



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

МИХАЛЕВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ

**НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИСТОВ И
СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОВОК В УСЛОВИЯХ СОВМЕЩЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ
С ДЕФОРМАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Магнитогорск
2025

Работа выполнена

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

Официальные оппоненты:

Филиппов Георгий Анатольевич,
доктор технических наук, профессор, директор научного центра качественных стендов ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИЧермет» им. И.П. Бардина, г. Москва

Шахов Сергей Иосифович,
доктор технических наук, начальник отдела нестандартного оборудования ООО «ТМК Стальные технологии», г. Челябинск

Шаталов Роман Львович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обработки материалов давлением и аддитивных технологий ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Защита состоится «13» мая 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета У.2.5.6.26 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан «___» 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Ирина Николаевна Хрусталева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Дальнейшее развитие нефтегазового и топливно-энергетического комплексов требует все большего количества труб самого разнообразного сортамента. В связи с этим перед трубной промышленностью стоит задача увеличить объем производства труб повышенного качества, расширить их сортамент и повысить степень обеспечения трубами необходимого сортамента ведущих отраслей страны.

При обжатии крупных непрерывно литых слябов на станах толстолистовой прокатки имеет место значительная неравномерность деформации по высоте сляба, что приводит к получению неоднородной структуры толстолистового проката. Вследствие этого в осевой зоне сляба литая структура металла недостаточно прорабатывается, неметаллические включения и ликваты имеют строчечное расположение в металле по оси прокатки, что приводит к снижению механических характеристик толстолистового проката и к проблемам при получении сварных труб на электросварочном стане.

В мире ведутся работы по созданию ресурсосберегающих литейно-прокатных комплексов для производства сортовых заготовок, в частности процессов продольного разделения непрерывнолитых слябов на ряд сортовых заготовок.

Для решения изложенных выше проблем производства стальных листов и сортовых заготовок целесообразно использовать компактную установку совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, технологические возможности которой предусматривают отливку тонких слябов и их обжатие с высокой степенью деформации за проход и в узком температурном интервале. Разработка и внедрение установки обеспечивает уменьшение капитальных и эксплуатационных затрат, улучшение качество металлопродукции и создать ресурсосберегающие комплексы для производства стальных листов и сортовых заготовок.

На основании вышеприведенного весьма актуальным является проведение исследований, направленных на разработку научных основ создания установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства стальных листов и сортовых заготовок.

Степень разработанности темы исследования.

За рубежом для получения стальных листов разработана технология, при которой выходящий из машины непрерывного литья тонкий сляб толщиной 60-70 мм с жидкой сердцевиной обжимается роликами зоны вторичного охлаждения до толщины 15-28 мм, что позволяет уменьшить величину зерна и область осевой ликвации. В современном металлургическом производстве технологически процесс производства сортовых заго-

товок для мелкосортных и проволочных станов сопровождается высокими капитальными, эксплуатационными и энергетическими затратами.

Предлагаемый процесс продольного разделения непрерывнолитой слябовой заготовки калиброванными валками прокатного стана на ряд сортовых заготовок не находит широкого применения в производстве.

В связи с этим весьма актуальным является создание компактной и ресурсосберегающей установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформаций для получения стальных листов и сортовых заготовок.

Цель работы.

Повышение эффективности производства листовых и сортовых заготовок в условиях совмещенных процессов непрерывной разливки с деформационным воздействием.

Задачи исследования:

1. Провести оценку НДС металла при гибке боковых стенок оболочки при получении стальных листов на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

2. Выполнить исследования закономерностей формоизменения на установках непрерывного литья и деформации при получении стальных листов на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации:

- Определить напряженное состояние бойков от усилия обжатия и установить закономерности распределения в них осевых и эквивалентных напряжений при получении на установке стальных листов.

- Определить в условиях нестационарной теплопроводности и термоупругости температурные поля и напряженное состояние бойков при получении листов из стали. Установить закономерности распределения температуры в бойках, термоупругих и суммарных напряжений от усилия обжатия и температурной нагрузки при обжатии стальной заготовки и на холостом ходу.

-Разработать методику и выполнить оценку напряженного состояния и выбора материала бойков различной конструкции при получении стальных листов на установке.

3. На основании результатов математического моделирования разработать концепции компоновок МНЛДЗ.

4.Разработать ресурсосберегающую технологию получения сортовых заготовок за один проход на установке непрерывного литья и деформации:

- Определить напряженно-деформированное состояние с установлением закономерностей распределения перемещений металла и осевых, касательных и эквивалентных напряжений в очаге циклической деформации при получении трех стальных сортовых заготовок на установке.

- Определить напряженно-деформированное состояние металла в очаге циклической деформации при внедрении разделяющего бурта калиброванного бойка в сляб при получении трех сортовых заготовок.

- Определить закономерности распределения в калиброванных бойках суммарных напряжений от усилия обжатия и температурной нагрузки при получении на установке трех стальных сортовых заготовок.

5. Внедрение разработанных технических и технологических решений по совершенствованию технологических процессов и агрегатов МНЛДЗ.

6. Выполнить теоретические и экспериментальные промышленные исследования закономерностей формоизменения процессов на опытно-промышленной установке.

7. Провести опытно-промышленное опробование созданных конструкций элементов установки непрерывного литья и деформации для оценки эффективности их работы и внедрить в производство.

Методология и методы исследования. При выполнении работы использовались методы МКЭ-моделирования совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении стальных листов и сортовых заготовок с использованием пакета ANSYS. Исследование микроструктуры металла проведены на металлографическом микроскопе Olympus BX51 и сканирующем электронном микроскопе Tascan MIRALMV.

Объектом исследования являются технологические процессы и агрегаты МНЛДЗ, их функционирование, представляющие собой совокупность комплексных процессов непрерывной разливки с обработкой давлением.

Предмет исследования – взаимовлияние и взаимосвязи между параметрами комплексных процессов непрерывной разливки с обработкой давлением, при которых будут обеспечиваться требуемая производительность и надежное функционирование МНЛДЗ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.5.7. «Технологии и машины обработки давлением»: пункт 4. Технологии ковки, прессования, листовой и объемной штамповки, а также формования и комплексных процессов с обработкой давлением, например, непрерывного литья и прокатки заготовок.

Научная новизна работы.

1. Развиты научные основы выбора рациональных процессов непрерывной разливки с обработкой давлением для оценки напряженного состояния бойков, что позволило установить закономерности распределения в них осевых и эквивалентных напряжений при получении на установке стальных листов и сортовых заготовок.

2. Сформулированы принципы построения установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, в том числе при получении на установке стальных листов и сортовых заготовок, что позволило разработать ряд новых конструктивных решений с использованием бойков различных конструкций.

3. Создана методика расчета температурных полей и термоупругих напряжений в бойках установки непрерывного литья и деформации, включающая определение в условиях нестационарной теплопроводности и термоупругости температурные поля и напряженное состояние бойков.

4. Установлены закономерности распределения температуры в бойках с каналами и без них от технологических параметров процесса деформации. Использование бойков с каналами позволило снизить температуру контактной поверхности с 460 °C до 370 °C.

5. Разработана методика оценки напряженного состояния бойков различной конструкции и определены геометрические параметры бойков. Установлено, что рациональный угол наклона рабочей поверхности бойка α относительно поверхности заготовки изменяется от 9 до 12 градусов.

6. Определено влияние на закономерности распределения перемещений металла и осевых и эквивалентных напряжений в очаге деформации при внедрении разделяющих буртов калиброванных бойков в слаб при получении на установке трех стальных сортовых заготовок.

Практическая значимость работы.

1. Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации, напряженного состояния бойков различной конструкции и выбора материала бойков установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

2. Разработаны модели для определения и получены результаты оценки напряженного состояния системы кристаллизатор-бойки-полоса при получении на установке стальных листов и сортовых заготовок.

3. Создана и освоена опытно-промышленной установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения металлопродукции на ОАО «Уральский трубный завод». Новизна технических решений подтверждается патентами Российской Федерации на изобретения № 2658761, № 2761373, № 2754336 описывающей процессы функционирования системы непрерывной разливки и деформирования.

4. Суммарный экономический эффект составляет 151 млн. рублей. Он получен от внедрения новых технических и технологических решений, полученных при разработке и внедрении установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения металлопродукции на ОАО «Уральский трубный завод».

5. Разработаны рациональные режимы технологии совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, что позволило создать ряд систем для получения непрерывно литых заготовок, что обеспечивает повышение качества листов и сортовых заготовок и повышение эффективности производства.

6. Разработана технология, позволяющая с высокой степенью деформации до 75 % производить разливку слябов и их обжатие, с целью снижения энергетических и эксплуатационных затрат.

7. Практические и научные результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Положения, выносимые на защиту:

1. Оценка напряженного состояния системы кристаллизатор-байки-полоса при получении стальных листов и сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

2. Закономерности распределения напряжений в очаге циклической деформации и осевых и эквивалентных напряжений в бойках без каналов от усилия нажатия при получении на установке стальных листов.

3. Закономерности распределения в бойках с каналами температуры, термоупругих и суммарных напряжений от усилия обжатия и температурной нагрузки при обжатии сляба и на холостом ходу при получении на установке стальных листов.

4. Методика оценки напряженного состояния бойков различной конструкции и выбора материала бойков при получении на установке стальных листов.

5. Новая технология получения нескольких стальных сортовых заготовок за один проход на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

6. Закономерности распределения перемещений металла и напряжений в очаге циклической деформации при получении на установке трех стальных сортовых заготовок.

7. Закономерности распределения перемещений металла и осевых и эквивалентных напряжений в очаге деформации при внедрении разделяющих буртов калиброванных бойков в сляб при получении на установке трех стальных сортовых заготовок.

8. Закономерности распределения в калиброванных бойках температуры, термоупругих и суммарных напряжений от усилия обжатия и температурной нагрузки при получении на установке трех стальных сортовых заготовок.

