....	5
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТА «ОКАЛИНА» ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПЕРЕДЕЛАМ.....	11
ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ПОЛОСЫ.....	11
1.2 Влияние технологии производства НЛЗ и горячекатаной полосы на образование и удаляемость окалины.....	15
1.3 Влияние окалины на формирование качественных характеристик поверхностного слоя НЛЗ и горячекатаной полосы.....	17
1.3.1 Влияние окалины на формирование качественных характеристик.....	17
поверхностного слоя НЛЗ	17
1.3.2 Влияние окалины на формирование качественных характеристик.....	20
поверхностного слоя горячекатаной полосы	20
1.4 Анализ существующих способов удаления окалины в процессе	25
непрерывного литья заготовок и прокатки.....	25
1.4.1 Удаление окалины гидросбивом	27
1.4.2 Удаление окалины на непрерывно травильных агрегатах.....	29
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОКАЛИНЫ С РОЛИКАМИ МНЛЗ И НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКОЙ	33
2.1 Исследование состояния рабочих поверхностей роликов МНЛЗ.....	33
2.2 Математическое моделирование процесса взаимодействия окалины.....	38
с роликами МНЛЗ и непрерывнолитой заготовкой.....	38
2.3 Определение ограничений, накладываемых на условия налипания окалины на ролики МНЛЗ или вдавливания ее в непрерывнолитую.....	45
заготовку	45
2.4 Исследование износостойкости наплавочных материалов	58
и разработка рекомендаций по уменьшению налипания окалины	58
на ролики МНЛЗ.....	58
2.5 Исследование износа и обрабатываемости наплавленных	65
и ненаплавленных роликов МНЛЗ из материала 25Х1МФ	65
2.6 Разработка опытно-промышленной установки.....	68
для электроконтактной обработки наплавленных роликов МНЛЗ.....	68

2.7 Выводы	71
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	74
И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА	74
ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТА «ВКАТАНАЯ ОКАЛИНА».....	74
3.1 Оборудование, оснастка и образцы для исследования механизма	74
образования «вкатаная окалина»	74
3.2 Экспериментальное исследование механизма образования дефекта «вкатаная окалина»	77
3.3 Аналитическое исследование условий образования дефекта	82
«вкатаная окалина»	82
3.3.1 Анализ возможных вариантов образования дефекта	82
«вкатаная окалина»	82
3.3.2 Теоретический анализ перемещения фрагментов окалины.....	83
при деформации раскатываемых выступов с образованием	83
и без образования дефекта «вкатаная окалина».....	83
3.3.3 Теоретический анализ перемещения фрагментов окалины при деформации впадин с образованием и без образования дефекта «вкатанная окалина».....	92
3.4 Моделирование процесса гидромеханического удаления окалины	98
с горячекатаной полосы.....	98
3.5 Исследование процесса гидромеханического удаления окалины	101
с горячекатаной полосы.....	101
3.6. Выводы	107
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РАЗРЫХЛЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ	110
НА ИЗГИБО-РАСТЯЖНОМ ОКАЛИНОЛОМАТЕЛЕ	110
4.1 Эффективность использования изгибо-растяжных.....	110
окалиноломателей в непрерывно-травильных агрегатах.....	110
4.2. Методика исследования процесса удаления окалины при	111
прохождении её через изгибо-растяжной окалиноломатель	111
4.3. Исследование процесса удаления окалины с полосы при	114
прохождении её через изгибо-растяжной окалиноломатель	114

4.4. Разработка методики расчета величины натяжения полосы	119
и радиуса изгибающих роликов изгибо-растяжного окалиноломателя НТА.....	119
4.5 Выводы	128
Заключение	130
Список литературы.....	133
Приложения.....	147

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающая конкуренция в условиях глобализации рынка регламентирует жесткие требования к качеству непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) и горячекатаной продукции, которые должны обеспечиваться на всех стадиях технологической цепочки. Особенно жесткие требования предъявляются на начальных стадиях технологической цепочки, поскольку вследствие технологической наследственности, дефекты, образовавшиеся на стадии производства НЛЗ, впоследствии, проходя стадии горячекатаного передела, часто комбинируются и усиливают друг друга и исправление их является затруднительным, а иногда невозможным.

Одним из нежелательных явлений при производстве НЛЗ и горячекатаной продукции является окисление горячего металла в окружающей среде с образованием на его поверхности окалина. Образование окалина способствует потере полезной массы металла и ухудшает качество поверхности металлопродукции и, как следствие, увеличивает технологические отходы на металлургических предприятиях. Увеличение технологических отходов только в результате потери металла вследствие высокотемпературного окисления с образованием окалина достигает 1-2 % в зависимости от применяемой технологии.

Негативная роль окалина прослеживается на всех стадиях металлургического передела. На стадиях производства непрерывнолитых заготовок окалина, образовавшаяся вследствие агрессивного воздействия воды и пара на металл при высоких температурах, налипает на поддерживающие ролики или вдавливается в поверхность НЛЗ. Налипшая окалина формирует выступы на поверхностях роликов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), которые оставляют вмятины на поверхности НЛЗ и усугубляют вдавливание фрагментов окалина вглубь металла.

Вдавленная в НЛЗ окалина провоцирует появление дефекта «вкатаная окалина» на стадиях горячекатаного передела, которая является трудноудаляемой на непрерывно-травильных агрегатах (НТА).

Опыт работы МНЛЗ и станов горячей прокатки показывает, что используе-

мые технологии и устройства для удаления окалины с поверхности НЛЗ и горячекатаной полосы пока еще далеки от совершенства и не всегда обеспечивают ожидаемого от них эффекта. Особенно малоэффективными являются методы предотвращения образования вторичной окалины и оборудование для удаления ее с поверхности металла, в частности, изгибо-растяжных машин, встроенных в НГА и предназначенных для предварительного разрушения окалины при подготовке горячекатаной полосы к травлению.

Таким образом, уменьшение негативного влияния окалины на качество НЛЗ и горячекатаной полосы на всех стадиях металлургического передела во многом сдерживается из-за несовершенства применяемых на МНЛЗ и станах горячей прокатки технических разработок и математического описания закономерностей, в соответствии с которыми происходит взаимодействие окалины с металлом, контактирующими с ней роликами МНЛЗ, прокатными валками и роликами изгибо-растяжных машин.

Поэтому вопросы совершенствования математических моделей, описывающих связи в системе заготовка-инструмент-машина при наличии между ними окалины и разработка на этой основе технических решений, направленных на улучшение качества горячекатаной продукции и снижение технологических отходов, является актуальной научно-технологической задачей, имеющей существенное значение для экономики страны.

Объект исследования - способы и устройства для интенсифицирования удаления окалины с поверхностей непрерывнолитой заготовки и горячекатаной полосы.

Предмет исследования - математическое и физическое моделирование процессов и устройств для интенсифицирования удаления окалины, технические решения по их совершенствованию, механизм образования дефекта «вкатаная окалина».

Цель работы - разработка научно-обоснованных технических решений, направленных на совершенствование способов и устройств для интенсифицирования удаления окалины на всех этапах производства горячекатаного проката на ос-

нове результатов моделирования процессов в технологической системе непрерывнолитая заготовка - горячекатаная полоса. Эта система включает в себя подсистемы: непрерывнолитая заготовка - ролик МНЛЗ, полоса - валок окалиноломателя перед гидросбивом, полоса - гидросбив и полоса - изгибо-растяжной окалиноломатель.

Задачи исследования, направленные на достижение поставленной цели:

1. Исследовать условия и смоделировать процесс взаимодействия окалины с роликами МНЛЗ и непрерывнолитой заготовкой с целью разграничения условий налипания ее на ролики или вдавливания в непрерывнолитую заготовку.

2. Выполнить аналитическое исследование процесса образования дефекта «вкатаная окалина» с учетом взаимодействия фрагментов окалины с неровностями горячекатаной полосы и рабочей поверхностью валка.

3. Смоделировать узел системы гидромеханического удаления окалины и установить закономерность влияния диаметра форсунки, давления струи жидкости и температуры нагрева металла на количество удаляемой окалины.

4. Исследовать процесс разрыхления и удаления окалины на изгибо-растяжном окалиноломателе с разработкой методики расчета величины натяжения полосы и радиуса роликов, обеспечивающих эффективное разрыхление и удаление окалины.

5. Разработать технические решения по снижению дефекта «окалина» с учетом технологической наследственности по переделам горячекатаной полосы.

Научная новизна работы:

1. Разработана математическая модель процесса взаимодействия окалины с НЛЗ и роликами, отличающаяся тем, что она включает уравнения, позволяющие количественно определить сочетание конструктивных параметров МНЛЗ, доли жидкой фазы в НЛЗ, несущей способности закристаллизовавшейся корки и степени заполнения впадин изношенной поверхности роликов, при которых происходит вдавливание фрагментов окалины в НЛЗ или налипание их на поверхность роликов.

2. Получены новые данные по износостойкости наплавочных материалов и

способу обработки, необходимые для научно-обоснованного использования их при восстановлении роликов МНЛЗ с целью снижения износа их поверхностей и налипания на них окалины при эксплуатации.

3. Дано математическое описание с экспериментальным подтверждением процесса взаимодействия фрагментов окалины с прокатываемым металлом, позволяющее наложить ограничения на геометрию канавок на поверхности НЛЗ после их огневой зачистки или после применения рифленых валков окалиноломателей с целью исключения дефекта «вкатаная окалина».

4. Получена аналитическая зависимость, позволяющая теоретически обосновать величину радиуса изгибающего ролика и величину угла охвата ролика полосой, обеспечивающие эффективное разрыхление и удаление окалины с поверхности полосы на изгибо-растяжном окалиноломателе, отличающаяся тем, что в ней учитывается наличие роликов разных диаметров и возможность их смещения от уровня полотна основных роликов окалиноломателя.

Практическая ценность работы:

1. Разработаны рекомендации по отбраковке роликов МНЛЗ зоны вторичного охлаждения с налипшей на ее поверхность окалиной с углами между их боковыми поверхностями менее 75° и канавками износа, угол наклона боковых поверхностей которых менее 80° .

2. С целью уменьшения налипания окалины на поверхность роликов МНЛЗ, рекомендовано исключить операцию отжига после восстановления их наплавкой. Для обработки высокотвердой наплавленной поверхности предложено использовать электроконтактный метод с разработанной конструкцией диска электрода (патент на полезную модель РФ №97665).

3. Сформулированы рекомендации по корректировке технологии огневой зачистки поверхностных дефектов НЛЗ. Боковые поверхности канавка огневой зачистки поверхностных дефектов должны составлять угол с поверхностью заготовки $50...55^\circ$, а углы между ее боковыми поверхностями $70...80^\circ$. При использовании рифленых валков рекомендовано применять выступы рифлений с углом наклона между их боковыми поверхностями не менее 75° .

4. Усовершенствована конструкция (патент на полезную модель РФ №96799) и режимы настройки изгибо-растяжного окалиноломателя, обеспечивающие эффективное растрескивание окалины и удаление ее с полосы.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается использованием основ теории пластичности и упругости, современных методов экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием профилометра Mahr PS 1 с отсечкой шага 0,25 мм, разрывной машины ММ-10, инструментального микроскопа БМИ, толщиномера АТ1. Обработка экспериментальных данных выполнялась с применением пакета программ Statistica 6.1. Площадь удаленной окалины с поверхности горячекатаной полосы измеряли при помощи программы Photoshop 5.0 с преобразованием сфотографированного участка в цифровой формат.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований и новые математические зависимости для расчета напряженного состояния закристаллизовавшейся корки НЛЗ, при вдавливании в нее фрагментов окалины, способствующего удержанию их на поверхности во вдавленном состоянии или налипанию на поверхность ролика МНЛЗ.

2. Механизм образования дефекта «вкатаная окалина». Результаты экспериментальных исследований и новые математические решения по кинематически возможному перемещению фрагментов окалины при деформации раскатываемых выступов и впадин с образованием и без образования дефекта «вкатаная окалина».

3. Усовершенствованная конструкция изгибо-растяжного окалиноломателя, результаты экспериментальных исследований и новые математические зависимости по расчетам усилия протягивания горячекатаной полосы и радиуса изгибающего ролика для обеспечения эффективного растрескивания окалины и ее удаления с горячекатаной полосы.

Реализация результатов работы.

Разработанная конструкция опытно-промышленной установки электроконтактной обработки высокотвердых наплавленных роликов МНЛЗ была принята за основу для изготовления промышленной установки в условиях ООО «Механоремонтный комплекс» г. Магнитогорска.

Научные разработки автора внедрены в учебном процессе и используются при чтении курсов «Процессы и операции формообразования», «Наукоемкие конструкторско-технологические решения», а также при курсовом проектировании и выполнении выпускных квалификационных работах по направлениям 15.03.05 и 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств [Приложение 3].

Понятие технологической системы в диссертации рассматривается как «совокупность функционально взаимосвязанных предметов труда, средств технологического оснащения и исполнителей, реализующих в регламентирующих условиях производство продуктов и услуг с заданными свойствами» [1].

Поддержание заданных свойств горячекатаной полосы при ее производстве включают следующие функционально взаимосвязанные предметы труда и процессы: непрерывнолитая заготовка - ролик МНЛЗ, полоса - валок окалиноломателя перед гидросбивом окалины, полоса - гидросбив окалины и полоса - изгибо-растяжной окалиноломатель перед травлением, которые представляют целостную систему непрерывнолитая заготовка - горячекатаная полоса.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТА «ОКАЛИНА» ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПЕРЕДЕЛАМ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ПОЛОСЫ

Качеству горячекатаной продукции уделяется серьезное внимание на всех этапах производства. В результате аналитического исследования источников [1-28] выявлено, что множество авторов сводят проблемы качества горячекатаного проката к наличию окалины на его поверхности, на которое влияет:

- качество оборудования МНЛЗ и его соответствие уровню развития используемой технологии;
- качество непрерывнолитой заготовки;
- состояние нагревательных устройств и технологии нагрева НЛЗ перед прокаткой;
- эффективность окалиновзламывающих устройств;
- состояние поверхности прокатных валков;
- мониторинг качества поверхности металла на всех этапах технологической цепочки.

Существенное влияние на качество НЛЗ и горячекатаной полосы оказывает наличие окалины на их поверхностях, которая на стадии производства НЛЗ формируется при взаимодействии раскаленного металла с воздухом, охлаждающей жидкостью и паром, а на стадии горячей прокатки при нагревании заготовок в методических печах при взаимодействии с кислородом и другими газами-окислителями, содержащимися в печной атмосфере, и непосредственно на прокатном стане при контакте с окружающей средой (воздух, водяной пар) в межклетевых пространствах и на отводящем рольганге.

В зависимости от применяемого оборудования и технологии количество образующейся на поверхности металла окалины может достигать 1-2 %, что в масштабах страны составляет 500-1000 тысяч тонн в год и фактически соответствует годовому объему производства стали на металлургическом заводе средней мощности [142, 144].

1.1 Физико-химические процессы образования окалины и ее структура

Производство непрерывнолитой заготовки, прокатка, ковка, горячая объемная штамповка и другие технологические процессы обработки, связанные с нагревом и охлаждением железа и стали на воздухе или в продуктах сгорания топлива сопровождаются окислением обрабатываемых металлов и сплавов. При окислении, которое особенно интенсивно протекает при температурах, превышающих 600 C° , поверхность стали покрывается продуктами газовой коррозии — окалиной [82].

К наиболее значительным работам по изучению окалинообразования следует отнести монографии В. И. Архарова [73], И. Н. Францевича, Р. Ф. Войтовича, В. А. Лавренко [74], О. Кубашевского и В. Гопкинса [75], работы Ж. Бенара, Ж. Валаней, Ж. Пайдасси [76, 77]. Однако механические свойства окалины в этих работах не рассматриваются, а лишь указывается на необходимость их исследования. Изучению свойств окалины применительно к условиям обработки металлов давлением посвящены работы В. Н. Рудбаха и С. М. Сафонова [78], В.М. Темлянцева [142] и Н.В. Темлянцева [143].

Исследования механических и физических свойств отдельных составляющих фаз окалины проведены авторами [79, 80, 81, 142, 143].

Окалина, образующаяся на углеродистых и низколегированных сталях, состоит, как правило, из трех слоев, которые приблизительно соответствуют закиси FeO (вюстит), окиси железа Fe_2O_3 (гематит) и магнетиту Fe_3O_4 [73-77]. Двусторонняя диффузия реагентов в слое вюстита проявляется в разделении его на два подслоя [55-57].

Последовательность в расположении слоев разных фаз в окалине соответствует последовательности этих фаз на диаграмме состояния железо-кислород [77]. При наличии стали легирующих элементов кремния, молибдена и ванадия на ее поверхности при высоких температурах образуются соединения Fe_2SiO_4 (фаялит), MnO_3 и V_2O_5 , которые относятся к труднотравимым [144].

Сцепление окалины с окисляемой металлической поверхностью при горячей обработке давлением играет важную роль. С одной стороны, прочное сцепление окалины уменьшает окисление стали во время нагрева заготовок в печах и при их последующей обработке; с другой стороны, затрудняет удаление окалины в процессе деформации, а также перед последующей деформацией заготовок в холодном состоянии или другими видами обработки, что приводит к ухудшению качества поверхности изделий и повышает износ инструмента.

В работах [89, 143] подробно рассмотрены основные случаи образования поверхности отрыва окалины от металла при различном состоянии слоя окалины на границе раздела.

В общем случае можно выделить три характерных типа строения поверхности раздела окалина-сталь (Рисунок 1.1): слоевой (послойный), зернограничный и сталагмитообразный (от греческого stalagma - капля) [143].

В случае слоевого типа строения между металлом и окалиной имеется резкая граница раздела. При таком строении при деформации металла в процессе прокатки окалина отделяется достаточно легко. Слоевой тип поверхности раздела наблюдается после сравнительно низкотемпературного (до 1000-1050°C) нагрева сталей, не содержащих легирующих элементов, способных образовывать легкоплавкие соединения, например углеродистых, хромистых и др.

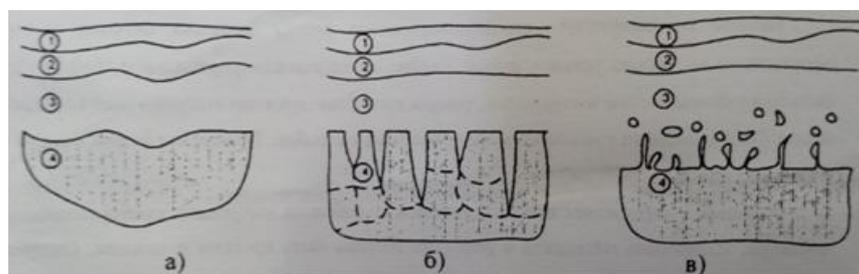


Рисунок 1.1 - Типы строения поверхности раздела окалина-сталь [143]:

- а) слоевой; б) зернограничный; в) сталагмитообразный; слои: 1 - Fe_2O_3 (гематит); 2 - Fe_3O_4 (магнетит); 3 - FeO (вюстит); 4 - сталь

В случае образования поверхности раздела зернограничного типа (Рисунок 1.1б) окалина проникает по границам зерен металла (на рисунке 1.1б показаны пунктирной линией). Зернограничному окислению способствуют легкоплавкие соединения, более высокие по сравнению со слоевым типом температуры нагрева до 1150-1250 °С. Он характерен для сталей типа 10ХСНД, 15ХСНД, 30ХГСА и аналогичных по химическому составу. Сцепление окалина с поверхностью стали при зернограничном типе поверхности раздела выше, чем при слоевом.

Наибольшее сцепление окалина с металлом наблюдалось в случае, когда образуется поверхность раздела сталагмитообразного типа (Рисунок 1.1в). Поверхность стали и слой вюститита представляют собой оксидно-металлическую композицию, содержащую хаотично расположенные частицы обезуглероженной стали (практически железа) округлой, сферообразной (каплевидной) формы, многие из них вытянуты и связаны с основной поверхностью стали и заполняющую пространство между частицами вюститную матрицу. Для такого типа строения явная граница раздела окалина-сталь фактически отсутствует. Данный вид поверхности раздела наблюдался при температурах нагрева до 1200-1250 °С и более и является следствием развития зернограничного типа, вызванного температурным воздействием более высокого уровня. Для возникновения сталагмитообразного типа поверхности раздела необходимо обязательное наличие жидкой фазы, т.е. оплавления легкоплавких соединений окалина.

Н.В. Темлянцевым отмечается, что рассмотренные типы поверхностей в общем случае могут наблюдаться при нагреве одной марки стали, но в различных температурных интервалах. При этом определенное влияние оказывает неравномерность температурного поля по периметру нагреваемого НЛЗ, например, в области середины грани может быть зернограничный тип поверхности раздела, а в области перегретых углов или торцов - сталагмитообразный. Таким образом, оборудование и технологии производства НЛЗ и горячекатаной полосы оказывают существенное влияние на строение и характер сцепления окалина с металлом.

1.2 Влияние технологии производства НЛЗ и горячекатаной полосы на образование и удаляемость окалины

Существенное влияние на окалинообразование оказывает атмосфера окисления [82], химический состав окалины и длительность окисления [75, 83], температура и скорость нагрева металла [84]. Влияние на скорость окисления оказывает сочетание газов-окислителей в печной атмосфере и наличие в ней примесей [77, 82, 85, 86]. Химический состав атмосферы, давление и скорость потока окисляющих газов во многом зависят от типа конструкции нагревательных устройств и выбранного режима нагрева [87, 88].

Результаты исследования [104] свидетельствуют о влиянии температурно-деформационного режима прокатки на удаление окалины с поверхности НЛЗ, нагретых под прокатку углеродистых, низколегированных и среднелегированных сталей.

В.Н. Перетятыко и Н.В. Темлянцев отмечают, что наиболее благоприятный температурно-деформационный режим прокатки с точки зрения удаляемости окалины с горячекатаной полосы существенно зависит от химического состава нагреваемой и деформируемой марки стали. Применительно к углеродистой марки стали 3 пс хорошее отделение окалины наблюдается в диапазоне температур 1050-1250 °С и степеней деформации 6-30%. В аналогичных условиях нагрева и деформаций стали марки 40Х В.Н. Перетятыко и Н.В. Темлянцев отмечают худшее отделение окалины по сравнению с углеродистой сталью 3 пс, что по их мнению связано с присутствием хрома. Для стали марки 15ХСНД температурно-деформационный режим под прокатку характеризуется более узким интервалом температуры нагрева и обжатий. Наиболее благоприятной точки зрения окалиноудаления является температура нагрева 1150 °С и обжатие около 16 %. Наихудшее удаление окалины с этой стали наблюдается при высокотемпературном нагрева до 1250 °С, степени деформации более 30 % и нагреве до 1050 °С и степени деформации 10 %.

Аналогичную чувствительность к температурно-деформационному режиму проявляет кремнистая сталь марки 60С2. Улучшить удаляемость окалины при прокатке этой марки стали авторы рекомендуют нагревом ее не выше 1150-1180 °С и обжатием в первых проходах до 20-25 % [104, 143].

Удаляемость окалины стали марки 30ХГСА также весьма чувствительна к температуре нагрева и степени деформации. Характерно, что наилучшее удаление окалины наблюдается при более высокой температуре нагрева - 1250 °С и степени деформации 16,7 %, а хуже всего окалина удаляется при температуре 1050 °С и степени деформации менее 3-5 %. Поэтому авторы рекомендуют нагрев до температуры не более 1180-1200 °С и степень деформации в первых проходах 10-15 %.

Высокую чувствительность к температурно-деформационному режиму при горячей прокатке авторы объясняют интенсивностью зернограничного проникновения оксидов вглубь металла (сталь 30ХГСА), отрицательным влиянием по границе раздела металл - окалина легкоплавких образований сульфида никеля и оксида меди (сталь 15ХСНД), образованием в окалине легкоплавкого фаялита (сталь 60С2).

Резюмируя вышесказанное, следует отметить, что наиболее легко при первичных обжатиях удаляется окалина со стали марки 3 пс, поскольку поверхность раздела сталь - окалина достаточно ровная, а следы зернограничного проникновения оксидов в сталь отсутствуют. Соответственно, для этой марки стали и для стали 40Х нагрев до температур 1250 °С безопасен с точки зрения опасности образования вкатаной окалины.

С точки зрения окалиноудаления и дефекта «вкатаная окалина» сталь марки 15ХСНД является одной из наиболее проблемных при производстве листовой продукции, поскольку при ее нагреве формируется неровная поверхность раздела сталь - окалина, а соответственно улучшается сцепляемость окалины со сталью [143].

Ф.К. Петерс и Я.Дж. Энжель [90], исследуя способность окалины к деформированию, отмечают, что при деформации заготовки толстые слои окалины отде-

ляются сравнительно легко, а тонкие (от 5 до 30 мкм) деформируется вместе с заготовкой без ее разрушения и отделения.

1.3 Влияние окалина на формирование качественных характеристик поверхностного слоя НЛЗ и горячекатаной полосы

1.3.1 Влияние окалина на формирование качественных характеристик поверхностного слоя НЛЗ

Образовавшаяся на поверхности НЛЗ окалина вследствие окисления раскаленного металла под действием окружающей среды, принимает непосредственное участие в формировании качественных показателей поверхности НЛЗ, поскольку является промежуточным слоем между затвердевшей частью НЛЗ и поддерживающими ее роликами МНЛЗ. Как правило, деформации (вмятины) на широких гранях сляба появляются вследствие интенсивного процесса окалинообразования и вдавливания фрагментов окалина в его поверхность [29-32]. Не только механическое воздействие окалина оказывает влияние на качество поверхности НЛЗ, но и химические реакции, протекающие на ней.

Образовавшаяся окалина совершенно по-разному ведет себя при контакте с роликами МНЛЗ. Например, окалина может налипать на ролик. Смирновым А.Н., Цупруном А.Ю. и др. [29] дано описание механизма наматывания окалина на ролик (рис.1.2) и сделан вывод, что явление наматывания окалина на поддерживающие ролики МНЛЗ связано как с физическими процессами, так и с химическими, и устранение этого явления достаточно трудоёмко.

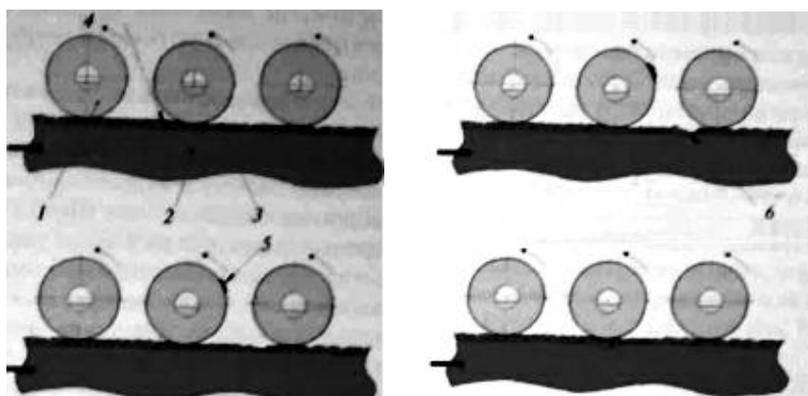


Рисунок 1.2 - Схема механизма налипания окалины на поддерживающие ролик: 1 - ролик; 2 - сляб; 3 - слой окалины на поверхности заготовки; 4 - вкрапления шлака; 5 - окалина, налипшая на поверхность ролика; 6 - вдавленный поверхностный слой заготовки

Процесс, аналогичный формированию сляба в МНЛЗ, проходит в валковых совмещенных агрегатах [33, 34]. Для обеспечения качественной поверхности полосы и работоспособности валков, затвердевшие на их поверхности, частицы металла приходится удалять специальной обработкой валков металлическими щетками [35] или шлифовальными кругами [36]. Так, в работе [36] указано, что для удаления с поверхности валков частиц металла («чешуек») следует в течение всего времени разливки проводить обработку валков шлифовальными кругами, а между разливками обточкой валков устранять вмятины, царапины и локальные углубления на поверхности.

Исследования, проведенные на ОАО «ММК», показали, что производство непрерывнолитой заготовки сопровождается высоким износом рабочей поверхности роликов МНЛЗ. Распространенные дефекты рабочей поверхности роликов проявляются в виде изношенных участков, выемок, сколов, бугров налипшей окалины и т.д. Установлено, что качество рабочей поверхности не сохраняется до конца регламентированного срока [130].

Выемки, сколы и изношенные участки на поверхности роликов способствуют лучшему удержанию окалины налипшей, на их рабочую поверхность.

Выступающие на поверхности роликов МНЛЗ фрагменты налипшей окалины не только оставляют отпечатки на поверхности НЛЗ, но и вдавливают окалину с поверхности НЛЗ вглубь металла [17]. Если в процессе зачистки поверхности НЛЗ под прокатку

такие фрагменты вдавненной окалины не полностью удаляются с НЛЗ, то при последующих переделах они могут спровоцировать дефект «вкатаная окалина».

Одним из методов уменьшения эффекта налипания окалины на ролики является применение для их изготовления более износостойких и термостойких материалов. Высокая термостойкость и износостойкость подразумевают высокие механические свойства, что, в свою очередь, приводит к низкой механической обрабатываемости роликов и является неприемлемым в промышленных условиях. В частности, при восстановлении рабочей поверхности роликов их подвергают наплавке, для чего используют материал, твердость которого достигает 450 НВ.

Для решения данной проблемы, с целью улучшения обрабатываемости, наплавленные ролики подвергают отжигу, снижая твердость наплавленного слоя до 220-250 НВ (почти в 2 раза). Такое снижение твердости, действительно, улучшает обрабатываемость резцами, но снижает стойкость рабочей поверхности роликов к образованию дефектов на поверхности при эксплуатации.

С целью обеспечения приемлемой производительности обработки наплавленных роликов при сохранении их высоких эксплуатационных свойств Н.В. Мазуром совместно с автором была проанализирована возможность замены механической обработки наплавленного слоя альтернативными видами обработки. В результате анализа было установлено, что наиболее производительным и приемлемым способом для обработки роликов МНЛЗ с использованием существующего оборудования является электроконтактная обработка (ЭКО) [138].

Известно, что электроконтактный способ обработки (ЭКО) высокотвердых марок сталей и сплавов имеет высокую производительность независимо от механических свойств обрабатываемого материала и не создаёт дефектного слоя [136, 138].

ЭКО используется в промышленности для обработки деталей из высокомарганцевистой стали 110Г13Л: брони конусов дробилок; футеровки плит; деталей, восстановленных наплавкой, например конуса засыпных аппаратов, и др.

По данным [136, 138], ЭКО позволяет обрабатывать детали с шероховатостью поверхности 30-160 мкм и зоной термического влияния не более 0,5 мм, хо-

тя известны случаи, когда зона термического влияния достигает нескольких миллиметров.

Однако, применительно к обработке и исследованию износа наплавленных роликов, такие данные являются малоизученными. Недостаточно информации и по износостойкости материала, из которого изготавливаются ролики МНЛЗ. Отсутствует опыт применения ЭКО к обработке роликов МНЛЗ в промышленных условиях.

1.3.2 Влияние окалины на формирование качественных характеристик поверхностного слоя горячекатаной полосы

Анализ научно-технической литературы [40-53] показывает, что вопросам качества проката и сокращению отходов горячекатаного проката из-за дефектов возникающих на стадии горячекатаного передела уделяется серьезное внимание. Одним из таких дефектов является «окалина».

Наличие на поверхности металла окалины влияет не только на проявление дефекта «окалина» на конечной продукции, но и на закономерности процесса взаимодействия поверхности полосы с прокатными валками, являясь прослойкой между ними.

Авторы [104] утверждают, что печная окалина, образующаяся на сталях при высокотемпературном нагреве под прокатку, оказывает существенное влияние не только на теплообменные процессы, точность измерения температуры поверхности металла [105], но и в значительной степени влияет на свойства поверхности подката с точки зрения взаимодействия с деформирующим инструментом. По данным работы [64], при пластической деформации печная и прокатная окалина, обладающая высокой абразивной способностью (в зависимости от марки стали и способов нагрева ее величина может составлять 11,4-24,9 % от абразивной способности монокорунда), приводит к повышенному износу валков.

Воздействие окалины на контактное трение, следовательно, и на характер течения металла может быть различным. Если в создавшихся температурно-скоростных и силовых условиях деформации предел текучести окалины меньше,

чем у деформируемого металла, окалина уменьшает коэффициент трения, играя роль смазки. Если же прочность окалины превышает прочность деформируемого металла, контактное трение увеличивается и пластический контакт, сопровождающийся разрывом скорости, видоизменяется, смещаясь частично или полностью с поверхности инструмента в слой окалины или в деформируемый металл.

В работах С. И. Губкина, Т. М. Голубева, И. М. Павлова, М. В. Сторожева, Е. А. Попова, И. Я. Тарновского, А. Д. Томленова, Е. П. Унксова, А. П. Чекмарева, А. К. Чертавских, В. К. Белосевича, Ю. М. Чижикова и других авторов [65-72] изменением свойств окалины объясняются характер распределения сил трения в очаге деформации и зависимость величины удельных сил трения от температуры. Наличие легкоплавкой составляющей фракции в окалине (фаялита, MoO_3 , V_2O_5) изменяет условия захвата прокатываемой полосы и может служить пробуксовкой полосы в прокатных валках.

Результаты исследования, выполненные Н.М. Темлянцевым [143] свидетельствуют, что в очаге деформации окалина резко охлаждается и растрескивается. Охлаждаясь, она становится более твердой и вдавливается в примыкающие к ней слои металла, при этом деформируемый металл заполняет пространства трещин между фрагментами окалины. После удаления окалины на поверхности проката образуются выпуклости, которые являются причиной дефекта «рябизна».

В зависимости от стадии горячекатаного передела авторы работы [119] различают первичную, вторичную и третичную окалину. Каждый вид окалины по своему влияет на образование поверхностных дефектов.

При дефекте поверхности «прилипшая окалина» речь идет о внедрении в процессе прокатки в поверхность изделия частиц первичной окалины. Данный дефект проявляется в виде отдельных точек, зон или дорожек, которые могут беспорядочно распределяться по ширине и длине как верхней, так и нижней стороны проката.

Результаты анализа современных технологических процессов показывают, что наиболее эффективный способ снижения отходов производства по дефекту «окалина», являющейся следствием вторичной и третичной окалины - это уско-

ренное охлаждение проката за чистовой клетью стана, в процессе его транспортировки по отводящему рольгангу [91].

Одной из главных причин появления дефекта «вкатанная окалина» на поверхности проката является некачественная зачистка поверхностных дефектов непрерывнолитых слябов перед прокаткой [96]. Несовершенство рекомендаций в технологической инструкции стана по огневой зачистке поверхностных дефектов заготовки не позволяет в дальнейшем полностью исключить появление дефекта «вкатанная окалина». Совсем немного работ посвящено исследованиям трансформации поверхностных дефектов заготовки при контакте её с роликами и валками. Авторы [37] считают, что надежные методы моделирования трансформации поверхностных дефектов позволяют отказаться от трудоемких экспериментов, с помощью которых сложно охватить все многообразие поверхностных дефектов в сочетании с различной формой очага деформации, условиями трения, режимом деформации и другими факторами прокатки. Исследование трансформации поверхностных дефектов с применением методов моделирования выполнено также в работах [38, 39]. Результаты моделирования иллюстрируются рисунком 1.3.

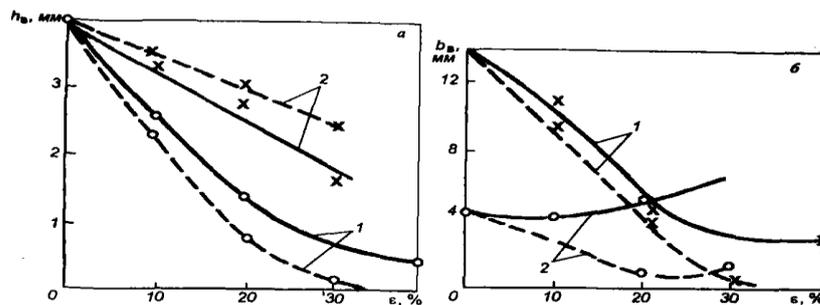


Рисунок 1.3 - Расчетное (---) и экспериментальное (---) изменение глубины (а) и ширины (б) треугольных поперечных впадин, $h_{B0} = 4$ мм: 1 - $\varphi = 120$ град; 2 - $\varphi = 60$ град

Результаты моделирования отражают наблюдаемое в эксперименте увеличение h_B (глубины впадин) при $\varphi = 60$ град с увеличением обжатия полосы, а также возможную асимметрию впадины (рис.1.3, б).

Продольная треугольная впадина ($\varphi = 60$ град), расположенная по оси симметрии образца, трансформируется иначе, чем поперечные впадины того же сечения, - ее размеры уменьшаются более интенсивно.

Следует отметить, что в работе [37] определены условия образования поверхностных впадин, но не были исследованы влияние и связь этих дефектов с наличием окалины, хотя полученные результаты могут быть косвенным подтверждением защемления окалины в этих впадинах или выкатывание ее на поверхность прокатываемой полосы.

Поведение вкатаной окалины достаточно интересно смоделировано в работе [93] в приложении к процессу волочения. В работе проведены исследования формоизменения дефектов поверхности (ФДП) при волочении. Согласно расчетам основными факторами, влияющими на ФДП, является угол раскрытия дефекта β и коэффициент трения f . Чем больше f и меньше β , тем быстрее прекращается формоизменение дефекта, который преобразуется в трещину. Угол раскрытия дефектов ($\beta < 100-110^\circ$) уменьшается с ростом деформации. Такие дефекты закрываются и преобразуются в поверхностные трещины. Дефекты ($\beta > 100-110^\circ$) при деформировании металла увеличивают угол раскрытия и полностью выглаживаются. Дефекты ($\beta = 100-110^\circ$) могут как выглаживаться, так и закрываться в зависимости от прочих условий обработки. При осадке полос прямоугольного сечения на поверхности контакта треугольные впадины с вписанным углом β от 60 до 90° выглаживаются. Увеличение угла β способствует более быстрому поднятию дна впадины по сравнению со сближением её берегов. Впадины с углом раскрытия $\beta = 120-130^\circ$ являются настолько пологими, что деформация внутренних слоёв металла выдавливает их до контактной поверхности. Дефекты первой группы могут, как выглаживаться, так и закрываться - преобразовываться в трещину. Угол раскрытия дефектов первой группы ($\beta < 100-110^\circ$) уменьшается с увеличением деформации, дефекты закрываются, преобразуются в трещины. Дефекты третьей группы ($\beta > 100-110^\circ$) выглаживаются с увеличением угла раскрытия и исчезают. Дефекты второй промежуточной группы ($\beta = 100-110^\circ$) в зависимости от условий деформирования могут, как закрываться, так и выглаживаться.

Более наглядно это продемонстрировано в работе [94]. Возможны два варианта завершения формоизменения - выглаживание и превращение в поверхностную трещину, а иногда и систему трещин.

Авторами [95] проанализированы и систематизированы дефекты прокатки (рис. 1.4).

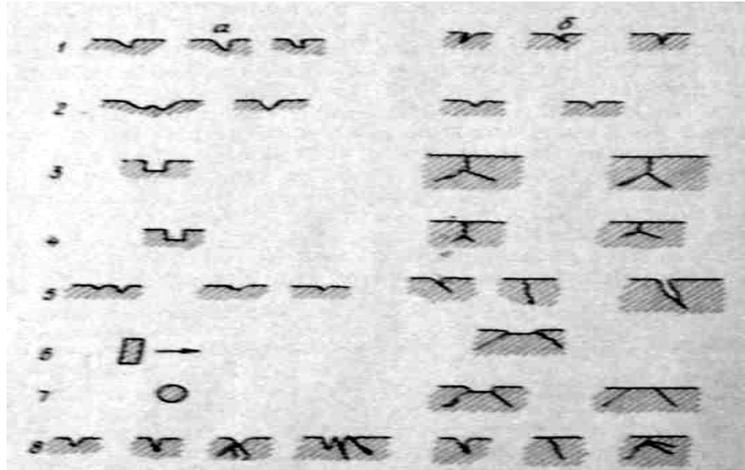


Рисунок 1.4 - Изменение характера и вида дефектов в процессе деформации при прокатке труб: а - дефект до прокатки (в поперечном сечении); б - после прокатки (стрелкой у дефекта б показано направление прокатки)

Дефекты типа пологих раковин с просматриваемым дном на горячекатаной заготовке, как правило, уменьшаются. Складки при холодной деформации не раскатываются и, как правило, превращаются в дефект типа трещин.

Достоинством работ [93 - 95] является детальное исследование поведения дефектов в процесс адекватности их формоизменения, однако исследования проводились без учета присутствия окалины на поверхности заготовки, что важно, с точки зрения адекватности реальным процессам ОМД.

В источнике [96] проведен анализ причин появления дефекта «вкатаная окалина» при производстве проката. Авторы классифицируют окалину как первичную вкатаную, если она представляет собой вкрапления остатков окалины, вдавленной в поверхность металла при горячей прокатке. Причинами образования первичной вкатаной и не полностью удаленной окалины, образовавшейся в про-

цессе нагрева металла в печи и в черновой группе клетей, являются: поверхностные дефекты слитков, горячекатаных слябов, раскатов и полос в виде поверхностных трещин, царапин, надрывов, деформационных рванин, отпечатков, следов абразивной зачистки и других дефектов; нарушения режимов нагрева слитков, слябов в нагревательных устройствах (оплавление, перегрев); нерациональные технологические режимы работы вертикального, горизонтального черновых окалиноломателей, а также чистового горизонтального окалиноломателя, некачественное удаление окалины гидросбивами стана горячей прокатки; повышенная выработка рабочих валков чистовых клетей стана; образование на валках сетки разгара, других повреждений поверхности валков. Вторичная вкатаная окалина - вкатаные в поверхность металла частички окалины, которые разбросаны по поверхности в виде точек и штрихов. Эта окалина образуется на поверхности горячекатаной полосы после удаления первичной окалины в окалиноломателе и гидросбивом.

Обобщенный анализ научно-технической литературы по математическому описанию процесса образования дефекта «вкатаная окалина» показывает, что таких исследований не проводилось. Выполнялись только работы по физическому моделированию формоизменения поверхностных дефектов в процессе прокатки без учета прослойки окалины между полосой и прокатными валками.

1.4 Анализ существующих способов удаления окалины в процессе непрерывного литья заготовок и прокатки

В настоящее время применяют разнообразные способы удаления окалины:

- механическое удаление окалины (сухая и мокрая галтовка, дробеструйная, пескоструйная, дробеметная и гидравлическая очистка, механическими скребками и специальными зачистными устройствами, установленными на деформирующем оборудовании в поточных линиях, иглофрезерование и т. п.);
- химическая очистка различного состава;
- термическая очистка;

- огневая зачистка.

Кроме того, есть большое число комбинированных и специальных способов очистки с применением ультразвука, электрогидравлического удара, электрохимического травления и др.

Для удаления окалины с нагретых заготовок перед их деформированием используют механическое и термическое воздействие водяной струи, подаваемой на поверхность заготовок под давлением [98].

Пластическая деформация - наиболее эффективный способ удаления окалины при горячей прокатке слэбов. Непрерывные листовые станы горячей прокатки имеют устройства (окалиноломатели), представляющие собой прокатные двухвалковые клетки с горизонтальными или вертикальными валками [99]. Эффективность разрушения окалины зависит от глубины проникновения деформации и определяется величиной обжатия. Оптимальную величину обжатия выбирают, исходя из условий сохранения формы слэба при максимальном разрушении окалины [99]. Для удаления окалины с поверхности заготовок перед прокаткой имеются и другие способы, основанные на применении специальных зачистных устройств. Например, для очистки верхней поверхности блюмов предложен способ предварительного разрушения окалины клиновым виброинструментом [100].

Разработан способ удаления окалины с поверхности проката тепловым ударом при нагреве её токами высокой частоты. Этот процесс основывается на различии характеристик деформации металла и окалины [102, 103].

В производстве горячекатаного листа вкатаная окалина приводит к необходимости зачистки поверхности, например с помощью передвижных шлифовальных машин, причем зачистка должна быть без превышения минусового допуска по толщине листа. Если вкатаная окалина расположена вблизи кромок листов, то эти участки обрезают, что увеличивает долю металла, определяемую в отходы. Зачистка участков листов, пораженных окалиной, - малопроизводительная и весьма трудоемкая операция. По данным работы [107], при производстве листов для судостроительной промышленности из стали марки 10ХСНД объем зачистки может достигать 50 % поверхности проката, поскольку на последнем не допуска-

ется даже мелкая вкатаная окалина.

1.4.1 Удаление окалины гидросбивом

Удаление окалины на современных станах горячей прокатки осуществляется исключительно гидромеханическим способом - гидросбивом.

Важнейшей характеристикой сопла является давление удара при встрече с поверхностью раската, которое определяется как частное от деления усилия струи на площадь поверхности, подвергнутой удару [109].

Разработаны установки гидросбива окалины с применением коллекторов с кавитационными генераторами колебаний давления воды [110].

Давление в сопле, размер сопла и угол струи линейно влияют на давление удара. Высота сопла над плоскостью проката оказывает влияние по экспоненциальному закону; при этом (независимо от угла струи) изменяются одновременно два параметра: ширина струи и ее глубина.

Наиболее влияющим параметром является высота сопла над поверхностью проката. При сокращении расстояния от сопла до поверхности раската в два раза давление удара о поверхность раската увеличивается примерно в четыре раза.

Расчет установки удаления окалины следует выполнять по ожидаемому виду окалины. Наибольшая доля первичной окалины образуется в печи и носит название первичной окалины. Для того чтобы первичную печную окалину можно было легко удалять, печи должны работать в окислительном режиме. При этом образуется толстый, сухой и легко удаляемый слой окалины.

Качественно удалить окалину с поверхности раскатов при горячей прокатке можно при комплексном использовании окалиноломателей с устройствами последующего удаления разрыхленной окалины гидросбивом [110].

Гидромеханическое удаление окалины с поверхности горячей полосы в настоящее время является самым эффективным. Этим объясняется тот факт, что исследованию эффективности установок гидросбива посвящены многочисленные исследования [111-118].

Авторами [111] разработана программа, составленная для обеспечения оптимального расположения сопел для обеспечения требуемых показателей качества удаления окалины с учетом экономии форсуночной воды и снижения расхода энергии. Улучшение результативности и эффективности установок гидромеханического удаления окалины с учетом конструкции форсунок, их взаимного расположения на форсуночных балках и энергосбережения рассмотрены также в работах [112,113,114].

В работе [115] приведены основные механизмы процесса гидромеханического удаления окалины, влияющие на качество очистки поверхности от окалины. Авторы [116,117] считают, что основной параметр - удельная сила удара струи и развиваемая ею удельная энергия удара. Вторым определяющим фактором воздействия является так называемая «норма соударения», представляющая собой плотность орошения. Однако эти два фактора не учитывают степень предварительного разрыхления окалины.

Известным путем повышения эффективности систем гидросбива является уменьшение расстояния от форсунки до обрабатываемой поверхности [118]. Отметим, что в этом случае необходимо обеспечить требуемое перекрытие струй воды, а это влечет за собой увеличение количества форсунок на форсуночных балках. Оценка эффективности установок гидросбива выполнена в работе [119]. Рассмотрены установки гидросбива первичной окалины, расположенные непосредственно за печью и окалиноломателем и установки гидросбива вторичной окалины, которая образуется при транспортировке сляба к прокатной клетки или между клетями.

В результате литературного обзора, посвященного гидросбиву окалины, можно сказать, что исследования в данном направлении имеют резервы для улучшения эффективности работы оборудования, на базе новых углубленных экспериментальных исследований с математическим описанием закономерностей протекающих процессов.

1.4.2 Удаление окалины на непрерывно травильных агрегатах

В настоящее время наиболее распространенным, высокопроизводительным и надежным способом удаления окалины с поверхности проката перед поступлением его на холоднокатаный передел или перед отправкой его потребителю является кислотное травление на травильных агрегатах. Травильные агрегаты современных широкополосных станов представляют собой исключительно непрерывные травильные агрегаты (НТА), в которых полосы соседних двух рулонов соединяются путем сшивания или сварки, перед кислотными ваннами, обеспечивая непрерывность процесса травления.

Конец каждого поступающего рулона задается в изгибающие ролики, благодаря чему она подвергается изгибу в различных направлениях перед поступлением в правильные ролики. При знакопеременном изгибе образуется большое количество тонких, близко расположенных поперечных трещин в окалине, покрывающих полосу, и ослабляется сцепление окалины с металлом, что интенцифицирует действие кислоты. Кроме того, при изгибе полоса выправляется и получает наклеп, что затрудняет последующее образование больших поперечных трещин в травильной установке. Таким образом, эффективная работа изгибающих роликов непосредственно влияет на эффективность удаления окалины с горячекатаной полосы на НТА.

С целью повышения эффективности разрыхления окалины перед травлением используются также изгибо-растяжные машины [101,108,123,124]. В работе [108] авторами исследована эффективность растрескивания окалины при растяжении полосы с использованием специального модуля (в виде растяжной машины) с деформацией в пределах 0,2-6 % для растрескивания окалины и ее ускоренного отслоения, а также для дополнительного доступа через трещины травящей жидкости.

В исследованиях [123] и [124] показана эффективность применения правки полосы растяжением и изгибом не только для растрескивания окалины, но и для уменьшения неплоскостности полос в НТА. Авторы отмечают, что главными па-

раметрами окалиновзламывающего оборудования, применяемого в линиях НТА, которые обеспечивают максимальное разрыхление и удаление окалины с поверхности проката, являются величина натяжения полосы, радиус изгибающих роликов. Допустимый радиус кривизны уменьшается с увеличением предела текучести и понижением удельного натяжения полосы.

Ограничения, накладываемые на радиус изгиба и величину удельного натяжения, связаны с возможностью проявления дефектов «изломы» и «полосы линии скольжения». Рекомендуется [52] для предотвращения изломов избегать изгибов полос с радиусом кривизны меньше критического, величина которого зависит от механических свойств, толщины, удельного натяжения полосы.

Окалиновзламывающие устройства оказывают эффективное действие на снижение проявления дефекта «вкатанная окалина» после прохождения горячекатаной полосы через травильную ванну. Разрыхляя окалину, они облегчают доступ к поверхности металла с внедренными в них частицами окалины. После травления на поверхности металла имеются только углубления от растворенной окалины без признаков остаточной окалины.

Резюмируя вышеизложенное можно констатировать, что окалиновзламывающие устройства изгибо-растяжного действия являются одним из основных элементов НТА, влияющих на эффективность удаления окалины и, ввиду немногочисленных исследований по эффективности их работы, резервы для их совершенствования пока еще не исчерпаны.

Следует отметить, что сдерживающим фактором совершенствования изгибо-растяжных машин является отсутствие математического описания процесса их функционирования. Поэтому разработка математического описания функционирования изгибо-растяжного окалиноломателя, с учетом ограничений, накладываемых на их параметры, позволит целенаправленно улучшать режимы их эксплуатации и повышать эффективность удаления окалины в НТА.

1.5 Выводы. Цель и постановка задач исследования

Анализ имеющейся научно-технической информации свидетельствует о наличии технологической наследственности дефекта «окалина» по всем переделам производства горячекатаной продукции. Однако исследования по проявлению дефекта «окалина» в основном ограничивались одним из конкретных этапов технологического передела без учета предыдущих этапов и, как следствие, без учета технологической наследственности.

Основные исследования по формированию качественных характеристик поверхностей НЛЗ и горячекатаной полосы проводились без учета промежуточного слоя между НЛЗ и поддерживающими ее роликами, а также между прокатываемой полосой и валками. Исследований по математическому моделированию процесса взаимодействия окалина с роликами МНЛЗ и непрерывнолитой заготовкой с целью разграничения условий налипания окалина на ролики МНЛЗ или вдавливания в НЛЗ до настоящего времени не проводилось. Трудности такого математического моделирования усугублялись отсутствием данных по влиянию износа материалов, используемых для изготовления роликов МНЛЗ, на явление налипания и вдавливания фрагментов окалина.

Малочисленными являются данные по влиянию геометрии рифлений на поверхности валков окалиноломателя, формирующих отпечатки на поверхности подката в процессе взламывания окалина, на расположение фрагментов окалина в этих отпечатках.

Математические модели, описывающие процесс вдавливания или выкатывания на поверхность полосы таких фрагментов окалина пока еще не разработаны.

Фундаментальные теоретические исследования по математическому описанию функционирования изгибо-растяжных окалиноломателей с учетом ограничений накладываемых на их параметры не проводились. Имеющиеся литературные данные относятся в основном к изгибо-правильным машинам, а не к окалиноломателям.

На основании вышеизложенного целью диссертационной работы является разработка научно-обоснованных технических решений, направленных на повышение эффективности удаления окалины на всех этапах производства горячекатаного проката на основе результатов моделирования процессов в системе непрерывнолитая заготовка - ролик МНЛЗ, полоса - рифленый валок и полоса - ролик окалиноломателя перед травлением.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать условия и смоделировать процесс взаимодействия окалины с роликами МНЛЗ и непрерывнолитой заготовкой с целью разграничения условий налипания ее на ролики или вдавливания в непрерывнолитую заготовку.

2. Выполнить аналитическое исследование процесса образования дефекта «вкатаная окалина» с учетом взаимодействия фрагментов окалины с неровностями горячекатаной полосы и рабочей поверхностью валка.

3. Смоделировать узел системы гидромеханического удаления окалины и установить закономерность влияния диаметра форсунки, давления струи жидкости и температуры нагрева металла на количество удаляемой окалины.

4. Исследовать процесс разрыхления и удаления окалины на изгибо-растяжном окалиноломателе с разработкой методики расчета величины натяжения полосы и радиуса роликов, обеспечивающих эффективное разрыхление и удаление окалины.

5. Разработать технические решения по снижению дефекта «окалина» с учетом технологической наследственности по переделам горячекатаной полосы.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОКАЛИНЫ С РОЛИКАМИ МНЛЗ И НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКОЙ

2.1 Исследование состояния рабочих поверхностей роликов МНЛЗ

Исследования выполняли на эксплуатируемых и отработавших срок службы роликах 2,5 и 9 секций МНЛЗ. Состояние роликов, находящихся в эксплуатации, изучали во время плановых ремонтов МНЛЗ, а отработавших срок службы после их демонтажа.

Визуальное обследование роликов МНЛЗ после их демонтажа показало, что рабочие поверхности роликов включают участки с сеткой разгара, с локальным микрорельефом, с налипшей окалиной.

Общий вид участков роликов МНЛЗ с сеткой разгара показан на рисунке 2.1.

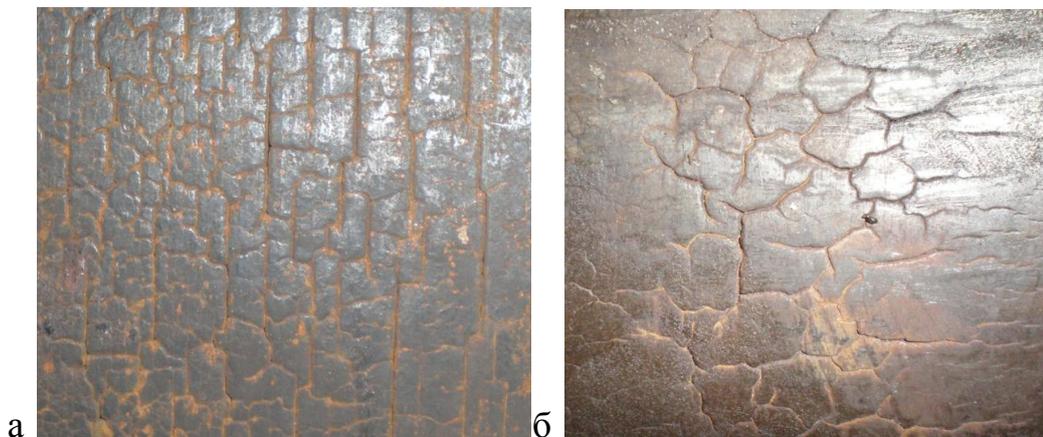


Рисунок 2.1 - Фото сетки разгара: а) в центральной части бочки ролика МНЛЗ; б) в периферийной части бочки ролика МНЛЗ (10)

Характер сетки разгара зависит от места ее расположения на рабочей поверхности ролика. В центральной части ролика МНЛЗ сетка разгара имеет четко выраженную направленность вдоль образующей ролика (рис. 2.1.а). По краям рабочей поверхности ролика сетка разгара является хаотичной без явно выраженных преимущественных направлений трещин.

Размер участков с выраженной направленностью сетки разгара составляет

400...300x20...250 мм, а иногда на некоторых роликах распространяется по всей их рабочей поверхности. Некоторые ролики МНЛЗ характеризуются единичными крупными трещинами разгара длиной от нескольких миллиметров до нескольких десятков миллиметров. Ширина таких единичных трещин составляет от нескольких десятых миллиметра до нескольких миллиметров при глубине 0,5-4,5 мм (рис. 2.2).

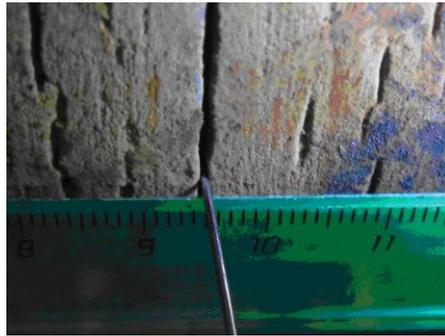


Рисунок 2.2 - Вид участка рабочей поверхности ролика МНЛЗ с трещинами разгара

Фотографии рабочих поверхностей роликов МНЛЗ, которые дают представление о характере локальных впадин, а также об их размерах приведены на рисунке 2.3.



(x5)



(x10)

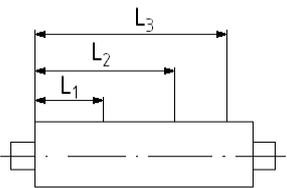
Рисунок 2.3 - Вид участков рабочих поверхностей роликов МНЛЗ с отдельными впадинами

Локальные впадины являются следствием выкрошек или отслоений фрагмен-

тов материала ролика под действием механических и тепловых факторов в процессе их эксплуатации. Площадь впадин изменяется от нескольких квадратных миллиметров до нескольких сотен квадратных миллиметров, и имеют разнообразную конфигурацию.

Замер профиля рабочей поверхности роликов выполняли для наиболее изношенных их участков и участков с налипшей окалиной. Для роликов второй секции МНЛЗ места расположения наиболее изношенных участков приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Расположение наиболее изношенных участков рабочей поверхности роликов МНЛЗ

№ роликов	Схема измерения	Расстояния замеров от края рабочей поверхности роликов МНЛЗ		
		L ₁ , мм	L ₂ , мм	L ₃ , мм
1		158	460	1590
2		78	825	1245
3		162	371	606

Изношенные участки рабочей поверхности роликов исследовали при помощи профилометра Mahr PSI с отсечкой шага 0,25 мм на участках протяженностью 10 мм. Типичные профилограммы изношенных участков проиллюстрированы рисунком 2.4.

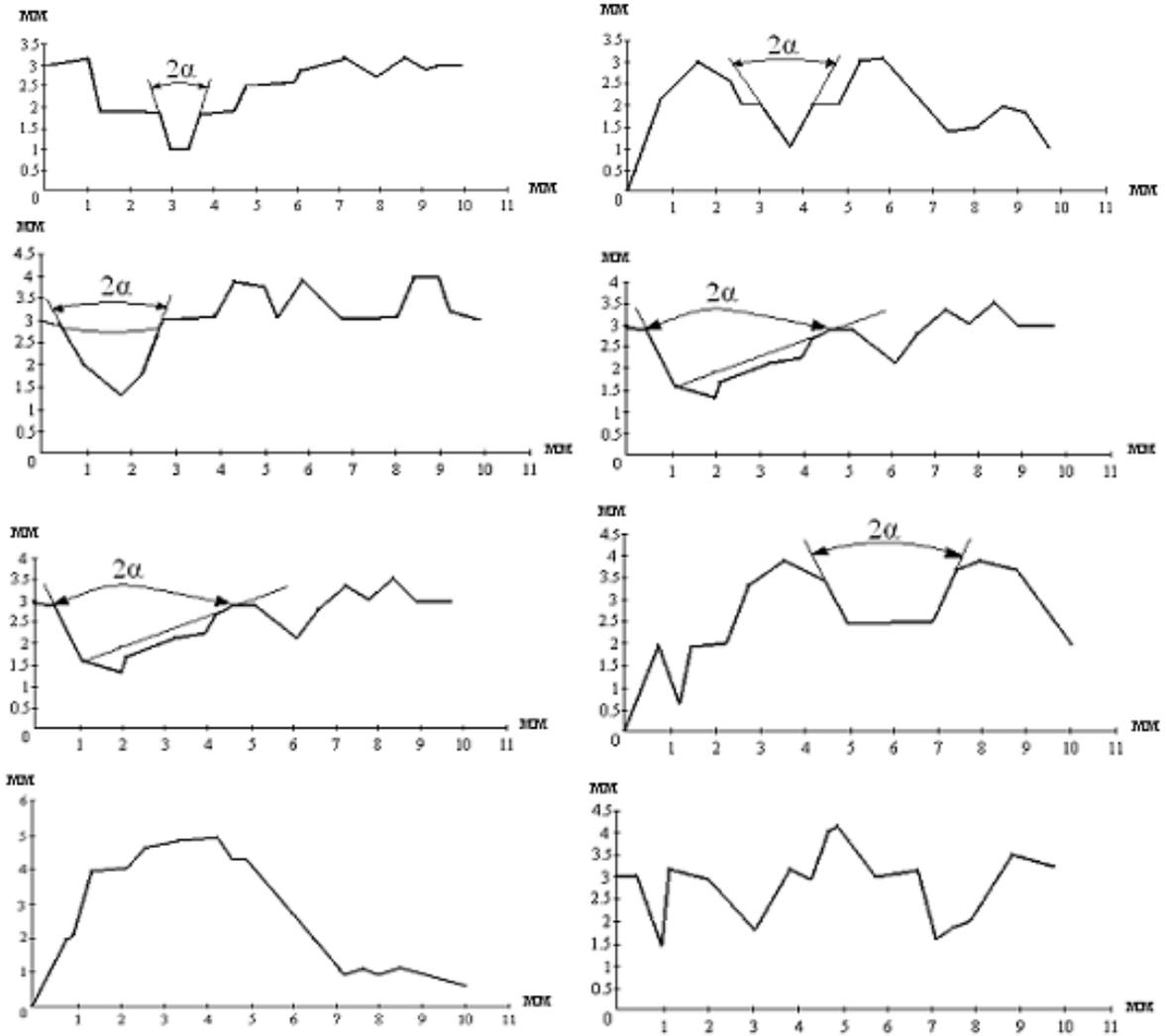


Рисунок 2.4 - Профилограммы изношенных участков
рабочей поверхности роликов

Обработка профилограмм показала, что углы наклона между боковыми поверхностями впадин изменяются в пределах $2\alpha=30\dots 82^\circ$.

По аналогичной методике изучались размеры и формы налипшей на рабочую поверхность роликов МНЛЗ. Общий вид фрагментов налипшей окалины приведен на рисунке 2.5.

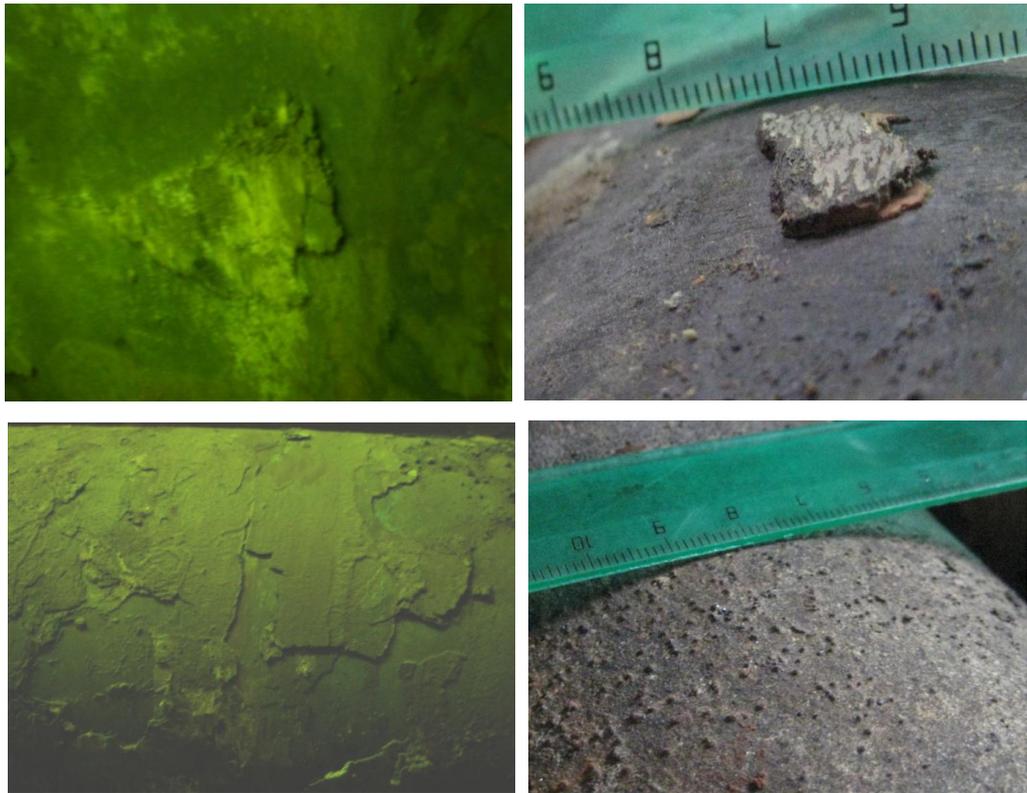


Рисунок 2.5 - Налипшая на поверхность ролика окалина

Замеры толщины окалины проводили в трех точках (по краям и в середине ролика).

Наибольшая толщина окалины - 5 мм, а средняя толщина окалины по образующей бочке ролика - 2,65 мм.

Налипшую на ролики окалину можно подразделить на мелкую, площадью от 10 мм^2 до 300 мм^2 , и более крупную, которая охватывает до $1/5$ образующей поверхности ролика. Налипшая окалина выступает над уровнем полотна роликов на 3...4 мм, увеличивая тем самым циклическую нагрузку на них. Наиболее типичные формы мелкой налипшей окалины: куполообразная (Рисунок 2.6.а), клиновидная (Рисунок 2.6.б) или трапецеидальная (Рисунок 2.6.в). Углы наклона между боковыми поверхностями налипшей окалины изменяются в диапазоне $43^\circ \dots 88^\circ$.

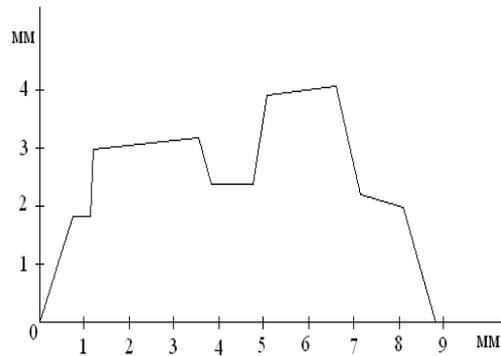
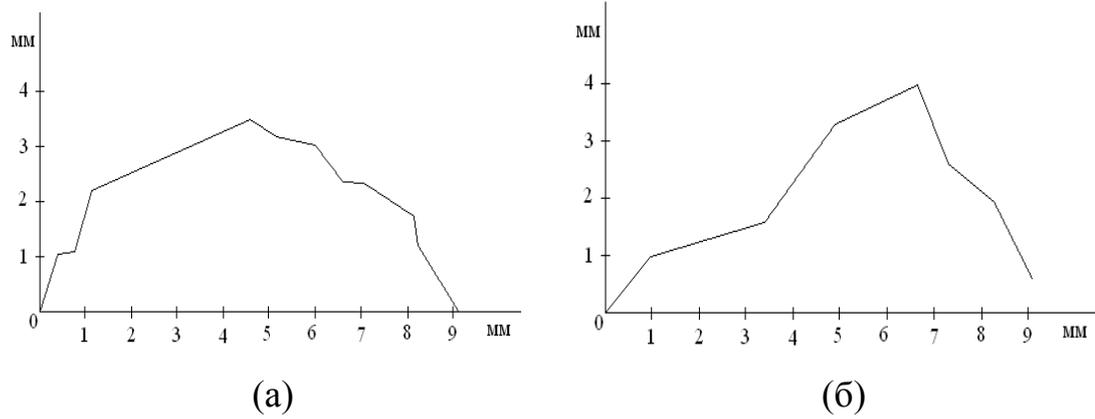


Рисунок 2.6 - Типичные профилограммы фрагментов налипшей на ролики окалины

Такие формы фрагментов окалины позволяют их аппроксимировать обобщенной формой усеченного клина.

2.2 Математическое моделирование процесса взаимодействия окалины с роликами МНЛЗ и непрерывнолитой заготовкой

Математическое моделирование процесса взаимодействия окалины с роликами, приводящее к налипанию ее на их рабочие поверхности, и взаимодействия с непрерывнолитой заготовкой (НЛЗ), сопровождаемое вдавливанием фрагментов налипшей окалины в закристаллизовавшуюся корку, выполняем с использованием одного из методов теории пластичности - метода линий скольжения.

Анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя НЛЗ при вдавливании в нее фрагмента налипшей окалины выполнен для аппроксими-

рованного симметричного усеченного клина с углом наклона между боковыми поверхностями 2α (Рисунок 2.7.а). Допускаем, что в процессе вдавливания налипшей окалины вращающимися роликами она перемещается перпендикулярно поверхности заготовки и, что пластическая зона от вдавливания фрагмента окалины распространяется на всю толщину закристаллизовавшейся корочки НЛЗ. С учетом принятого допущения сетка линий скольжения, соответствующая такому напряженно-деформированному состоянию материала заготовки, также является симметричной (Рисунок 2.7.б).

Сетки линий скольжения $ABCDEA$ и $A_1B_1C_1D_1E_1A_1$, примыкающие к боковым сторонам фрагмента окалины AB и A_1B_1 , включают по два треугольника и по одному сектору, расположенные между ними.

Сетка линий скольжения $HAFGF_1A_1H_1$ ограничивает пластическую зону под поверхностью налипшей окалины. Область A_1AH определяет жесткую зону, примыкающую к поверхности окалины A_1A . Такая сетка линий скольжения справедлива, если углы EAF и $E_1A_1F_1$ превышают угол 90^0 . При выполнении этого условия материал заготовки, находящийся вне зоны $CDEAFGF_1A_1E_1D_1C_1$, считается абсолютно жестким.

В процессе вдавливания фрагмента налипшей окалины в НЛЗ его скошенные боковые поверхности раздвигают материал заготовки от центра вдавливаемого фрагмента в противоположных направлениях. Материал заготовки, расположенный под нижним торцом фрагмента окалины, при этом также вытесняется в стороны от центра вдавливаемого фрагмента. Поскольку зоны материала, расположенные вправо от линий скольжения $CDEAFG$ и влево от линий скольжения $C_1D_1E_1A_1F_1G_1$ являются абсолютно жесткими, то при вдавливании налипшей на ролики окалины все материальные точки этих зон должны двигаться от центра фрагмента окалины с одинаковой скоростью, но в противоположных направлениях. Это возможно, если скорости смещения деформируемого материала от раздвигающего действия боковыми поверхностями вдавливаемой налипшей на ролики окалины равны скорости смещения материала заготовки в результате выдавливающего эффекта. Если скорость смещения материальных точек жесткой зоны от

раздвигающего действия боковых сторон фрагмента, вдавливаемой в НЛЗ налипшей на ролики окалины, превышает скорость смещения материальных точек от действия вытесняемого материала, расположенного под окалиной, то на боковых сторонах фрагмента налипшей на ролики окалины формируются сжимающие напряжения, если же отстает, то на боковых поверхностях фрагмента налипшей на ролики окалины формируются растягивающие напряжения.

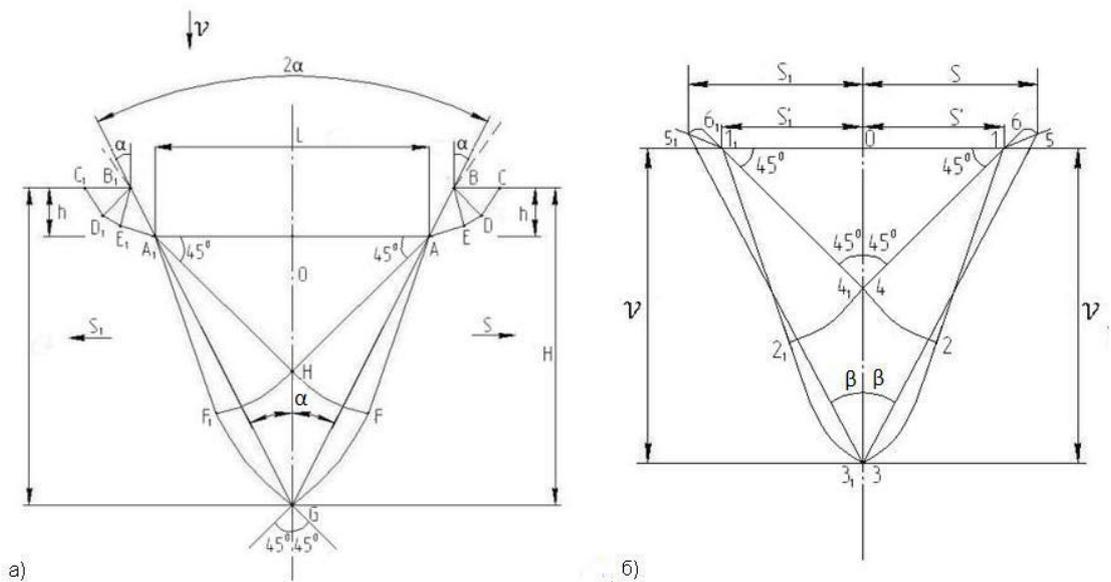


Рисунок 2.7 - Сетка линий скольжения (а) и годограф скоростей при вдавливании окалины в НЛЗ

Скорости смещения материала заготовки в противоположные стороны от раздвигающего действия боковых поверхностей вдавливаемого в НЛЗ фрагмента налипшей на ролики окалины определяются зависимостью (рис. 2.7.а):

$$|S'_1| = |S'| = |V| \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.1)$$

где $|S'_1|$ и $|S'|$ скорости смещения материала заготовки под раздвигающим действием боковых сторон вдавливаемого фрагмента налипшей на ролики окалины;

$|V|$ - скорость вдавливания фрагмента налипшей на ролики окалины;

α - угол наклона каждой из боковых поверхностей фрагмента налипшей на ролики окалины.

Скорости смещения материала заготовки вправо (S) и влево (S_1) на границе с жесткой зоной в результате выдавливающего действия внедряющегося в НЛЗ налипшей на ролики окалины, согласно условию постоянства объема и симметричности процесса, определяются из соотношения (рис. 2.7.а):

$$|S_1| = |S| = |V| \frac{L}{2(H-h)}, \quad (2.2)$$

где L - протяженность фрагмента налипшей на ролики окалины, контактирующего с НЛЗ и измеряемый в плоскости параллельной ее поверхности;

H - толщина закристаллизовавшейся корочки НЛЗ;

h - глубина внедрения фрагмента налипшей на ролики окалины в поверхность литой заготовки.

С учетом принятых допущений и уравнений (1,2) на рисунке 2.7.б изображен годограф скоростей в соответствии с сеткой линий скольжения, приведенной на рисунке 2.7.а.

Вектор 01 определяет скорость смещения материала заготовки вправо, а вектор $01'$ определяет скорость смещения материала заготовки влево параллельно поверхности НЛЗ. Области годографа 012340 и $01_12_13_14_11$ характеризуют скорости относительного смещения элементов очага деформации в областях сеток линий скольжения $OAFGHO$ и OA_1F_1GHO .