9. Результаты экспериментального исследования совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении стальных листов

и сортовых заготовок на опытно-промышленной установке ОАО «Уральский трубный завод».

Степень достоверности результатов.

Достоверность результатов работы подтверждается корректным использованием апробированных методов исследований, адекватностью разработанных конечно-элементных моделей, результатов теоретического исследования напряжений в очаге циклической деформации и в бойках установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации с использованием пакета ANSYS и их согласованием с результатами промышленных испытаний на заводе (ОАО «Уральский трубный завод»).

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 12 Международный конгресс прокатчиков, г. Выкса (2019); Международная научно-техническая конференция «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация», г. Санкт-Петербург (2019); 12 Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г Уфа (2019); 3 Международная научно-техническая конференция «Машиностроение: инновационные аспекты развития», г. Санкт-Петербург (2020); Научно-техническая конференция с международным участием «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР»: УрО РАН (2020) и на кафедре «Металлургические и роторные машины» УрФУ (2022).

Личный вклад автора.

Научные положения и результаты работы, выносимые на защиту, основываются на исследованиях, выполненных непосредственно под руководством и с активным участием автора. Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, обоснованном выборе методов решения технических и технологических проблем, проведении промышленных экспериментальных исследований на действующей промышленной установке, анализе и обобщении результатов работы и обоснования всех положений, выносимых на защиту. Апробирование и внедрение в производство предложенных новых технических и технологических решений осуществлялось при непосредственном участии автора.

Публикации.

Материалы диссертации представлены в 39 публикациях, в том числе статей опубликовано в 22 журналах, рекомендованных ВАК, 4-х монографиях, 3-х патентах на изобретения Российской Федерации, 2-х свидетельствах на регистрацию программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи

глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 354 страницах текста, содержит 203 рисунка, 74 таблицы, содержит список использованной литературы из 268 наименований и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении на основе сведений о развитии трубной промышленности в Российской Федерации, возрастающих требований к качеству труб обоснована значимость и актуальность темы диссертации, излагаются цель, задачи диссертации, а также сформулирована научная новизна и приведены основные положения, выносимые на защиту. Данна общая характеристика работы.

В первой главе дан анализ современных представлений по технологии и машинам процессов непрерывного литья и деформации для производства стальных листов и сортовых заготовок.

Выполнен анализ современного состояния технологии и машин обработки давлением по производству стальных листов и сортовых заготовок. При изучении исследований ведущих ученых: Рудского А.И., Радкевича М.М., Колбасникова Н.Г., Колесникова А.Г., Салганика В.М., Шаталова Р.Л., Филиппова Г.А., Лехова О.С. и других исследователей, отмечено, что определяющими фактором является применение эффективных ресурсосберегающих технологий обработки давлением, развитие литейно-прокатных агрегатов и комплексов, а также широкое использование цифровых производственных систем и математического моделирования в процессах обработки давлением.

Указаны особенности технологии и оборудования непрерывной разливки стали, определяющих качество получаемых листа и сортовых заготовок при прокатке и эффективную работу литейно-прокатных комплексов, а также основные положения по математическому моделированию течения жидкой стали при непрерывном литье заготовок, представленные в исследованиях Брайана Г. Томаса (Brian G. Thomas), Дж. Закели, Вдовина К.Н., Куклева А.В., Точилкина В.В., Шахова С.И., Ячикова И.М. и других.

На основе проведенного анализа сформулирована цель диссертационной работы и определены задачи, которые необходимо решить для ее достижения.

Вторая глава посвящена исследованию процессов в системе агрегатов машины непрерывного литья и деформации заготовки (МНЛДЗ).

На рисунке 2 представлена схема установки, которая состоит из неразъемного медного кристаллизатора 1 и двух суппорта 2 с бойками 4. Установка имеет конструкцию медного кристаллизатора, у которого боковые стенки выполнены в виде полукруга с радиусом равным 50 мм. Кристаллизатор 1 имеет постоянный контакт с подвижными бойками 4,

причем он прижимается к ним с помощью специального пружинного механизма. Каждый суппорт с бойками установлен на двух эксцентриковых валах 3.

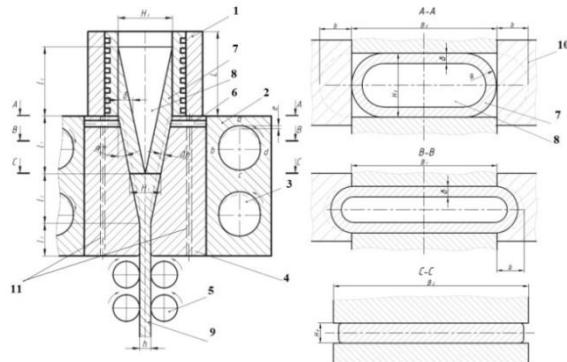


Рисунок 2 – Схема установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации

Синхронное вращение эксцентриковых валов осуществляется от приводного электродвигателя. Вытягивание заготовки из кристаллизатора 1 осуществляется с помощью бойков во время ее обжатия и тянувших роликов во время холостого хода.

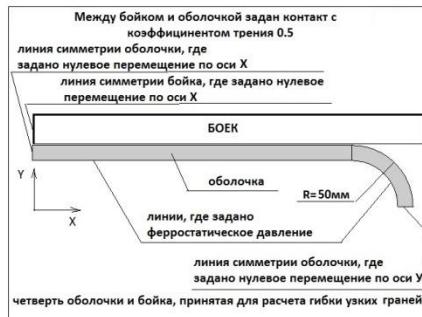


Рисунок 3 – Четвертая часть оболочки, принятая для расчета



Рисунок 4 – Эпюры напряжений в направлении оси Y после полного обжатия оболочки бойками (сближение широких стенок – 74мм). Результаты даны только для узкой грани.
Материал оболочки – 09Г2С

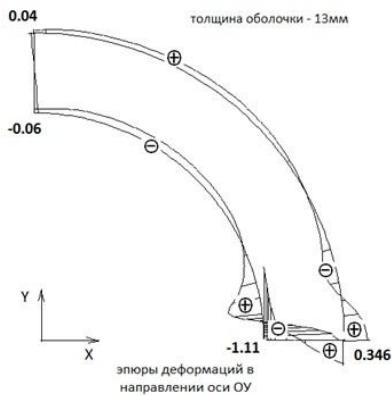


Рисунок 5 – Эпюры деформаций в направлении оси Y после полного обжатия оболочки бойками (сближение широких стенок – 74мм).

При создании установки были разработаны основные положения конструирования - принципы построения компоновок системы и конструкций машин.

Одними из важнейших мест формирования корочки металла являются места перехода узких и широких стенок кристаллизатора. Для получения рациональной конфигурации конструкции слябового кристаллизатора проведено моделирование течения жидкой стали. В кристаллизатор установки (рисунок 2) жидкий металл поступает из промежуточного ковша через специальные стаканы. Жидкая сталь рассматривается как «ньютоновская» жидкость. Движения потоков стали рассматривается как $(k - \varepsilon)$ модель турбулентной вязкости. Метод математического моделирования принят в качестве основного при оценке движения потоков стали в кристаллизаторе установки. Наличие скоростных потоков металла в

центре сечения кристаллизатора и вихревых течений металла в месте углового соединения узких и широких стенок, показывает необходимость применения рациональных сопряжения стенок в части окружности.



Рисунок 6 – Модель для расчета очага деформации. Толщина полосы на выходе – 8 мм. Положение показано перед рабочим ходом

Важную роль имеет оценка напряженного состояния подсистемы бойки-полоса МНЛДЗ при получении стальных листов на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Для оценки параметров промышленной установки непрерывного литья и деформации при получении листа из стали поставлены и решены две задачи по определению НДС металла при формировании полосы в зоне гибки боковых стенок оболочки с жидкой фазой (рисунок 2, участок l_1) и при циклической деформации бойками сляба (рисунок 2, участок l_2).

Для решения изложенных выше задач использован современный пакет ANSYS, который успешно применяется при решении методом конечных элементов контактных задач упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений.

Рассматривается процесс получения листов из стали 09Г2С толщиной 8 мм и 16 мм и шириной 2250 мм. Толщину оболочки слитка с жидкой фазой при выходе из кристаллизатора принимаем равной 15 мм. Высота и ширина оболочки соответственно 100 мм и 2200 мм. Высота расплава металла от мениска до низа кристаллизатора – 625 мм. Температура внутренней поверхности оболочки – 1450 градусов, наружной поверхности в зоне контакта со стенкой–бойком – 1200 градусов. Величина эксцентри-

ситета эксцентрикового вала – 5 мм, угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка – 12,5°. Угол поворота эксцентрикового вала, на котором происходит обжатие заготовки, принят равным 90°. Величина подачи заготовки $S=22,5$ мм. Скорость вытягивания оболочки слитка из неразъемного кристаллизатора $V=2,5$ м/мин. Скорость вращения эксцентриковых валов $n=110$ мин⁻¹. Обжатие сляба происходит на $\frac{1}{4}$ оборота эксцентрикового вала, поэтому время обжатия сляба $t_{обж} = 0,136$ с, а холостого хода – $t_{хх}=0,409$ с.

На рисунке 3 в системе координат ХОУ представлена четвертая часть оболочки, принятая для расчета. На рисунке так же приведены кинематические граничные условия. Для расчетов была принята сетка конечных элементов с длиной грани элемента – 0,5 мм. При расчете значения модуля упругости и сопротивления пластической деформации определялись в зависимости от степени деформации и температуры.

Результаты расчета НДС металла в области узкой грани оболочки с жидкой фазой представлены в виде эпюр напряжений и деформаций (рисунки 4 и 5). Анализ результатов расчета (рисунок 4, таблица 1) показывает, что на наружной поверхности узкой стенки оболочки с жидкой фазой напряжения по оси Y (σ_y) растягивающие и возрастающие по мере гибки от 35,6 до 143,5 МПа, а по оси X (σ_x) – от 10,81 до 94,19 МПа. Анализ эпюр деформаций (рисунок 5) показывает, что на наружной поверхности узкой стенки оболочки деформации, растягивающие и по мере гибки деформации по оси Y (ϵ_y) возрастают с 0,04 до 0,346. Для оценки НДС металла в узких боковых стенках оболочки с учетом их подпора боковыми стенками сборного кристаллизатора выполнен расчет в двух постановках: без учета и с учетом подпора узких стенок.

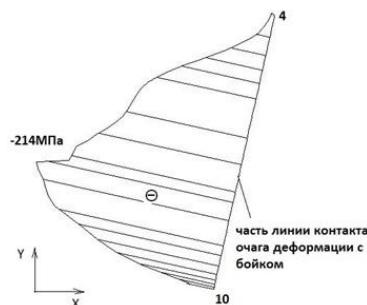


Рисунок 7– Характер напряжений по оси ОХ на части линии контакта очага деформации с бойком. Толщина полосы на выходе – 8мм

Из полученных данных следует, что при гибке боковых стенок обо-

лочки с подпором растягивающие напряжения снижаются с 95,5 МПа до 59 МПа, что будет способствовать снижению вероятности образования трещин на узких стенках оболочки с жидкой фазой.

Геометрическая модель для расчета НДС металла в очаге деформации показана на рисунке 6. Рассмотрим процесс получения листа сечением 8×2250 мм из стали 09Г2С. Толщина полосы после смыкания широких стенок оболочки с жидкой фазой равна 30 мм, то есть обжимается тонкий сляб. Степень деформации полосы за проход при получении листа толщиной 8 мм составляет 73 %.

На рисунке 7 представлен характер распределения напряжений при получении листов толщиной 8 мм из стали 09Г2С.

В таблице 1 приведены выборочные результаты по максимальным напряжениям по поверхности контакта очага деформации с бойком и в области симметрии очага деформации.

Таблица 1
Значение напряжений при получении листов из стали 09Г2С

Толщина получаемого листа, мм		8	16
Максимальное напряжение по оси ОХ, МПа	по линии 3-9	-199	-146
	по линии 4-10	-214	-156
Максимальное напряжение по оси ОУ, МПа	по линии 3-9	-91	-54
	по линии 4-10	-86	-65

Полученные результаты свидетельствуют о благоприятной с позиции получения листов из стали высокого качества схемы напряженного состояния в очаге циклической деформации с преобладанием высоких (до минус 214 МПа) сжимающих напряжений.

Также представлены результаты исследования напряжений в бойках с каналами от усилия обжатия при получении листов из стали для сварных труб.

Модель бойка и характер нагружения представлен на рисунке 8.

Материал бойка – сталь 45ХНМ. Толщина бойка по верхней поверхности – 70 мм. Длина бойка – 570 мм. Диаметр каналов для охлаждения бойка – 20мм. Для расчета в силу симметрии принятая половина бойка.

Расчет напряженного состояния бойка от усилия обжатия выполнен на основе решения объемной задачи теории упругости методом конечных элементов (МКЭ).

В систему уравнений входят:

- уравнение равновесия (без учета инерционных сил); геометрические и физические соотношения и граничные условия.

Поверхность S_1 является рабочей поверхностью бойка, которая контактирует с металлом очага деформации при обжатии заготовки. На данной поверхности задается усилие обжатия.

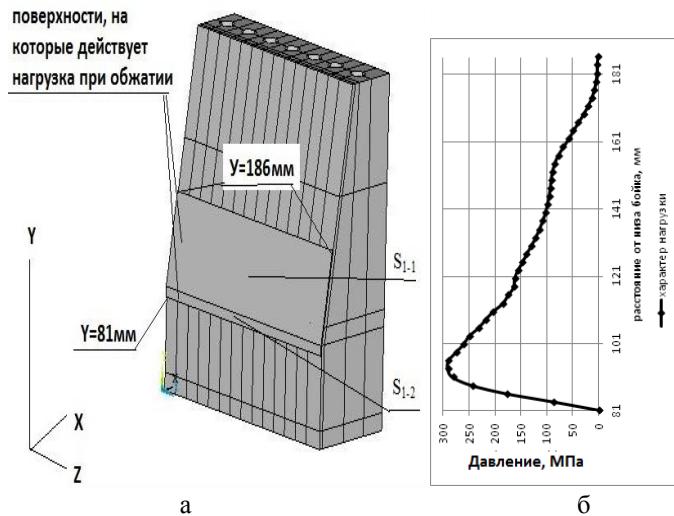


Рисунок 8 – Геометрия стенки бойка (а) и характер ее нагружения (б)

Расчет напряженного состояния бойка в данной постановке производился в пакете ANSYS 15.0. Результаты расчета осевых напряжений в бойках с каналами от усилия обжатия приведены на рисунке 9.

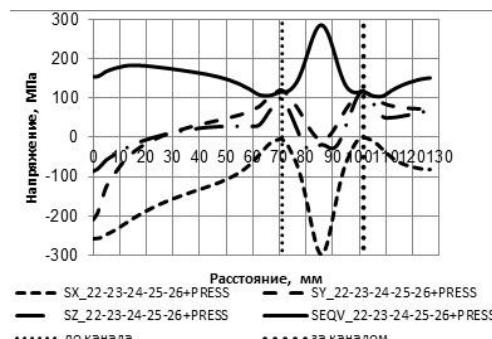


Рисунок 9 – Характер напряжений от воздействия на боек с каналами усилия обжатия

Скачки напряжений в области каналов бойков связаны с наличием концентрации напряжений. Так, по линии, расположенной между каналами, напряжение по оси X равно минус 158 МПа, а по линии, проходящей через канал, – минус 300 МПа. Коэффициент концентрации для данного канала в этом сечении равен $300/158=1,9$. Сжимающие напряжения на контактной поверхности бойка в направлении осей Y и Z, равные соответственно минус 210 МПа и минус 80 МПа, переходят в области канала в растягивающие – величиной 115 МПа и 100 МПа.

В третьей главе изложена методика расчета температурных полей и термоупругих напряжений в бойках установки непрерывного литья и деформации (рисунок 10).

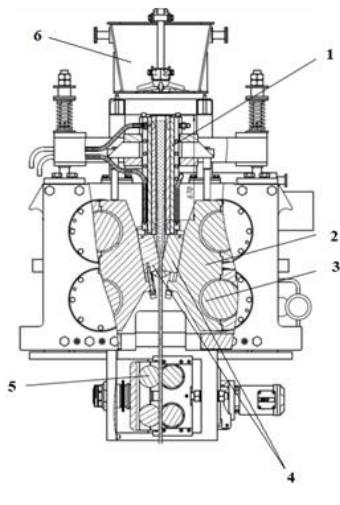


Рисунок 10 – Установка: 1- зона разливки; 2 – подвижные узлы; 3 – валы; 4 – зона деформации; 5 – тянущее устройство; 6 – промежуточный ковш

Используя уравнение для нестационарной теплопроводности (1) с соответствующими начальными и граничными условиями, определялось температурное поле бойков:

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \quad (1)$$

где c – теплоемкость; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности.

Все коэффициенты принимаем в зависимости от температуры бойков.

В работе представлен алгоритм, позволяющий определить поле деформаций и термоупругих напряжений по полю температур в каждый момент времени.

Предполагая, что упругая и температурная деформация аддитивны, основное определяющее соотношение для напряжений представлено в виде

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl} (\varepsilon_{kl} - \alpha_{kl} \Delta T), \quad (2)$$

где α_{kl} – тензор коэффициентов термического расширения; ΔT – изменение температуры, отсчитанное от естественного (ненапряженного и недеформированного) состояния, $\Delta T = T - T_0$.

Для тел, механические и теплофизические свойства которых изотропны, соотношение (2) принимает вид (3):

$$\sigma_{ij} = 2G \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \delta_{ij} - \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha \Delta T \delta_{ij} \right), \quad (3)$$

где G – модуль сдвига; μ – коэффициент Пуассона; δ_{ij} – символ Кронекера;

e – объемное расширение, $e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$.

Последнее слагаемое в правой части формулы (3) отражает влияние на напряжения температурной деформации.

Для определения термоупругих напряжений в бойке необходимо:

- на первом этапе в каждый момент времени определить температурное поле во всех узлах конечно-элементной сетки;
- на втором этапе для данного момента времени решить объемную задачу теории упругости. Тогда разрешающие уравнения (2) – (3) позволят найти температурные перемещения во всех узлах конечно-элементного разбиения, а затем определяются и температурные деформации, и напряжения.

Данная схема выполнения расчетов реализована с помощью программного комплекса ANSYS 15. Для решения задачи нестационарной теплопроводности необходимо задать плотность теплового потока от металла очага деформации при обжатии сляба и эффективный коэффициент теплоотдачи при охлаждении водой рабочей поверхности бойка во время холостого хода.

В ходе проведения численного эксперимента определена плотность теплового потока по средней температуре полос толщиной 10 мм и шириной 240 мм из стали 09Г2С, полученных на опытно-промышленной установке непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод». Определение плотности теплового потока и эффективного коэффи-

циента теплоотдачи по экспериментально замеренной температуре бойков выполнено путем решения нестационарной задачи теплопроводности методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS. Время контакта бойков с полосой – 0,15 с. Время паузы (холостого хода) – 0,45 с. Во время обжатия сляба для контактной (рабочей) поверхности бойка задается граничное условие в виде плотности теплового потока, величину которого и надо определить. Во время паузы контактная поверхность бойка охлаждается водой с температурой 35 °C. В этом случае для нее задается граничное условие в виде эффективного коэффициента теплоотдачи α_1 .