Области годографа 156 и $1_15_16_1$ отражают скорости относительного смещения элементов очага деформации в зонах сеток линий скольжения $BCDEAB$ и $B_1C_1D_1E_1A_1B_1$. Векторы 35 и 3_15_1 определяют направления относительного смещения элементов очага деформации ABE и $A_1B_1E_1$ вдоль боковых поверхностей AB и A_1B_1 фрагмента окалины. Векторы 15 и 1_15_1 направлены параллельно линиям скольжения AE и A_1E_1 соответственно.

Точки пересечения вектора 35 с 15 и вектора 3_15_1 с 1_15_1 определяют вели-

чины радиусов векторов 156 и $1_15_16_1$.

Направления векторов 16 и 1_16_1 совпадают с направлениями линий скольжения CD и C_1D_1 и значения их также определяются радиусами секторов 156 и $1_15_16_1$.

Анализ поля линий скольжения и годографа скоростей показывает, что напряжения растяжения на боковых поверхностях фрагмента окалины AB и A_1B_1 возможны в тех случаях, когда векторы годографа скоростей 15 и 1_15_1 имеют одинаковые направления соответственно с векторами 01 и 01_1 и по модулю отличаются от нуля. Такое условие выполняется, если (Рисунок 2.7):

$$\alpha < \beta = \arctg \frac{L}{2(H-h)}, \quad (2.3)$$

Таким образом, если угол наклона боковой грани внедряющегося фрагмента налипшей на ролики окалины α меньше угла β (рис. 2.7.), то по его боковым сторонам действуют напряжения растяжения и окалина не зажимается материалом заготовки. Она может свободно покинуть поверхность заготовки, оставляя на ее поверхности отпечаток. При значительных размерах фрагмента окалины и малых толщинах закристаллизовавшейся корочки НЛЗ, характеризуемой величиной после вдавливания в нее фрагмента окалины, возможно даже образование зазора между материалом НЛЗ и боковыми поверхностями фрагмента окалины, что облегчает процесс удаления его с поверхности заготовки и налипания на поверхность контактирующего с ним ролика МНЛЗ.

В процессе вдавливания фрагмента налипшей окалины с большими углами наклона боковых поверхностей α , особенно небольших размеров, в толстую закристаллизовавшуюся корочку, когда $\tg \alpha \geq \frac{L}{2(H-h)}$, по боковым поверхностям формируются напряжения сжатия, которые прижимают слой окалины к боковым поверхностям, сформированной впадины на поверхности НЛЗ, способствуя улучшению сцепления окалины с этими поверхностями. Сжимающие напряжения и адгезионные связи удерживают фрагменты окалины по поверхности НЛЗ во

внедренном состоянии. Если налипший ранее фрагмент окаины имеет слабое сцепление с роликом, то возможно отслаивание этого фрагмента от ролика под действием удерживающего усилия со стороны НЛЗ и переход на ее поверхность во внедренном состоянии.

Таблица 2.2 и графики на рисунке 2.8 иллюстрируют значения относительно-го размера фрагмента окаины (L/H) в зависимости от относительного его внедрения в закристаллизовавшуюся корку НЛЗ (h/H), превышение которого формируют напряжение растяжения на боковых поверхностях фрагмента окаины. На рисунке 2.8 области, расположенные над линиями $\frac{L}{H} = f\left(\frac{h}{H}\right)$ относятся к областям растягивающих напряжений, а области расположенные под линиями $\frac{L}{H} = f\left(\frac{h}{H}\right)$ относятся к областям сжимающих напряжений. Каждая линия, соответствующая определенному углу наклона боковых поверхностей (α), разграничивает области, формирующие растягивающие и сжимающие напряжения.

Таблица 2.2 - Относительные величины фрагментов окаины (L/H), вдавливание которых на величину (h/H) соответствует переходу напряжений растяжения к напряжениям сжатия на боковых поверхностях фрагмента окаины наклоненных под углом α

Угол наклона боковой поверхности фрагмента окаины, α ,град	Относительная величина вдавливания фрагмента окаины, h/H						
	0,01	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
10	0,348	0,334	0,317	0,281	0,211	0,141	0,070
20	0,720	0,691	0,655	0,582	0,437	0,291	0,145
30	1,142	1,096	1,038	0,923	0,692	0,461	0,231
40	1,661	1,594	1,510	1,342	1,006	0,671	0,335
45	1,98	1,9	1,8	1,6	1,2	0,8	0,4
50	2,358	2,263	2,143	1,905	1,429	0,953	0,476

Угол наклона боковой поверхности фрагмента окалины, α , град	Относительная величина вдавливания фрагмента окалины, h/H						
	0,01	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
60	3,429	3,290	3,117	2,771	2,078	1,385	0,692
70	5,425	5,206	4,932	4,384	3,288	2,192	1,096
75	7,389	7,091	6,717	5,971	4,478	2,985	1,493
80	11,228	10,775	10,207	9,073	6,805	4,537	2,268
85	22,631	21,717	20,574	18,288	13,716	9,144	4,572

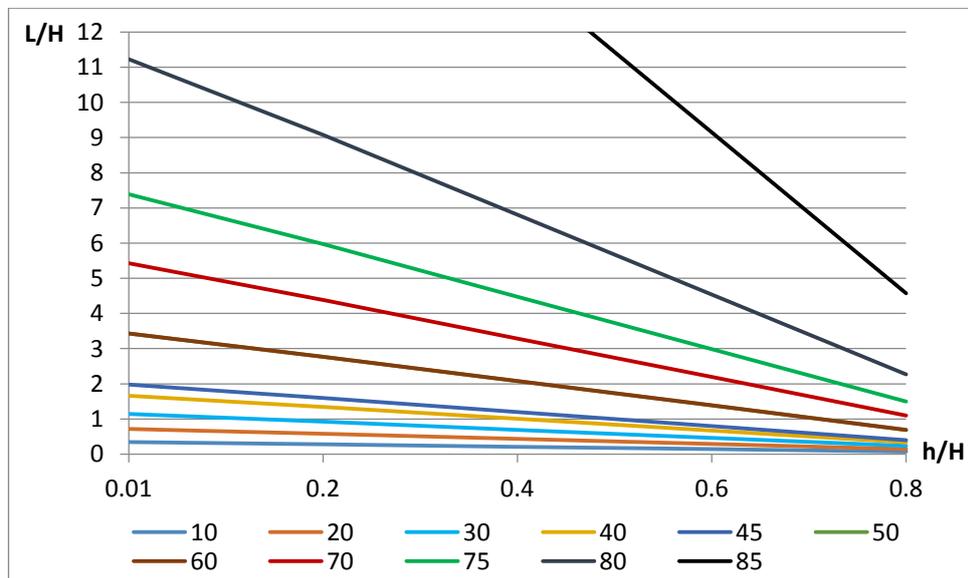


Рисунок 2.8 - График зависимостей относительного размера фрагмента окалины (L/H) от величины относительного его внедрения (h/H) в корку НЛЗ, соответствующего переходу напряжений растяжений к напряжениям сжатия на боковых поверхностях фрагмента окалины наклоненных под углом α

Если данные таблицы 2.2 представить в виде зависимости относительной величины фрагмента от угла наклона его боковой поверхности α для разных значений относительного его внедрения (h/H) в корку НЛЗ, соответствующего переходу от напряжений растяжения к напряжениям сжатия по его боковым поверхностям, то такие зависимости иллюстрируются рисунком 2.9.

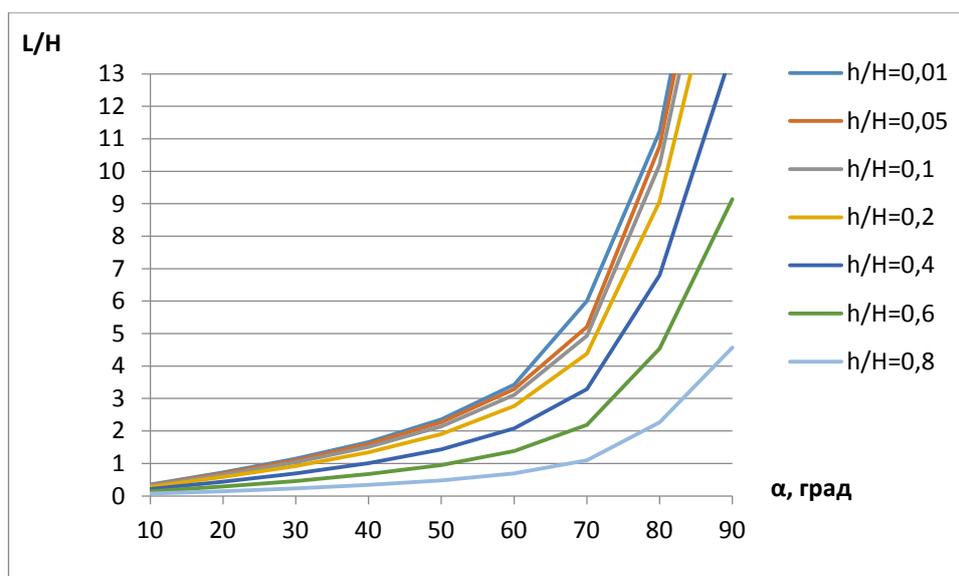


Рисунок 2.9 - График зависимости относительного размера фрагмента окалины (L/H) от угла наклона его боковой поверхности для различных значений относительного его внедрения (h/H) в корку НЛЗ, соответствующего переходу от напряжений растяжений к напряжениям сжатия по его боковым поверхностям

Области, расположенные над линиями $L/H=f(h/H)$ и $L/H=f(\alpha)$ относятся к области растягивающих напряжений и наоборот. Таким образом, знание толщины корки НЛЗ, размера фрагмента окалины, вдавливаемого в нее, и углов наклона его боковых поверхностей позволяет установить, будет ли этот фрагмент окалины удерживаться на поверхности НЛЗ напряжениями сжатия или же фрагмент будет свободно располагаться на поверхности НЛЗ с возможностью налипания на поверхность ролика МНЛЗ [149].

2.3 Определение ограничений, накладываемых на условия налипания окалины на ролики МНЛЗ или вдавливания ее в непрерывнолитую заготовку

В предыдущем разделе диссертации выполненное математическое моделирование показало, что для того, чтобы фрагменты окалины, вдавленные в закристал-

лизовавшуюся корку НЛЗ, не зажимались материалом заготовки необходимо формированием напряжений растяжения по боковым поверхностям фрагментов окалины. Это условие является необходимым, но недостаточным, поскольку усилие вдавливания фрагмента окалины ограничивается, давлением корки НЛЗ на ролики под действием гидростатического давления жидкой фазы НЛЗ. Давление жидкой фазы на ролики МНЛЗ частично или полностью компенсируется сопротивлением прогибу закристаллизовавшейся корки НЛЗ.

Возможность прогиба корки НЛЗ рассмотрим как предельное состояние пластины с двумя зашечленными и двумя свободно опертыми краями при пластическом изгибе под действием давления от жидкой фазы НЛЗ. Предельная нагрузка $F_{пр}$ для такого случая составляет [145]:

$$F_{пр} = \sigma_T h_n^2 \left(\frac{2a}{\delta b} + \frac{\delta b}{a} \right), \quad (2.4)$$

где σ_T - предел текучести материала пластины;

h_n - толщина пластины;

a - половина стороны пластины, по которой она зашечлена;

b - половина стороны, по которой она свободно оперта;

δ - доля размера пластины « b », вовлекаемой в пластическую деформацию при образовании «пластического шарнира».

Если принять, что закристаллизовавшаяся корка зашечлена в местах сопряжения с короткими гранями НЛЗ и свободно опирается на два смежных ролика и учесть, что на закристаллизовавшуюся корку действует давление изнутри НЛЗ от столба жидкой фазы, то результирующая сила от давления жидкой фазы с учетом сопротивления прогибу закристаллизовавшейся корки, которая передается на контактную поверхность НЛЗ с роликом F_p , составит:

$$F_p = \gamma_{ж} L B_3 \cdot t - \sigma_T H^2 \left(\frac{2t}{0,5\delta B_3} + \frac{0,5\delta B_3}{t} \right), \quad (2.5)$$

где $\gamma_{ж}$ - удельный вес жидкой фазы НЛЗ;

L - высота столба жидкой фазы;

H - толщина закристаллизовавшейся корки НЛЗ;

t - шаг роликов;

B_3 - ширина литой заготовки;

δ - доля ширины корки НЛЗ, вовлекаемой в пластическую деформацию при образовании «пластического шарнира».

Величина δ является варьируемым фактором. Из всех значений δ наиболее близким значением к действительному значению нагрузки является такое, которое соответствует минимуму предельной нагрузки. Анализ уравнения (2.5) показывает, что минимум предельной нагрузки соответствует значению $\delta = 2\sqrt{2}$. Подставляя это значение δ в уравнение (2.5), получим:

$$F_p = \gamma_{ж} L B_3 \cdot t - \sqrt{2} \sigma_T H^2 \left(\frac{2t}{B_3} + \frac{B_3}{t} \right) \quad (2.6)$$

Выразим толщину закристаллизовавшейся корки через габаритные размеры сечения НЛЗ и долю жидкой фазы в этом сечении, используя рисунок 2.10.

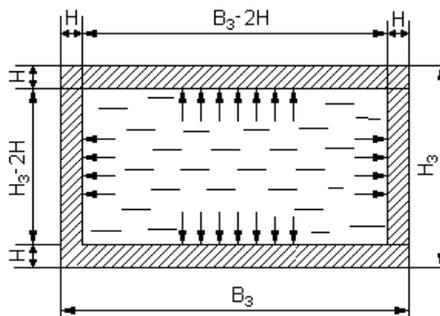


Рисунок 2.10 - Схема поперечного сечения НЛЗ:

1 - закристаллизовавшаяся корка, 2 - жидкая фаза

Для упрощения расчетов принято, что толщина закристаллизовавшейся корки одинакова по всему периметру поперечного сечения НЛЗ.

В соответствии с рис. 2.10 площадь поперечного сечения заготовки равна $B_3 \cdot H_3$, а площадь поперечного сечения жидкой фазы составляет $(B_3 - 2H) \cdot (H_3 - 2H)$.

Соответственно доля жидкой фазы φ в поперечном сечении НЛЗ равна:

$$\varphi = \frac{(B_3 - 2H)(H_3 - 2H)}{B_3 H_3}, \quad (2.7)$$

где B_3 - ширина НЛЗ;

H_3 - толщина НЛЗ;

φ - доля жидкой фазы в сечении НЛЗ.

Решая уравнения (2.7) относительно толщины закристаллизовавшейся корки НЛЗ, получим:

$$H = \frac{1}{4} (B_3 + H_3 - \sqrt{(B_3 + H_3)^2 - 4B_3 H_3 (1 - \varphi)}). \quad (2.8)$$

Подстановкой уравнения (2.8) в (2.6) имеем:

$$F_p = \gamma_{ж} L B_3 t - \frac{\sqrt{2} \sigma_T}{16} (B_3 + H_3 - \sqrt{(B_3 + H_3)^2 - 4B_3 H_3 (1 - \varphi)})^2 \left(\frac{t}{B_3} + \frac{B_3}{t} \right). \quad (2.9)$$

В соответствии со схемой взаимодействия фрагмента окалины с закристаллизовавшейся коркой НЛЗ, приведенной на рис 2.7.а, сила F_0 , необходимая для внедрения этого фрагмента в поверхность НЛЗ, определяется зависимостью:

$$F_0 = \sigma_T (1 + \pi - 2\alpha) A_0, \quad (2.10)$$

где σ_T - предел текучести закристаллизовавшейся корки НЛЗ;

α - угол наклона боковой грани фрагмента окалины;

A_0 - площадь фрагмента окалины, внедряемого в поверхность НЛЗ.

Таким образом, если результирующая сила от давления жидкой фазы и сопротивления закристаллизовавшейся корки прогибу меньше сопротивления внедрению фрагмента окалины в поверхность НЛЗ, то контактирование ролика с НЛЗ

реализуется без вдавливания фрагмента окалины в ее поверхность. Если результирующая сила превышает сопротивление вдавливанию фрагмента окалины в поверхность НЛЗ, то контактирование ролика с НЛЗ сопровождается вдавливанием этого фрагмента в поверхность НЛЗ. Для этого необходимо выполнение условия:

$$F_0 < F_p \quad (2.11)$$

Подставляя в это неравенство значения F_0 и F_p из уравнений (2.10 и 2.9) и решая его относительно площади фрагмента окалины с учетом (2.8), имеем:

$$A_0 < \frac{\left(\gamma_3 L B_3 t - \sqrt{2} \sigma_T H^2 \left(\frac{t}{B_3} + \frac{B_3}{t} \right) \right)}{\sigma_T (1 + \pi - 2\alpha)} \quad (2.12)$$

Полученная зависимость (2.12) накладывает ограничения на размер фрагмента окалины, который может быть вдавлен в НЛЗ с учетом конструктивных параметров МНЛЗ, габаритных размеров НЛЗ и несущей способности ее закристаллизовавшейся корки.

Рисунки 2.11...2.16 иллюстрируют изменение предельных величин площади фрагмента окалины в зависимости от формы фрагмента окалины (параметра α), конструктивных параметров МНЛЗ (параметры L и t), габаритных размеров НЛЗ (параметры B_3 и H_3) предела текучести материала заготовки (параметр σ_T) и доли жидкой фазы в сечении НЛЗ (параметр ϕ).

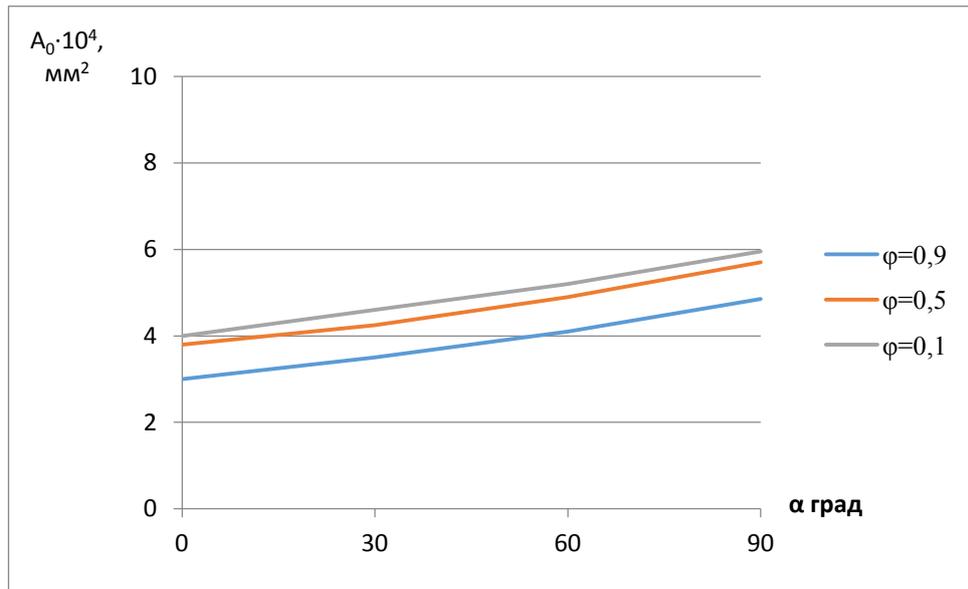


Рисунок 2.11 - Влияние угла наклона боковой поверхности фрагмента окалины на предельное значение его площади при вдавливании в НЛЗ при различных значениях доли жидкой фазы (ϕ)

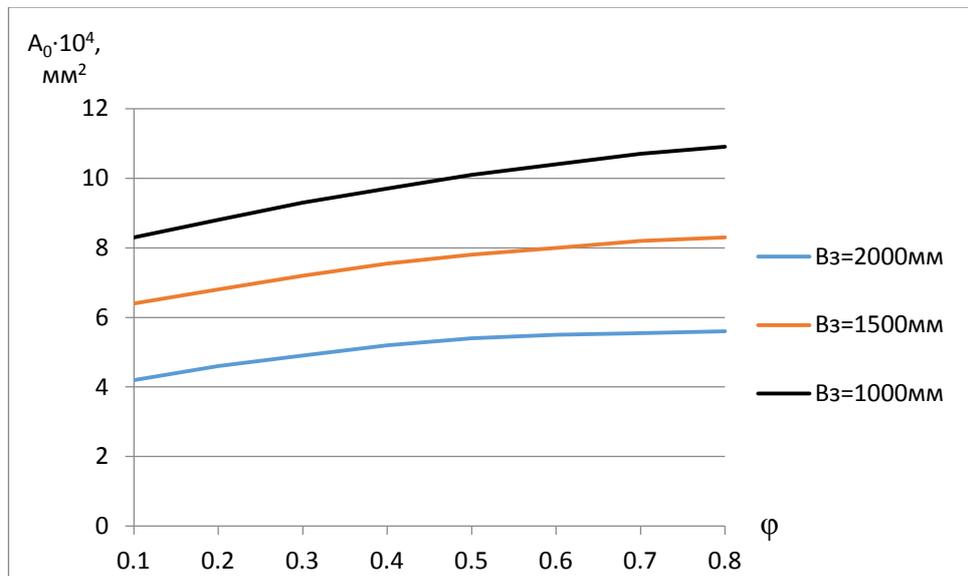


Рисунок 2.12 - Влияние доли жидкой фазы в НЛЗ на предельное значение площади, вдавливаемого в нее фрагмента окалины, при различной ширине НЛЗ

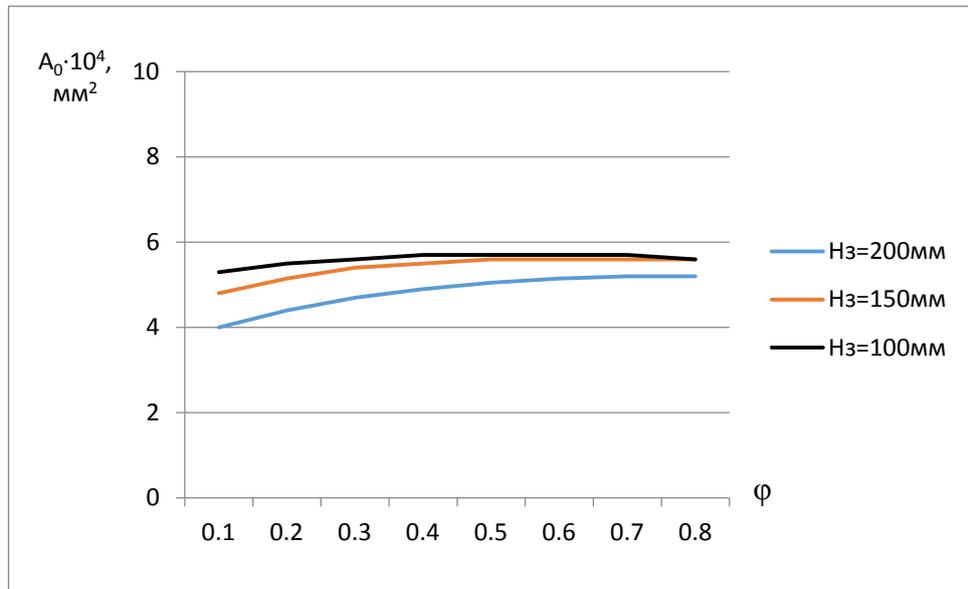


Рисунок 2.13 - Влияние доли жидкой фазы в НЛЗ на предельное значение площади, вдавливаемого в нее фрагмента окалины, при различной толщине НЛЗ

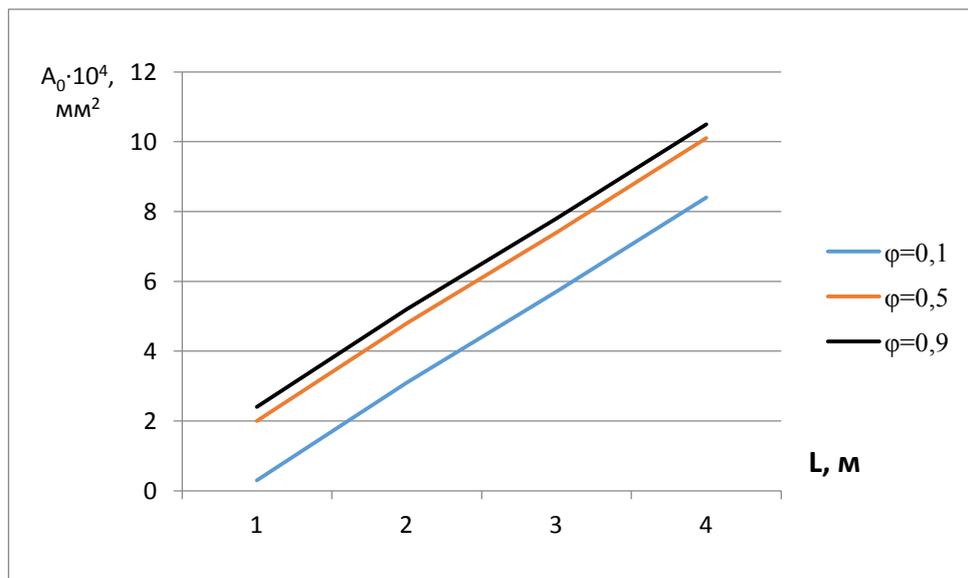


Рисунок 2.14 - Влияние высоты столба жидкой фазы в НЛЗ на предельное значение площади, вдавливаемого в нее фрагмента окалины, при различных значениях доли жидкой фазы НЛЗ

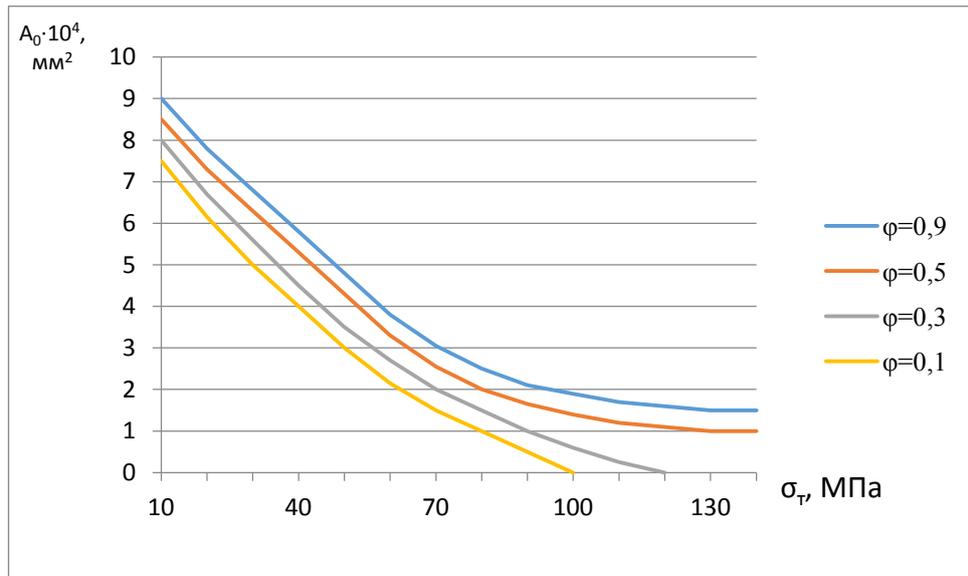


Рисунок 2.15 - Влияние предела текучести материала закристаллизовавшейся корки на предельное значение площади, вдавливаемого в нее фрагмента окалины, при различных значениях доли жидкой фазы НЛЗ

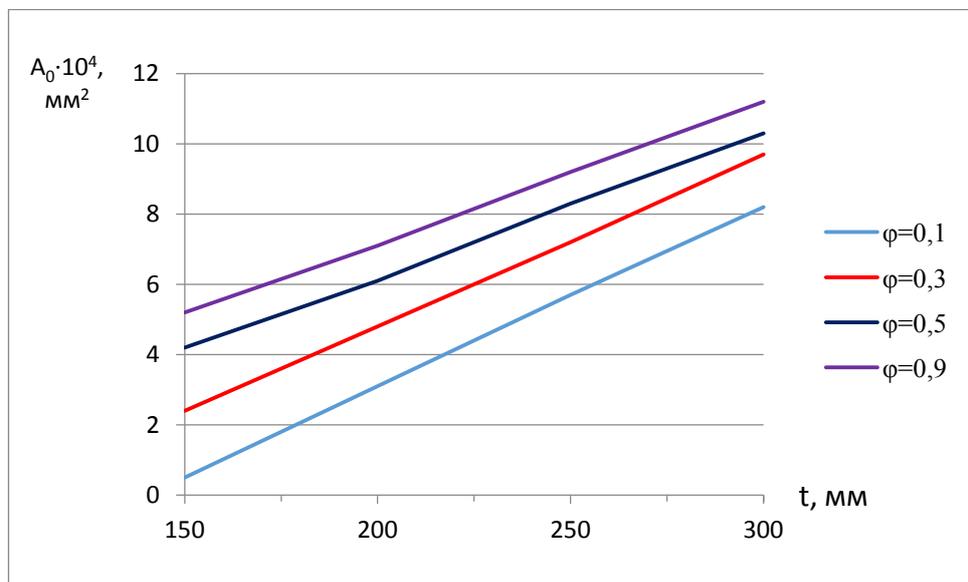


Рисунок 2.16. Влияние шага роликов МНЛЗ на предельное значение площади фрагмента окалины, вдавливаемого в НЛЗ, при различных значениях доли жидкой фазы НЛЗ

Анализ графиков показывает, что наибольшее влияние на изменение площа-

ди фрагмента окалины, который может быть вдавлен в НЛЗ, оказывают конструктивные параметры МНЛЗ, ширина НЛЗ и предел текучести материала заготовки в зоне контакта с роликом МНЛЗ.

Зависимость (2.12) справедлива только в том случае, если предельно возможная площадь фрагмента окалины A_0 не превышает площадь контакта НЛЗ с контактирующим роликом A_k , то есть должно выполняться условие:

$$A_0 \leq A_k. \quad (2.13)$$

Площадь контакта НЛЗ с контактирующим роликом равна:

$$A_k = B_3 \cdot l_k, \quad (2.14)$$

где B_3 - ширина НЛЗ;

l_k - длина дуги контакта НЛЗ с роликом.

Для определения длины контакта НЛЗ с роликом рассмотрим деформацию закристаллизовавшейся корки НЛЗ, принимая ее заземленной по контуру с короткими гранями, и нагруженной изнутри НЛЗ равномерным давлением от столба жидкой фазы.

Максимальный прогиб закристаллизовавшейся корки НЛЗ между роликами, моделируемой пластиной заземленной по контуру, определяется зависимостью [146], которая в обозначениях, принятых в диссертации, имеет вид:

$$\Delta_{max} = \frac{0,0284 P_{ж} t^4}{\left(1 + 1,056 \left(\frac{t}{B_3}\right)^5\right) \cdot E \cdot H}, \quad (2.15)$$

где $P_{ж}$ - давление от столба жидкой фазы НЛЗ на закристаллизовавшуюся корку;

t - шаг роликов;

B_3 - ширина заготовки НЛЗ;

E - модуль упругости материала НЛЗ с учетом температуры нагрева;
 H - толщина закристаллизовавшейся корки, определяемая по зависимости (2.8).

Схема взаимодействия НЛЗ с роликами с прогнутыми закристаллизовавшимися корками иллюстрируется рисунком 2.17.

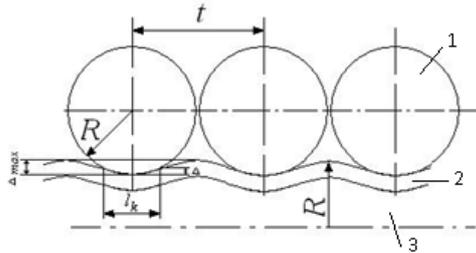


Рисунок 2.17 - Схема контакта закристаллизовавшейся прогнутой корки НЛЗ с роликами: 1 - ролик МНЛЗ; 2 - закристаллизовавшаяся корка НЛЗ; 3 - жидкая фаза

Если допустить, что радиус кривизны сдеформированной корки НЛЗ одинаков и в вогнутом состоянии и в выпуклом состоянии, то величина прогиба корки, соприкасающаяся с роликом, составит $\Delta_{max}/2$ и поэтому длина дуги контакта НЛЗ с роликом равна:

$$l_k = \sqrt{2D\Delta_{max}}, \quad (2.16)$$

где D - диаметр ролика.

Таким образом, площадь контакта НЛЗ с роликом с учетом зависимостей (2.15) и (2.17) подсчитывается по формуле:

$$A_k = 0,238B_3 t^2 \sqrt{\frac{D \cdot \gamma_{ж} \cdot L}{\left(1 + 1,056 \left(\frac{t}{B_3}\right)^5\right) E \cdot H}} \quad (2.17)$$

Подставляя в формулу (2.13) значения A_0 и A_k из уравнений (2.12) и (2.17) получим окончательно ограничение, накладываемое на предельное значение площади фрагмента окалины, вдавливаемого в НЛЗ:

$$A_0 \leq \frac{\gamma_{ж} \cdot L B_3 t - \sqrt{2} \sigma_T H^2 \left(\frac{t}{B_3} + \frac{B_3}{t} \right)}{\sigma_T (1 + \pi - 2\alpha)} \leq 0,238 B_3 t^2 \sqrt{\frac{D \cdot \gamma_{ж} \cdot L}{\left(1 + 1,056 \left(\frac{t}{B_3} \right)^5 \right) E \cdot H}}, \quad (2.18)$$

Анализ неравенства (2.18) показывает, что к ограничительным факторам, накладываемым левой его частью на допустимый размер площади фрагмента окалины, добавляются еще диаметр роликов и модуль упругости материала НЛЗ, содержащиеся в правой части неравенства.

Применительно к процессу вдавливания фрагментов окалины во впадины изношенной поверхности роликов МНЛЗ, воспользуемся решением, выполненным в работе [147]. Для принятых в настоящей работе обозначений имеем:

$$m = 1 - \left(1 - \frac{1-c}{c} \frac{P}{\sigma_{T_0}} \right)^{\frac{1}{1-c}}, \quad (2.19)$$

где m - коэффициент заполнения впадин изношенной поверхности роликов;

σ_{T_0} - предел текучести окалины;

P - удельное давление литой заготовки на ролики;

$$c = \frac{1 + f t g \Psi / 2}{1 - f c t g \Psi / 2};$$

f - коэффициент трения на поверхности контакта окалины со стенкой впадины ролика;

Ψ - угол раствора между стенками впадины ролика (Рисунок 2.18).

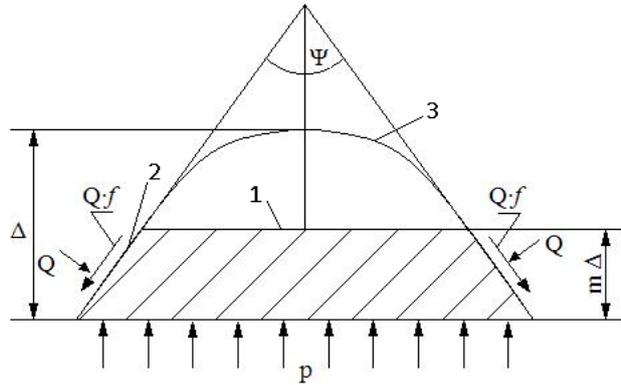


Рисунок 2.18 - Схема заполнения канавки металлом с окалиной:

1 - окалина; 2 - металл заготовки; 3 - канавка на ролике

В процессе перемещения НЛЗ по роликам она нагружает ролики усилием, определяемым выражением (2.6). Удельное давление на ролики соответственно составляет:

$$P = \frac{F_p}{A_k}, \quad (2.20)$$

где A_k - площадь контакта НЛЗ с поверхностью ролика.

При наличии окалины на поверхности НЛЗ ее минимальная площадь, через которую может быть передано усилие от НЛЗ на ролики без ее внедрения в НЛЗ, согласно схеме линий скольжения (Рисунок 2.7а) и уравнению (2.10) равна:

$$A_0 = \frac{F_0}{\sigma_T(1+\pi-2\alpha)} \quad (2.21)$$

Полагая, что площадь контакта НЛЗ с роликом определяется площадью, через которую возможно передать усилие от НЛЗ к ролику, и учитывая, что $F_p = F_0$ из уравнений (2.14) и (2.15) следует:

$$P = \sigma_T(1 + \pi - 2\alpha) \quad (2.22)$$

Подставляя значение «Р» из уравнения (2.22) в уравнение 2.19, имеем:

$$m = 1 - \left(1 - \frac{1-c}{c} \frac{\sigma_T(1+\pi-2\alpha)}{\sigma_{T_0}} \right)^{\frac{1}{1-c}} \quad (2.23)$$

Анализ полученного выражения показывает, что заполнению впадин изношенной поверхности ролика окалиной способствует увеличение отношения предела текучести материала закристаллизовавшейся корки НЛЗ к пределу текучести окалины, уменьшение коэффициента трения окалины о стенки впадины роликов МНЛЗ и увеличение угла раствора между стенками впадины роликов (рис. 2.19 и рис. 2.20). Угол наклона (α) между боковыми поверхностями фрагментов окалины, вдавливаемого в НЛЗ, на заполнение впадин ролика МНЛЗ окалиной оказывает незначительное влияние.

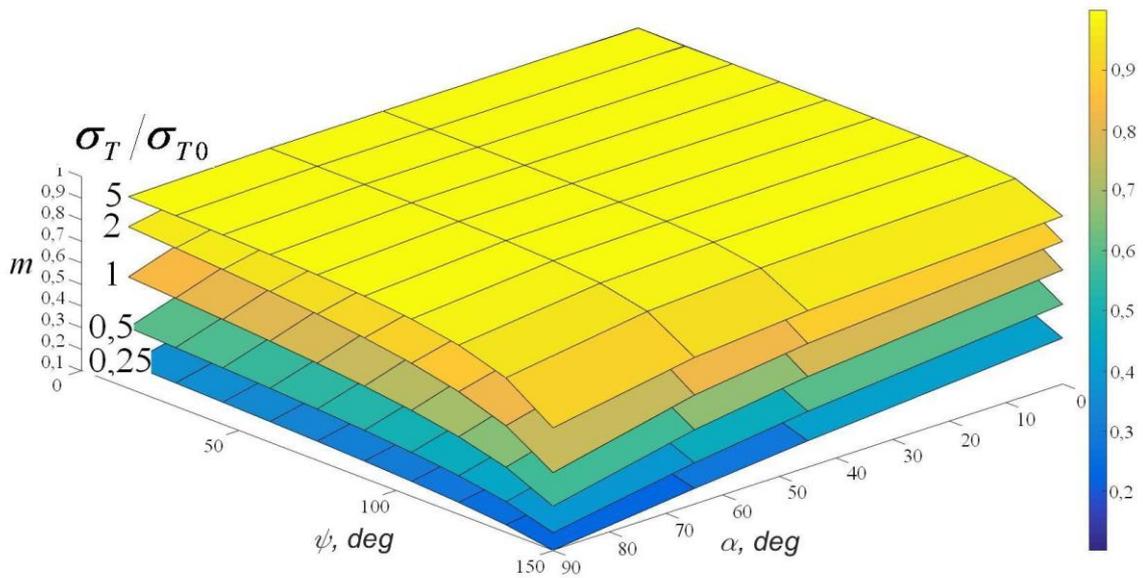


Рисунок 2.19 - Зависимость относительной величины заполнения впадин роликов МНЛЗ окалиной от величины угла раствора стенок впадины (Ψ), угла наклона боковых поверхностей фрагментов окалины вдавливаемых в НЛЗ (α) и от отношения σ_T/σ_{T_0} при коэффициенте трения окалины о стенки впадин роликов

$$f=0,1$$

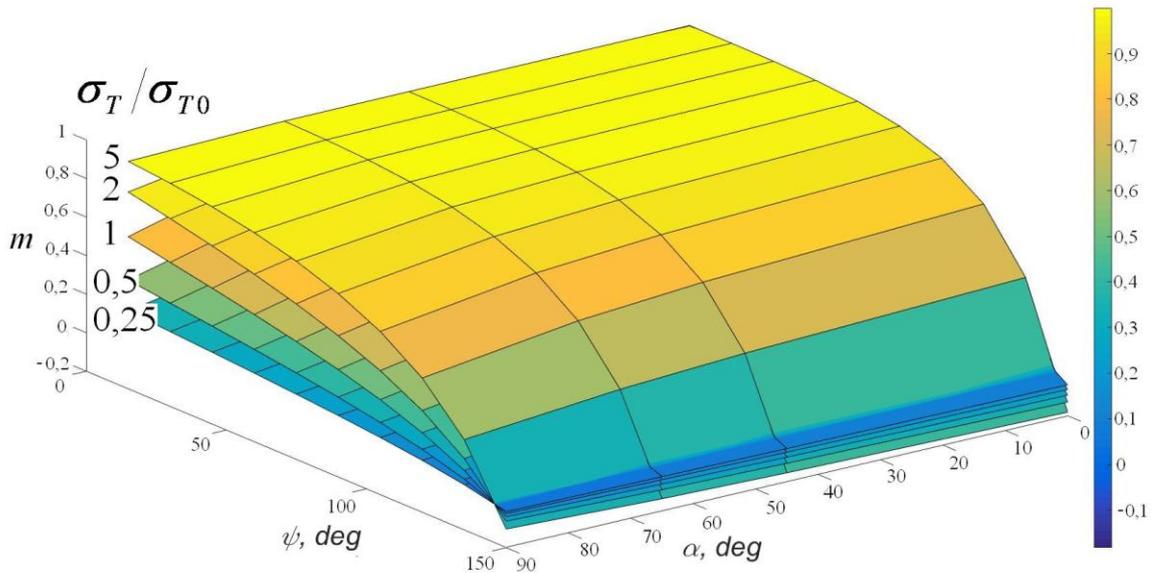


Рисунок 2.20 - Зависимость относительной величины заполнения впадин роликов МНЛЗ окалиной от величины угла раствора стенок впадины (Ψ), угла наклона боковых поверхностей фрагментов окалины, вдавливаемых в НЛЗ (α), от отношения σ_T/σ_{T0} при коэффициенте трения окалины о стенки впадин роликов $f=0,3$

2.4 Исследование износостойкости наплавочных материалов и разработка рекомендаций по уменьшению налипания окалины на ролики МНЛЗ

Результаты исследования в разделе 2.3 показали, что износ роликов МНЛЗ способствует налипанию на нее окалины, поскольку горячая окалина вдавливается во впадины изношенной поверхности ролика заполняя их частично или полностью. Заполнение впадин окалиной провоцирует формирование более прочных связей между поверхностью ролика и окалиной, и, как следствие, окалина более прочно удерживается на рабочей поверхности ролика. Таким образом, одним из приоритетных направлений в разработке мероприятий по снижению налипания окалины на ролики МНЛЗ, является повышение износостойкости их рабочих поверхностей. В настоящее время для повышения износостойкости роликов при их

ремонтах используют различные наплавочные материалы.

Анализ материалов, используемых для наплавки роликов МНЛЗ в России и за рубежом, показал, что в основном используются наплавочные материалы: Cyromecore, ПП25Х5ФМС, Св.18Х17МГС, Св20Х13 и Св.20ХГСНМ.

С целью сопоставления их износостойкости в лабораториях Магнитогорского технического университета были проведены эксперименты на образцах, наплавленных вышеотмеченными материалами. За критерий износа принимали линейный износ образцов после их истирания на установке, имитирующей проскальзывание между роликом и НЛЗ. Схема лабораторной установки представлена на рисунке 2.2.1.

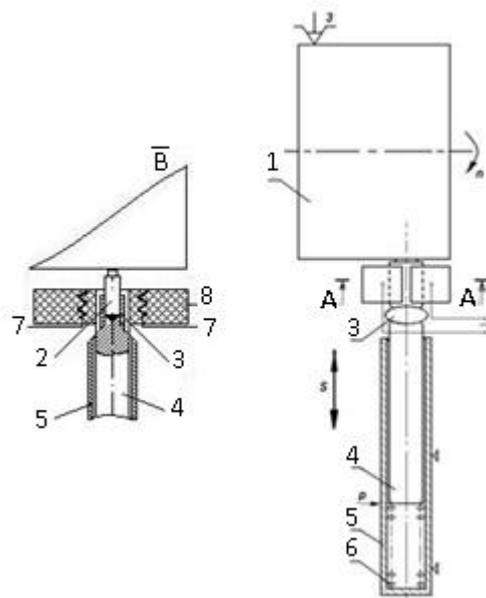


Рисунок 2.21 - Схема установки для исследования линейного износа образцов наплавленных и ненаплавленных роликов МНЛЗ: 1 - барабан; 2 - образец ролика; 3 - выступ держателя; 4 - держатель; 5 - корпус; 6 - пружина; 7 - нагревательный элемент; 8 - мини-печь

Исследования проводили по следующей методике. Корпус динамометрического приспособления 5 закрепляли в резцедержателе станка PorebaTR 70 (Рисунок 2.22 а). Испытуемый образец 2 вставляли в гнездо, выполненное на выступающей торцевой части держателя 4. Требуемое усилие прижатия образца к диску

задавалось путем сжатия градуированной пружины 6, расположенной внутри корпуса 5 и упирающейся в торец держателя 4. Предварительная градуировка пружины позволила устанавливать требуемую нагрузку на образец по лимбу поперечного перемещения салазок станка.

Мини-печь 8 (рис. 2.21 и рис. 2.22б) закрепляли на токарно-винторезном станке PorebaTR 70 (рис. 2.22 а), таким образом, чтобы расстояние между ее корпусом и поверхностью трения диска составляло 1-2 мм, что обеспечивало достаточный вылет образца и поддержание необходимой его температуры в процессе истирания. Для улучшения теплопередачи от нагревающего элемента мини-печи к образцу, конец держателя, вводимый в мини-печь вместе с образцом выполнен тонкостенным с минимальным зазором между ним и нагревательными элементами.

Температура нагрева образца регистрировалась и корректировалась в течение всего периода его истирания с использованием хромель-алюмелевой термопары. Наибольшие отклонения температуры не превышали ± 10 °С.

Время испытания каждого образца составляло 5 минут.

Величина линейного износа замерялась микрометром с точностью 0,01 мм с последующим усреднением результатов замеров. Измерения размеров образцов до и после износа выполняли при постоянной температуре 20 °С с отклонениями ± 1 °С, после длительной выдержки в водяной ванне.

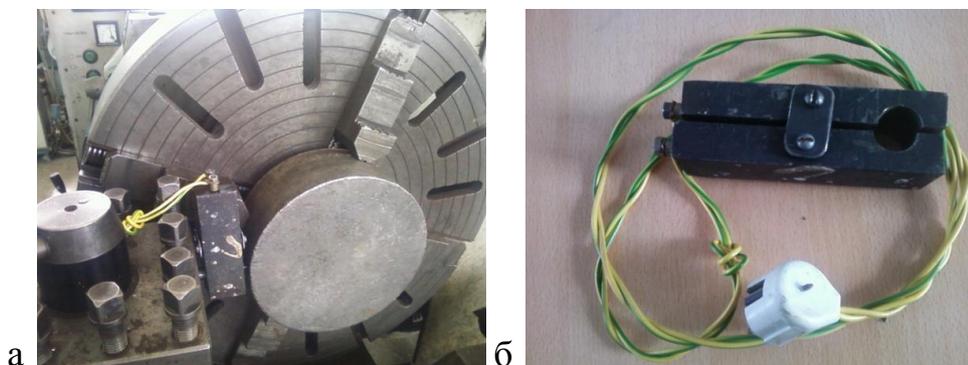


Рисунок 2.22 - Установка в сборе на токарно-винторезном станке PorebaTR70 (а);
Приспособление для нагрева образцов (мини печь) (б)

Процесс моделирования износа роликов МНЛЗ считается подобным, если величины удельного давления и температура предварительного подогрева образцов идентичны давлениям и температуре функционирования роликов.

Температура нагрева образцов для испытаний их на износ была установлена по литературным данным [129], как средняя температура функционирования роликов МНЛЗ и принята в исследованиях равной 235 °С.

Удельное давление на ролики МНЛЗ определяли с использованием формулы (2.20), выведенной в разделе диссертации 2.3.

Используя схему контакта НЛЗ с роликами (рис. 2.17) и учитывая, что сила, действующая на два смежных ролика распределяется между ними равномерно, удельное давление НЛЗ на площадках контакта с роликами определим по зависимости:

$$p = \frac{\gamma_{ж} \cdot L \cdot t}{\sqrt{2D\Delta_{max}}}, \quad (2.24)$$

где Δ_{max} - максимальный прогиб закристаллизовавшейся корки НЛЗ, определяемый уравнением (2.15).

Таким образом, удельное давление между роликом и НЛЗ определяется удельным весом жидкой фазы НЛЗ, высотой столба жидкой фазы, шагом и диаметром роликов, модулем упругости и толщиной закристаллизовавшейся корки НЛЗ.

Расчеты показывают, что применительно к существующим конструкциям МНЛЗ удельное давление на контакте НЛЗ с роликами зоны вторичного охлаждения изменяется в диапазоне 34,4-65,8 МПа. Для испытания на износ образцов из наплавочных материалов установили удельное давление равное 40 МПа.

Поскольку для испытаний на износ образцы использовались длиной 20 мм и диаметром 10 мм, то с целью обеспечения такого давления при испытаниях на износ на торце образца, примыкающего к диску протачивали выступ длиной 2 мм и диаметром 2,5 мм (рис. 2.23), что соответствовало контактной площади 4,9 мм² и

усилию прижатия образца 196 Н.

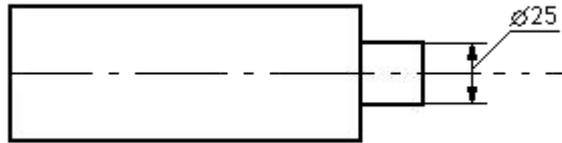


Рисунок 2.23 - Образец для испытания на износ наплавочных материалов

Результаты износа образцов при температуре 235 °С приведены в таблице 2.3. За показатель износостойкости принята величина обратная величине износа образца.

Таблица 2.3 - Результаты испытаний на износ наплавочных материалов

Наплавочный материал	№ образца	Линейный износ, мм	Среднее значение износа, мм	Износостойкость, 1/мм
Св.20ХГСНМ	1	0,28	0,328	3,05
	2	0,34		
	3	0,28		
	4	0,35		
	5	0,39		
Св.18Х17МГС	1	0,14	0,174	5,75
	2	0,18		
	3	0,22		
	4	0,17		
	5	0,16		
ПП25Х5ФМС	1	0,24	0,194	5,15
	2	0,17		
	3	0,16		
	4	0,21		
	5	0,19		

Наплавочный материал	№ образца	Линейный износ, мм	Среднее значение износа, мм	Износостойкость, 1/мм
Суромесоре 410 N-0	1	0,16	0,146	6,85
	2	0,11		
	3	0,14		
	4	0,14		
	5	0,18		
Св.20X13	1	0,30	0,304	3,29
	2	0,26		
	3	0,36		
	4	0,31		
	5	0,29		

Для наглядности табличные данные по износостойкости иллюстрированы графиком на рисунке 2.24.

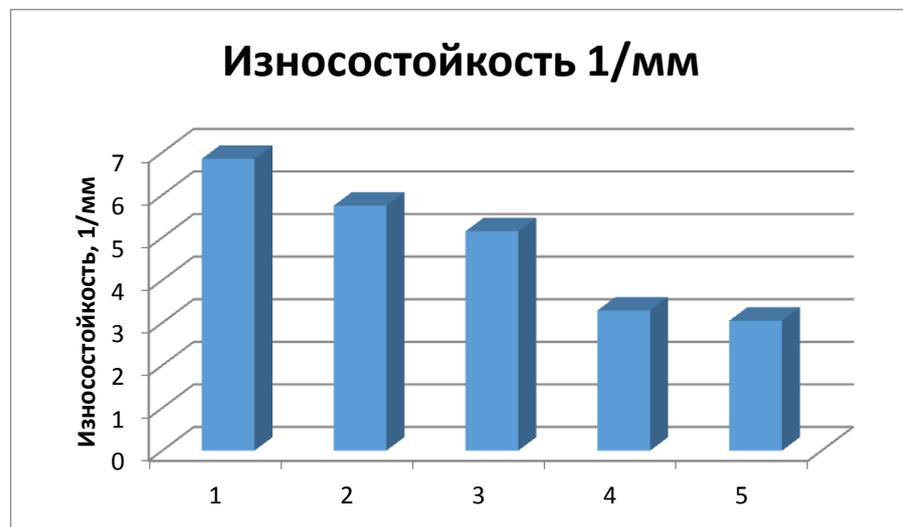


Рисунок 2.24 - Износостойкость наплавочных материалов при температуре 235°C: 1-Суромесоре; 2- Св.18X17МГС; 3-ПП25X5ФМС; 4-Св20X13; 5-Св.20ХГСНМ

Наибольшую износостойкость показал наплавочный материал Суромесоре

410, а наименьшую Св.20ХГСНМ. Хорошие показатели по износостойкости продемонстрировали отечественные наплавочные материалы Св.18Х17МГС и ПП25Х5ФМС.

С целью сопоставления результатов испытаний на износ наплавочных материалов, нагретых до температуры 235°С с данными по износу аналогичных материалов без предварительного подогрева, полученных Н.В. Мазуром [130], показатели износостойкости представлены показателями относительной износостойкости. За единицу показателя относительной износостойкости принят показатель износостойкости наплавочного материала Св.20ХГСНМ, для сопоставимости результатов, которые также были выражены в единицах износостойкости Св.20ХГСНМ, но только при температуре окружающей среды.

Сопоставление относительной износостойкости наплавочных материалов между собой при температуре 235°С, а также с результатами относительного износа, полученными в работе [130] без предварительного подогрева приведены на рис. 2.25.

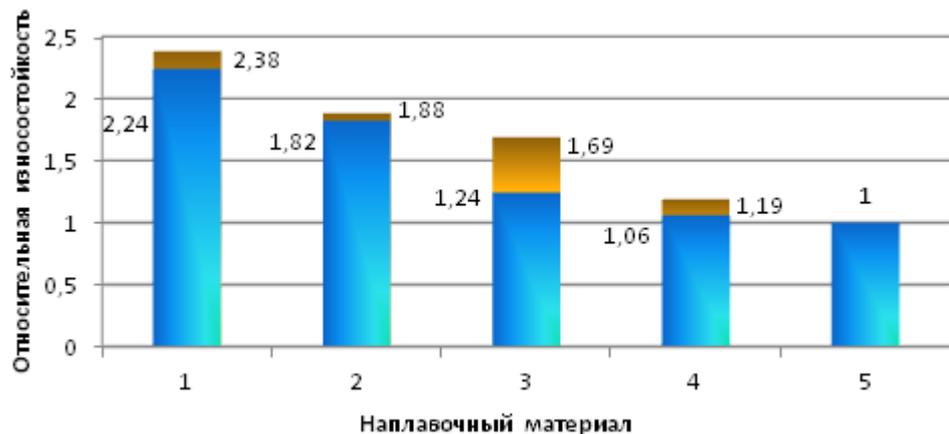


Рисунок 2.25 - Относительная износостойкость наплавочных материалов:

1-Сугомесcore 410 N-0; 2-Св.18Х17МГС; 3-НпПП25Х5ФМС;

4-Св20Х13; 5-Св.20ХГСНМ

■ - испытание при t=235°С; ■ - испытание при t= 20°С [130].

Анализ величин относительных значений износостойкости наплавочных ма-

териалов, используемых для наплавки рабочих поверхностей роликов МНЛЗ, показал, что относительная износостойкость наплавочных материалов слабо зависит от температуры в диапазоне от 20°C до 235°C за исключением наплавочного материала ПП25Х5ФМС.

Повышение относительной износостойкости наплавочного материала ПП25Х5ФМС связано с тем, что по данным Н.В. Мазура [130] он имеет наибольшую термостойкость из выше исследованных отечественных материалов. Это позволяет его рекомендовать для наплавки роликов, работающих в наиболее термонапряженных условиях.

2.5 Исследование износа и обрабатываемости наплавленных и ненаплавленных роликов МНЛЗ из материала 25Х1МФ

Исследование выполнено по методике, описанной в разделе 2.4 на образцах, взятых от ненаплавленных роликов из материала 25Х1МФ и наплавленных роликов с наплавочным материалом ПП25Х5ФМС. Толщина наплавленного слоя на роликах составляла 8...9 мм. Твердость наплавленного слоя на образцах составляла 248...255 НВ, а твердость образцов, вырезанных и ненаплавленного ролика - 223...225 НВ, т.е. твердость образцов с наплавленным слоем на 23...32 единицы превышала твердость ненаплавленных образцов.

Результаты износа образцов, нагретых до температуры 235°C приведены в таблице 2.4 и иллюстрированы гистограммой на рисунке 2.26.

Таблица 2.4 - Результаты исследований

Номер опыта	Износ, мм	
	Наплавленный образец	Ненаплавленный образец
1	0,23	0,27
2	0,26	0,33
3	0,25	0,31

Номер опыта	Износ, мм	
	Наплавленный образец	Ненаплавленный образец
4	0,24	0,32
5	0,26	0,36
6	0,17	0,34
7	0,25	0,30
8	0,15	0,29
9	0,25	0,26
Среднее значение	0,228	0,344

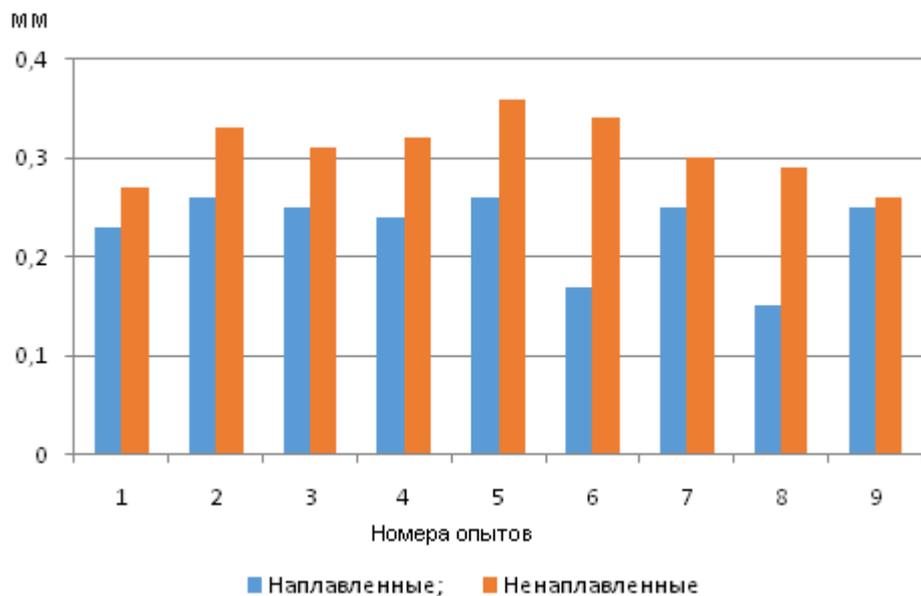


Рисунок 2.26 - Гистограмма износа образцов

Результаты исследований показывают, что износ наплавленных образцов в 1,5 раза меньше по сравнению с ненаплавленными, хотя разница в их твердости не превышает 32 единиц. Таким образом, применение наплавочного материала ПП25Х5ФМС с повышенной твердостью позволяет существенно снизить износ роликов из материала 25Х1М1Ф. Однако наплавленный слой без предварительной термической обработки имеет низкую механическую обрабатываемость на металлорежущих станках.

С целью улучшения обрабатываемости, наплавленные ролики подвергают отжигу, снижая твердость наплавленного слоя до 220-250 НВ (почти в 2 раза). Такое снижение твердости, действительно, улучшает обрабатываемость резцами, но повышают износ рабочих поверхностей роликов МНЛЗ в процессе их эксплуатации и, как следствие, способствует удержанию окалины на их поверхностях.

Низкая обрабатываемость резанием связана с тем, что материал 25Х1МФ и в особенности наплавочный материал ПП25Х5ФМС создают силы резания в 1,5...2 раза больше, чем при обработке стали 45 в аналогичных условиях. К тому же материалы, используемые для изготовления и наплавки роликов, имеют низкую теплопроводность, что приводит к возникновению высоких температур в зоне резания в 2...3 раза больше, чем при обработке обычных конструкционных материалов. Это накладывает ограничения на производительность механической обработки роликов МНЛЗ особенно наплавленных, поскольку в процессе механической обработки имеют место динамические нагрузки на резец из-за колебания сечения срезаемого слоя.

Повышенные значения контактных температур и наличие ударных нагрузок при обработке наплавленного слоя роликов МНЛЗ являются основной причиной низкой производительности их механической обработки и повышенного расхода режущего инструмента. Попытки применения новых инструментальных материалов и изменения геометрии заточки инструмента до настоящего времени к существенным положительным результатам не привели. Поэтому автором был выполнен анализ других способов обработки труднообрабатываемых материалов, который показал, что наиболее приемлемым и высокопроизводительным способом, практически не зависящим от твердости обрабатываемого материала является электроконтактный метод.

Автором [135, 136] совместно с Мазуром Н.В. проведены аналитические и экспериментальные исследования по применимости электроконтактной обработки роликов МНЛЗ.

В результате была разработана и спроектирована конструкция и изготовлена установка электроконтактной обработки наплавленных роликов МНЛЗ. Выполне-

но опытно-промышленное испытание установки. Отработаны режимы электроконтактной обработки роликов МНЛЗ. Составлена технологическая инструкция на обработку наплавленных роликов МНЛЗ в условиях цеха ремонта металлургического оборудования-3 ЗАО «Механоремонтный комплекс» ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

2.6 Разработка опытно-промышленной установки для электроконтактной обработки наплавленных роликов МНЛЗ

Опытно-промышленная установка электроконтактной обработки (ЭКО) спроектирована и изготовлена на базе токарно-винторезного станка модели 1Н65. Общий вид установки показан на фото (Рисунок 2.27,а).

Головка ЭКО в сборе установлена на суппорте станка (см. рисунок 2.27,б).

Вращение диску-электроду передавалось от асинхронного электродвигателя мощностью 1,5 кВт.

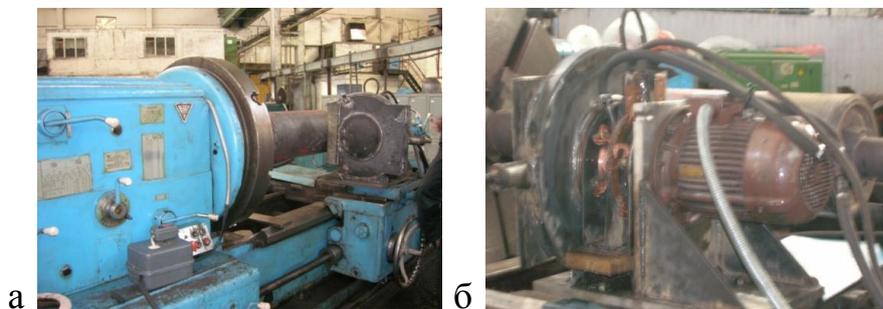


Рисунок 2.27 - Общий вид установки ЭКО в ЦРМО-3

Головка ЭКО смонтирована на сварном основании, которое крепилось к суппорту Т-образными болтами, вставляемыми в Т-образные пазы. На том же основании закреплен защитный кожух 8 диска-электрода (Рисунок. 2.28). В кожух смонтировано сопло для подачи охлаждающей жидкости на диск-электрод. Торцевая поверхность кожуха выполнена в виде откидной крышки для удобства установки и снятия диска-электрода, а также для наблюдения за его состоянием и проверки его крепления на шпинделе головки ЭКО. Торцевые поверхности кожуха

ха, обращенные к ролику, снабжены резиновыми шторами для защиты рабочего места от излучения электрической дуги и брызг охлаждающей жидкости.

С целью предупреждения перегрева элементов токосъёмника 9 в зону контакта щеток с медными кольцами подавался сжатый воздух (Рисунок 2.28).

Токосъёмник помещен в кожух из диэлектрического материала, что исключает случайный контакт с токоведущими стационарными и вращающимися его элементами.

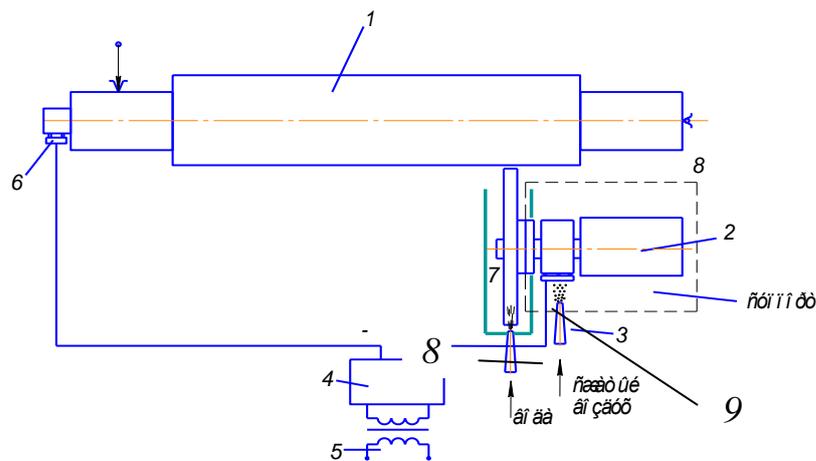


Рисунок 2.28 - Схема опытно-промышленной установки ЭКО: 1 - ролик МНЛЗ; 2 - электродвигатель; 3 - штуцер; 4 - вторичная обмотка трансформатора; 5 - первичная обмотка трансформатора; 6, 9 - токосъёмники; 7 - диск-электрод; 8 - кожух

Обязательным условием успешной работы ЭКО является наличие обильного (200-300 л/мин) водяного охлаждения диска-электрода.

Охлаждение диска-электрода в опытно-промышленной установке ЭКО осуществлено с помощью системы охлаждения данного станка.

Применительно к условиям эксплуатации промышленной установки рекомендуется использовать замкнутую систему охлаждения, включающую питающий и сливной баки, насос подачи воды, фильтр, насос откачки воды из сливного бака и системы трубопроводов.

Напряжение на диск-электрод подавалось от вторичной обмотки трансформатора 4 через токосъемники 9, а на ролик МНЛЗ 1 - через токосъемники 6 (см. рисунок 2.28).

Общий вид токосъемника головки ЭКО, подводящего ток на диск-электрод, показан на рисунке 2.29, а. Общий вид токосъемника шпинделя станка, снимающего ток с обрабатываемого ролика, приведен на рисунке 2.29,б. Охлаждение токосъемника осуществлялось сжатым воздухом из цеховой системы.

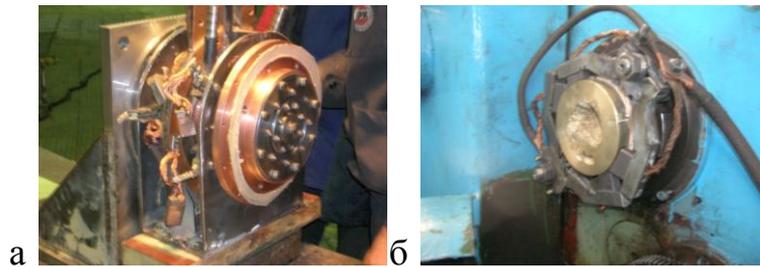


Рисунок 2.29 - Устройство щеточное токосъемника диска-электрода (а); вид токосъемника, встроенного в шпиндель станка 1Н65 в ЦРМО-3 (б)

Устройство головки ЭКО показано на рисунке 2.30.

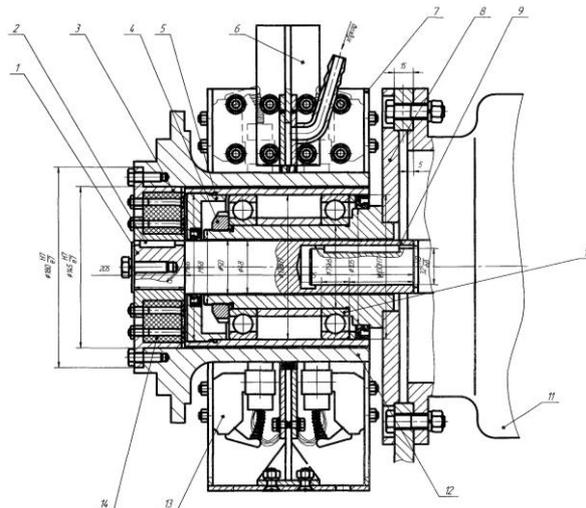


Рисунок 2.30 - Сборочный чертеж головки: 1 - ось; 2, 9 - шпонка; 3 - обод муфты; 4 - гайка шлицевая; 5 - гайка дистанционная; 6 - токопровод; 7 - устройство щеточное; 8 - муфта; 10 - подшипник шариковый; 11 - электродвигатель; 12 -шпиндель; 13 - щеткодержатель; 14 - диск резиновый

Диск-электрод закрепляли на шпинделе головки 12, который установлен на шариковые подшипники 10, изолированной от корпуса и получал вращение от электродвигателя 11.

Токопровод 6 к диску-электроду выполнен в виде кольца с щеточным устройством 7, изолированного от корпуса головки (Рисунок 2.31).

Кроме вращательного движения диск-электрод вместе с суппортом станка перемещался в продольном и поперечном направлениях.

Подвод тока к головке производился гибким изолированным кабелем.

По результатам испытания опытно-промышленной установки ЭКО были изменены конструктивные исполнения устройства диска-электрода, получен патент на полезную модель [137] и выполнены чертежи с изменениями, которые переданы в цех ремонта металлургического оборудования-3 ЗАО «Механоремонтный комплекс» ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» для изготовления промышленной установки электроконтактной обработки роликов МНЛЗ. Что подтверждается актом внедрения [Приложение 1].

Усовершенствован технологический процесс механической обработки роликов МНЛЗ, позволяющий полностью исключить операцию отжига роликов и токарную обработку, что повышает стойкость рабочей поверхности к образованию на ней дефектов в виде сколов, выкрошек, царапин и т.д.

Экономия за счет замены механической обработки методом ЭКО составит 1057800 руб./год [Приложение 2].

2.7 Выводы

Исследовано состояние рабочих поверхностей роликов МНЛЗ после их эксплуатации с записью профилограмм на профилометре Mahr PSI. Выявлено, что рабочие поверхности роликов после их эксплуатации включают участки:

- с сеткой разгара площадью $400 \dots 300 \times 200 \dots 250 \text{ мм}^2$ и глубиной трещин $0,5 \dots 4,5 \text{ мм}$;
- с локальными впадинами различной конфигурации площадью от несколь-

ких квадратных миллиметров до нескольких сотен квадратных миллиметров;

- с изношенным грубым микрорельефом, характеризующимся наличием впадин глубиной 1..3 мм и углами наклона между их боковыми поверхностями 30...82°;

- с налипшей окалиной площадью от 10 до 300 мм², толщиной до 5 мм и углами наклона между боковыми поверхностями выступов 43...88°.

2. Выполнено математическое моделирование процесса взаимодействия окалины с роликами МНЛЗ и непрерывнолитой заготовкой. Установлено, что при значительных размерах фрагмента окалины и малых толщинах закристаллизовавшейся корочки НЛЗ вдавливание окалины сопровождается формированием напряжений растяжения по боковым поверхностям вдавливаемого фрагмента, что облегчает процесс удаления его с поверхности заготовки с последующим налипанием на поверхность контактирующего ролика.

В процессе вдавливания фрагмента окалины небольших размеров и большими углами наклона боковых поверхностей в толстую закристаллизовавшуюся корку по боковым поверхностям вдавливаемого фрагмента формируются напряжения сжатия, которые зажимают и удерживают этот фрагмент окалины на поверхности НЛЗ, что на стадии горячекатаного передела может спровоцировать дефект «вкатаная окалина» [149].

3. Получена математическая зависимость, которая накладывает ограничения на размер фрагмента окалины, который может быть вдавлен в НЛЗ с учетом конструктивных параметров МНЛЗ, габаритных размеров и доли жидкой фазы в НЛЗ и несущей способности закристаллизовавшейся корки. Наибольшее влияние на изменение площади фрагмента окалины, который может быть вдавлен в НЛЗ, оказывают конструктивные параметры МНЛЗ, ширина НЛЗ и предел текучести материала заготовки.

4. Разработан аналитический метод определения коэффициента заполнения впадин изношенных поверхностей роликов окалиной. Установлено, что заполнению впадин окалиной способствует увеличение отношения предела текучести материала закристаллизовавшейся корки НЛЗ к пределу текучести окалины, умень-

шение коэффициента трения окалины о стенки впадины роликов МНЛЗ и увеличение угла раствора между стенками впадины на поверхности роликов.

5. Выполнено исследование износостойкости наплавочных материалов, применяемых для восстановления роликов МНЛЗ. Установлено, что при температуре нагрева 235°С, наилучшую износостойкость из отечественных наплавочных материалов имеют Св.18Х17МГС и ПП25Х5ФМС.

6. Проанализирована обрабатываемость наплавочного слоя из различных наплавочных материалов. Предложено для обработки высокотвердых поверхностей роликов МНЛЗ с целью сохранения их твердости и повышения производительности использовать метод электроконтактной обработки (ЭКО).

7. Разработана и внедрена опытно-промышленная установка для электроконтактной обработки наплавленных роликов МНЛЗ, позволившая исключить операцию отжига перед механической обработкой. Экономический эффект от использования установки ЭКО составляет 1057800 руб/год [Приложения 1,2].

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТА «ВКАТАНАЯ ОКАЛИНА»

3.1 Оборудование, оснастка и образцы для исследования механизма образования «вкатаная окалина»

Исследования механизма образования дефекта «вкатаная окалина» проводили в лаборатории кафедры технологии машиностроения МГТУ им. Г.И.Носова. Для этих целей разработана и изготовлена лабораторная экспериментальная установка, показанная на рисунке 3.1.

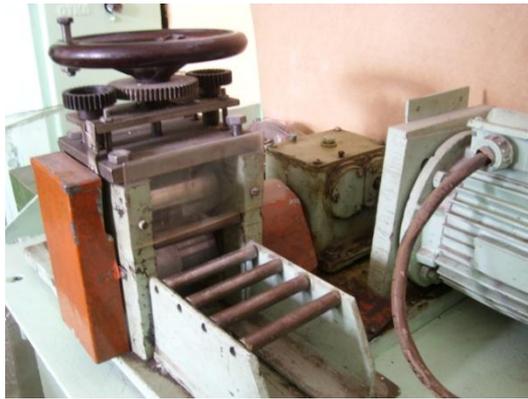


Рисунок 3.1 - Общий вид установки
для исследований дефекта «вкатаная окалина»

Для моделирования подката горячекатаной полосы использовали различные виды образцов из свинца [126]. Обоснованием выбора материала свинца при моделировании является температура его рекристаллизации [133].

Дефект поверхности заготовки типа «впадины» моделировали в виде канавки, либо одиночной впадины, как показано на рис. 3.2а

Дефект поверхности заготовки типа «выступ» моделировали, как показано на рисунке 3.2б

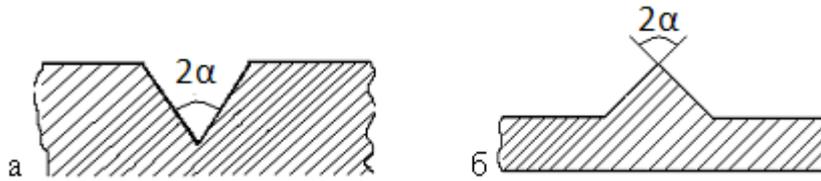


Рисунок 3.2 - Искусственный дефект перед прокаткой в виде канавки (а) и в виде выступа (б) треугольного сечения

Поскольку при проведении исследований главное внимание уделялось углу раскрытия искусственного дефекта, то возникла необходимость в создании специальной оснастки. В связи с этим были изготовлены специальные керны и шаблоны для нанесения дефектов показанный на рисунке 3.3.