В таблице 2 представлено изменение значений температур для бойков без каналов и с каналами при плотности теплового потока $q = 4 \text{ МВт}/\text{м}^2$, при коэффициентах α_1 2000 и 3000 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Значение этого коэффициента определено на основании опытных данных и для расчета принято значение $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Таким образом, для обеспечения средней температуры на контактной поверхности бойка на уровне 350°C, что было установлено ранее, при $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ значение плотности теплового потока получилось равным 4 $\text{МВт}/\text{м}^2$.

Таблица 2
Значения температур при установившемся поле для бойка
без каналов и бойка с каналами

На ли- нии	Значение температуры			
	На поверхности контакта		На глубине 5 мм	Со стороны суп- порта
	В конце контакта	В конце паузы		
Бойк без каналов при $q=4 \text{ МВт}/\text{м}^2$, $\alpha_1=2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$				
P_1	442	350	369	306
P_2	456	362	385	297
P_3	460	366	390	291
P_4	455	362	385	286
Бойк с каналами при $q=4 \text{ МВт}/\text{м}^2$, $\alpha_1=2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$				
P_1	302	233	225	42
P_2	366	296	306	36
P_3	370	298	308	36
P_4	366	295	304	36

Анализ данных свидетельствует о снижении температуры рабочей поверхности бойка в зоне очага деформации с 460 до 370 °C, на глубине 5 мм – с 390 до 308 °C, а в конце паузы – с 366 до 298 °C. Таким образом,

использование бойков с каналами, охлаждаемыми водой позволяет снизить температуру рабочей поверхности бойка на 90 °C.

Расчет напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации и термоупругих напряжений в бойках установки непрерывного литья и деформации, представлены в свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Четвертая глава посвящена расчету температурных полей и термоупругих напряжений бойков с каналами и без них и выбору материала бойков при получении стальных листов на установке непрерывного литья и деформации. Актуальной задачей является обоснованный выбор конструктивных параметров и материала бойков.

Для сравнительной оценки напряженного состояния бойков различной конструкции рассмотрено два их конструктивных исполнения: с каналами для их охлаждения и без каналов. В таблице 3 представлены данные напряженного состояния бойков различной конструкции, по которым можно оценить влияние каналов на характер распределения температуры по толщине и длине бойка.

Таблица 3

Напряженное состояние бойков различной конструкции
при получении листов из стали для сварных труб
на установке непрерывного литья и деформации

Конструкция бойка, $q=4 \text{ MBT/m}^2$	Температура 380-400	Напряжения от усилия обжатия, МПа						Термоупругие напряжения, МПа						Суммарные напряжения, МПа					
		SX		SY		SZ		SX		SY		SZ		SX		SY		SZ	
		кп	ок	кп	ок	кп	ок	кп	ок	кп	ок	кп	ок	кп	ок	кп	ок	кп	ок
Боек с каналами	-275	-200	-300	-210	-120	-100	-140	-50	-50	-530	-600	-110	-730	-140	-324	-280	-670	-180	220
Боек без каналов	510-535	-	-233	-	-115	-	-	-	-	-	-831	-	-910	-	-324	-	-967	-	-

Примечание: кп – контактная поверхность бойка, ок – область канала бойка.

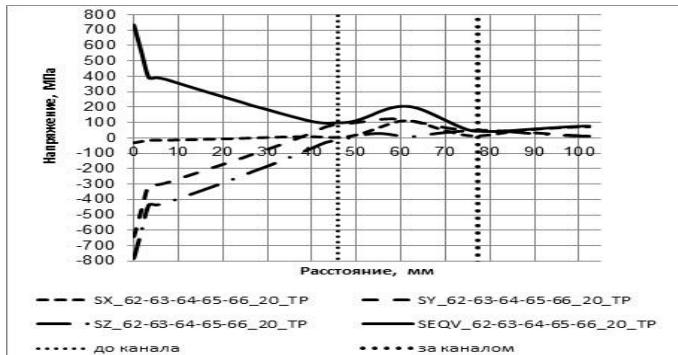


Рисунок 11 – Характер термоупругих напряжений по толщине бойка от воздействия на боек температурного поля при обжатии заготовки

Скачки напряжений в области каналов бойков связаны с наличием концентрации напряжений. На втором этапе расчета следует определить температурные поля и осевые термоупругие напряжения в бойках с каналами и без них. При расчете температурного поля приняты граничные условия:

- в каналах охлаждение водой с коэффициентом теплоотдачи 7000 Вт/(м²·К) и температурой воды 35 °C;
- на рабочую поверхность бойка во время обжатия заготовки в течение 0,136 с. действует плотность теплового потока 4 МВт/м².

Во время холостого хода эффективный коэффициент теплоотдачи – 2000 Вт/(м²·К). Результаты расчета приведены в таблице 2. Во время обжатия заготовки контактная поверхность бойка с каналами нагревается до температуры 380–400 °C и далее на холостом ходу на глубине 2–3 мм уменьшается до 170–200 °C. При обжатии заготовки бойками без каналов их контактная поверхность нагревается до температуры 510 – 535 °C. Для рассчитанных полей температур были определены величины и закономерности распределения осевых и эквивалентных термоупругих напряжений в бойках с каналами и без них при обжатии заготовки (см. таблицу 3). На контактной поверхности возникают высокие сжимающие термоупругие напряжения, достигающие минус 730 МПа, которые в области каналов переходят в растягивающие величиной от 110 до 140 МПа (см. таблицу 3 и рисунок 11). Таким образом, каналы для охлаждения бойков не только приводят к возникновению в области канала высоких растягивающих напряжений (до 220 МПа), но и существенно повышают уровень сжимающих суммарных напряжений до минус 840 МПа.

Сравнительный анализ напряженного состояния бойков с каналами и без них показал, что каналы являются концентраторами напряжений, поскольку они в области каналов повышают уровень осевых сжимающих напряжений от усилия обжатия и температурной нагрузки, а также приводят к возникновению осевых растягивающих термоупругих напряжений. Но при этом, каналы в бойках позволяют снизить на 130 °С температуры их контактной поверхности в сравнении с бойками без каналов и, соответственно, снизить максимальные термоупругие напряжения с минус 910 МПа до минус 730 МПа, а максимальные осевые суммарные напряжения с минус 1033 МПа до минус 780 МПа (см. таблицу 3).

Экспериментально замеренные температуры контактных поверхностей бойков опытно-промышленной установки ОАО «Уральский трубный завод» позволили оценить уровень термоупругих напряжений и обоснованно выбрать материал бойков.

В результате замера температур контактной поверхности бойков после выхода из них стальной полосы установлено, что эта температура в отдельных случаях может достигать 500 °С. При этой температуре величина сжимающих термоупругих напряжений на контактной поверхности бойков равна минус 910 МПа. С учетом вышеизложенного бойки опытной установки непрерывного литья и деформации изготовлены из стали 4Х4ВМФС. Это штамповая сталь, которая имеет повышенную стойкость к образованию трещин разгара и износостойкость, предел текучести которой при температуре 500°C равен 1309 МПа, что значительно превышает величину максимальных термоупругих напряжений от температурной нагрузки. Результаты исследования также позволяют установить требования к системе охлаждения бойков, чтобы температура их контактных поверхностей не превышала 500 °С.

В пятой главе представлены особенности получения сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации и оценка НДС. В современной металлургии технологический процесс производства сортовых заготовок отличается высокими капитальными, эксплуатационными и энергетическими затратами.

При развитии производства сортовых заготовок может быть эффективно использована компактная установка для одновременного получения трех и более сортовых заготовок за один проход.

Сущность способа непрерывного литья сортовых заготовок представлена на рисунке 12, а. Сталь 14 располагается в зоне разливки - кристаллизаторе 1. В данной зоне формируется оболочка 15 с корочкой. На оболочку воздействуют бурты стенок-бойков 8 и 9, высота которых постепенно увеличивается в направлении непрерывного литья. По мере продвижения оболочки 15 с жидкой фазой 14 через калиброванные стенки-

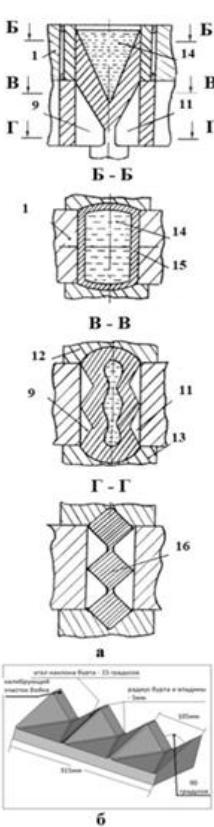


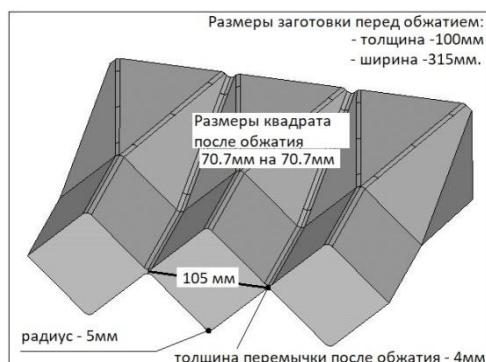
Рисунок 12 – Технология и конструкции установки для получения сортовых заготовок: а – технология; б - боек

Рисунок 13 – Сортовые заготовки соединенные перемычками

бойки 8 и 9 разъемного кристаллизатора, происходит путем гибки стенок оболочки 15. Формирование нескольких сортовых заготовок, при этом происходит циклическое вытеснение жидкого металла из полостей сортовых заготовок. По мере продвижения сортовых заготовок с жидкой фазой происходит одновременное смыкание четырех стенок каждой заготовки с исключением жидкой фазы и образование нескольких сортовых заготовок, соединенных перемычками.

После полного исключения жидкой фазы из сортовых заготовок происходит одновременное их обжатие поверхностями разделяющих выступов по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Разделение заготовок, соединенных перемычками на отдельные заготовки, осуществляется после их выхода из кристаллизатора

В установке для получения сортовых заготовок калибровка бойков с разделяющими выступами (рисунок 12, б) выполнена таким образом, что при сведенном положении бойков они в совокупности образуют закрытую полость кристаллизатора, которая обеспечивает на выходе из него одновременное получение нескольких сортовых заготовок, соединенных перемычками (рисунок 13).