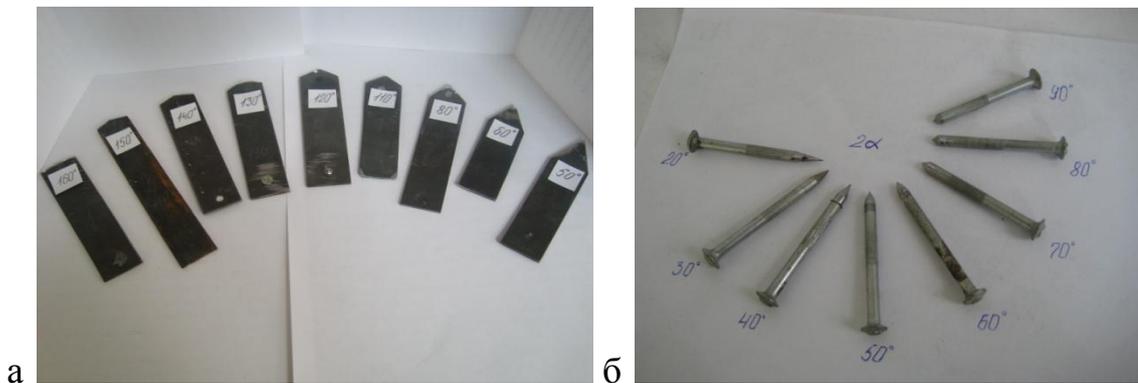


Рисунок 3.3 - Шаблоны с различными углами для нанесения искусственных дефектов

Технология изготовления свинцовых образцов использовалась следующая:

- отливка образца из свинца соответственно в виде брусков прямоугольной формы, моделирующих сляб;
- механическая обработка образца для создания ровной поверхности, предназначенной для деформации, перед нанесением искусственных дефектов;
- нанесение искусственных дефектов с помощью специально изготовленных кернов или шаблонов.

На рис. 3.4. показан готовый к исследованию образец из свинца с нанесенными искусственными дефектами в виде одиночных впадин.

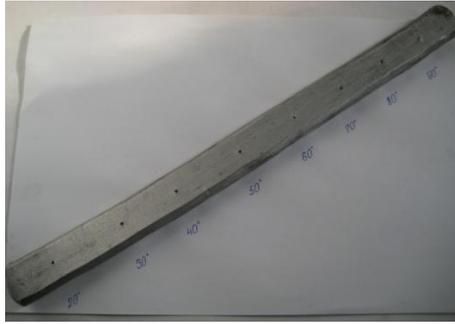


Рисунок 3.4 - Подготовленный свинцовый образец

После моделирования деформации образцов изготавливали шлифы каждого искусственного дефекта (Рисунок 3.5).

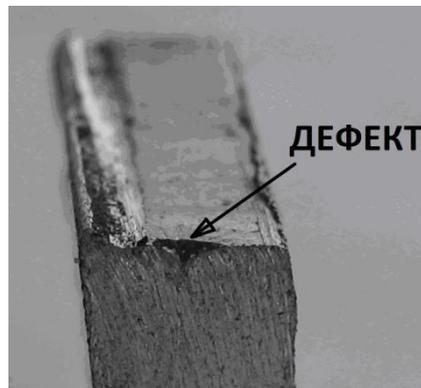


Рисунок 3.5 - Свинцовый образец
с разрезом единичного искусственного дефекта

Свинцовые образцы изготавливали с впадинами и выступами, как показано на рисунке 3.6а.

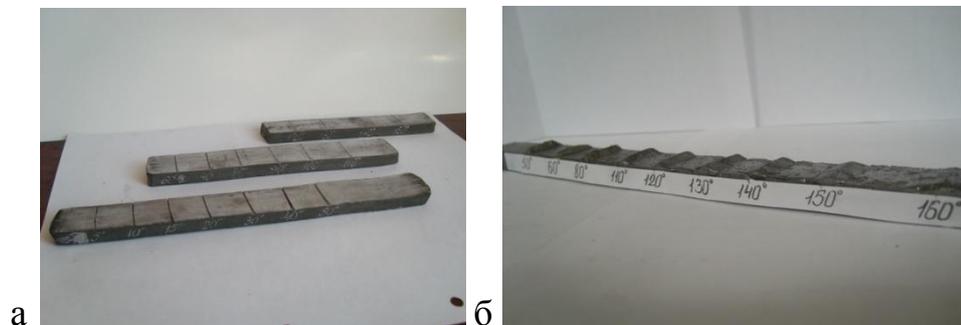


Рисунок 3.6 - Свинцовый образец с нанесенными искусственными дефектами: а - типа «впадина»; б - типа «выступ».

Технология получения искусственного дефекта в виде выступа треугольного сечения отличалась тем, что выступы получались на образце при отливке, как показано на рисунке 3.6б. Впадины и выступы наносили поперек направления будущей прокатки.

Прокатный стан оснащался рифлеными и гладкими валками. При моделировании окалиноломателя использовались рифленые валки с углами между боковыми поверхностями рифлений 45, 60, 75, 90, 120°С. Рифлеными валками прокатывали гладкие образцы без предварительно нанесенных дефектов. При моделировании последующих клеток стана горячей прокатки использовались гладкие валки и образцы с предварительно нанесенными на них выступами и впадинами с различными углами между их боковыми поверхностями: 50, 60, 80, 110, 120, 130, 140, 150 и 160°С.

3.2 Экспериментальное исследование механизма образования дефекта «вкатаная окалина»

Механизм дефекта «вкатаная окалина» исследовали по формоизменению поверхностных дефектов, смоделированных выступами и канавками треугольной формы с различными углами раскрытия их боковых поверхностей, в результате обжатия их на лабораторном прокатном стане. За критерий образования дефекта «вкатаная окалина» принимался факт смыкания боковых поверхностей дефектов с защемлением между ними окисных пленок после обжатия образцов между валками прокатного стана.

Эксперименты проводили в два этапа.

На первом этапе моделировали процесс обжатия гладкой полосы рифлеными валками с величиной обжатия 3...4%. Каждым рифленным валком с определенной геометрией рифленой поверхности прокатывали по 10 образцов. После каждого прохода фиксировали общий вид дефектов на поверхности деформированных образцов.

Установлено, что рифления с углами меньше 60...75° формируют на поверх-

ности прокатываемой полосы впадины, которые проходя через очаг деформации, практически не меняют своей формы, полученной от отпечатываемости выступов рифлений валков на поверхности полосы. Углы их раствора соответствуют углам между боковыми поверхностями выступов рифлений с точностью $\pm 30'$.

Прокатка рифлеными валками полосы с углами между боковыми поверхностями рифлений более $60 \dots 75^\circ$, формируют на поверхности прокатываемой полосы впадины, которые проходя через очаг деформации, имеют тенденцию к увеличению угла раствора между их боковыми поверхностями. Угол раствора боковых поверхностей, измеренный на шлифах образцов, после выхода из очага деформации увеличился по сравнению с углом между боковыми поверхностями рифлений в среднем на $1^\circ \dots 4^\circ$, причем, чем больше угол между боковыми поверхностями рифлений, тем больше увеличение угла раствора впадин на прокатаной полосе (табл. 3.1).

Таблица 3.1 - Зависимость угла раствора впадин на прокатаной заготовке от угла рифлений на прокатном валке

Угол рифлений 2α	Углы раствора впадин										Среднее значение
	Номера образцов										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
45°	$43^\circ 40'$	$44^\circ 20'$	$44^\circ 45'$	$44^\circ 10'$	$42^\circ 50'$	$42^\circ 15'$	$43^\circ 25'$	$44^\circ 20'$	$45^\circ 05'$	$45^\circ 10'$	$44^\circ 18'$
60°	$61^\circ 05'$	$60^\circ 15'$	$59^\circ 30'$	$59^\circ 50'$	$60^\circ 45'$	$59^\circ 10'$	$59^\circ 15'$	$60^\circ 05'$	$58^\circ 55'$	$59^\circ 20'$	$60^\circ 04'$
75°	$75^\circ 25'$	$75^\circ 45'$	$74^\circ 30'$	$74^\circ 40'$	$75^\circ 35'$	$75^\circ 50'$	$73^\circ 45'$	$75^\circ 15'$	$74^\circ 40'$	$75^\circ 40'$	$75^\circ 06'$
90°	$91^\circ 00'$	$93^\circ 40'$	$95^\circ 50'$	$88^\circ 25'$	$96^\circ 30'$	$86^\circ 35'$	$93^\circ 10'$	$88^\circ 15'$	$95^\circ 55'$	$94^\circ 25'$	$92^\circ 22'$
120°	$124^\circ 40'$	$126^\circ 10'$	$122^\circ 05'$	$125^\circ 30'$	$126^\circ 10'$	$125^\circ 25'$	$121^\circ 15'$	$123^\circ 45'$	$123^\circ 10'$	$124^\circ 05'$	$124^\circ 04'$

Увеличение угла раствора боковых поверхностей впадин на поверхностях образцов при больших углах между боковыми поверхностями рифлений можно объяснить наличием удлинения полосы при ее объемной деформации при вдавлении в нее выступов рифлений.

Таким образом, чтобы избежать, риска защемлений во впадинах полосы фрагментов окалины и любых инородных частиц, рифление валков, используемых на окалиноломателе, рекомендуется выполнять с рифлением, угол между боковыми поверхностями которых составляет 75° и более.

На **втором этапе** эксперимента моделировали процесс деформации сляба в первой клетки стана горячей прокатки гладкими валками. Горячекатаную полосу моделировали образцами из свинца. Нанесенные на поверхность дефекты в виде впадин и выступов треугольного сечения являлись моделями отпечатков рифлений валков окалиноломателя, фрагментов окалины на поверхности подката и впадин от огневой зачистки поверхностных дефектов.

Прокатку проводили с относительными единичными обжатиями 20% в три прохода.

Изменение формы выступов треугольного сечения с различными углами при вершине: $2\alpha = 50, 60, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160^\circ$ фиксировали после каждого прохода, где 2α - угол между стенками выступа и впадины (Рисунок 3.7).

Выступы с протяженностью их на всю ширину полосы в процессе прокатки вдавливались в нее с расплющиванием вершин при значениях углов между их боковыми поверхностями $2\alpha \leq 80^\circ$. Расплющивание вершин выступов сопровождалось наслоением деформированных фрагментов выступов на поверхность полосы, примыкающей к выступам (Рисунок 3.7,а). Наличие окислов на выступах и на поверхности прокатываемой полосы препятствовали образованию металлических связей между металлом полосы и наслоениями от деформаций выступов, поэтому такие наслоения легко отслаивались при приложении к ним нагрузки.

Аналогичные выступы с углами между их боковыми поверхностями $2\alpha > 80 \dots 160^\circ$ раскатывались без наслоений фрагментов выступов на поверхность полосы (Рисунок 3.7,б).

Выступы с одинаковой протяженностью вдоль и поперек прокатываемой полосы, раскатывались без наслоений фрагментов выступов на поверхность полосы при значениях углов между их боковыми поверхностями $2\alpha > 90^\circ$.

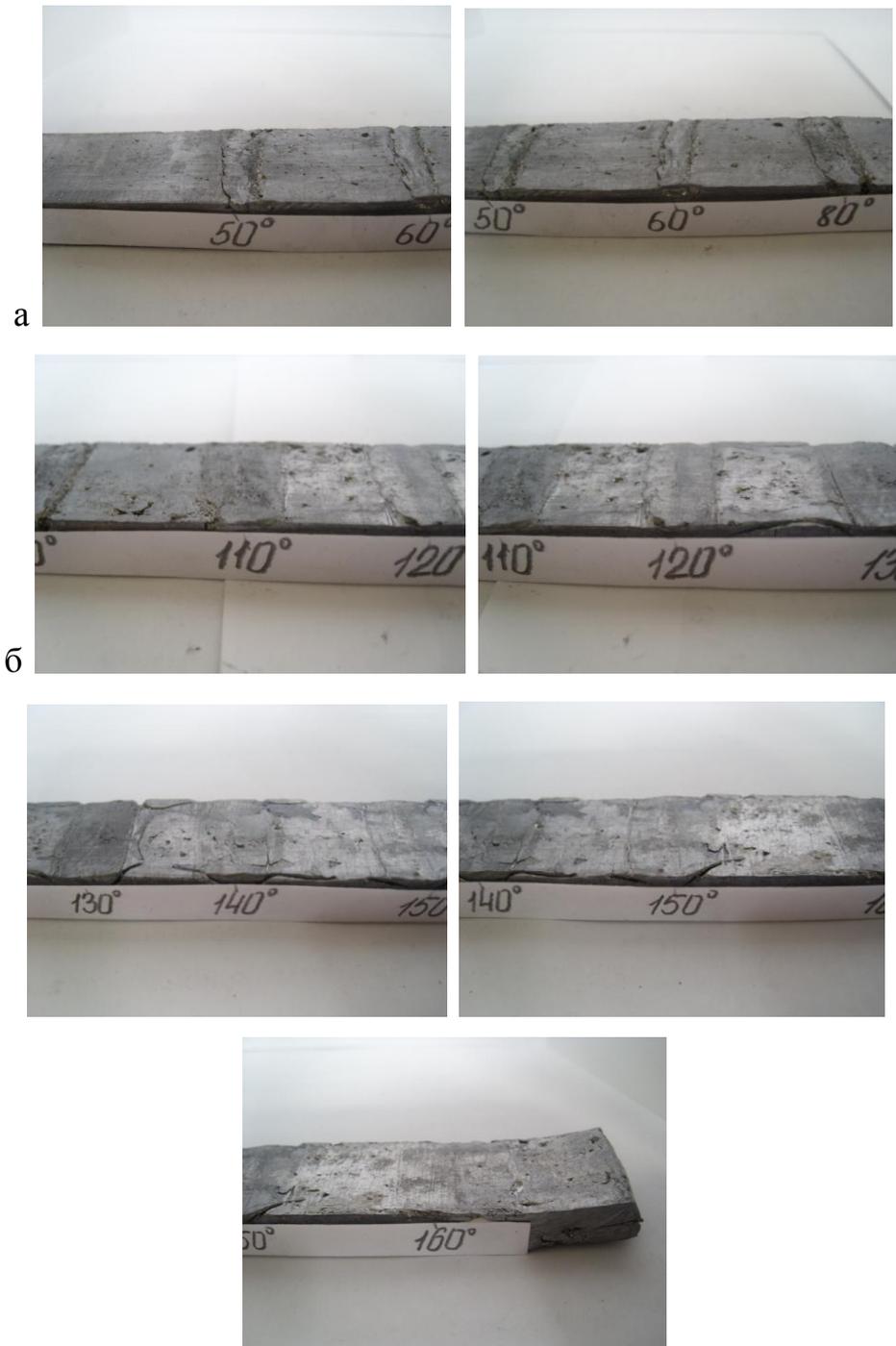


Рисунок 3.7 - Раскатанные выступы после прокатки со значениями углов при вершине: а - до 80° ; б - $80-160^{\circ}$

Прокатка образцов с впадинами треугольного сечения, которые моделировали искусственный дефект на прокатываемом образце, (Рисунок 3.8) выполнялась аналогично прокатке образцов с выступами.

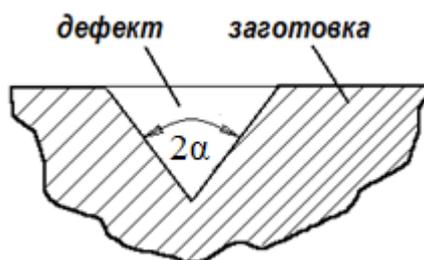


Рисунок 3.8 - Схема искусственного дефекта

После проведения эксперимента установлено, что смыкание берегов впадин большой протяженности поперек образца наблюдается при значениях углов равных $2\alpha \leq 60-90^\circ$ (Рисунок 3.9,а), а в остальных случаях, аналогичные впадины раскатывались без образования дефекта если угол между их боковыми поверхностями превышал эти значения, (Рисунок 3.9,б).

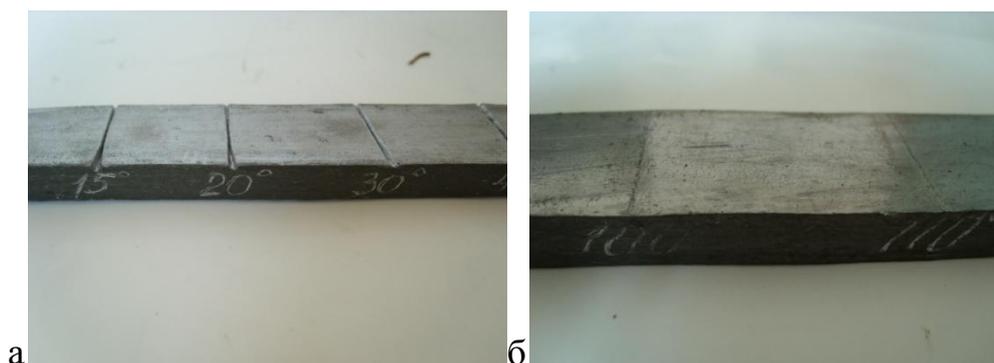


Рис. 3.9 - Фото образцов с единичными нанесенными дефектами после прокатки: а - $2\alpha \leq 60-90^\circ$; б - $2\alpha > 60-90^\circ$

Образцы, на которых впадины были нанесены с одинаковой протяженностью вдоль и поперек направления прокатки, кернами, изображенными на рисунке 3.3, б, выкатывали дно впадины на поверхность полосы при значении угла между их боковыми поверхностями $2\alpha \geq 100^\circ$.

Дно впадины выдавливалось на поверхность в том случае, когда выход её на поверхность опережал смыкание стенок по всей высоте впадины или выступа, и в результате они «раскатывались».

Окалина, оставаясь внутри впадин, в процессе дальнейшей прокатки закаты-

валась внутрь поверхности металла. После травления она могла проявиться на горячекатаном листе в виде дефекта «вкатаная окалина».

Результаты выполненных исследований позволяют рекомендовать выполнять огневую зачистку поверхностей заготовок с образованием канавок, угол между боковыми поверхностями которых составляет более $60 \dots 90^\circ$. Меньшее значение углов раствора канавок от огневой зачистки может сопровождаться смыканием боковых поверхностей канавок в процессе горячей прокатки и закатыванием внутрь металла фрагментов окалины и других неметаллических частиц.

3.3 Аналитическое исследование условий образования дефекта «вкатаная окалина»

3.3.1 Анализ возможных вариантов образования дефекта «вкатаная окалина»

Вкатаная окалина является одной из главных причин снижения качества готового проката, поэтому в настоящем разделе диссертации выполнено подробное аналитическое исследование процесса образования дефекта «вкатаная окалина».

Рассмотрим четыре основных случая перемещения фрагментов окалины расположенных на поверхностях выступов и впадин прокатываемого металла.

I. Окалина закатывается в складки металла после раскатывания выступов с образованием дефекта «вкатаная окалина».

II. Окалина, расположенная на поверхностях выступов в процессе деформации металла раскатывается по поверхности прокатываемой полосы без образования дефекта «вкатаная окалина».

III. Окалина, расположенная во впадинах деформируемого металла, остается внутри металла в результате смыкания боковых поверхностей впадины в процессе деформации с образованием дефекта «вкатаная окалина».

IV. Окалина, расположенная во впадинах деформируемого металла, выкатывается на поверхность прокатываемой полосы без образования дефекта «вкатаная

окалина».

Рисунок 3.10 иллюстрирует вышеотмеченные варианты образования дефекта «вкатанная окалина» и перемещения фрагментов окалины на поверхность деформируемого металла с последующим ее раскатыванием по поверхности горячекатаной полосы.

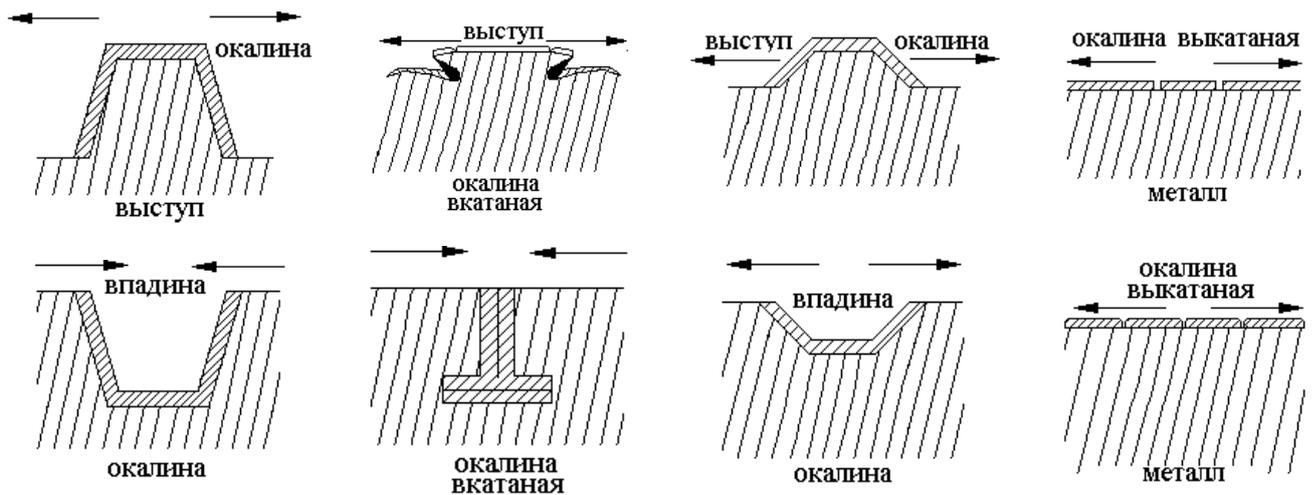


Рисунок 3.10 - Возможные варианты перемещения фрагментов окалины на выступах и во впадинах деформируемого металла

Для моделирования процесса перемещения деформируемого материала воспользуемся одним из методов теории пластичности - методом линий скольжения. Выбор этого метода обоснован тем, что именно этот метод позволяет иметь в очаге деформации статически допустимое поле напряжений и определять кинематически возможные перемещения деформируемого материала в очаге деформации.

3.3.2 Теоретический анализ перемещения фрагментов окалины при деформации раскатываемых выступов с образованием и без образования дефекта «вкатанная окалина»

Рассмотрим деформацию выступов, смоделированного формой усеченного клина, высота которого превышает половину размера его верхнего основания. Если не учитывать трение между окалиной и материалом выступа, сетки линий

скольжений применительно к деформации выступов различной формы приведены на рисунке 3.11 (а, в, д) и соответствующие им годографы - на рисунке 3.11 (б, г, е).

Сетка линий скольжения очага деформации состоит из четырех треугольных блоков с равномерными сетками OBD , $A'B'C'$, ABC , $OB'D'$ и двух центрированных сеток в виде секторов $C'B'D'$ и CBD с углами раствора α . Линии скольжения OD и OD' пересекают ось симметрии под углом 45° . Аналогичные углы составляют линии скольжения $A'C'$ и $B'C'$ с поверхностью $A'B'$ и линии скольжения AC и BC с поверхностью AB .

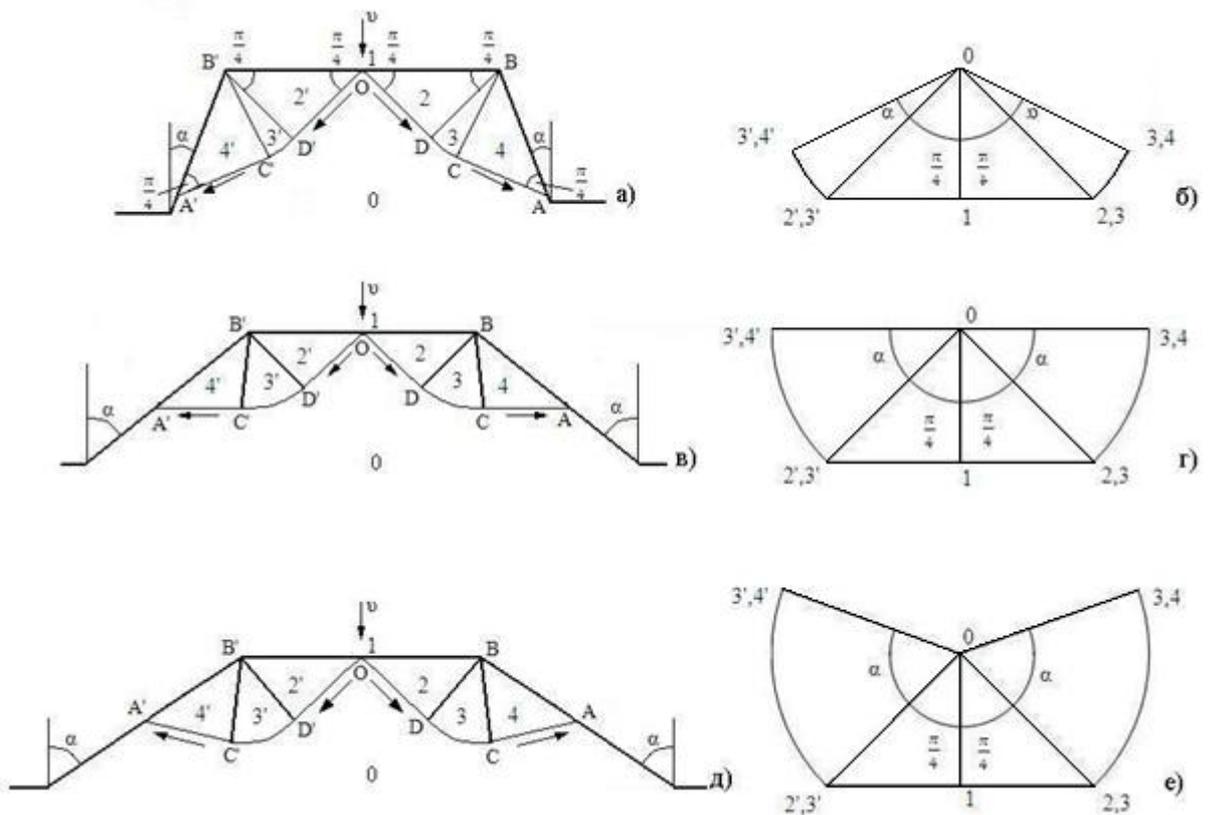


Рисунок 3.11 - Сетки линий скольжения (а, в, д) и соответствующие им годографы скоростей (б, г, е) очагов деформации выступов без учета трения с различными углами наклона боковых поверхностей: а) и б) - $\alpha < 45^\circ$; в) и г) - $\alpha = 45^\circ$; д) и е) - $\alpha > 45^\circ$

Рисунок 3.11,а и соответствующий ему годограф скоростей (рис. 3.11,б) ил-

люстрируют схему деформации выступа с находящейся на нем окалиной, когда его боковые поверхности расположены под большим углом к поверхности прокатываемой полосы (малым углом ($2\alpha < 90^\circ$) между его боковыми поверхностями).

На рис. 3.11,а цифрами 1, 2, 3 обозначены номера блоков, моделирующих очаг деформации и их взаимодействие между собой и прокатываемой полосой (на схеме 0). Годограф скоростей показывает величину и направление вектора скорости перемещения блоков относительно инструмента 1-2 и 1-2', а также между блоками очага деформации и материалом прокатываемой полосы 0-2, 0-3, 0-4, 0-2', 0-3', 0-4'.

Не останавливаясь на величинах векторов скоростей относительных скольжений между блоками, инструментом и материалом прокатываемой полосы отметим, что в соответствии с годографом скоростей блоки очага деформации 4 и 4' в процессе деформации вместе с окалиной, расположенной на их поверхностях, перемещаются в направлении вектора скорости 0-4 и 0-4', т.е. от поверхности выступа к основанию. Такое перемещение окалины способствует варианту I (рис. 3.10, I) с образованием дефекта «вкатаная окалина» после раскатывания выступа.

Аналогичный анализ схемы деформации и годографа скоростей, приведенных на рисунке 3.11,в и г, для угла наклона между боковыми поверхностями $2\alpha = 90^\circ$ показывает, что если не учитывается трение между прокатным валком и деформируемым выступом с окалиной, то блоки очага деформации 4 и 4' перемещаются параллельно поверхности прокатываемой полосы и поэтому фрагменты окалины, расположенные на их поверхности, при дополнительных воздействиях на них могут перемещаться как к основанию выступов, с образованием дефекта «вкатаная окалина», так и к вершине выступа, выкатываясь на поверхность полосы без образования такого дефекта.

Схема деформации выступа с окалиной на его поверхности, боковые стороны которого составляют между собой «тупой угол» ($2\alpha > 90^\circ$), иллюстрируется рисунком 3.11,д и соответствующий ей годограф скоростей - рисунком 3.11,е. Так же как и в предыдущих случаях, представленные схема деформации и годограф скоростей не учитывают эффект трения между прокатным валком и деформируемым

выступом прокатываемой полосы. В отличие от предыдущих вариантов деформации выступов, вертикальные составляющие скорости перемещения блоков относительно основной массы прокатываемой полосы $0-4$ и $0-4'$ направлены от основания выступа к его вершине. Соответственно также смещаются и фрагменты окалина, расположенные по его боковым поверхностям. Такое перемещение окалина соответствует варианту II, когда окалина, расположенная по бокам выступа, смещается на поверхность прокатываемой полосы и раскатывается по ней без образования дефекта «вкатаная окалина».

Таким образом, теоретический анализ показывает, что если не учитывать трение между валком и прокатываемой полосой, то деформация выступа с находящейся на нем окалиной, вызывает дефект «вкатаная окалина», когда угол между его боковыми поверхностями $2\alpha < 90^\circ$ и деформация выступа с окалиной на его поверхностях, сопровождается выкатыванием фрагментов окалина на поверхность прокатываемой полосы без образования дефекта «вкатаная окалина», когда угол между его боковыми поверхностями $2\alpha > 90^\circ$.

Учет эффекта трения между прокатываемой полосой и валком при анализе перемещений элементов очага деформации в процессе деформации выступов на прокатываемой полосе с находящейся на ней окалиной, рассмотрим на аналогичных формах выступов с использованием сетки линий скольжения, учитывающей трение между деформируемым материалом выступа и расположенной на его поверхностях окалиной.

Трение между деформируемым материалом и окалиной вызывает изменение угла наклона линий скольжения к боковым поверхностям выступов (рис. 3.12) и к контактной поверхности деформирующего инструмента.

Закономерность изменения угла наклона линий скольжения к поверхностям, контактирующим с окалиной принимаем в виде [148]:

$$\beta = \frac{1}{2} \arccos \mu, \quad (3.1)$$

где μ - коэффициент трения деформируемого материала об окалину, $0 \leq \mu \leq 1$.

Схемы очага деформации с учетом коэффициента трения $\mu=0,5$ для вышерассмотренных форм выступов с расположенной на них окалиной и соответствующие им годографы скоростей приведены на рисунке 3.12.

Анализ схем линий скольжения и годографов скоростей, иллюстрированных рисунком 3.12, показывает, что при значениях угла между боковыми поверхностями выступа $2\alpha < \arccos \mu$, в соответствии с годографом скоростей (рис. 3.12,б), зоны очага деформации 4 и 4' в процессе взаимодействия с прокатным валком перемещаются вместе с окалиной от верхней поверхности выступа к его основанию (векторы 04 и $04'$) с образованием дефекта «вкатанная окалина».

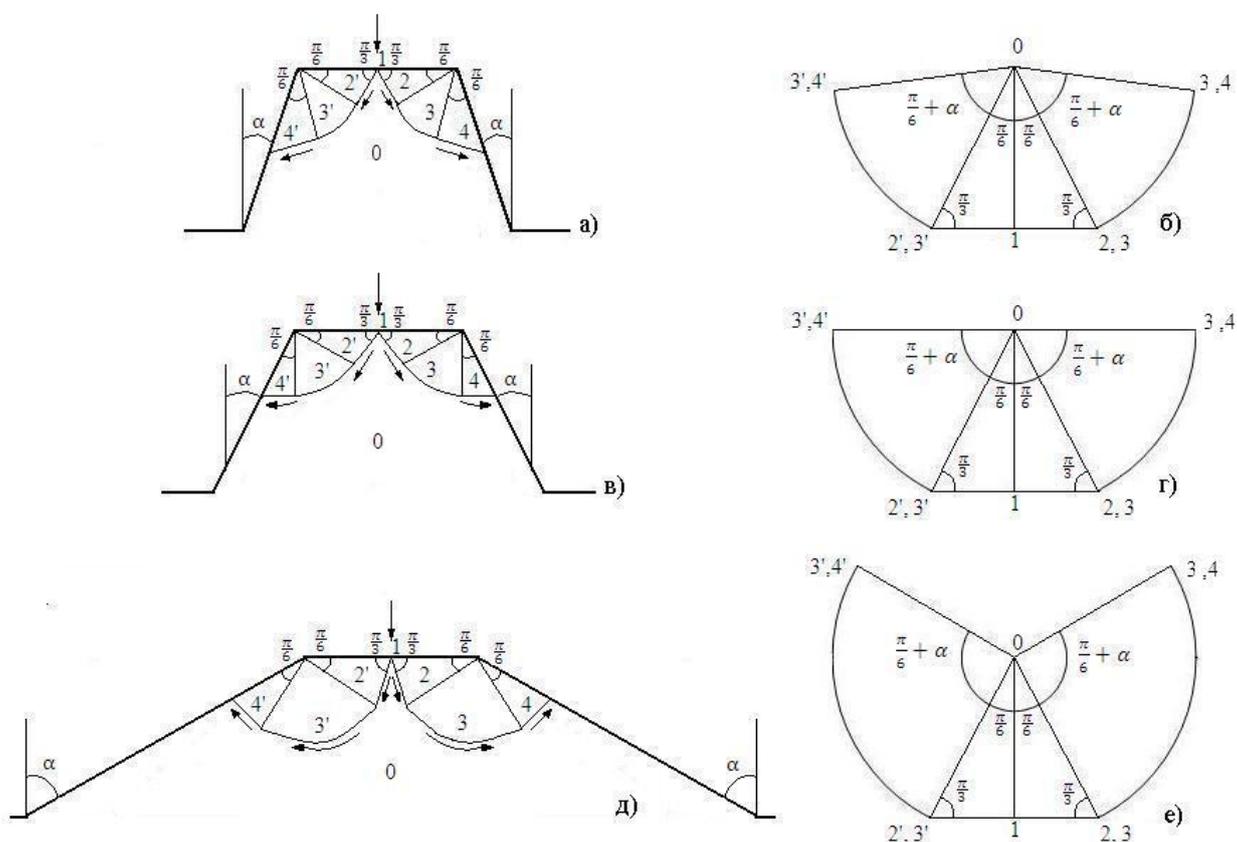


Рисунок 3.12 - Сетки линий скольжения (а, в, д) и соответствующие им годографы скоростей (б, г, е) очага деформации выступов с различными углами наклона боковых поверхностей при деформации их прокатными валками с коэффициентом трения $\mu=0,5$. а) и б) - $\alpha < 30^\circ$; в) и г) - $\alpha = 30^\circ$; д) и е) - $\alpha > 30^\circ$

В случае, когда угол между боковыми поверхностями выступа $2\alpha > \arccos \mu$

процесс деформации выступа прокатным валком сопровождается перемещением зон 4 и 4' очага деформации от основания выступа к его верхней поверхности (векторы 04 и 04'). Такое перемещение зон очага деформации 4 и 4', с примыкающей к их боковым поверхностям окалиной, сопровождается выкатыванием фрагментов окалины на поверхность полосы без образования дефекта «вкатаная окалина». Если выполняется равенство $2\alpha = \arccos \mu$, то возможно различное перемещение фрагментов окалины, как к основанию выступа с образованием дефекта «вкатаная окалина», так и в сторону его верхней поверхности без образования такого дефекта, в зависимости от дополнительного воздействия на зону деформации выступа.

Влияние коэффициента трения на критические значения полуугла между боковыми поверхностями выступа, которые разграничивают области образования дефекта «вкатаная окалина» и область выкатывания окалины на поверхность полосы без его образования, приведено в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Влияние коэффициента трения на величину угла α , разделяющего зоны вкатывания и выкатывания окалины при деформации выступа прокатным валком

μ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
α	45°	43°08'	39°14'	36°16'	33°12'	30°

Согласно приведенным в таблице данным с увеличением коэффициента трения угол наклона боковых стенок выступа, разграничивающих области выкатывания окалины на поверхность и вкатывания в металл, уменьшается. Например, если принять коэффициент трения равным 0,5, который часто используется применительно к процессам горячей деформации, и подставить в вышеприведенные неравенства, то получаем, что при $2\alpha < 30^\circ$ образуется дефект «вкатаная окалина», а при $2\alpha > 30^\circ$ окалина выкатывается на поверхность полосы без риска образования такого дефекта. Применительно к схеме деформации выступа без учета трения величина полуугла между боковыми поверхностями выступа, разграничивающи-

ми области вкатывания окалины и ее выкатывания на поверхность, составляет $\alpha=45^\circ$, что отмечалось ранее при рассмотрении схем и годографов деформации выступов с окалиной без учета эффекта трения (Рисунок 3.11).

Приведенные выше решения относятся к плоским задачам и отражают влияние размеров и углов наклона боковых поверхностей выступов на процесс вдавливания окалины во внутрь прокатываемой полосы или ее выкатывание на поверхность металла только в направлении прокатки без учета протяженности выступа поперек полосы.

С целью оценки влияние протяженности выступа в поперечном направлении полосы на процесс выкатывания окалины на поверхность полосы или вкатывания ее во внутрь металла рассмотрим деформацию выступов призматической формы с размером верхнего основания axb и углами между их боковыми поверхностями равными 2α (Рисунок 3.13).

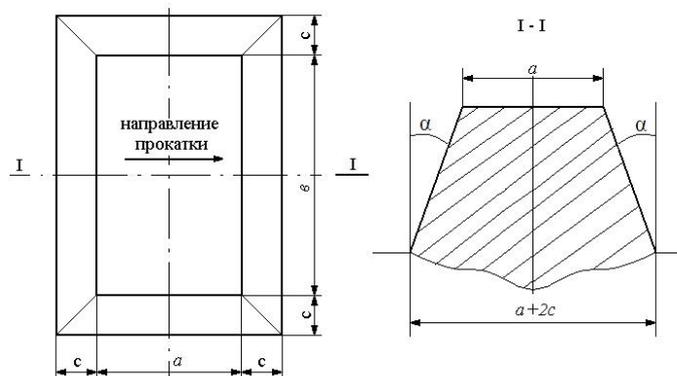


Рисунок 3.13 - Форма и параметры призматического выступа с окалиной на прокатываемой полосе

Для решения задачи используем один из методов теории пластичности - метод верхней оценки. Смоделируем очаг деформации жесткими блоками по форме аналогичными зонам поля линий скольжения, рассмотренным ранее при решении плоской задачи (Рисунок 3.12), Однако, треугольные зоны которых моделируются прямоугольными треугольниками с одним из углов равным полууглу между боковыми поверхностями выступа α (Рисунок 3.14,а). Соответствующий ему годо-

граф скоростей представлен на рисунке 3.14,б.

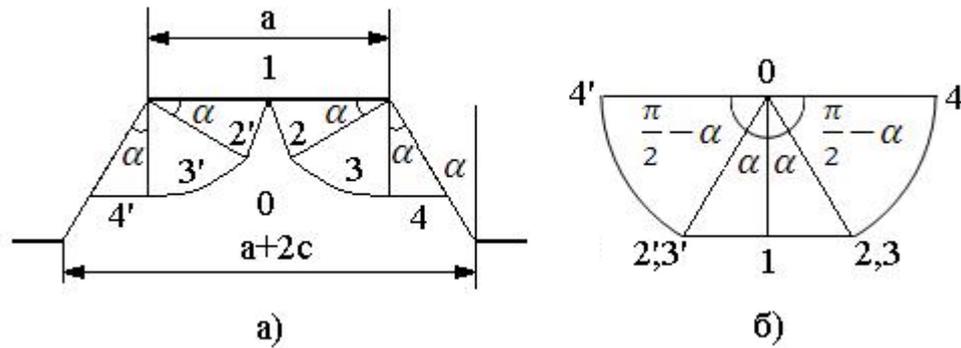


Рисунок 3.14 - Моделирование очага деформации жесткими блоками а) и годограф скоростей б)

Принимаем, что значение полуугла α_{\min} соответствующей минимальной диссипации внутренней энергии в очаге деформации, является границей, разделяющих процессы вкатывания фрагментов окалины или выкатывания их на поверхность прокатываемой полосы.

При значениях $\alpha < \alpha_{\min}$ деформируемого выступа происходит вкатывание фрагментов окалины внутрь прокатываемой полосы, а при $\alpha > \alpha_{\min}$ происходит выкатывание фрагментов окалины на ее поверхность.

Мощность диссипации внутренней энергии определяется интегралами:

$$N_{\text{внутр}} = \int_S \tau_S \Delta \mathcal{V} dS + \int_{S_K} \tau_K \Delta \mathcal{V}_K dS_K, \quad (3.2)$$

где τ_S - предел прочности на срез деформируемого материала;

τ_K - касательные напряжения на поверхности контакта деформируемой полосы с валком;

$\Delta \mathcal{V}$ и $\Delta \mathcal{V}_K$ - соответственно, разрывы скоростей в касательной плоскости к поверхности разрыва между блоками очага деформации и по поверхности контакта;

S и S_K - соответственно, поверхности разрыва между блоками очага деформации и по контакту с прокатным валком.

Заменяя интегралы в уравнении (3.2) суммами $\sum_{i=1}^{i=n} \tau_s \Delta \mathcal{V}_i S_i$ и $\sum_{i=1}^{i=n} \tau_{K_i} \Delta \mathcal{V}_{K_i} S_{K_i}$, где n число поверхностей разрывов в очаге деформации, после подстановки их значений из схемы деформаций и годографа скоростей (Рисунок 3.14) и преобразований, имеем:

$$N_{\text{внутр}} = 2\tau_s v(a+b) \left(\operatorname{tg} \alpha + \pi - 2\alpha + \frac{\mu \cdot \sin \alpha}{1 + \frac{b}{a}} \right). \quad (3.3)$$

Значения α_{\min} определим продифференцировав уравнения (3.3) по углу α и приравняв результат к 0:

$$\frac{1}{\cos^2 \alpha} + \frac{\mu \cos \alpha}{1 + \frac{b}{a}} - 2 = 0. \quad (3.4)$$

Применительно к выступам большой протяженностью поперек прокатываемой полосы, т.е. при $\frac{b}{a} \rightarrow \infty$ в независимости от коэффициента трения $\alpha_{\min} = 45^\circ$. Если $\frac{b}{a} \rightarrow 0$, то значения α_{\min} определяются из уравнения в зависимости от условий трения на контакте валок - прокатываемая полоса по соотношению:

$$\frac{1}{\cos^2 \alpha} + \mu \cos \alpha - 2 = 0. \quad (3.5)$$

Значение коэффициента трения $\mu = 0,5$, обычно принимаемое при горячей прокатке металлов, соответствует значению $\alpha_{\min} = 37^\circ 53'$. Если не учитывать трение ($\mu = 0$), то получаем аналогичное значение как и при решении плоской задачи $\alpha_{\min} = 45^\circ$.

Величина α_{\min} при равных значениях размера выступов вдоль и поперек направления прокатки ($a=b$) определяется из следующего уравнения:

$$\frac{1}{\cos^2 \alpha} + \frac{\mu \cos \alpha}{2} - 2 = 0. \quad (3.6)$$

Так же, как и в предыдущих случаях, значению $\mu=0$ соответствует $\alpha_{\min}=45^\circ$. Для коэффициента трения, принимаемого обычно при горячей прокатке $\mu=0,5$, из уравнения (3.6) имеем $\alpha_{\min}=42^\circ$.

Анализ полученных результатов свидетельствует, что поперечные выступы большой протяженностью при значениях $\mu=0,5$ выкатывают окалину на поверхность полосы при значениях $2\alpha \geq 90^\circ$, а продольные выступы - при $2\alpha \geq 75^\circ 46'$. Различное поведение продольных и поперечных дефектов на прокатываемой полосе подтверждены экспериментами автора и работами Зильберга Ю.В., Миленина А.А., Перетятыко В.Н., Мартынова Ю.А., Уманского А.А., Кургузова С.А. и др. [37,44,93,95].

3.3.3 Теоретический анализ перемещения фрагментов окалины при деформации впадин с образованием и без образования дефекта «вкатанная окалина»

Окалина, расположенная во впадинах горячекатаной полосы, также может стать причиной дефекта «вкатанная окалина». Рассмотрим условия вкатывания ее во внутрь металла или выкатывание ее на поверхность полосы для чего смоделируем впадину с находящейся в ней окалиной призматической формой с треугольным сечением и прямоугольным основанием (Рисунок 3.15).

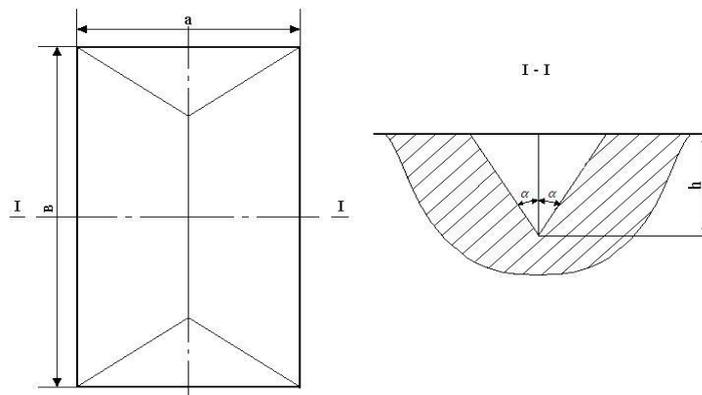


Рисунок 3.15 - Форма и параметры призматической впадины с окалиной на прокатываемой полосе

Учитывая симметричность смоделированной впадины, ограничимся рас-

смотрением допустимых полей скоростей перемещения фрагментов металла и окалины на одной второй части впадины (Рисунок 3.16).

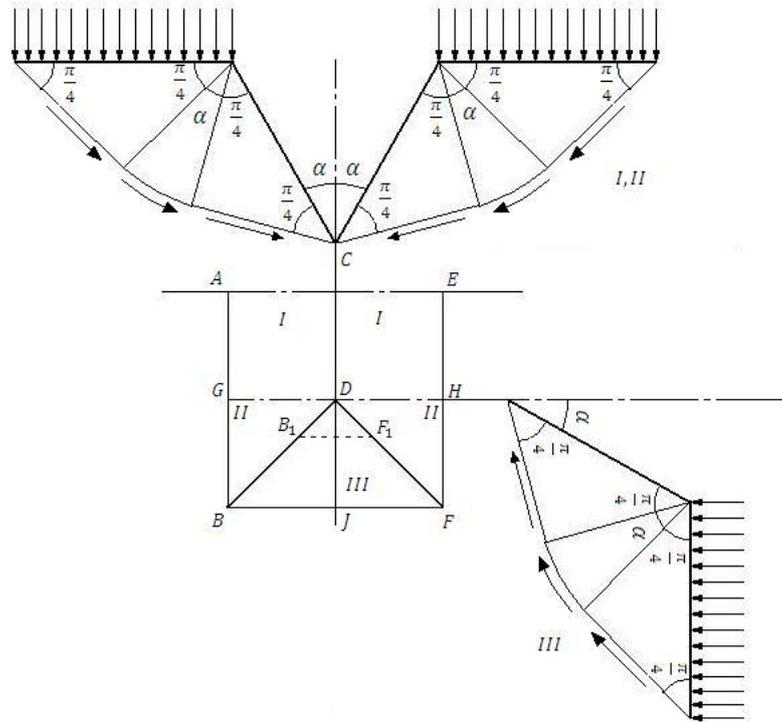


Рисунок 3.16 - Схема зон пластической деформации, примыкающих к краям угловой части впадины, и допустимые в них поля скоростей перемещений

Выделим три зоны I, II, III, примыкающие к угловой части смоделированной впадины, в которых материал деформируется пластически в соответствии с закономерностями плоской деформации. В зонах I и II деформируемый материал перемещается в направлении параллельном оси симметрии (ACE). В зоне III он перемещается в направлении параллельном CDI. Допустимые поля скоростей перемещений в этих зонах показаны соответственно на рисунке позициями I, II, III. В процессе деформации прокатными валками горячекатаной полосы, материал, примыкающий к краям впадины, перемещается параллельно ACE (Рисунок 3.16 позиции I, II). Области I и II отличаются тем, что поверхность разрывов тангенциальных скоростей для области II коническая и наклонная, а для области I она цилиндрическая. По мере удаления сечения B_1F_1 от BIF вид этих сечений остается подобным виду, показанным на рисунке 3.16 (позиция III), но уменьшается в раз-

мерах по мере удаления от линии ВІІ. Разрывы тангенциальных скоростей в зоне иллюстрируются рисунком 3.16 (позиция III).

Для решения задачи, как и в предыдущем разделе, используем один из методов теории пластичности - метод верхней оценки, который позволяет определить возможные поля скоростей перемещения элементов очага деформации при минимальной диссипации в нем внутренней энергии.

Смоделируем очаг деформации жесткими блоками 2,3,4 и 2',3',4' (Рисунок 3.17, а) и построим для возможного их перемещения годограф скоростей (Рисунок 3.17, б).

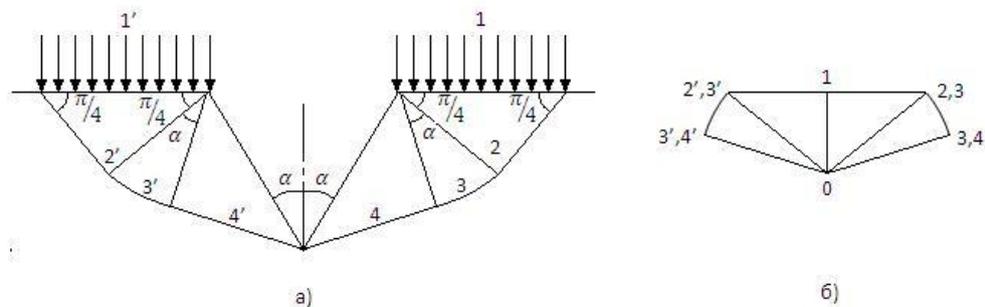


Рисунок 3.17 - Моделирование очага деформации у краев впадины жесткими блоками а) и годограф скоростей б)

При анализе перемещений фрагментов окалина и элементов очага деформации, примыкающего к краям впадины принимаем, что при значениях угла между стенками впадины 2α больше угла, который соответствует минимуму мощности диссипации энергии в очаге деформации $2\alpha_{\min}$, имеет место выкатывание окалина из впадины на поверхность полосы, а при значениях $2\alpha < 2\alpha_{\min}$ окалина вкатывается во внутренние слои горячекатаной полосы с образованием дефекта «вкатаная окалина».

Мощность диссипации внутренней энергии определяется интегралами:

$$N_{\text{внутр}} = \int_S \tau_s \Delta \mathcal{V} dS + \int_{S_K} \tau_K \Delta \mathcal{V}_K dS_K, \quad (3.7)$$

где $\Delta\mathcal{V}$ и S - разрыв тангенциальных скоростей поверхности разрывов между элементами очага деформации;

$\Delta\mathcal{V}_K$ и S_K - разрыв тангенциальных скоростей и поверхности разрывов по контакту с прокатным валком;

τ_s и τ_K - предел прочности на сдвиг деформируемого материала и напряжения сдвига по поверхности контакта с прокатным валком.

Заменяя интегралы в уравнении (3.4) суммами $\sum_{i=1}^{i=n} \tau_s \Delta\mathcal{V}_i S_i$ и $\sum_{i=1}^{i=n} \tau_{K_i} \Delta\mathcal{V}_{K_i} S_{K_i}$, где n число поверхностей разрывов в очаге деформации и подставляя их значения из схемы деформаций и годографа скоростей (Рисунок 3.16 и 3.17), получим после преобразований:

$$N_{\text{внутр}} = \tau_s \mathcal{V} \left[\frac{a}{b} \left(\frac{\sin^3 \alpha}{3} - \mu \cos \alpha - \frac{\mu \cos^3 \alpha}{3} - \sin \alpha + (\pi + 2) \right) - \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\mu \cos 2\alpha}{2} + \frac{2a\mu}{a+b} \right]. \quad (3.8)$$

Значения угла α_{\min} , соответствующий минимуму диссипации внутренней энергии и разделяющий область вкатывания окалины внутрь металла или выкатывание ее на поверхность полосы, определим продифференцировав уравнение (3.8) по углу α и приравняв результат к нулю:

$$\mu \frac{a}{b} \sin \alpha (1 + \cos^2 \alpha) - \frac{a}{b} \cos^3 \alpha - \cos 2\alpha + \mu \sin 2\alpha = 0. \quad (3.9)$$

Если не учитывать трение между валком и горячекатаной полосой, то значение полуугла α , определяющее минимум диссипации энергии вычисляется из уравнения:

$$\frac{a}{b} \cos^3 \alpha + \cos 2\alpha = 0. \quad (3.10)$$

Для впадины одинаковой протяженностью вдоль и поперек горячекатаной

полосы имеет место равенство параметров основания смоделированной призматической впадины ($a=b$) и значение полуугла между ее боковыми поверхностями, определяющее минимум диссипации энергии, равно $51^{\circ}54'$.

В теории обработки металлов давлением при горячей их деформации коэффициент трения между инструментом и деформируемым металлом обычно принимается $\mu=0,5$. В этом случае для $a=b$ уравнение (3.9) удовлетворяется при значении $\alpha=34^{\circ}0,8'$.

Рассмотрим вариант, когда впадина имеет незначительную протяженность вдоль направления прокатки горячекатаной полосы и большую протяженность в поперечном направлении, т.е. $\frac{a}{b} \rightarrow 0$. Согласно уравнению (3.9) для значений $a/b=0$ оно принимает вид:

$$\mu \sin 2\alpha - \cos 2\alpha = 0 \quad (3.11)$$

или после преобразований:

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{1}{\mu} \quad (3.12)$$

Значения полуугла между стенками впадины α от коэффициента трения, соответствующего минимуму диссипации энергии, при деформации горячекатаной полосы в зоне, примыкающей к впадине, применительно к случаю $a/b \rightarrow 0$ приведена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Значения полуугла между стенками впадины в случае $a/b \rightarrow 0$ зависимости от коэффициента трения

μ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
α	45°	$42^{\circ}08'$	$39^{\circ}18'$	$36^{\circ}39'$	$34^{\circ}06'$	$31^{\circ}42'$

Резюмируя вышеизложенные результаты, констатируем, что окалина, распо-

ложенная во впадине с одинаковой протяженностью вдоль и поперек прокатки и углами между боковыми поверхностями $2\alpha < 103^\circ 48'$ при $\mu = 0$ и $2\alpha < 68^\circ 16'$ при $\mu = 0,5$, вкатывается вглубь прокатываемого металла с образованием дефекта «вкатанная окалина». Окалина, расположенная в аналогичных впадинах, но с углами между боковыми поверхностями $2\alpha > 68^\circ 16' \dots 103^\circ 48'$, в зависимости от условий трения, выкатывается на поверхность полосы без образования такого дефекта.

Окалина, расположенная во впадине большой протяженностью поперек полосы ($a/b \rightarrow 0$), вкатывается вглубь прокатываемого металла при значительно меньших углах наклона между ее боковыми сторонами $2\alpha < 63^\circ 25' \dots 90^\circ$, соответственно при изменении коэффициента трения от $\mu = 0,5$ до $\mu = 0$. Большие значения угла наклона боковых стенок впадин $2\alpha > 63^\circ 25' \dots 90^\circ$ способствуют выкатыванию окалины на поверхность полосы без образования дефекта «вкатанная окалина».

Из всех возможных случаев расположения выступов и впадин на прокатываемой полосе с находящимися на них фрагментами окалины наиболее неблагоприятным вариантом является вариант, когда окалина ориентирована к поверхности прокатываемой полосы практически перпендикулярно. Расположение фрагмента к направлению проката под углом близким к 90° способствует его внедрению в поверхность деформируемого металла под действием прокатных валков.

В том случае, когда фрагмент окалины становится ребром, закономерность внедрения можно смоделировать пуансоном, вдавливаемым в металл. Рисунок 3.18 иллюстрирует поле линий скольжения в начальный момент вдавливания.

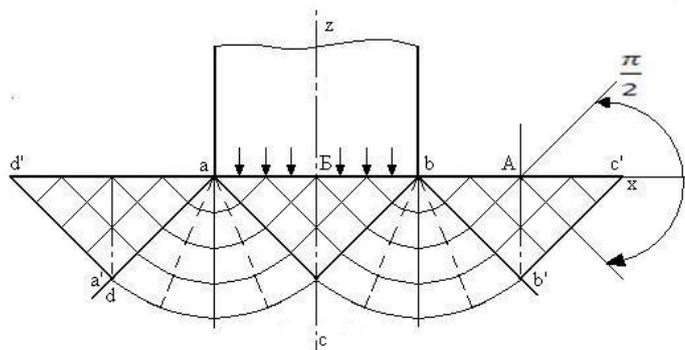


Рисунок 3.18 - Поле линий скольжения в начальный момент вдавливания окалины

По мере внедрения окалины удельное усилие увеличивается вплоть до тех пор, когда поле линий скольжения примет вид, показанный на рис. 3.19,а Угол поворота линий скольжения здесь на 90° больше, чем в начале внедрения.

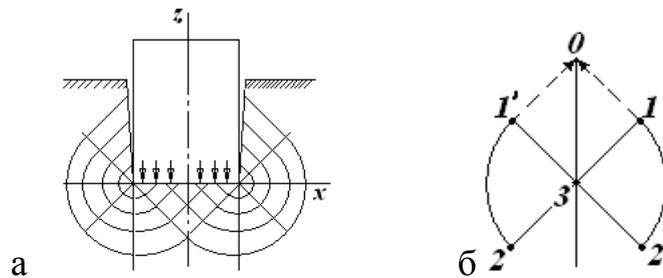


Рисунок 3.19 - Схема деформации (а); годограф скоростей (б)

Смоделировав зону пластической деформации жесткими блоками, построили годограф скоростей. По годографу видно, что компоненты скоростей блоков движутся в направлениях $1' - 0$ и $1 - 0$ (рисунок 3.19,б), создавая тенденцию смыкания берегов канавки, и, как следствие, к защемлению окалины.

3.4 Моделирование процесса гидромеханического удаления окалины с горячекатаной полосы

Техническая задача гидромеханического удаления окалины с поверхности горячекатаной полосы связана с процессами работы окалиноломателя и гидросбива окалины. Причем, гидросбив окалины в большинстве случаев является определяющим. Вероятность образования дефекта «вкатаная окалина» на поверхности проката на стане напрямую зависит от эффективности гидромеханического удаления окалины.

Литературный обзор и исследования, проведенные на производстве, не позволяют грамотно выбрать параметры гидросбива. На прокатных станах применяются системы с различными: давлением, расходом воды, конструкцией сопел, расстоянием от сопла до полосы. Многофакторность процесса определила задачу

создания исследовательской установки, моделирующей процесс гидромеханического удаления окалины с поверхности металла в лабораторных условиях, и получению зависимостей описывающих удаление окалины от рассмотренных параметров оборудования.

Для проведения исследований процесса гидромеханического удаления окалины с горячекатаной полосы в условиях кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова» применяли установку, позволяющую исследовать данный процесс в лабораторных условиях. Данная установка была модернизирована на основе исследований авторов [127, 128].



Рисунок 3.20 - Лабораторная установка для исследования процесса гидромеханического удаления окалины.

Установка, показанная на рис. 3.20, состояла из следующих основных узлов: нагреватель, устройство для гидромеханического удаления окалины, искусственная термопара.

Устройство для гидромеханического удаления окалины (Рисунок 3.21) содержало корпус 1 с выполненным в нем центральным отверстием, в которое помещается подпружиненный шток-поршень 2. Крышка 3, прижимаемая к корпусу болтами, позволяла регулировать усилие сжатия пружины для изменения давления рабочей жидкости в цилиндре. В нижнее основание корпуса ввинчивалось цилиндр 4 с соплом 5. Положение втулки 6 определяло объем рабочей жидкости.

Спусковой механизм 7 обеспечивал включение гидравлического устройства. Для осуществления плавности работы в корпусе располагался демпфер 8. Рычагом 9 устройство приводили в исходное положение. Одновременно в цилиндр подавали заданное количество жидкости и удерживали в нем до включения спускового механизма.

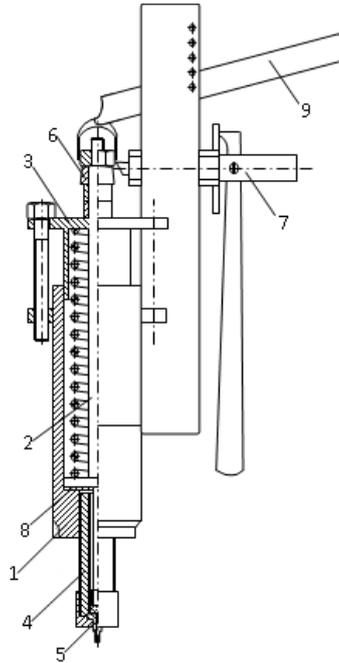


Рисунок 3.21 - Схема гидравлического устройства для удаления окалины

Параметры настройки гидравлического устройства следующие: угол взаимодействия струи с полосой 90° , расстояние от сопла до поверхности образца 150 мм, диаметр сопла 0,5-2 мм.

Для целей исследования установка подверглась модернизации. После модернизации установки, появилась возможность: фиксировать температуру нагрева образцов; регулировать мгновенный поток жидкости при гидросбиве окалины при помощи насадок. На рисунке 3.22 представлены форсунки с диаметром выходного отверстия 0,5; 0,8; 1,5 и 2 мм (соответственно слева направо), моделирующие узел системы гидромеханического удаления окалины на стане.



Рисунок 3.22 - Общий вид насадок

3.5 Исследование процесса гидромеханического удаления окалины с горячекатаной полосы

Целью настоящего раздела диссертации являлось экспериментальное исследование гидромеханического удаления окалины с поверхности металла в лабораторных условиях и получение зависимостей, описывающих данный процесс.

Исследования механизма отслаивания окалины проводили в три этапа[141].

На **первом этапе** исследовали процесс отслаивания окалины при различной температуре нагрева образцов.

Образцы (стальные карточки, показанные на рис. 3.23) нагревали до следующих температур: 600, 800, 900 и 1000 °С.

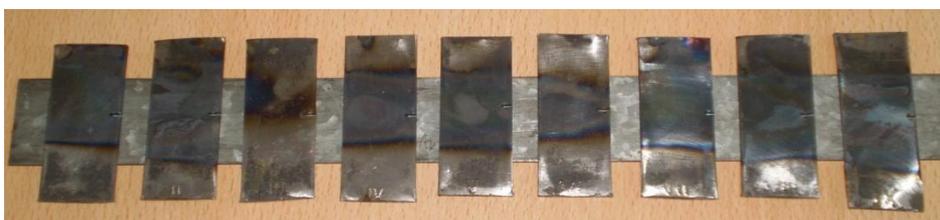


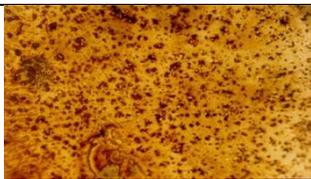
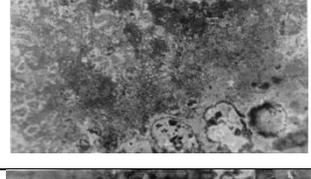
Рисунок 3.23 - Образцы после нагревания

Нагретые карточки помещали в экспериментальную установку и удаляли окалину воздействием струи под давлением 8 МПа. В табл. 3.4 представлены результаты данного эксперимента. Эксперимент повторяли три раза, что видно из графиков, описывающих результаты.

По результатам опытов получили зависимость массы отслоившейся окалины от температуры нагрева образцов (Рисунок 3.24, а) и площади отслоившейся окалины от температуры нагрева образцов (Рисунок 3.24, б).

Из таблицы 3.4 графиков на рисунке 3.24 видно, что с увеличением температуры нагрева образцов удаление окалины становилось более интенсивным. Установлено, что при увеличении температуры нагрева образцов с 600 до 950 °С площадь отслоившейся окалины увеличивалась в 8-14 раз.

Таблица 3.4 - Результаты эксперимента гидромеханического удаления окалины

Номер опыта	Температура, °С	Вид поверхности образцов с отслоившейся окалиной при тепловом ударе	Масса отслоившейся окалины, г			Площадь отслоившейся окалины, %		
			1	2	3	1	2	3
			Опыт №					
			1	2	3	1	2	3
1	600		0,37	0,5	0,63	3,5	4	7,1
2	800		0,74	0,76	1,03	39	47,5	49
3	900		0,86	1,15	1,38	47	51	53
4	950		1,26	1,41	1,69	51	54	56,7

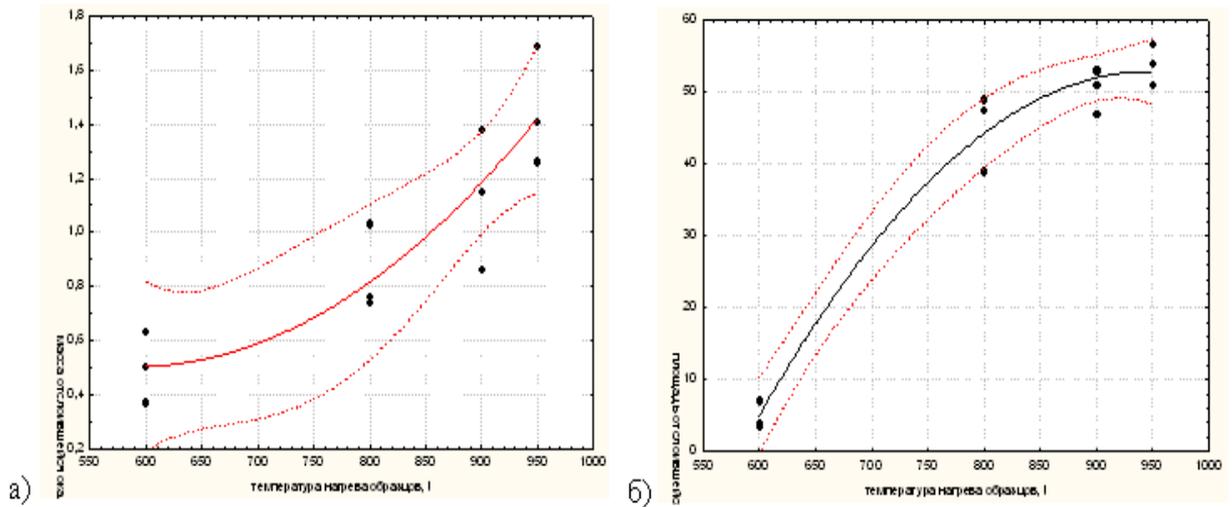


Рисунок 3.24 - Зависимость массы отслоившейся окалины от температуры нагрева образцов (а); площадь отслоившейся окалины при температуре нагрева образцов (б)

На **втором этапе** исследовали комплексное влияние давления струи ($P=1-7$ МПа) на площадь удаленной окалины.

В результате исследований получены результаты величин площадей удаленной окалины, представленные в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Зависимость площади удаленной окалины от давления воздействующей струи

P, МПа	Площадь, S (мм ²)		
	опыт №1	опыт №2	опыт №3
1	48	50	52
2,2	52	55	58
3,5	59	60	61,5
5	62,5	68	71
6,5	67	71	72,5
7	74	75	76

На рисунке 3.25 приведен график зависимости площади отслоения окалины от давления струи.

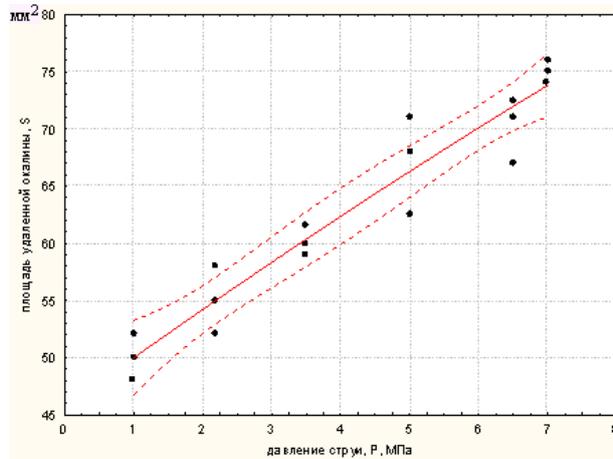


Рисунок 3.25 - Зависимость площади удаленной окалины от давления воздействующей струи

На **третьем этапе** исследовали удаление окалины с поверхности образцов, варьируя величину поперечного сечения струи охлаждающей жидкости при постоянном расстоянии от форсунки до металла и при давлении струи - 8 МПа была замерена площадь удаленной окалины на каждом образце. Эксперимент состоял из пяти серий, то есть из каждого сопла производилось по пять впрыскиваний на каждый из пяти образцов (табл. 3.6).

На рис. 3.26 показан один из образцов после воздействия струи жидкости через форсунку диаметром 0,5 мм. Форма пятна неровная, есть участки с остаточной окалиной ($270,125 \text{ мм}^2$)



Рисунок 3.26 - След от струи жидкости через форсунку диаметром 0,5 мм

На рисунке 3.27 показан один из образцов после воздействия струи жидкости через форсунку диаметром 0,8 мм.



Рисунок 3.27 - След от струи жидкости через форсунку диаметром 0,8 мм

Форма пятна более четкая, практически нет остаточных пятен окислы, размер пятна равен $272,625 \text{ мм}^2$.

На рисунке 3.28 показан один из образцов после воздействия струи жидкости через форсунку диаметром 1,5 мм. Форма пятна округлая, остатков окислы не наблюдалось, пятно относительно большое и равно $299,228 \text{ мм}^2$.



Рисунок 3.28 - След от струи жидкости через форсунку диаметром 1,5 мм

На рисунке 3.29 показан один из образцов после воздействия струи жидкости через форсунку диаметром 2 мм. Пятно относительно большое и равно 295 мм^2 .



Рисунок 3.29 - След от струи жидкости через форсунку диаметром 2 мм

На рис 3.29 наблюдалось неполное удаление окалины в зоне контакта охлаждающей жидкости с металлом.

После эксперимента получены результаты, приведенные в таблице 3.6, и построен график зависимости площади удаленной окалины от диаметра выходного отверстия форсунки (Рисунок 3.30).

Таблица 3.6 - Площадь удаленной окалины в зависимости от диаметра сопла

Диаметр сопла, мм	Площадь S , мм ²					
	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4	Серия 5	
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	$S_{\text{сред}}$
0,5	270,125	188,5625	242,2	179,5625	252,15	230,52
0,8	163,6563	245,3125	212,4063	272,625	299,125	239,625
1,5	254,15	299,228	178,39	239,839	250,39	244,3994
2	285,0625	200,3125	244,75	295	200,5625	245,1375

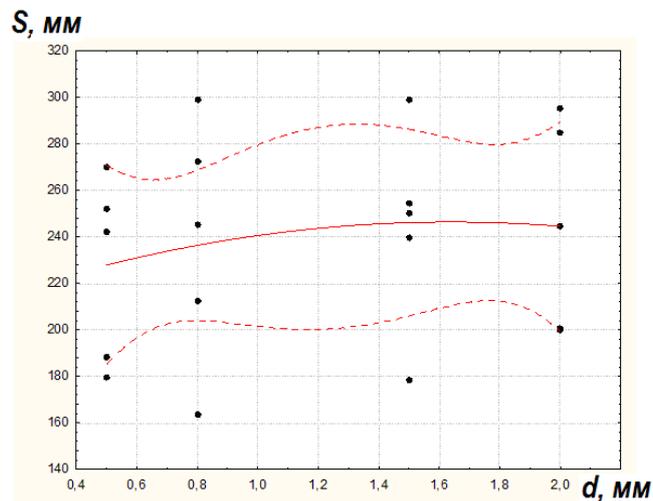


Рисунок 3.30 - Площадь удаленной окалины в зависимости от диаметра сопла

В результате обработки экспериментальных данных с помощью пакета программ Statistica 6.1 получено уравнение регрессии с доверительной вероятностью 0,97%

$$S(d) = 207,9689 + 46,851d - 14,2968d^2 \quad (3.13)$$

где S - площадь удаленной с поверхности металла окалины;

d - диаметр сопла

Полученное уравнение рекомендовано к использованию на производстве горячекатаного проката при настройке системы гидросбива окалины.

На основании исследований, проведенных на установке моделирования процесса гидромеханического удаления окалины, были сделаны следующие выводы.

Экспериментальными исследованиями получены зависимости:

1. Площади удаленной окалины от температуры нагрева образцов и последующего охлаждения в воде.
2. Площади удаленной окалины от диаметра воздействующей струи.
3. Площади удаленной окалины от давления воздействующей струи.

Полученные зависимости могут найти применение при проектировании и совершенствовании технологии гидромеханического удаления окалины на линиях стана горячей прокатки.

Применение гидромеханического удаления окалины с поверхности горячекатаного металла является эффективным, но, как показали исследования и литературный обзор источников по данной тематике, а также анализ годовых отчетов на производстве, данный способ не позволяет удалить вкатанные фрагменты окалины. При дальнейшем взаимодействии с валками окалина вдавливаются в поверхность металла и остается в поверхностном слое. Дефект проявляется после травления полосы и после холодной прокатки. Дальнейшие исследования посвящены удалению окалины с поверхности проката при воздействии знакопеременного изгиба, перед травлением на непрерывно-травильных агрегатах.

3.6. Выводы

1. Установлено, что выступы рифлений на поверхности валка окалинолома-

теля оставляют на прокатываемой полосе впадины негативной формы. Впадины, угол раствора которых составляет 60° и менее после выхода из очага деформации с обжатием 3...4%, практически не меняют своей формы. Впадины, углы раствора боковых поверхностей которых превышают эти значения выходят из очага деформации при аналогичном обжатии с углом раствора большим на $1...4^\circ$ по сравнению с углом раствора впадины негативной формы выступа рифлений.

2. Экспериментально установлено, что прокатка гладкими валками образцов, с выступами протяженностью по всей их ширине, сопровождается расплющиванием вершин выступов и наслоением деформированных вершин выступов на поверхность полосы в зонах, примыкающих к их боковым поверхностям, если угол между боковыми поверхностями выступов $2\alpha \leq 80^\circ$. При больших значениях углов ($2\alpha > 80^\circ$) выступы раскатывались без каких-либо наслоений на поверхность прокатываемых образцов. Выступы с одинаковой протяженностью вдоль и поперек прокатываемых образцов раскатывались без наслоений фрагментов выступов на поверхность образцов при значениях углов между их боковыми поверхностями $2\alpha > 90^\circ$.

3. Экспериментально показано, что прокатка образцов с впадинами треугольного сечения, нанесенными на всю ширину образца, сопровождается смыканием боковых поверхностей впадин, с защемлением окисных пленок, если угол между ними составляет $2\alpha \leq 90^\circ$. При значениях угла между их боковыми поверхностями $2\alpha > 90^\circ$ дно впадины вкатывалось на поверхность образцов. Прокатка образцов с впадинами одинаковой протяженностью вдоль и поперек направления прокатки сопровождается выкатыванием дна впадины на поверхность образцов при значениях угла между их боковыми поверхностями $2\alpha > 100^\circ$.

4. Смоделирован процесс образования дефекта «вкатанная окалина». Расчетные значения угла между боковыми поверхностями выступов, распространяющихся на всю ширину прокатываемой полосы, соответствующие расплющиванию вершин выступов с наслоением их на поверхность прокатываемой полосы и защемлением фрагментов окалина, равно $2\alpha \leq 90^\circ$ независимо от условий трения в очаге деформации. Окалина, расположенная во впадине большой протяженности

поперек полосы, вкатывается вглубь прокатываемого металла при расчетных значениях угла между ее боковыми поверхностями $2\alpha \leq 63^\circ 25' \dots 90^\circ$, соответственно при изменении коэффициент трения от $\mu=0,5$ до $\mu=0$.

Применительно к выступам и впадинам одинаковой протяженности вдоль и поперек прокатки образованию дефекта «вкатаная окалина» соответствуют расчетные значения угла между их боковыми поверхностями для выступов $2\alpha \leq 84^\circ \dots 90^\circ$ и для впадин $2\alpha \leq 68^\circ 16' \dots 103^\circ 48'$ соответственно при изменении коэффициента трения от $\mu=0,5$ до $\mu=0$.

Расчетные значения угла наклона боковых поверхностей продольных выступов, соответствующие образованию дефекта «вкатаная окалина», находится в диапазоне $2\alpha \leq 75^\circ 46' \dots 90^\circ$ при изменении коэффициента трения от $\mu=0,5$ до $\mu=0$.