Рассмотрим процесс получения на установке из сляба толщиной 100 мм и шириной 315 мм трех сортовых заготовок (квадрат 70,7 мм) из стали Ст3. Сечение полости медного водоохлаждаемого кристаллизатора 100×315 мм. Температуры равны: внешней поверхности непрерывнолитой заготовки 1200 °C, в осевой зоне – 1450 °C.

Геометрическая модель для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) металла в очаге деформации дана на рисунке 14. Результаты расчета НДС металла в очаге деформации при формировании сортовых заготовок получены решением задачи упруго-пластичности в объемной постановке методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS.

Результаты расчета напряжений в очаге деформации даны в виде графиков по рабочим поверхностям в четырех поперечных сечениях, вид которых приведен на рисунке 15. На каждом сечении для удобства представления результатов показаны по семь характерных точек (см. рисунок 16).

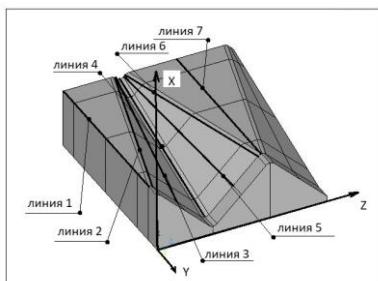


Рисунок 14 – Линии для оценки напряжений

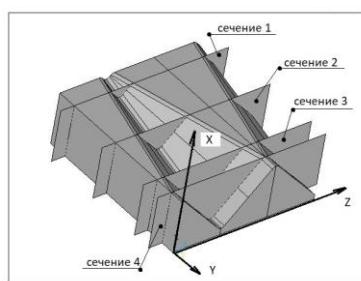


Рисунок 15 – Сечения для оценки напряжений

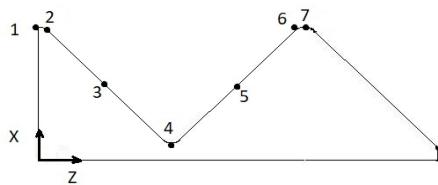
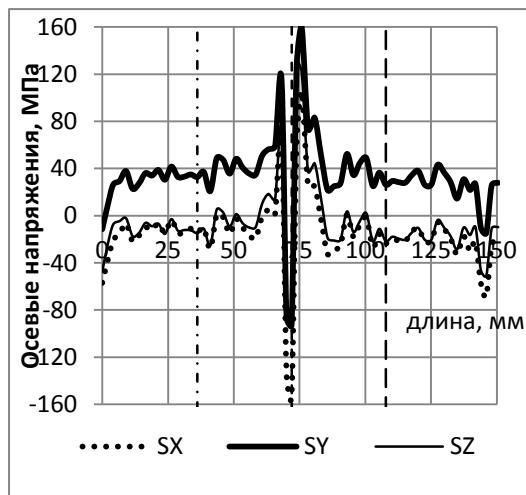


Рисунок 16 – Вид сечения 4. Положение точек для представления результатов по развертке периметра сечения

На рисунке 17 приведены результаты расчета напряжений по длине впадины сечения 4 очага деформации.



минус 76,1 МПа, которые затем переходят в растягивающие максимальной величиной 105 МПа, 160,2 МПа и 122,3 МПа.

Рассмотрена специфика работы бурта бойка в заготовку толщиной 100 мм на величину 48 мм. Часть заготовки и линии для оценки напряжений представлены на рисунке 18.

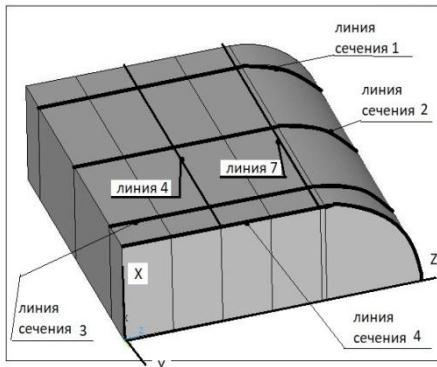


Рисунок 18 – Линии для оценки напряжений

Рисунок 17 – Осевые напряжения по развертке части периметра сечения 4. Начало графика в точке «2». Разворотка по точкам 2-3-4-5-6.

Характер распределения осевых напряжений по длине впадины сечения 4 показан на рисунке 17. Напряжения в направлении осей X, Y и Z в точке 4 впадины сжимающие и достигающие соответственно величин минус 154,7 МПа, минус 92,9 МПа и растягивающие максималь-

Напряжения в направлении оси X по мере внедрения бурта в сляб возрастают и достигают наибольшей величины, равной минус 230 МПа, в зоне впадины сечения 4. В зоне впадины напряжения в направлении оси Y сжимающие и в сечении 4 имеют максимальное значение, равное минус 200 МПа (см. рисунок 19).

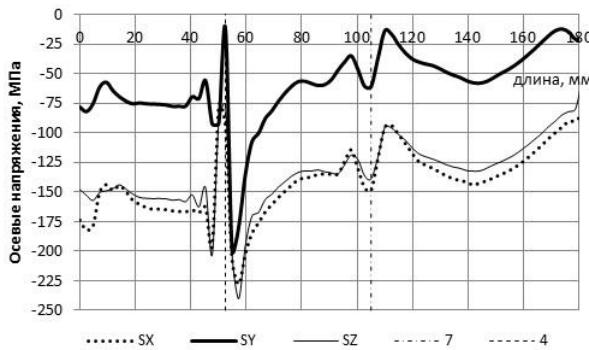


Рисунок 19 – Напряжение по развертке линии сечения 4 при обжатии сляба на 48 мм: 4 - соответствует впадине на получаемой заготовке; 7 – соответствует ребру поверхности

Шестая глава посвящена исследованию напряжений в бойках с буртами при получении стальных сортовых заготовок на установке совмещенного непрерывного литья и деформации.

Наиболее нагруженными элементами установки при получении сортовых заготовок являются бойки с разделяющими буртами, которые во время рабочего хода одновременно формируют несколько сортовых заготовок и вытягивают стальной сляб из кристаллизатора. При этом в калиброванных бойках возникают суммарные напряжения от усилия обжатия и температурной нагрузки, которые снижают их стойкость.

Геометрия и характер нагружения бойка представлен на рисунке 20. Результаты расчета напряжений приведены для четырех сечений, показанных на рисунке 15.

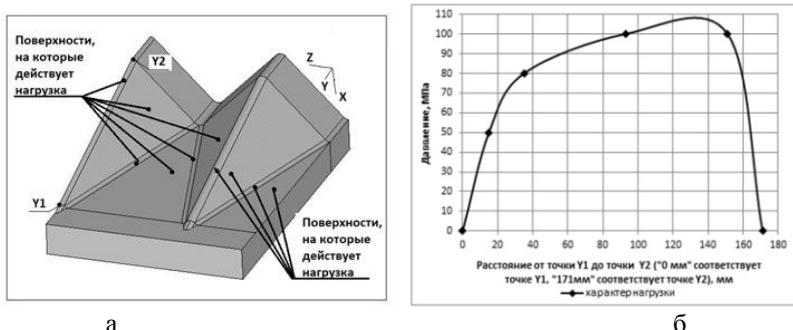


Рисунок 20 – Модель для расчета (а) и характер нагружения бойка (б)

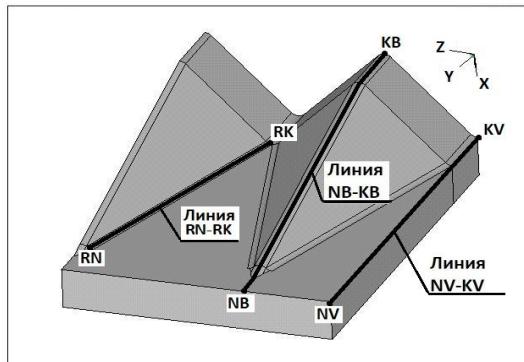


Рисунок 21 – Положение линий по высоте бойка во впадине, на бурте и в зоне радиуса

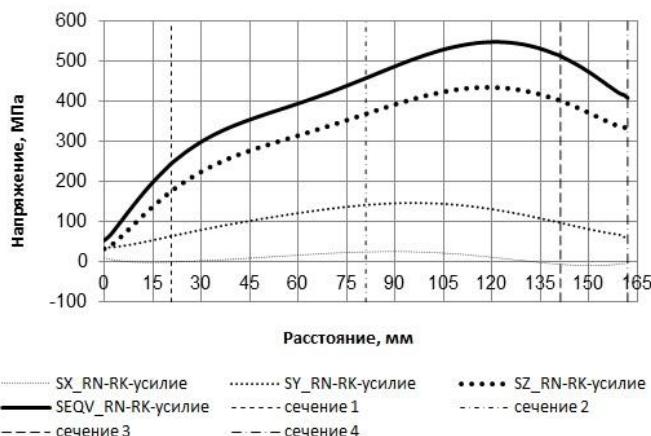


Рисунок 22 – Характер напряжений вдоль линии RN-RK от воздействия на боек усилия обжатия при рабочем ходе

Результаты расчета приведены по трем линиям по высоте бойка, положение которых дано на рисунке 22.

Особый интерес представляет характерная точка 2 – это вершина разделяющего бурта, и по длине бурта она расположена на линии NB-KB (см. рисунки 21). В этой точке по всей длине бурта возникают сжимающие напряжения, достигающие наибольших значений в направлении осей

X и Z в сечении 3 и соответственно равные минус 112 МПа и минус 113 МПа.