5. Смоделирован узел гидромеханического удаления окалины. Установлено, что увеличение диаметра форсунки с 0,5 мм до 2 мм сопровождается увеличением площади, удаляемой с поверхности полосы окалины на 6%; при увеличении давления струи от 1 МПа до 7 МПа площадь удаленной окалины возросла на 46%; Увеличение температуры нагрева образцов с 600°C до 950°C вызывает увеличение площади отслоившейся окалины под воздействием струи воды давлением 8 МПа в 8-14 раз.

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РАЗРЫХЛЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ НА ИЗГИБО-РАСТЯЖНОМ ОКАЛИНОЛОМАТЕЛЕ

4.1 Эффективность использования изгибо-растяжных окалиноломателей в непрерывно-травильных агрегатах

Удаление окалины с поверхности горячекатаной полосы перед нанесением на ее поверхность защитных или декоративных покрытий или перед последующей ее холодной прокаткой осуществляется на травильных агрегатах или механическими способами: дробеструйной, дробеметной обработкой, обработкой металлическими щетками, абразивными кругами и т.д.

Наиболее распространенным способом удаления окалины с горячекатаной полосы является травление разбавленным раствором кислоты.

Окалина на железе и стали лежит обычно слоями, причем наружный слой окислен сильно (Fe_2O_3), а последующие слои - промежуточный (Fe_3O_4) и внутренний (FeO) слабее. Синяя окалина Fe_2O_3 до некоторой степени растворима в кислоте, а черный магнитный окисел Fe_3O_4 , образующийся в большой степени при горячей прокатке, растворяется слабо. Красный цвет, часто появляющийся после прокатки на широкополосном стане, получается благодаря водному красному железняку ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), образующемуся в присутствии воды. Вследствие относительной нерастворимости более сильно окисленных форм считают, что в процессе травления кислота разрушает сначала внутренний слой, а наружные слои разрушаются механически под действием водорода, выделяющегося из кислоты.

Независимо от химического состава слоев окалины интенсивность их растворения при прохождении через травильные ванны в значительной степени определяется доступностью реактивной среды к этим слоям. Известно, что разрыхленный слой окалины растворяется значительно быстрее, чем сплошной слой. С целью разрыхления слоя окалины на поверхности горячекатаной полосы, травильные агрегаты включают изгибо-растяжные окалиноломатели, в которых полоса

обычно огибает небольшие ролики, благодаря чему она подвергается изгибу в различных направлениях перед поступлением в правильные ролики. При этом изгибе часть окалины отслаивается, а в оставшейся окалине образуется большое количество очень тонких, близкорасположенных поперечных трещин в окалине, покрывающей полосу, и ослабляется сцепление между металлом и окалиной, что ускоряет действие кислоты. Кроме того, при изгибе полоса выправляется и получает достаточный наклеп, что затрудняет последующее образование больших поперечных трещин в травильной установке.

Анализ конструкций изгибо-растяжных окалиноломателей свидетельствует о том, что существующие конструкции не обеспечивают высокой эффективности удаления и разрыхления окалины при прохождении горячекатаной полосы через них, а соответственно имеется резерв в улучшении их конструкций и в повышении эффективности в подготовке горячекатаной полосы к травлению. Целью настоящей главы диссертации является исследование и повышение эффективности процесса удаления и разрыхления окалины перед травильной операцией.

4.2. Методика исследования процесса удаления окалины при прохождении её через изгибо-растяжной окалиноломатель

Экспериментальные исследования по оценке эффективности удаления окалины выполняли на геометрически подобной модели изгибо-растяжного окалиноломателя НТА-1 ЛПЦ-4 ОАО «ММК», спроектированной и изготовленной в масштабе 1:6 на кафедре технологии машиностроения ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И.Носова».

При разработке устройства, моделирующего изгибо-растяжной окалиноломатель НТА-1, соблюдали все необходимые пропорции согласно теории подобия. Например, ролики изготавливали из стали марки Сталь 40. При проектировании и изготовлении лабораторной установки принимали следующие допущения. Ширину бочки роликов сократили до 50 мм для уменьшения прогиба роликов от действующих сил. Узлы трения качения роликов в модели решены в виде подшипни-

ков скольжения. Настройку установки производили при помощи регулировочных болтов. Хвостовая часть модели закреплялась в разрывной машине модели ММ-10 (рис. 4.1).

Представленная лабораторная установка обеспечивала:

- а) изменение расстояния от линии протягивания полосы до оси роликов;
- б) угол огибания роликов полосой;
- в) регулирование скорости протягивания полосы;
- г) регулирование усилия протягивания полосы с фиксацией его величины.

В качестве критериев подобия использовалось равенство h/R и L/R , где h - толщина полосы, R - радиус изгибающих роликов, L - величина смещения роликов от уровня протягивания полосы, а также соблюдался подобным угол обхвата ролика полосой.



Рисунок 4.1 - Установка моделирования упруго-пластического изгиба в сборе на разрывной машине ММ-10

Технология проведения эксперимента состояла из следующих этапов:

1. Разборка устройства, моделирующего изгибо-растяжной окалиноломатель с отделением «верхней» части от «нижней».
2. Установка в устройство, моделирующее изгибо-растяжной окалиноломатель, заранее подготовленного образца с окалиной таким образом, чтобы получался перегиб полосы, близкий по форме и параметрам к существующему процессу в реальном окалиноломателе (Рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 - Фото модели установки с заправленной полосой

3. Установка и закрепление в верхний зажим разрывной машины (модель ММ-10) устройства, моделирующего изгибо-растяжной окалиноломатель

4. Закрепление свободного конца полосы, выступающего из устройства, моделирующего изгибо-растяжной окалиноломатель осуществляли в нижний зажим разрывной машины модели ММ-10 (Рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 - Фото модели установки с протянутой полосой в конечном положении

5. Вытягивание полосы из устройства с изгибами через ролики (Рисунок 2.19) включением разрывной машины модели ММ-10.

6. Разборка устройства, маркировка полосы и исследование её на потерю окалины. Повтор опытов с заменой роликов в интервале диаметров от 4 до 14 мм включительно.

Площадь удаленной окалины с поверхности полосы измеряли при помощи

программы Photoshop5.0, сфотографировав поверхность образцов и преобразовав в цифровой формат. Суммарную длину трещин на площади 1 см^2 измеряли на инструментальном микроскопе БМИ.

4.3. Исследование процесса удаления окалины с полосы при прохождении её через изгибо-растяжной окалиноломатель

Имеющаяся на поверхности и вдавленная в поверхность металла окалина удаляется на изгибо-растяжных окалиноломателях, устанавливаемых перед непрерывно-травильными агрегатами (НТА). В результате литературного обзора установлено, причиной «вкатаной окалины» является неэффективная работа окалиновзламывающего оборудования линий непрерывного травления полос. Целью ставилось на разработанном геометрически-подобном оборудовании исследовать процесс удаления окалины с поверхности полосы при прохождении ее через изгибо-растяжной окалиноломатель, выявить недостатки и усовершенствовать конструкцию, обеспечивающую максимально возможное удаление окалины с проката в изгибо-растяжном окалиноломателе.

Проведены эксперименты по удалению окалины с поверхности металла на лабораторной модели «изгибо-растяжной окалиноломатель». Разработанная и изготовленная установка моделировала окалиноломатель, применяемый на линиях непрерывного травления полосы. Подробное описание методики проведения эксперимента приведено в разделе 4.2.

Исследования проводили в два этапа.

На **первом этапе** исследовали удаление окалины при различной глубине погружения роликов - L (Рисунок 4.4).

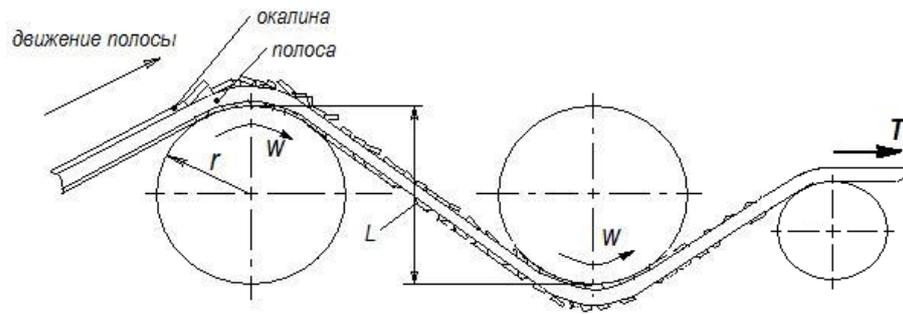


Рисунок 4.4 - Схема прохождения полосы через ролики окалиноломателя:

r - радиус изгибающего ролика; W - угловая скорость вращения ролика;

L - глубина погружения ролика

При моделировании использовались подготовленные металлические пластины размером 25x480 мм, толщиной - 0,6; 0,8 и 1,0 мм, моделирующие толщину горячекатаной полосы толщиной 3, 4 и 5 мм соответственно в масштабе 1:6. Внешний вид пластин показан на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 - Вид пластин перед заправкой в модель изгибо-растяжного окалиноломателя

Пластины заправляли в установку между роликами и равномерно зажимали путем вращения регулировочных болтов, задавая тем самым определенную глубину погружения роликов. Далее производили протягивание полосы через ролики, фиксируя усилия протягивания.

Показателем оценки удаленной окалины с поверхности образцов была выбрана площадь удаленной окалины. Показателем оценки степени растрескивания окалины была принята суммарная длина трещин на одном квадратном сантимет-

ре поверхности образца.

Для ее определения на каждом металлическом образце маркером размечали базовый участок размером 10x200 мм (Рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 - Лабораторные образцы

После проведения эксперимента, участки, отмеченные маркером, сфотографированы и переведены в цифровой формат. Подсчет удаленной окалины производили при помощи пакета программ Photoshop 6.0 .

Результаты экспериментов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Результаты значений экспериментов из 3-х серий опытов по удалению и разрыхлению окалины на модели изгибо-растяжного окалиноломателя без дополнительного ролика

Толщина полосы l , мм	Глубина погружения роликов L , мм	Усилие протягивания F, H	Количество удаленной окалины $S, мм^2$			Среднее зна- чение
			Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	
			1136,0	1540,5	1460,5	1453,6
0,6	4	2400	19,0	18,0	21,0	19,3
0,6	6	2800	1410,7	1344,8	1678,7	1478,7
0,6	8	4600	22,5	20,5	29,5	24,1
			1524,7	1600,2	1680,6	1601,8
			30,5	32,5	29,0	30,6

Толщина полосы l , мм	Глубина погружения роликов L , мм	Усилие протягивания F, H	Количество удаленной окалины $S, \text{мм}^2$			Среднее зна- чение
			Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	
0,8 0,8 0,8	4	3000	1392	1452,5	1530	1458,1
			19,5	17,0	23,5	20,0
	6	3200	1430,1	1400,5	1650,6	1493,7
			22,0	19,5	22,5	21,3
	8	3400	1641	1579,7	1701,7	1640,8
			31,5	25,5	32,0	29,7
1 1 1	4	5000	1456,8	1435,6	1356	1415,6
			29,5	33,0	32,5	31,7
	6	6400	1400	1797,4	1550	1416,3
			34,0	31,5	34,5	33,3
	8	6800	1900	1530,2	1540	1656,6
			48,0	43,5	46,5	45,7

Числитель - площадь удаленной окалины, с образца, мм^2 ; знаменатель - суммарная длина трещин, $\text{мм}/\text{см}^2$

По данным таблицы 4.1 построены зависимости (Рисунок 4.7).

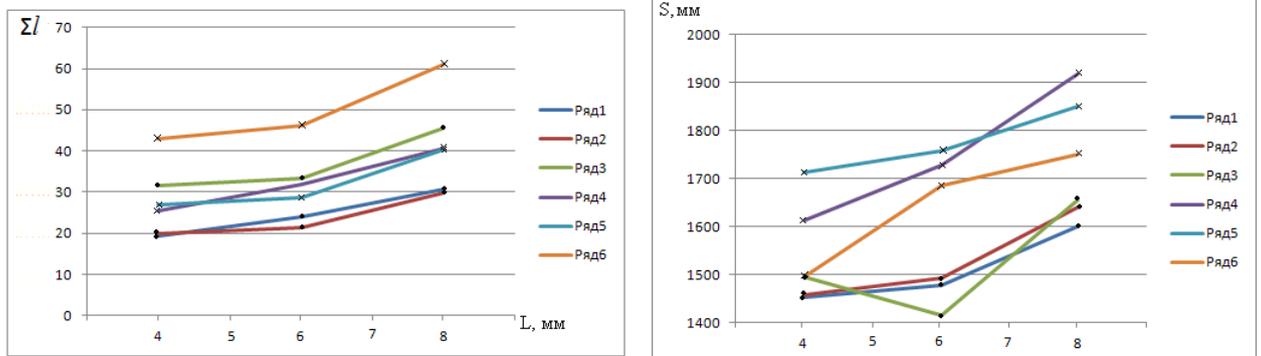


Рисунок 4.7 - Зависимость площади удаленной окалины (а) и суммарной длины трещин (б) от глубины погружения роликов

1,4 - полоса 0,6мм; 2,5 - полоса 0,8мм; 3,6 - полоса 1,0 мм;

- - окалиноломатель без дополнительного ролика, х - окалиноломатель с дополнительным роликом

На втором этапе исследовали протягивание полосы толщиной 0,6мм (Материал Ст3) с использованием дополнительных роликов диаметром 4,6,8,10мм с фиксацией усилия протягивания [149].

На рисунке 4.8 показан принцип установки дополнительных роликов в модель изгибо-растяжного окалиноломателя.



Рисунок 4.8 - Общий вид устройства моделирующего изгибо-растяжной окалиноломатель с установленным роликом

Построена зависимость значений усилий протягивания от диаметра ролика (Рисунок 4.9).

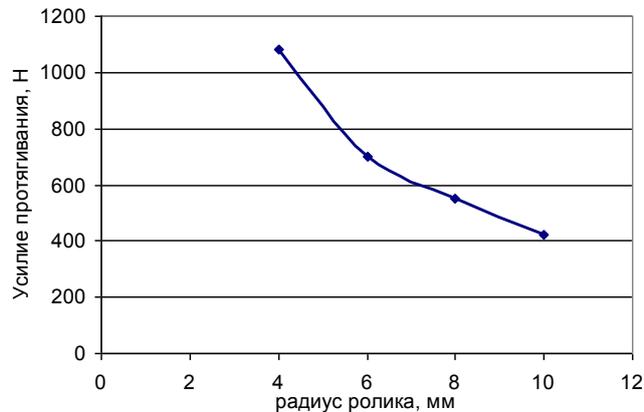


Рисунок 4.9 - Экспериментальная зависимость усилия протягивания от радиуса изгибающих роликов

Результаты экспериментов коррелируют с данными приведенными в источнике [123].

Результаты экспериментов по разрыхлению и удалению окалины с образцов горячекатаной полосы после их протягивания через модель изгибо-растяжного окалиноломателя с выстроенным дополнительным роликом приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.1 - Результаты значений экспериментов из 3-х серий опытов по удалению и разрыхлению окалины на модели изгибо-растяжного окалиноломателя с дополнительным роликом

Толщина полосы l , мм	Глубина погружения роликов L , мм	Усилие протягивания F, H	Количество удаленной окалины $S, \text{мм}^2$			Среднее значение
			Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	
0,6	4	2400	1329	1802	1708	1613
			25,0	24,0	27,0	25,3
	6	2800	1650	1572	1963	1728
			36,5	27,5	31,5	31,8
8	4600	1970	1847	1940	1909	
		40,5	42,5	39,0	40,6	
0,8	4	3000	1732,1	1711,4	1692,3	1711,9
			27,0	22,0	32,0	27,0
	6	3200	1790,1	1680,9	1804,4	1758,4
			29,5	25,0	31,5	28,6
8	3400	1920,4	1740,2	1890	1850,2	
		44,5	33,0	43,5	40,3	
1	4	5000	1565,7	1410,2	1510	1495,5
			38,5	46,0	44,0	42,8
	6	6400	1632	1763,8	1660,2	1685,3
			47,5	43,0	48,0	46,1
8	6800	1990	1542,1	1722	1751,3	
		61,5	60,0	62,0	61,1	

Числитель - площадь удаленной окалины, с образца, мм^2 ; знаменатель - суммарная длина трещин, $\text{мм}/\text{см}^2$

Анализ результатов свидетельствует, что встраивание дополнительного ролика в изгибо-растяжной окалиноломатель повышает количество удаленной с поверхности окалины до 11,5 %, а протяженность трещин в окалине до 33 %.

Следующий раздел диссертации посвящен установлению математической зависимости между усилием натяжения полосы и радиусом роликов в изгибо-растяжном окалиноломателе.

4.4. Разработка методики расчета величины натяжения полосы и радиуса изгибающих роликов изгибо-растяжного окалиноломателя НТА

Изгибание полосы в изгибо-растяжных окалиноломателях непрерывно-

травильных агрегатов вызывает отделение части окалины от металла, однако основная цель этой операции состоит в том, чтобы создать трещины в слое окалины и тем самым повысить эффективность действия кислоты при последующем травлении. Эффективность разрушения окалины зависит от радиуса изгибов полосы и от их количества, от угла охвата изгибающего ролика полосой, от величины натяжения полосы в окалиноломателе. Чем больше полосе задается деформация, тем эффективнее происходит растрескивание слоя окалины на поверхности металла. Использование разработанной методики позволяет накладывать ограничения на радиус изгибающих роликов и величину угла обхвата ролика полосой и величину натяжения полосы, обеспечивающих придание полосе предельно-допустимых деформаций, при которых произойдет растрескивание слоя окалины на поверхности проката, при прохождении его через изгибо-растяжной окалиноломатель.

Рассмотрим чистый изгиб листа при наличии на поверхности слоя окалины. Примем, что деформация листа в направлении перпендикулярном плоскостям изгиба, равна нулю.

Решение выполняем относительно оси симметрии (Рисунок 4.10).

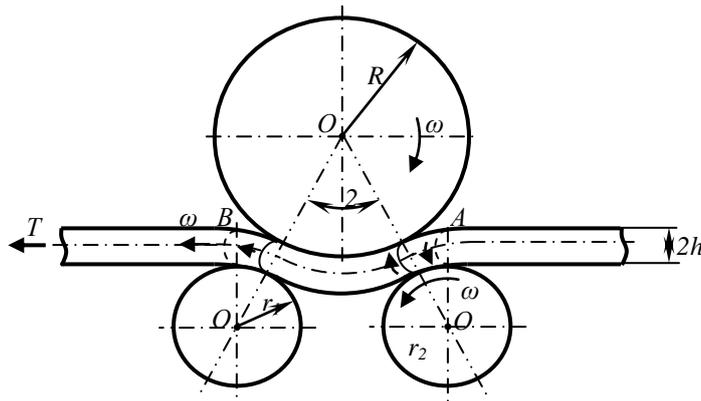


Рисунок 4.10 - Схема прохождения полосы через изгибающие ролики.

Пусть ω_1 - угловая скорость выходящего листа относительно центра кривизны O_1 , тогда

$$(r + h)\omega_1 = (R + 2h)\omega - V_1, \quad (4.1)$$

где V_1 - величина разрыва тангенциальной составляющей скорости вдоль полукруглой дуги на выходе из зазора между роликами (Рисунок 4.11).

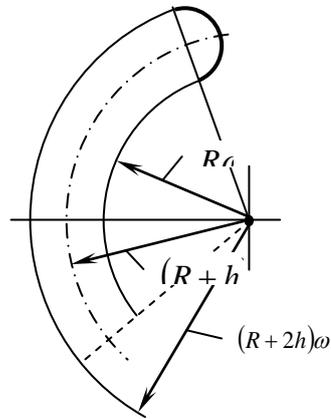


Рисунок 4.11 - Схема разрыва тангенциальной составляющей скорости вдоль полукруглой дуги на выходе из зазора между роликами без учета смещения нейтральной оси

Мощность, развиваемая приложением усилия T , равна

$$T \cdot V = \sigma_T \left[\left(1 + \frac{h}{R}\right) \left(1 + \frac{h}{r}\right) - 1 \right]. \quad (4.2)$$

Рассмотрим процесс прохождения полосы между изгибающими роликами с учетом смещения нейтральной оси на следующей схеме (Рисунок 4.12).

Пусть ω_2 - угловая скорость относительно центра вращения ролика O_2 , тогда

$$r_2 \cdot \omega_2 = (R + 2h)\omega - V_2. \quad (4.3)$$

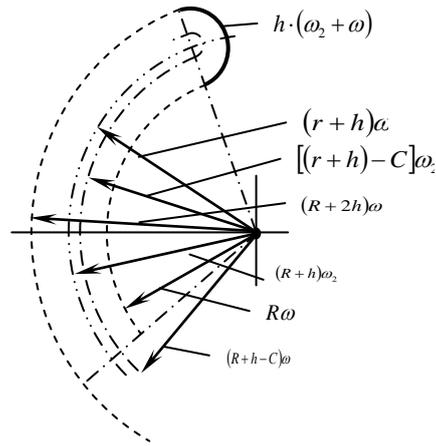


Рисунок 4.12. Схема разрыва тангенциальной составляющей скорости вдоль полукруглой дуги на выходе полосы с учетом смещения нейтральной оси

Преобразуя уравнение (4.3) в следующей последовательности,

$$(r_2 + 2h)\omega_2 = R\omega + V_2, \quad (4.4)$$

$$r_2 + \omega_2 = R\omega + 2h\omega - V_2, \quad (4.5)$$

$$r_2 + \omega_2 + 2h\omega = R\omega + V_2, \quad (4.6)$$

$$-2h\omega_2 = 2h\omega - 2V_2, \quad (4.7)$$

$$V_2 = 2h(\omega_2 + \omega). \quad (4.8)$$

получаем выражение:

$$V_2 = h(\omega_2 + \omega), \quad (4.9)$$

где V_2 - величина разрыва касательной составляющей скорости вдоль дуги в сечении $O - O_2$ (см. рисунок 4.10).

Мощность, развиваемая приложенным усилием, равна:

$$N_T = \sigma_T \cdot b \cdot \pi(h^2\omega_2 + hV_2) = \sigma_T \cdot b \cdot \pi(h^2\omega_2 + h^2(\omega_2 + h^2\omega)), \quad (4.10)$$

$$N_T = \sigma_T \cdot b \cdot \pi h^2(\omega_2 + \omega_2 + \omega) = \sigma_T \cdot b \cdot \pi h^2(\omega_2 + \omega) \quad (4.11)$$

$$T = \sigma_T b \pi h^2 \left(\frac{2}{r+R} + \frac{1}{R+r} \right). \quad (4.12)$$

Тогда выражение для определения усилия протягивания принимает вид:

$$T = \frac{2\pi b \sigma_T h^2}{r+h} \left(1 + \frac{r+h}{R+h} \right). \quad (4.13)$$

В силу симметричности схемы деформации (см. рисунок 4.11) суммарная мощность при протягивании листа через ролики составит

$$T = 2\pi h b \sigma_T \left[\left(1 + \frac{h}{R} \right) \left(1 + \frac{h}{R} \right) - 1 \right]. \quad (4.14)$$

Пусть $R=nr$, $b=1$, тогда выражение (4.14) примет вид:

$$T = \frac{2\pi \sigma_T h^2}{r+h} \left(2 + \frac{r+h}{nr+h} \right) = \frac{2\pi \sigma_T h^2}{r+h} \left(1 + \frac{r+h}{nr+h} \right). \quad (4.15)$$

Для единичной длины

$$T \leq \sigma_T h; \quad T = k h b \sigma_T; \quad k < 1$$

где $n=r/R$

k - коэффициент натяжения;

R, r - радиусы верхних и нижних изгибающих роликов соответственно.

Таким образом, выражение (4.15) запишется в виде:

$$k \sigma_T h = \frac{2\pi \sigma_T h^2}{r+h} \left(2 + \frac{r+h}{nr+h} \right). \quad (4.16)$$

Преобразовав, получим квадратное уравнение относительно r :

$$r^2[kn] + r[knh + kh - 4\pi nh - 2\pi h] + kh^2 - 6\pi h^2 = 0. \quad (4.17)$$

Решая уравнение (4.17) относительно r , получаем:

$$r = \frac{h}{2kn} (4\pi n - k - kn + 2\pi) + \sqrt{(kn + k - 4\pi n - 2\pi)^2 - 4kn(k - 6\pi)}. \quad (4.18)$$

Аналитически установлено предельно-допустимое значение радиуса ролика изгибо-растяжного окалиноломателя без учета смещения нейтральной оси (4.19):

$$r \geq \frac{h}{2kn} (4\pi n - k - kn + 2\pi) + \sqrt{(kn + k - 4\pi n - 2\pi)^2 - 4kn(k - 6\pi)}, \quad (4.19)$$

при значении которого полоса воспримет деформацию, необходимую для эффективного растрескивания слоя окалины на поверхности полосы.

Ниже данная задача решена с учетом смещения нейтральной оси - C (см. рисунок 4.12). Для данного случая выражение 4.16 примет вид:

$$k h b \sigma_T = \sigma_T b \pi \left(\frac{h(c-r)}{r+h} + \frac{h(R+h-C)}{R+h} \right), \quad (4.20)$$

где $C = r + h - \sqrt{r^2 + 2rh}$ [140, с.213],

$$R=rn.$$

После подстановки значений CR в уравнение (4.20) получаем:

$$\frac{k}{\pi} = \frac{(h - \sqrt{r^2 + 2rh})(rn+h) + (rn - r + \sqrt{r^2 + 2rh})(r+h)}{(r+h)(rn+h)}. \quad (4.21)$$

$$\cdot r^2(kn - \pi(n-1)) + r[kn(n+1) - \pi h(2n-1)] - \pi r \sqrt{r^2 + 2rh}(1-n) + h^2(k - \pi) = 0.$$

Уравнение является иррациональным.

Принимая допущение $\sqrt{r^2 + 2rh} = r$ получим:

$$r^2[kn] + r[kh(n + 1) - \pi h(2n - 1)] + h^2(k - \pi) = 0. \quad (4.22)$$

Решая уравнение относительно r , получаем предельно-допустимое значение радиуса ролика изгибо-растяжного окалиноломателя с учетом смещения нейтральной оси:

$$r \geq \frac{h}{2kn} \left(2\pi n - \pi - kn - k + \sqrt{k^2(n - 1)^2 + \pi^2(2n - 1)^2 - 2k\pi(2n^2 - n - 1)} \right). \quad (4.23)$$

На рисунке 4.13 приведена зависимость радиуса ролика изгибо-растяжного окалиноломателя от толщины протягиваемой полосы при различных коэффициентах натяжения $r=f(h)$ при $n=1$ без учета смещения нейтральной оси.

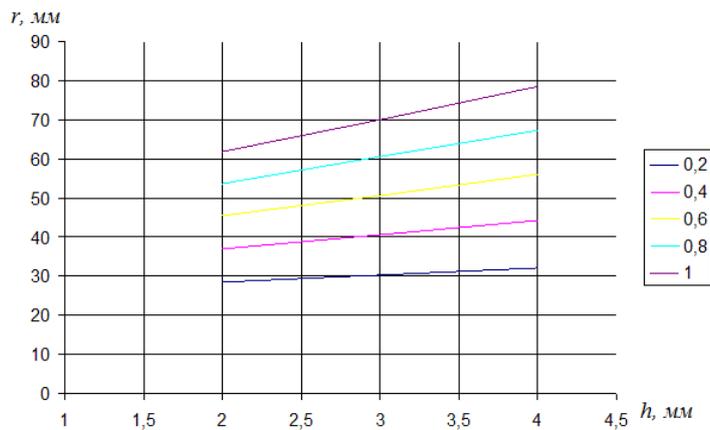


Рисунок 4.13 - Расчетная зависимость радиуса изгибающего ролика от толщины полосы при различных коэффициентах натяжения без учета смещения нейтральной оси, $r=f(h)$

На графиках, приведенных ниже, показаны расчетные зависимости, построенные по формуле 4.23, т.е. с учетом смещения нейтральной оси:

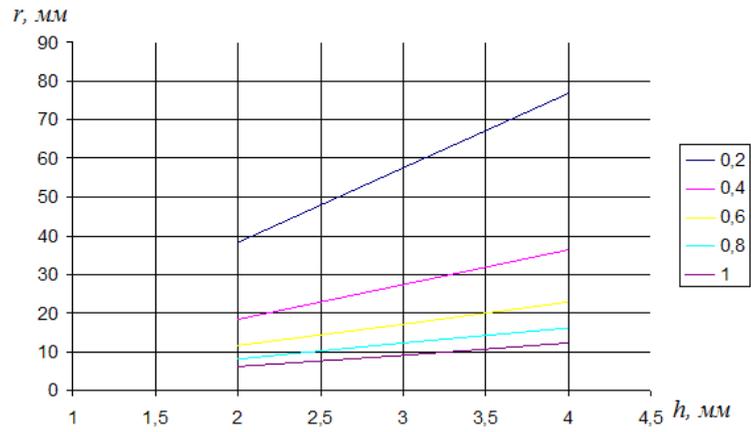


Рисунок 4.14 - Расчетная зависимость радиуса изгибающего ролика от толщины полосы при различных коэффициентах натяжения с учетом смещения нейтральной оси, $r=f(h)$

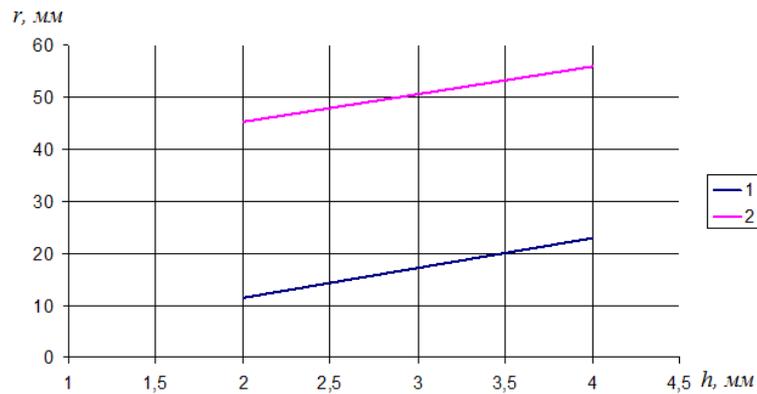


Рисунок 4.15 - Расчетная зависимость радиуса изгибающего ролика от толщины полосы при $k=0,6$: 1- с учетом смещения нейтральной оси, 2 - без учета смещения нейтральной оси, $r=f(h)$

На рисунке 4.16 приведены зависимости усилия протягивания (величины натяжения) полосы (ст3, 16Д) различной толщины от радиусов изгибающих роликов изгибо-растяжного окалиноломателя. Полученная зависимость позволяет установить предельно-допустимую величину натяжения полосы при прохождении ее через изгибо-растяжной окалиноломатель в зависимости от радиуса изгибающего ролика и толщины полосы, необходимой для придания полосе максимальной деформации, при которой произойдет наиболее эффективное растрескивание слоя окалины на поверхности полосы.

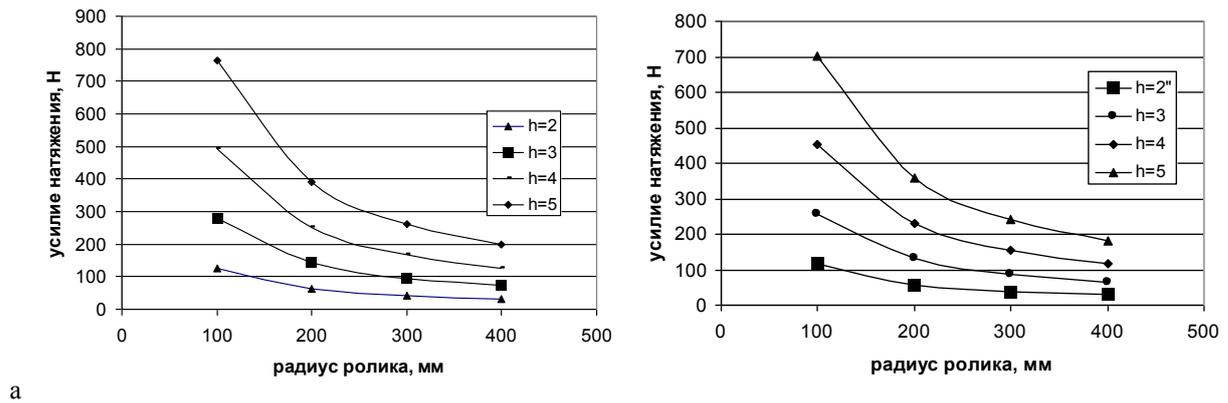


Рисунок 4.16 - Расчетные зависимости усилия протягивания полосы различной толщины ($h = 2, 3, 4, 5$ мм) от радиусов изгибающих роликов изгибо-растяжного окалиноломателя (а - Ст3; б - 16Д)

На рисунке 4.17 приведены зависимости, полученные в результате экспериментальных и аналитических исследований. Для сопоставимости теоретических данных с экспериментальными, были проведены дополнительные исследования. Эксперимент проводили по методике, описанной в разделе 4.2. Производили протягивание полосы толщиной 0,6мм из материала Ст3 с использованием дополнительных роликов радиусом $R = 2, 3, 4, 7$ мм с фиксацией значений усилия протягивания. По аналитической зависимости установили значения усилий протягивания при прохождении полосы толщиной 0,6мм по роликам, радиус которых равен - 2,3,4,7. Результаты опытов занесены в таблицу 4.2 и иллюстрированы графиками на рисунке 4.17.

Таблица 4.2 - Результаты замера усилия протягивания полосы шириной 30мм в зависимости от радиуса ролика.

Радиус дополнительного ролика, мм	Усредненное усилие протягивания, Т, Н(практика)	Результаты расчета, Т, Н
2	443,47	420,7
3	320,3	345,6
4	250,7	273,5
7	151,7	145,5

По графикам установлено, что расхождение составляет 10-12%.

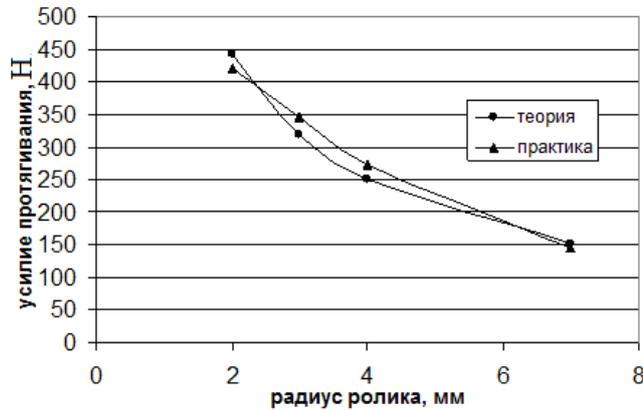


Рисунок 4.17 - Экспериментальная и расчетная зависимости усилия протягивания полосы от радиусов изгибающих роликов изгибо-растяжного окалиноломателя

В ходе аналитических исследований выведена зависимость 4.23, позволяющая рассчитать величину радиуса ролика изгибо-растяжного окалиноломателя, при прохождении по которому полоса получит предельную деформацию для удаления с ее поверхности слоя окалины. Построенные графики позволяют наглядно определить радиус изгибающего ролика для каждого значения толщины протягиваемой полосы. Например, для полосы $h=4\text{мм}$ радиус изгибающего ролика выбирается $r=22\text{мм}$.

На основании теоретических и экспериментальных исследований усовершенствована конструкция изгибо-растяжного окалиноломателя и получен патент на полезную модель [135].

4.5 Выводы

1. Выполнено физическое моделирование изгибо-растяжного окалиноломателя. С целью повышения эффективности разрыхления и удаления окалины с поверхности горячекатаной полосы предложено оснастить конструкцию изгибо-растяжного окалиноломателя дополнительным подвижным роликом, с возможно-

стью смещения от уровня полотна основных роликов. Установлено, что увеличение смещения дополнительного ролика от уровня полотна существующих роликов увеличивает площадь удаленной окалины на 11,5 %, эффективность ее разрыхления на 33% в зависимости от толщины полосы.

2. Разработана методика расчета величины натяжения полосы и радиуса изгибающих роликов изгибо-растяжного окалиноломателя, обеспечивающих наиболее эффективное растрескивание и удаление окалины с поверхности горячекатаной полосы.

3. На основании теоретических и экспериментальных исследований усовершенствована конструкция изгибо-растяжного окалиноломателя и получен патент на полезную модель [135].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследовано состояние рабочих поверхностей роликов МНЛЗ после их эксплуатации с записью профилограмм на профилометре Mahr PSI. Выявлено, что рабочие поверхности роликов после их эксплуатации включают участки:

- с изношенным грубым микрорельефом, характеризующимся наличием впадин глубиной 1..3 мм и углами наклона между их боковыми поверхностями 30...82°;

- с налипшей окалиной площадью от 10 до 300 мм², толщиной до 5 мм и углами наклона между боковыми поверхностями выступов 43...88°.

Выполнено математическое моделирование процесса взаимодействия окалины с роликами МНЛЗ и непрерывнолитой заготовкой с наложением ограничений на размер фрагмента окалины, который может быть вдавлен в НЛЗ. Установлено, что вдавливание в НЛЗ налипшей ранее на ролики МНЛЗ окалины небольшой площадью с большими углами наклона боковых поверхностей, способствуют удержанию окалины на НЛЗ, что на стадии горячекатаного передела может спровоцировать дефект «вкатаная окалина». Вдавливание налипшей окалины большой площади в НЛЗ, особенно в закристаллизовавшуюся корку малой толщины, способствует отслаиванию окалины от НЛЗ и налипанию на ролики.

2. Разработан аналитический метод определения коэффициента заполнения впадин изношенных поверхностей роликов окалиной. Установлено, что заполнению впадин окалиной способствует увеличение отношения предела текучести материала закристаллизовавшейся корки НЛЗ к пределу текучести окалины, уменьшение коэффициента трения окалины о стенки впадины роликов МНЛЗ и увеличение угла раствора между стенками впадины на поверхности роликов. С целью снижения налипания окалины на ролики рекомендовано использовать для восстановления роликов отечественный износостойкий наплавочный материал ПП25Х5ФМС с обработкой после наплавки электроконтактным способом с сохранением твердости обработанной поверхности не ниже 420 НВ. Разработана и внедрена опытно-промышленная установка для электроконтактной обработки на-

плавленных роликов МНЛЗ. Получен патент на диск-электрод (Патент РФ на полезную модель №97665).