Наиболее нагруженной зоной калиброванного бойка является крайний бурт бойка от линии RN-RK (зоны радиуса), который формирует одну сторону сортовой заготовки. При воздействии нормального давления на рабочую поверхность крайнего бурта в его основании по линии RN-RK (см. рисунки 21 и 22) возникают в направлении оси Z высокие растягивающие напряжения, которые по длине бурта (точка 5) возрастают от 177 МПа в сечении 1 до 402 МПа в сечении 3.

Расчет температурного поля бойка выполнен для следующего варианта: на рабочую поверхность бойка во время рабочего хода в течение 0,375 с. действует плотность теплового потока в – 4 МВт/м². Во время паузы (1,125 с.) – эффективный коэффициент теплоотдачи 2000 Вт/(м²·К).

На рисунках 23 и 24 даны результаты расчета температуры по линиям NB-KB и RN-RK (положение линий на рисунке 21).

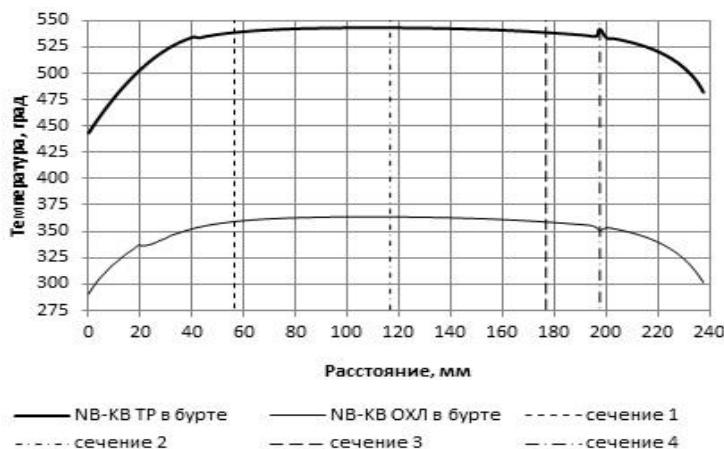


Рисунок 23 – Характер температур вдоль линии «NB-KB» в бурте» от воздействия на боек теплового потока (TP) и охлаждения водой (OХЛ)

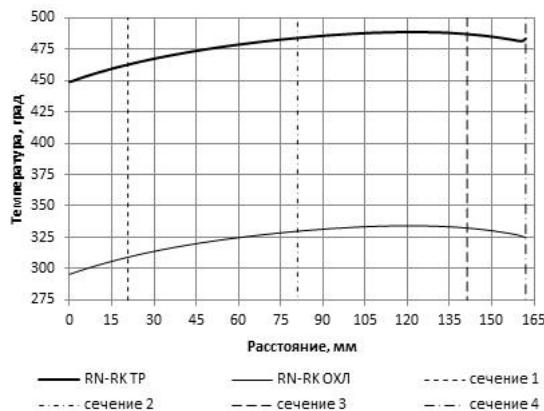


Рисунок 24 – Характер температур вдоль линии «RN-RK» от воздействия на боек теплового потока (TP) и охлаждения водой (ОХЛ)

На рисунке 25 представлены графики распределения термоупругих напряжений вдоль линии NB-KB при обжатии сляба и на холостом ходу. Из графиков следует, что термоупругие напряжения при обжатии сляба в направлении осей Y и Z сжимающие, достигающие наибольших величин соответственно минус 530 МПа и минус 261 МПа.

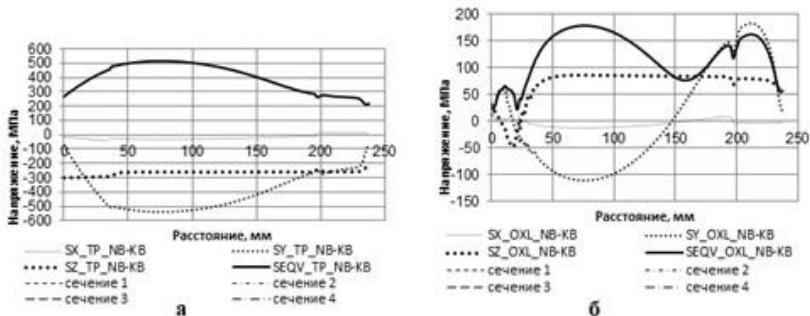


Рисунок 25 – Характер термоупругих напряжений вдоль линии NB-KB от воздействия на боек теплового потока (TP) и охлаждения водой (ОХЛ): а – в конце контакта; б – в конце паузы

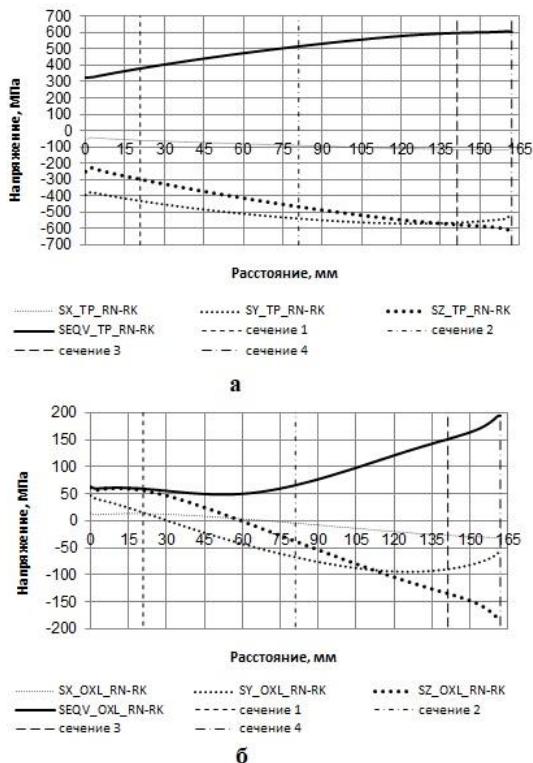


Рисунок 26– Характер термоупругих напряжений вдоль линии RN-RK от воздействия на бойк теплового потока (TP) и охлаждения водой (ОХЛ): а – в конце контакта; б – в конце паузы

Другой характер распределения имеют термоупругие напряжения на холостом ходу, где они в направлении оси Y в начале бурта растягивающие величиной до 60 МПа, затем по длине бурта переходят в сжимающие величиной минус 112 МПа, а далее в сечениях 3 и 4 становятся растягивающими с наибольшей величиной 128 МПа.

На рисунке 26 пока-

заны закономерности распределения осевых термоупругих напряжений по линии RN-RK, которая расположена в основании крайнего бурта (см. рисунок 21) при обжатии сляба и на холостом ходу. При обжатии сляба все осевые термоупругие напряжения сжимающие и достигающие в направлении оси Z наибольшей величины 610 МПа в сечении 4. Во время холостого хода осевые термоупругие напряжения по оси Z в сечении 1 растягивающие величиной до 62 МПа, которые по длине очага деформации переходят в сжимающие и достигающие максимальной величины.

Особый интерес представляют суммарные напряжения в точке 5 основания крайнего бурта калиброванного бойка, в которой возникают высокие (до 402 МПа) растягивающие напряжения от усилия обжатия (рисунок 27). Однако суммарные напряжения от усилия обжатия и температурной нагрузки в этой точке становятся сжимающими и изменяются по длине очага деформации в направлении оси Y от минус 367 МПа до минус 452 МПа, а в направлении оси Z – от минус 122 МПа до минус 280 МПа.

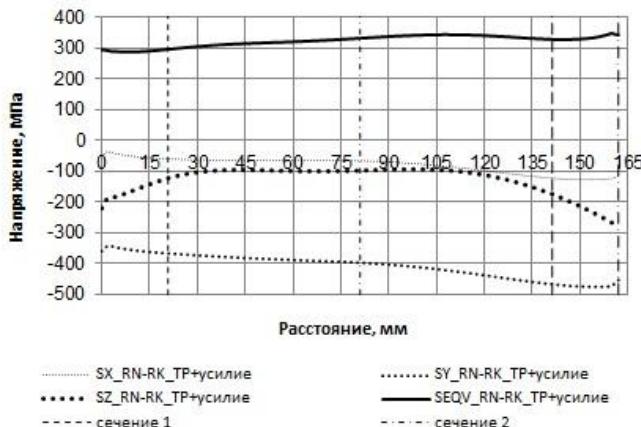


Рисунок 27 – Характер суммарных напряжений вдоль линии RN-RK от воздействия на боек температурного поля и усилия обжатия при рабочем ходе



Рисунок 28 – Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации: а - с затравкой перед разливкой; б – кристаллизатор; в – промежуточный ковш со стопором моноблоком; г - гнездовой блок с разливочным отверстием

Седьмая глава изложены результаты внедрения и опытно-промышленных испытаний. На рисунке 28 представлена модель опытной установки для получения полос толщиной 3–22 мм и шириной 220 мм из стали для сварных труб, которая установлена на ОАО «Уральский трубный завод».

Движение бойков обеспечивают четыре эксцентриковых вала с величиной эксцентричности 5 мм. Установка приводится в действие электродвигателем постоянного тока мощностью 200 кВт и номинальной частотой вращения 500 мин⁻¹ с возможностью регулировки. Номинальный момент электродвигателя 3800 Н·м.

Схема алгоритма по проектированию агрегатов и узлов установки для непрерывной разливки и деформации представлена на рисунке 29.

Опыт изготовления стального листа показывает, что при обжатии крупных непрерывно литых слабов на станах толстолистовой прокатки в его осевой зоне литая структура недостаточно прорабатывается, полная перекристаллизация не происходит, а неметаллические включения и ликвации трансформируются в осевую ликвационную полосу в направлении прокатки, раскрытий и других дефектов встыковой сварке труб привело к возникновению неустранимых дефектов и браку. По результатам проведения микрорентгеноспектрального анализа, повышение осевой ликвационной неоднородности трубного металла связано с ликвацией серы, фосфора, марганца и углерода. Повышенное содержание этих элементов приводит к увеличению твердости и микротвердости металла в зонах ликвации, а превышение твердости выше значений 250-300 единиц по HV10 способствует образованию холодных трещин при стыковой сварке и может привести к коррозионному растрескиванию под напряжением.

В данной работе использован алгоритм проектирования, приведенный на рисунке 29.



Рисунок 29 – Алгоритм проектирования агрегатов машины

В результате можно сказать, что основной проблемой при производстве стальных листов для сварных труб является обеспечение благоприятной схемы напряженного состояния металла в очаге деформации, исключение ликвационных зон с повышенной твердостью и получение высоких механических свойств тонколистового проката.

С целью разработки рациональных режимов технологического процесса при получении стальных полос способом непрерывного литья и деформации слитка на опытно-промышленной установке ОАО «Уральский трубный завод» в ходе экспериментальных работ получены полосы разной длины и толщины из стали 09Г2С (рисунок 30 и 31).

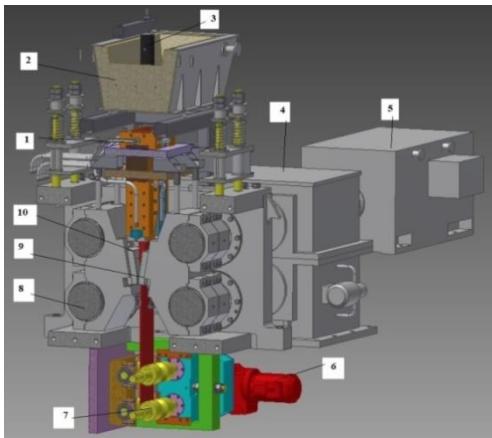


Рисунок 30 – Установка непрерывного литья и деформации:
1 – водоохлаждаемый медный кристаллизатор; 2 – промежуточный ковш; 3 – стопор –моноблок промежуточного ковша; 4 – редуктор –синхронизатор; 5 – приводной электродвигатель; 6 – тянувшее устройство;
7 – ролики тянувшего устройства; 8 – комплект валов установки деформации; 9, 10 – бойки

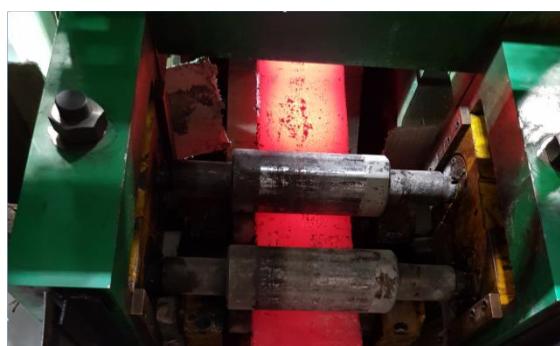


Рисунок 31 – Выход полосы в зоне вторичного охлаждения

Для проведения комплексных металлографических исследований были подготовлены образцы, вырезанные из полосы толщиной 16 мм и шириной 210 мм. Поперечное сечение полосы и схема вырезки образцов показано на рисунке 32.

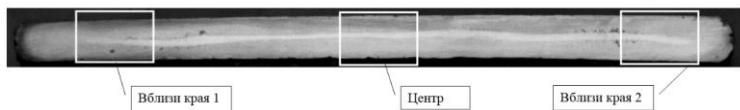


Рисунок 32 – Полоса в разрезе

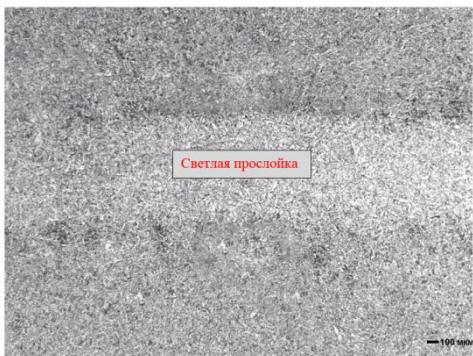


Рисунок 33 – Макроструктура полосы в осевой зоне, $\times 50$

Как видно, характерной особенностью макроструктуры получаемых полос является наличие более светлой прослойки в центральной части поперечного сечения металла. Детальный металлографический анализ этой зоны по всей длине прослойки показал, что в ней отсутствует строчечное расположение ликватов и не выявлено каких-либо других дефектов, непременно сопровождающих кристаллизацию непрерывно литых заготовок (см. рисунок 33).

Более того, в осевой зоне не произошло расслоение металла и не образовалась усадочная пористость. Все эти показатели отражают высокое качество металла полосы. Исследование микроструктуры металла проведены на металлографическом микроскопе Olympus BX51 и сканирующем электронном микроскопе Tascan MIRALMV при разной кратности увеличения (рисунок 35).

Из представленных данных видно, что в исследуемой стали по всему сечению полосы сформировалась в результате обработки в условиях непрерывного литья и деформации поликристаллическая не текстурированная ферритно-перлитная структура с достаточно высокой степенью разнозернистости. В области светлой прослойки разнозернистость выше с размером зерен от 20 до 200 мкм (рисунок 34, б, г)

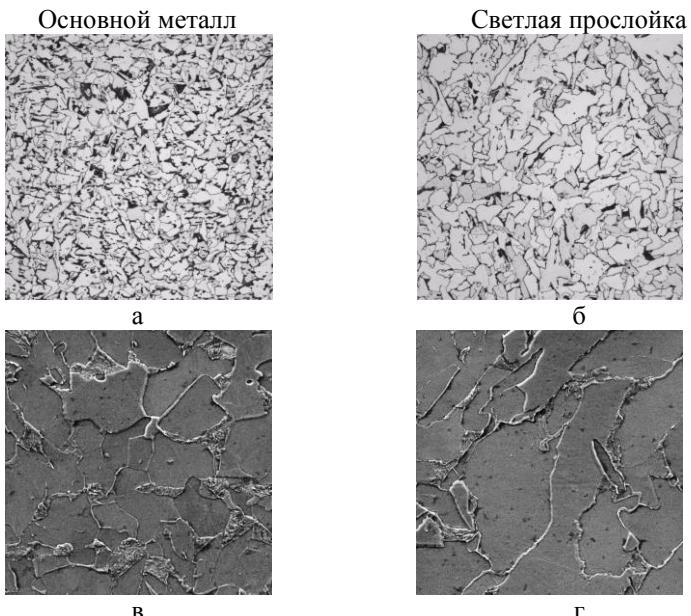


Рисунок 34 – Микроструктура металла полосы в разных зонах сечения: а, б – оптическая металлография, $\times 150$; в, г – растровая микроскопия, $\times 630$

Ближе к поверхности полосы микроструктура стали также ферритно-перлитная, однако, с меньшей степенью разнозернистости и более мелкозернистая с размером зерна в пределах 20-100 мкм.

Использование растрового электронного микроскопа в режиме «вторичных электронов» позволило получить контраст и определить расположение разных фаз на поверхности образца. Зерна феррита, имеющие более гладкие поверхности, легко выявляются в структуре, и их суммарная доля детерминирует структуру светлой прослойки как преимущественно ферритную.

Для контроля химического состава стали в разных участках и зонах полосы использовали атомно-эмиссионный спектрометр Spectrotest.

При проведении количественного анализа химического состава середины и краевых частей полосы обнаружено, что в середине полосы содержание основных элементов стабильно меньше, чем в остальной ее части: углерода на (31-63) %, серы на (25-33)%, фосфора на (19-89)%, кремния на (5-7)%, марганца на (3-7)%, хрома на (3-9)%, меди на (2-13)%, никеля на (3-5)%.

Измерение твердости, косвенно характеризующее механические свойства сплава, проведено в поперечном сечении полосы и вдоль светлой прослойки с использованием микротвердометра Zwick ZNV-1M. Полученные результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3
Параметры стальной заготовки

Параметр	Зоны оценки						
Места проведения измерений и микроструктура показаны на рисунке 4							
№ замера	1	2	3	4	5	6	7
Микротвердость, HV	161	165	162	141	164	161	158
Место анализа	Основной металл			Светлая прослойка	Основной металл		
Среднее, HV	163			141	161		

Из полученных данных следует, что твердость светлой прослойки в среднем практически на 15 % меньше твердости основного металла.

Подобное сочетание свойств в листе трубной заготовки весьма полезно при производстве трубы методом высокочастотнойстыковой сварки, а также позволяет обеспечить достаточно высокий уровень прочностных характеристик самой трубы при удовлетворительной вязкости и хладостойкости.

Определяющим фактором, обуславливающим пониженные прочностные характеристики в центральной светлой прослойке, является формирование преимущественно ферритной микроструктуры в этой зоне полосы по сравнению с основным металлом и резким снижением здесь концентрации углерода.

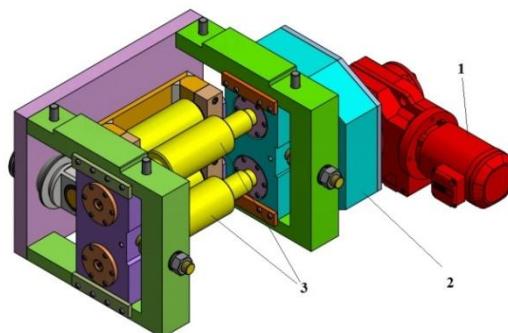
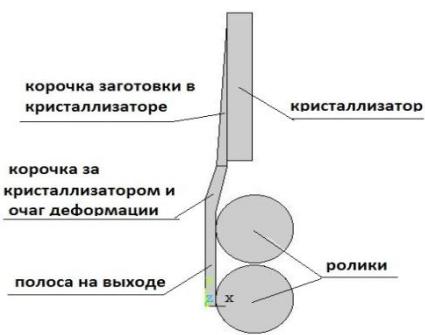


Рисунок 35 – Тянувшее устройство установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации: 1 – приводной двигатель; 2 – редуктор; 3 - ролики

Важную роль в работе установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации играет тянувшее устройство (рисунок 35), которое на холостом ходе вытягивает из кристаллизатора на заданную величину сляб с жидкой фазой, обеспечивая тем самым выполнение заданной производительности установки

Таким образом, очень важно определить усилия прижатия роликов, которые бы обеспечивали вытягивание полосы и не создавали в ней пластические деформации. Одновременно с определением усилия прижатия необходимо определить усилие вытягивания сляба из кристаллизатора и напряжения в полосе. Расчет выполнен для случая вытягивания полосы толщиной 8 мм и шириной 2250 мм из стали 09Г2С. Для определения НДС металла в вытягиваемой полосе решена плоская упругопластическая задача. Расчет выполнен методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS 15.0.