3. Выполнены экспериментальные исследования по отпечатываемости рифлений валка окалиноломателя на прокатываемой полосе и по прокатке образцов с выступами и впадинами с различными углами между их боковыми поверхностями. Установлено, что выступы на образцах с протяженностью по всей ширине образца и с углами между их боковыми поверхностями менее 80° вдавливаются в заготовку со сплюсненной вершиной, часть которой наслаивается на основную поверхность образца с заземлением окисной пленки. Выступы с углами между их боковыми поверхностями более 80° раскатываются по поверхности образца без наслоений. Выступы с одинаковой протяженностью вдоль и поперек образца раскатывались без вкатывания окалина при значениях углов между их боковыми поверхностями более 90° .

Впадины, в процессе прокатки образцов, закатывают окисную пленку внутрь металла, если угол между их боковыми поверхностями меньше $60\dots100^\circ$ и выкатывают окисную пленку на поверхность образцов при превышении этих значений. Большие значения соответствуют впадинам с одинаковой протяженностью вдоль и поперек направления прокатки, а меньшие значения соответствуют впадинам с большой протяженностью в поперечном направлении.

Выполнено математическое моделирование процесса образования дефекта «вкатанная окалина» при горячей прокатке полосы с выступами и впадинами с окалиной на их поверхностях. Получены аналитические зависимости по определению углов между боковыми поверхностями выступов и впадин на горячекатаной полосе 2α , исключающих образование дефекта «вкатанная окалина». Расчетные значения углов между боковыми поверхностями выступов, исключающие образование дефекта «вкатанная окалина» составляют $75^\circ32'\dots90^\circ$ для выступов и $63^\circ25'\dots180^\circ$ для впадин в зависимости от протяженности вдоль или поперек полосы и коэффициента трения.

4. Смоделирован узел гидромеханического удаления окалина и выполнены исследования по интенсифицированию удаления окалина с горячекатаной поло-

сы. Установлено, что увеличение диаметра форсунки с 0,5 мм до 2 мм сопровождается увеличением площади, удаляемой с поверхности полосы окалины на 6 %; при увеличении давления струи от 1 МПа до 7 МПа площадь удаленной окалины возрастает на 46 %; Увеличение температуры нагрева образцов с 600 °С до 950 °С вызывает увеличение площади отслоившейся окалины под воздействием струи воды давлением 8 МПа в 8-14 раз.

5. Выполнено физическое моделирование изгибо-растяжного окалиноломателя. С целью повышения эффективности разрыхления и удаления окалины с поверхности горячекатаной полосы предложено оснастить конструкцию изгибо-растяжного окалиноломателя дополнительным подвижным роликом, с возможностью смещения от уровня полотна основных роликов. Установлено, что увеличение смещения дополнительного ролика от уровня полотна существующих роликов увеличивает площадь удаленной окалины до 11,5 % и количество трещин до 33 % в зависимости от толщины полосы. Разработана методика расчета величины натяжения полосы и радиуса изгибающих роликов изгибо-растяжного окалиноломателя, обеспечивающих наиболее эффективное растрескивание и удаление окалины с поверхности горячекатаной полосы. Получен патент РФ на полезную модель РФ №96799 Правильно-растяжной окалиноломатель, МПК В21D 1/02/БИМП. 2010. №23. С.1043-1044.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы составил 1057800 руб./год. Научные разработки автора внедрены в учебном процессе при подготовке учащихся по направлениям 15.03.05 и 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железнов, Ю.Д. Системные основы интенсификации производства широкополосовой стали / Железнов Ю.Д., Григорян Г.Г., Псел М.И. // М.: Metallurgy, 1986. - 152 с.
2. Матвеев, Б.Н. Совершенствование непрерывного производства горячекатаной широкополосной стали (Опыт зарубежных источников) // Производство проката, 2002. - № 4. - С. 17-24.
3. Pichler R. Advanced solution for hot charging and optimized work roll shifting in hot strip mills / Pichler R. et al. // MPT Int., 1999. - 22. - N 5. - P. 84-89.
4. Aylen, J. Where did Generation V strip mills come from? // Steel Times, 2001. - N 7-8. - P. 227-228, 230, 236.
5. Темлянцев, М.В. Эволюция поверхностных дефектов при нагреве стали под обработку давлением / Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В., Журавлев Б.К., Сюсюкин А.Ю. // Metallurgy: reorganization, management, innovation, quality: Tr. всеросс. науч.-практ. конф. - Новокузнецк: СибГИУ, 2002. - С. 41-42.
6. Bodaud, C. The modernisation programme for the Sidex, Romania, wide strip mill // MPT Int., 1999. - 22. - N 4. - P. 98-106.
7. Thaller, G., Wagner, J. Le complex* de laminage a chaud dc HAOEED. La mise en route et let performance // Rev. Met. (France), 2001. - 98, - N 7-1. - P. 675-687.
8. Smith, T. Thin gauge hot strip. A report on the ISS symposium. Toronto // Steel Times Int., 2000. - 24. - N 7. - P. 30-34.
9. Темлянцев, М.В. Исследование окисления низколегированных конструкционных сталей при нагреве под прокатку в атмосфере воздуха / Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В., Стариков В.С. // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Tr. всеросс. науч. конф. студ., асп. и молод. ученых. - Новокузнецк: СибГИУ, 2003. - Вып. 7. - С. 170-172.
10. Райффершайд, М. Всеобъемлющий анализ качества в технологическом процессе с целью улучшения качества продукции/ Райффершайд М., Кемпкен Й.,

Брунс М., Лангара Гарсия-Эчаве Х.И., Минамбрес Овехеро Х. // Чёрные металлы, 2006. - Май. - С. 27-30.

11. Климусшкин, А.Н. Улучшение качества полосового проката из крупнотоннажных слитков / Климусшкин А.Н., Дахно Л.А., Ким А.А., Аннояров А.В., Калашник А.Ф. // Сталь, 2000. - № 6. - С.35-37.

12. Казачков, Е.А. Процессы формирования и пути повышения качества крупных слитков для прокатки толстых листов / Казачков Е.А., Макуров С.Л., Носоченко О.В. // Сталь, 2002. - № 8. - С. 39-42.

13. Рудой, Л.С. Повышение качества непрерывнолитых заготовок на Днепровском металлургическом комбинате / Рудой Л.С., Чуванов А.П., Учитель Л.М., Ивко В.В. // Сталь, 2003. - № 2. - С. 44-47.

14. Бахматов, П.В. Исследование получения непрерывнолитых полых деформированных заготовок на опытно-промышленной установке // Изв. вузов. Черная металлургия, 2003. - № 8. - С. 38-39.

15. Хребин, В.Н. Исследование влияния технологии раскисления малоуглеродистой стали на качество непрерывнолитой заготовки / Хребин В.Н., Тюленев Е.Н., Лавров В.А., Емельянов С.С., Храпов Г.А. // Сталь, 2006. - № 6. - С. 49-50.

16. Бигеев, А.М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали: учебник для вузов / Бигеев А.М., Бигеев В.А. - Магнитогорск: МГТУ, 2000. - С. 297-303.

17. Угаров, А.А. Влияние узлов оборудования МНЛЗ на качество поверхности блюмов / Угаров А.А., Гонтарук Е.И., Бокарев С.П., Айзин Ю.М. // Сталь, 2007. - № 6. - С. 16-17.

18. Кидяев, С.В. Анализ причин образования дефектов слябов и толстых листов / Кидяев С.В., Куклев А.В., Тиняков В.В., Соснин В.В., Лонгинов А.М., Тарвид Д.С. // Сталь, 2006. - № 9. - С. 19-21.

19. Дегранде, Х. CASTER-CROWN-СИСТЕМА: Повышение производительности и улучшение качества непрерывнолитых слябов / Дегранде Х., Шуберт И. // Чёрные металлы, 2008. - Окт. - С. 19-22.

20. Тутарова, В.Д. Прогнозирование качества непрерывнолитых слитков методами математической статистики / Тутарова В.Д., Логунова О.С. // Изв. вузов. Черная металлургия, 1999. - № 8. - С. 53-55.

21. Кольберг, С. Повышение производительности МНЛЗ и качества непрерывнолитых толстых слябов / Кольберг С., Лефгрэн П. // Чёрные металлы, 2005. - Ноябрь. - С. 40-46.

22. Тюрин, В.А. Улучшение качества непрерывнолитой заготовки // Сталь, 2000. - № 12. - С. 13-15.

23. Самойлович, Ю.А. Исследование трещинообразования под действием термических напряжений при нагреве заготовок / Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И. // Сталь, 2005. - № 7. - С. 61-63.

24. Мюллер, П. Улучшение качества и повышение экономичности технологии непрерывного литья заготовок / Мюллер П., Грундман Г., Х. фон Выл, Юнг В., Шуберт И. // Чёрные металлы, 2003. Февр. - С. 44-48.

25. Шуберт, И. Система CASTER-CROWN: повышение производительности и качества // Чёрные металлы, 2005. - Июль-август. - С. 49-52.

26. Паршин, В.М. Управление качеством непрерывнолитой заготовки / Паршин В.М., Чертов А.Д. // Сталь, 2005. - № 1. - С. 20-29.

27. Атлас дефектов стали: пер. с нем. - М.: Металлургия, 1979. - 188 с.

28. Дефекты сталей: справочник / под ред. С.М. Новокрещеновой и М.И.Виноград. - М.: Металлургия, 1984. - 199 с.

29. Смирнов, А.Н. Особенности явления «наматывания» окалины опорными роликами слябовой МНЛЗ / Смирнов А.Н., Цупрун А.Ю., Новиков Е.Н., Кислица В.В., Нагорный С.А. // Сталь, 2008. - № 4. - С. 19-22.

30. Буланов, В.Л. Рациональное охлаждение роликов МНЛЗ / Буланов В.Л., Волетова В.Е. // Сталь, 2001. - № 2. - С. 16-18.

31. Нисковский, В.М. Машины непрерывного литья слябовых заготовок / Нисковский В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. - М.: Металлургия, 1991. - 272 с.

32. Окисление металлов: пер. с франц. / под ред. Ж. Бенара. - М.: Metallurgia, 1969. - Т.2. - 447 с.
33. Бровман, М.Я. О повышении качества поверхности полосы при прокатке в валковых совмещенных агрегатах / Бровман М.Я., Николаев В.Ал. // Производство проката, 2006. - № 5. - С. 9-14.
34. Бродом, М.Я. Исследование начальной стадии кристаллизации металлов / Бродом М.Я., Галентовский Г.Г. // Изв. АН СССР. Металлы, 1983. - №1. - С 39-42.
35. Степанов, А.Н. Производство листа из расплава / Степанов А.Н., Зильберг Ю.В., Неуструев А.А. - М.: Metallurgii, 1978. - 160 с.
36. Егоров, В.В. Литейно-прокатный агрегат для производства стального горячекатаного листа / Егоров В.В., Майоров А.И. // Высокотехнологичное оборудование для металлургической промышленности: сб. тр. междунар. науч.-практ. конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.И. Целикова. - М.: ВНИИМЕТМАШ, 2004. - С. 143-160.
37. Зильберг, Ю.В. Теоретическое и экспериментальное исследование формоизменения поверхностных впадин при прокатке / Зильберг Ю.В., Миленин А.А. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия, 1998. - № 11. - С. 27-29.
38. Кузьменко, В.И. Решение на ЭВМ задач пластического деформирования: справочник / Кузьменко В.И., Балакин В.Ф. - Киев: Техніка, 1990. - 136 с.
39. Гун, Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. - М.: Metallurgia, 1983. - 352 с.
40. Миленин, А.А. // Изв. вузов. Черная металлургия, 1994. - № 12. - С 19-21.
41. Тибаев, С.В. Статистический контроль и прогнозирование показателей качества горячекатаного металла / Тибаев С.В., Харитоновна Е.С. // Сталь, 1998. - № 6. - С. 41-42.
42. Каневский, А.Л. Усовершенствование охлаждения валков и полос на станах горячей прокатки / Каневский А.Л., Ботштейн В.А., Белобров Ю.Н., Кожевников Г.В., Каушанский И.Б. // Сталь, 2006. - № 4. - С. 50-52.
43. Вебербергер, Э. Повышение производительности и качества продукции широкополосного стана горячей прокатки компании Voestalpine Stahl GmbH /

Вебербергер Э., Зайрук В., Миттер Г., Коннерт Р. // Чёрные металлы, 2008. - Янв. - С. 26-32.

44. Перетяцько, В.Н. Исследование формоизменения продольных дефектов при прокатке на непрерывном мелкосортном стане / Перетяцько В.Н., Мартыанов Ю.А., Уманский А.А., Федоров А.А. // Изв. вузов. Черная металлургия, 2008. - № 8. - С. 12-15.

45. Логинов, Ю.Н. Налипание металла на валки при листовой прокатке // Производство проката, 2006. - № 10. - С. 9-12.

46. Иванченко, В.Г. Влияние степени деформации на качество полос при дрессировке / Иванченко В.Г., Франценюк Л.И., Смирнов П.Н. // Сталь, 1997. - № 8. - С. 41-44.

47. Гарбер, Э.А. Взаимодействие валков и полосы на широкополосном стане горячей прокатки / Гарбер Э.А., Хлопотин М.В., Савиных А.Ф., Трайно А.И. // Сталь, 2008. - № 3. - С. 51-53.

48. Божков, А.И. Совершенствование технологии производства тонколистового проката с целью улучшения его плоскостности и качества / Божков А.И., Настич В.П., Чеглов А.Е. // Производство проката, 1998. - № 5. - С. 14-19.

49. Божков, А.И. Производство холоднокатаных полос с улучшенным качеством поверхности / Божков А.И., Настич В.П., Чеглов А.Е., Титов Е.В. // Производство проката, 2004. - № 12. - С. 3-9.

50. Божков, А.И. Производство холоднокатаных полос с улучшенным качеством поверхности. Сообщение 1 / Божков А.И., Настич В.П., Чеглов А.Е., Титов Е.В. // Производство проката, 2004. - № 11. - С. 17-23.

51. Кюблер, Ф. База данных качества поверхности - следующий этап в развитии процесса контроля поверхности полосы / Кюблер Ф., Карлович М. // Чёрные металлы, 2004. - Окт. - С. 22-26.

52. Мазур, В.Л. Предупреждение дефектов листового проката / Мазур В.Л., Добронравов В.И., Чернов П.П. - Киев: Техника, 1986. - 208 с.

53. Белосевич, В.К. Совершенствование процесса холодной прокатки / Белосевич В.К., Нетесов Н.П. - М.: Металлургия, 1988. - 268 с.

54. Беньковский, М.А. Качество поверхности автомобильного листа. - М.: Металлургия, 1988. - 268 с.
55. Архаров, В.И. Физика металлов и металловедение / Архаров В.И., Бланкова Е.Б. 1960. - Т.IX. - Вып.6. - С. 878-887.
56. Архаров, В.И. Окисление металлов / Архаров, В.И. - М.: Металлургиздат, 1945. - 171 с.
57. Garder, S. The Wire industry / Garder S., Sturgeon G. 1961. - V.28. - №327.
58. Тайц, Н.Ю. Технология нагрева стали / Тайц, Н.Ю. - М.: Металлургиздат, - 1962. - 567 с.
59. Дубина, О.В. К вопросу выбора рационального режима нагрева слитков под прокатку / Дубина О.В., Лебедев А.Н., Маншилин А.Г. // Наука производству. Сборник статей, 2003. - К., - С. 120.
60. Тихомиров, В.И. Скорость окалинообразования на металлах и сплавах / Тихомиров В.И., Ипатьев В.В., Гофман И.А. - Л., 1954. - С.52-57. (Ученые записки ЛГУ, - № 175).
61. Окисление металлов / под ред. Ж. Бернара. - Т.1. - М.: Металлургия, 1968. - 499 с.
62. Чернов, П.П. Влияние условий смотки и ускоренного охлаждения на фазовый состав и свойства прокатной окалины / Чернов П.П., Ларин Ю.И., Поляков В.Н. // Производство проката, 2001. - №12, - С. 35-38.
63. Смирнов, А.В. Горячее цинкование / Смирнов, А.В. - М.: Металлургия, 1953. - 210 с.
64. Северденко, В.П. Окалина при горячей обработке металлов давлением / Северденко В.П., Макушок Е.М., Равин А.Н. - М.: Металлургия, 1977. - 208 с.
65. Чмелев, А.А. Влияние окалинообразования на профиль поперечного сечения полос / Чмелев А.А., Мазур В.Л., Тимошенко Л.В., Бендер Е.А., Сосулин В.П., Жалгасова Л.Т. // Металлургическая и горнорудная промышленность, 1988. - №1. - С. 24-25.
66. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов / Губкин, С.И. - Т.2. - М.: Металлургиздат, 1960. - 416 с.: ил.

67. Тарковский, И.Я. Формоизменение при пластической обработке металлов / Тарковский, И.Я. - М.: Metallurgizdat, 1954. - 535 с.: ил.
68. Темлянцев, М.В. Окисление углеродистых конструкционных сталей при нагреве в атмосфере воздуха под обработку давлением / Темлянцев М.В., Стариков В.С., Темлянцев Н.В., Журавлев Б.К. // Заготовительные производства в машиностроении, 2004. - №5. - С. 47-49.
69. Чекмарев, А.П. Теория продольной прокатки / Чекмарев А.П., Нефедов А.А., Николаев В.А. - Харьков: ХГУ, 1965. - 212 с.: ил.
70. Чертовских, А. К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением / Чертовских А. К., Белосевич В. К. - М.: Metallurgiya, 1968. - 362 с.: ил.
71. Макушок, Е.М. Теоретические основыковки и горячей объемной штамповки. / Макушок Е.М., Матусевич А.С., Северденко В.П., Сегал В.М. - Минск: Наука и техника, 1968. - 407 с.: ил.
72. Северденко, В.П. Теория обработки металлов давлением / Северденко, В.П. - Минск: Высш. шк., 1966. - 224 с.: ил.
73. Архаров, В.И. Окисление металлов / Архаров, В.И. - М.: Metallurgizdat, 1945. - 171 с.: ил.
74. Францевич, И.Н. Высокотемпературное окисление металлов и сплавов / Францевич И.Н., Войтович Р.Ф., Лавренко В.А. - М.: Гостехиздат, 1963. - 323 с.: ил.
75. Кубашевский, О. Окисление металлов и сплавов: пер. с англ. / Кубашевский О., Гопкинс В. - М.: Metallurgiya, 1965. - 428 с.: ил.
77. Окисление металлов/ под ред. Ж. Бернара. - Т.2. - М.: Metallurgiya, 1969. - 448 с.: ил.
78. Рудбах, В.Н. Прокатка и тепловая обработка стали / Рудбах В.Н., Сафонов С.М. - М.;Л.: ОНТИ, Московский институт стали, 1936. - С. 80-98.
79. Tylecote, R.F. «J. Iron and Steel Inst.» / Tylecote, R.F. - 1960, - V.196, - № 2, - P. 135-141.

80. Vagnard, G. «Metaux» (corros-indes) / Vagnard, G. - 1965. - V.40. -№ 479-480. - P. 293-312; - № 482. - P. 384-402; - № 483, - P. 403-420.

81. Гончаров, Ю.В. Обработка металлов давлением / Гончаров, Ю.В. - М.: Металлургия, 1967. - С. 208-220 (ДМетИ. Сб. - № 52).

82. Копытов, В. Ф. Нагрев стали в печах / Копытов, В. Ф. - М.: Металлургиздат, 1955. - 264 с.: ил.

83. Oelsen, W. «Hfirterei-Technische-Mitteilungen» / Oelsen, W. - 1966. - Bd 21. - № 1. - S. 47.

84. Тайц, Н.Ю. Технология нагрева стали / Тайц, Н.Ю.- М.: Металлургиздат, 1962. - 567 с. : ил.

85. Жук, И.П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Жук, И.П. - М.: Металлургия, 1976. - 472 с.: ил.

86. Ващенко А.И. Окисление и обезуглероживание стали / Ващенко А.И., Зеньковский А.Г., Лившиц А.Е., Шульц Л.А. - М.: Металлургия, 1972. - 336 с.: ил.

87. Цейгер, Б.М. Труды специального конструкторского бюро № 3 Минавтопрома СССР / Цейгер Б.М., Вельский Е.Я., Клюев В.М. - Вып. 4. - Минск: ОНТЭИ СКБ№3, 1970. - С. 131-135.

88. Перетяцько, В.Н. Исследование влияния строения поверхностных слоев стали на удаление окалины после высокотемпературного нагрева слябов под прокатку / Перетяцько В.Н., Темлянцев Н.В. // Изв. вузов. Чер. металлургия, 2006. - №10. - С. 23-26.

89. Trenkler, H. «Werkstoffe und Korrosion» / Trenkler, H. - 1972, - Bd 23. - № 10. - S. 870-875.

90. Peters, F.K. «Arch. Eisenhüttenw» / Peters F.K., Engell R.J., 1959. - Bd 30. - S. 275.

91. Технологическая инструкция стана горячей прокатки 2500.

91. Афанасьев, С.И. Расчет окалинообразования на полосовом прокате / Афанасьев С.И., Бородай Г.П., Костик В.О. // Сталь, 1997. - № 5. - С. 45-46.

92. Губинский, В.Н. Уменьшение окалинообразования при производстве проката / Губинский В.Н., Минаев А.Н., Гончаров Ю.В. - Киев: Техника, 1981. - 135 с.
93. Кургузов, С.А. Исследование поведения дефектов поверхности при волочении с целью улучшения качества проволоки: дис. ... канд. техн. наук / Кургузов Сергей Анатольевич. - Магнитогорск, 1991. - 150 с.
94. Никифоров, Б.А. Формоизменение рисок при волочении проволоки / Никифоров Б.А., Королев Н.А., Кулеша В.А., Кургузов С.А. // Сталь, 1988. - № 3. - С. 67-69.
95. Дуплий, Г.Д. Видоизменение дефектов горячекатаных труб в результате холодной деформации / Дуплий Г.Д., Вильямс О.С., Хаустов Г.И., Савченко Л.Я., Крутинь Н.Ф. // Сталь, 1972. - № 2. - С. 151-153.
96. Добронравов, А.И. Классификатор дефектов поверхности горячекатаного плоского стального проката / Добронравов А.И., Карпов Е.В. - Магнитогорск: ЦПК «Персонал», ОНТИ ОАО «ММК», 2002. - 90 с.
97. Стычинский, В.В. Предупреждение образования окалины и методы очистки деталей / Стычинский В.В., Бешелев С.Д. - М.: Машиностроение, 1964. - 132 с.: ил.
98. Темлянцев, Н.В. Особенности строения поверхности раздела окалина-металл при нагреве стали под прокатку / Темлянцев Н.В. // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии: сб. науч. тр. - Новокузнецк: СибГИУ, 2007. - Вып. 18. - С. 31-33.
99. Сафьян, М.М. Горячая прокатка листов на непрерывных и полунепрерывных станах / Сафьян, М.М. - М.: Металлургиздат, 1962. - 380 с.: ил.
100. Олендаренко, О.Д. Исследование угара рельсовой стали Э30ХГ2САФМ при нагреве под прокатку [Текст] / Олендаренко О.Д., Темлянцев М.В. // Научное наследие И.П. Бардина: тр. Всерос. науч.-техн. конф. - Новокузнецк: СибГИУ, 2008. - С. 43-45.
101. Вакула, Л.А. Очистка поверхности круглого проката от окалины тепловым ударом / Вакула Л.А., Костик В.О. // Сталь, 1997. - № 6. - С. 58-59.

102. Золотухин, Н.М. Нагрев и охлаждение металла / Золотухин, Н.М. - М.: Машиностроение, 1973.
103. Лившиц, Б.Г. Физические основы свойств металлов и сплавов / Лившиц, Б.Г. - М.: Машгиз, 1956.
104. Перетяцько, В.Н. Удаление окалины с поверхности низко- и среднелегированных сталей при прокатке / Перетяцько В.Н., Темлянцев Н.В. // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2006. - № 10. - С. 23-26.
105. Перетяцько, В.Н. Горячая прокатка листовой нержавеющей стали / Перетяцько В.Н., Кузнецов А.Ф. - Кемерово: Кн. изд-во, 1989. - 254 с.
106. Олендаренко, О.Д. Применение покрытий для защиты стали от окисления при нагреве в печах перед прокаткой [Текст] / Олендаренко О.Д., Темлянцев М.В. / Творческое наследие Б.И. Китаева: Тр. Междунар. науч.-практ. конф. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. - С.351-354.
107. Бровман, М.Я. Усовершенствование технологии прокатки толстых листов / Бровман М.Я., Зеличенко Б.Ю., Герцев Л.И. - М.: Металлургия, 1969. - 256 с.
108. Хламков, С.С. Очистка проката от окалины с применением деформирующего модуля // Сталь, 2007. - № 6. - С. 52.
109. Беккер, Э.А. Применение оптимизированных сопел для гидросбива окалины на широкополосном стане горячей прокатки фирмы THYSSEN KRUPP STANL AG / Беккер Э.А., Биркемайер Г., Бюхеле В., Дегнер М., Девриент Л., Новак М., Тиман Г. // Черная металлургия, 2000. - №7. - С.42-46.
110. Леутина, Л.Е. Повышение эффективности устройства гидросбива окалины / Леутина Л.Е., Степанов Г.В. // Металлургия, 1984. - №10. - С. 39.
111. Беккер, Э.А. Применение оптимизированных сопел для гидросбива окалины на широкополосном стане горячей прокатки фирмы Thyssen Krupp Stahl AG / Беккер Э.А., Биркемайер Г., Бюхеле В., Дегнер М., Девриент Л., Новак М., Тиман Г. // Чёрные металлы. 2000, - Дек. - С. 42-46.
112. Kroll, A. Stahl u. eisen / Kroll A., Degner M., Thiemann G., Voss G. 119(1999). - Nr. 8, - S. 107/10.

113. Фрик, Ю. Оптимизация расположения форсунок в устройствах гидромеханического удаления окалины / Фрик, Ю. // Сталь, 2003. - № 11. - С. 69-73.

114. Бердичевский, Ю.Е. Пути повышения эффективности систем гидромеханического удаления окалины станов горячей прокатки / Бердичевский, Ю.Е. // Сталь, 2004. - № 7. - С. 44-48.

115. Бердичевский, Ю.Е. Выбор рациональных параметров систем гидросбива с учетом свойств окалины на поверхности проката / Бердичевский Ю.Е. и др. // Фазовые и структурные превращения в сталях: материалы школы-семинара. - Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 2003. - Вып. 3. - С. 536-545.

116. Silk, N.J. The impact energy primary descaling // Steel Times, 1999. - May.

117. Шеридан, Т. Перспективы в прокатке стали / Шеридан Т., Симон П. // Повторный нагрев: материалы европейской конф. - Люксембург, 1995. - С. 224.

118. Büchele, W. Entzunderug von warrngewalzten Oberflächen // Stahl und Eisen, 1995. - № 10. - S. 71-72.

119. Павлитцки, П. Инновационные решения для устройств удаления окалины / Павлитцки П., Ребейн Р. // Чёрные металлы, 2008. - Янв. - С. 37-42.

120. Oberflächen Fehler Katalog an warmgewalzten Flach-Stahlerzeugnissen, Verlag Stahleisen GmbH, Dusseldorf 2, 1996. - Aufl.

121. Кролль, А. Гидромеханическое удаление окалины на широкополосных станах горячей прокатки / Кролль, А. // Чёрные металлы, 2000. - Март. - С. 48-52.

123. Мухин, Ю.А. Совершенствование аналитической модели правки полосы растяжением с изгибом / Мухин Ю.А., Соловьев В.Н., Бахаев К.В., Баранов Д.В. // Производство проката, 2006. - № 7. - С. 2-5.

124. Пономарев, Н.И. Теоретические основы расчета правильно-растяжных машин / Пономарев Н.И., Крылов Н.И., Слоним А.З. // Машины для обработки полосового проката: сб. науч. тр. ВНИИМЕТМАШ. - М.: Металлургия, 1979. - №59. - С. 18-21.

125. Огарков, Н.Н. Оценка состояния рабочего поверхностного слоя роликов МНЛЗ / Огарков Н.Н., Суфьянов Д.В. // Процессы и оборудование металлургиче-

ского производства: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. Платова С.И. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. - Вып. 8. - С. 149-153.

126. Суфьянов, Д.В. Экспериментальное исследование процесса образования дефекта «вкатанная окалина» с учетом взаимодействия металла с валком / Суфьянов Д.В., Огарков Н.Н. // Производство проката, 2009. - № 3. - С. 2-4.

127. Огарков, Н.Н. Теоретическое исследование процесса удаления окалины при горячей прокатке / Огарков Н.Н., Жигулева И.Ф. - М.: Деп. в ВИНТИ 12.10.00, 2000. - № 2614-В00. - 7 с.

128. Огарков, Н.Н. Лабораторная установка для исследования гидромеханического удаления окалины / Огарков Н.Н., Кургузов С.А., Жигулева И.Ф. - М.: Деп. в ВИНТИ 17.04.01, 2001. - № 985-В2001. - 7 с.

129. Буланов, Л.В. Машины непрерывного литья заготовок / Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Парфенов Е.П. // Теория и расчет. - Екатеринбург: Урал. центр ПР и рекламы, 2003. - 320 с.

130. Мазур, Н.В. Повышение стойкости роликов МНЛЗ на основе моделирования процессов при их изготовлении и эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Мазур Николай Викторович. - Магнитогорск, 2008. - 155 с.

131. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. - 6-е изд / Вентцель, Е.С. - Стереотип. - М.: Высш. шк., 1999. - 576 с.

132. РД 50-398-83. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний. Планирование механических испытаний и статистическая обработка результатов.

133. Огарков, Н.Н. Исследование механизма образования дефекта «вкатанная окалина» / Огарков Н.Н., Суфьянов Д.В. // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: междунар. сб. науч. тр. - Магнитогорск: МГТУ, 2008. - С. 16-22.

134. Суфьянов, Д.В. Теоретическое исследование процесса вдавливания фрагментов окалины в непрерывнолитую заготовку / Суфьянов Д.В., Мазур Н.В. // Известия вузов. Черная металлургия, 2008. - №6. - С. 58-60.

135. Патент на полезную модель РФ № 96799. Суфьянов Д.В., Огарков Н.Н. Правильно-растяжной окалиноломатель, МПК В21D 1/02//БИМП, 2010. - №23. - С.1043-1044.

136. Суфьянов, Д.В. Разработка конструкций установки для электроконтактной обработки наплавленных роликов МНЛЗ / Суфьянов Д.В., Мазур Н.В., Сиенков С.М. // Материалы 65-й науч.-техн. конф. - Т.1. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. - С. 23-25.

137. Патент на полезную модель РФ № 97665. Суфьянов Д.В., Огарков Н.Н., Мурзаева Е.В., Платов С.И. Диск-электрод, МПК В23Н 7/08//БИМП, 2010. - №26. - С.965-966

138. Суфьянов, Д.В. Электроконтактная обработка наплавленных роликов МНЛЗ / Суфьянов Д.В., Мазур Н.В. // Тез. докл. XI науч.-техн. конф. молодых специалистов ЗАО «МРК». - Магнитогорск, 2007. - С. 34-36

140. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / Сторожев М.В., Попов Е.А. - М.: Машиностроение, 1977. - 423 с.

141. Огарков, Н.Н. Экспериментальное исследование процесса гидромеханического удаления окалины с горячекатаной полосы / Огарков Н.Н., Суфьянов Д.В. // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: междунар. сб. науч. тр. - Магнитогорск: МГТУ, 2011. - С. 131-135.

142. Темлянцев, М.В. Развитие металлургических основ, теории ресурсосберегающей технологии тепловой обработки стали: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Темлянцев Михаил Викторович. - Новокузнецк, 2007. - 41 с.

143. Темлянцев, Н.В. Повышение качества толстолистового проката на основе применения рациональных режимов нагрева стали с печак и деформационного окалиноудаления: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Темлянцев Николай Викторович. - Новокузнецк, 2007. - 22 с.

144. Олендаренко, О.Д. Разработка металлосберегающей технологии нагрева непрерывнолитых заготовок рельсовой стали в методических печах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Олендаренко Ольга Дмитриевна. - Новокузнецк, 2010. - 23 с.

145. Машнин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Машнин, Н.Н. - М.: Машиностроение, 1975. - 400 с.
146. Кантарович, З.Б. Основы расчета химических машин и аппаратов / Кантарович, З.Б. - М.: Машгиз, 1960. - 743 с.
147. Мазур, В.Л. Производство листа с высококачественной поверхностью / Мазур, В.Л. - Киев: Техника, 1982.
148. Соколовский, В.В. Теория пластичности. 3-е издание / Соколовский, В.В. - М.: Высшая школа, 1969. - 608 с.
149. Ogarkov, Nikolai N. Research on the process of scale pickup on the rolls of the continuous-casting machine and its indentation in continuous cast steel billets / Ogarkov, Nikolai N., Platov Sergey I., Sufianov Dim V., Steblyanko Valeriy L. // Journal of chemical Technology and Metallurgy. - 52. - 4, 2017. - P. 667-671.
150. Огарков, Н.Н. Эффективность удаления окалины с горячекатаной полосы при наложении ультразвуковых колебаний на полосу в изгибо-растяжном окалиноломателе / Огарков Н.Н., Платов С.И., Суфьянов Д.В., Некит В.А. // Материалы междунар. науч. конф. «Ультразвук: проблемы, разработки, перспективы». - Уфа, 2017. - 25-29 сент.

Приложение 9

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора по производству
ЗАО «Механоремонтный комплекс»

А.Г. Комаров

2008 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результатов работы по договору



По теме: «Разработка и внедрение высокоэффективной технологии ЭКО наплавленных роликов МНЛЗ»

Краткое описание выполненной работы

Разработана опытно-промышленная установка ЭКО для обработки роликов МНЛЗ в условиях ЦРМО-3 ЗАО «МПК». Установка собрана, проведены опытно-промышленные испытания установки. Выявлены вопросы, связанные с необходимостью конструктивной и технологической доработкой головки и увеличения мощности ВДУ. Разработанная конструкция и документация требует дополнительных испытаний для окончательного проектирования промышленной установки.

От ЦРМО-3 ЗАО «МПК»

Начальник цеха

Ст. электрик

Гл. механик

Начальник ЛСО

Завьялов В.И.

Гластуноков И.С.

Брызгунов Ю.В.

Подосян А.А.

От МГТУ

Зав. Кафедрой ТМС, профессор, д.т.н.

Аспирант кафедры «Технология машиностроения»

Соискатель ученой степени к.т.н.

Отарков Н.Н.

Суфьянов Д.В.

Мазур Н.В.

Ожидаемый экономический эффект от разработки и внедрения высокоэффективной технологии электроконтактной обработки наплавленных роликов МНЛЗ»

В настоящее время ролики МНЛЗ ККЦ восстанавливаются с использованием наплавочной технологии. При этом твердость наплавленного слоя достигает HRC 50 ед. В связи с чем, имеют место проблемы связанные с подбором оборудования инструмента и режимов для их механической обработки.

Предложение кафедры Технологии машиностроения сводится к применению для черновой обработки наплавленных роликов не механического, а производительно-электроконтактного способа (ЭКО), который позволяет обрабатывать материалы независимо от их твердости.

Проведенные исследования по обработке наплавленного, материала 3Х2В8, показали, что ЭИ диаметром 300 мм и шириной 15 мм обеспечивает съем материала до 65...70 кг/час и работает без перегрева при обычной системе охлаждения.

Расчеты показывают, что снятие припуска наплавленного слоя глубиной 4 мм с ролика диаметром 365 мм и длиной 1000 мм обеспечивает производительность 30 кг/ч. Таким образом, теоретически возможно, 1 ролик обработать за $24/29,6 = 0,81$ часа или за 48,9 минуты.

При обработке в ЦРМО-3 наплавленных и подвергнутых термической обработке роликов используются следующие режимы: $n=18$ об/мин; $S=0,4$ мм/об; $t=3...4$ мм.

Время операции (машинное время) равно:

$$T = \frac{L}{n \cdot S} = \frac{670}{18 \cdot 0,4} = 93 \text{ мин}$$

Увеличение производительности при использовании в обдирочных операциях ЭКО составит $93/48,9 = 1,9$ раза.

Стоимость одного ст. часа составляет 548 руб. Программа обработки наплавленных роликов в 2008 году $\sim 208 \times 12 = 2496$ шт. Трудоемкость черновой обработки резцами роликов равна $2496 \times 93 = 232128$ мин = 3868,8 ч.

Трудоемкость обработки наплавленных роликов методом ЭКО составляет $3868,8/1,9 = 1938,5$ ч. Сокращение трудоемкости обработки за счет внедрения обработки роликов методом ЭКО $3868,8 - 1938,5 = 1930,3$

Экономия за счет замены механической обработки методом ЭКО, при решении выявленных конструктивных проблем составит 1 057 800 руб.:

$$1930,3 \times 548 = 1\,057\,800 \text{ руб.}$$

Начальник ЦРМО-3

Экономист ЦРМО-3

Зав. Кафедры ТМС профессор, д.т.н.

Исполнители: соискатель ученой степени к.т.н.

аспирант кафедры ТМС



В.И. Завьялов

Н.Н. Воловская

Н.Н. Огарков

Н.В. Мазур

Д.В. Суфьянов



УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
В.М. Колокольцев
16» 01 2017

АКТ

использования в учебном процессе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» результатов диссертационной работы **Суфьянова Дима Вадимовича**, выполненной на соискание ученой степени кандидата технических наук

На основе рекомендаций методической комиссии Института металлургии, машиностроения и материалобработки в учебном процессе при подготовке студентов по направлению 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, внедрены результаты диссертационной работы, выполненные Суфьяновым Д.В. на кафедре МиТОДиМ ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Представленный электронный образовательный ресурс используется при проведении лабораторных и практических занятий по следующим курсам: «Процессы и операции формообразования», «Наукоемкие конструкторско-технологические решения», а также при курсовом проектировании и выполнении выпускных квалификационных работах.

Директор ИММиМ
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

А.С. Савинов

Исполнители работы:

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой МиТОДиМ
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

С.И. Платов

д.т.н., профессор кафедры МиТОДиМ
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Н.Н. Огарков