Диаметр роликов равен 120 мм и 310 мм. Температура внутренней поверхности оболочки в неразъемном кристаллизаторе и наклонном участке – 1450 °C, наружной поверхности в зоне контакта с неразъемным кристаллизатором наклонном участке - 1200°C. По толщине стенки оболочки температура меняется линейно. Температура полосы за зоной очага де-



формации принята равной 1100 градусов. Геометрическая модель для расчета усилия прижатия роликов при вытягивании полосы толщиной 8мм во время холостого хода показана на рисунке 36. И за ним, очаг деформации, полоса на выходе из кристаллизатора толщиной 8 мм. Так же в модель входят стенка неразъемного кристаллизатора и два ролика.

Рисунок 36 - Геометрическая модель для расчета усилия прижатия роликов

При создании конечно-элементной модели приняли кристаллизатор абсолютно жестким, что позволило снизить размерность модели. Кристаллизатор при этом моделировался линией контакта внутренней стенки кристаллизатора с оболочкой с жидкой фазой. Ролики тянувшего устройства приняты абсолютно жесткими, что позволило вводить в контакт только

образующие роликов. Конечно-элементная модель приведена на рисунке 37.



Рисунок 37 - Конечно - элементная модель для расчета усилия прижатия роликов

Для расчета в модель включены три контактные пары:

- между оболочкой и кристаллизатором;
- между первым роликом и полосой;
- между вторым роликом и полосой.

Каждая контактная пара связана со своим pilotным узлом, на которые задаются граничные условия. На плоскости симметрии заданы кинематические граничные условия – отсутствие нормальных перемещений. При высоте расплава металла в кристаллизаторе, равной 625 мм, на мениске величина ферростатического давления равна нулю, а внизу кристаллизатора – 0,438 МПа. По высоте металла изменения ферростатического давления приняты линейными.

К pilotному узлу, связанному с контактной парой между оболочкой и кристаллизатором, приложены кинематические граничные условия – отсутствие перемещений кристаллизатора по горизонтали и вертикали.

К pilotным узлам, связанным с каждым роликом и полосой, приложены кинематические и статические граничные условия:

- отсутствие перемещений ролика по вертикали;
- угол поворота роликов для обеспечения вытягивания полосы на 15 мм;
- нормальные (по горизонтали) усилия прижатия роликов, которые бы обеспечивали вытягивания полосы и не создавали в ней пластические деформации.

Поскольку усилие прижатия и угол поворота роликов для обеспечения вытягивания заготовки из кристаллизатора на 15 мм заранее неизвестны, то их нахождение было связано с большим количеством вариантов расчета.

При расчете для коэффициентов трения между роликами и полосой принятые два значения – 0,025 и 0,4, а в кристаллизаторе – 0,3 и 0,5.

Расчет выполнялся для двух диаметров роликов – 120 мм и 310 мм.

При моделировании использован четырехузловой твердотельный конечный элемент PLANE 182 с опцией плоской деформации. Для создания контактов использованы элементы TARGE 169 и CONTA 172. Элементы CONTA 172 располагались на затвердевшем металле в кристаллизаторе и на полосе, а элементы TARGE 169 – на линиях, эмитирующих внутреннюю стенку кристаллизатора и образующих поверхностей роликов.

В результате при моделировании число элементов и узлов равно в модели с роликами диаметром 120 мм соответственно 105116 и 105297, а для модели с роликами диаметром 310 мм - соответственно 151248 и 151353. Размер элементов принят равным 0,1мм.

Поскольку решалась контактная задача с учетом физической и геометрической нелинейности, то весь процесс расчета необходимо было разбить на шаги и подшаги.

Для получения результатов расчета с погрешностью не более 5 процентов весь процесс вытягивания был разбит на 2 шага, а каждый шаг разбивался на 10000 подшагов. На шаге 1 задавались все вышеописанные граничные условия, за исключением углов поворота роликов (на этом шаге угол поворота роликов принимался равным нулю), а на втором шаге в дополнение к граничным условиям на шаге 1 для роликов задавался угол поворота.

Подбор величины усилия прижатия и угла поворота роликов производился итерационно.

При подборе усилия прижатия для варианта с диаметром ролика 120 мм, коэффициентах трения в кристаллизаторе – 0,3, в роликах – 0,4 потребовалось выполнить 5 вариантов расчета. Время расчета каждого варианта – от 6 до 8 часов машинного времени. Для роликов диаметром 310мм потребовалось выполнить 7 вариантов. Время расчета каждого варианта – 7 - 9 часов.

Результаты расчета для роликов диаметром 120 мм и 310 мм при трении в кристаллизаторе и роликах соответственно 0,3 и 0,4 приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4

Результаты для роликов диаметром 120мм при трении в кристаллизаторе и роликах соответственно 0,3 и 0,4. Полоса 8x2250 мм

Усилие на один ролик, кН	Усилие вытягивания, кН	Обжатие под роликом, мм	Напряжение по Мизесу под роликом, МПа	Деформация под роликом, %	Напряжение по Мизесу в полосе, МПа
129	17,415	0,005	32,9	0,21	0,83

Таблица 5

Результаты для роликов диаметром 310мм при трении в кристаллизаторе и роликах соответственно 0,3 и 0,4. Полоса 8x2250 мм

Усилие на один ролик, кН	Усилие вытягивания, кН	Обжатие под роликом, мм	Напряжение по Мизесу под роликом, МПа	Деформация под роликом, %	Напряжение по Мизесу в полосе, МПа
146,25	17,415	0,006	31,7	0,19	0,83

Расчет при коэффициенте трения между полосой и роликами не 0,4, а 0,25 практически не изменил результаты.

Расчет при коэффициенте трения между закристаллизовавшейся оболочкой с жидкой фазой и стенками кристаллизатора не 0,3, а 0,5 привел только к увеличению усилия вытягивания и напряжению в полосе. Усилие вытягивания увеличились с 17,41 кН до 27,99 кН, а напряжение в полосе увеличилось с 0,83 МПа до 1,3 МПа, что значительно ниже пластических напряжений.

При найденных усилиях в результате расчета имеем размер площадки контакта для роликов 120 мм и 310 мм – 1,1 мм и 1,8 мм. Если посчитать размер площадки контакта по Герцу, то они равны 1,03мм и 1,76мм. Неплохое совпадение размеров площадок контакта при моделировании в пакете и по Герцу.

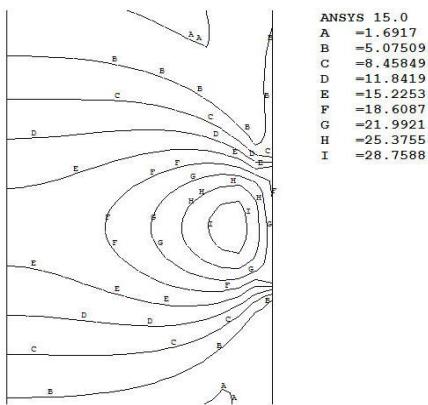


Рисунок 38 – Напряжения в полосе под роликом диаметром 310 мм по Мизесу, МПа

Определение угла поворота роликов для вытягивания заготовки на 15 мм было выполнено методом подбора. Для ролика диаметром 120 мм требуемый угол поворота равен 0,125 радиан, а для ролика 310 мм – 0,09676 радиан. При этих поворотах длина дуги для роликов диаметром 120 мм и 310 мм равна примерно 30 мм. При вытягивании заготовки для обеспечения в ней отсутствия пластических напряжений при найденных усилиях происходит проскальзывание полосы относительно роликов. На рисунке 38 приведены изолинии напряжений и деформаций

для характерных мест полосы сечением 8×2250 мм из стали 09Г2С при ее вытягивании из кристаллизатора роликами диаметром 310 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основании выполненных исследований закономерностей и взаимовлияния технологий и конструкций машины непрерывного литья и деформации на эффективность работы литейно-прокатных комплексов, дано решение научной проблемы, заключающейся в разработке теоретических положений создания и внедрения ресурсосберегающей технологии в условиях совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для получения стальных листов и сортовых заготовок, обеспечивающих уменьшение энергоемкости и металлоемкости оборудования и повышение качества выпускаемой продукции, и имеющей важное значение для развития экономики страны.

В ходе проведения диссертационного исследования были получены следующие научные результаты:

1. Поставлена и решена задача определения напряженного состояния системы кристаллизатор-байки-полоса при получении стальных листов на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, позволяющая изменять значения напряжений, что способствует предотвращению образования трещин на боковых поверхностях тонкого сляба. Предложенная схема напряженного состояния обеспечивает равномерную деформацию тонкого сляба (толщиной 30-40 мм) со степенью до 75 % за проход, что способствует улучшению качества листов из стали для сварных труб.

2. Проведены исследования закономерностей формоизменения на установках непрерывного литья и деформации, решена объемная задача определения осевых напряжений в бойках от усилия обжатия полосы при получении листов из стали для сварных труб на установке. Применение бойков с каналами создает условия для равномерного распределения потоков охлаждающей жидкости и снижения температуру их контактной поверхности с 460 °С до 370 °С.

3. Развиты основные положения конструирования установок совмещенного процесса непрерывного литья и деформации с разработкой алгоритма проектирования агрегатов машины и математического моделирования концепции компоновок МНЛДЗ.

4. Разработана ресурсосберегающая технология получения сортовых заготовок за один проход на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации с определением напряженно-деформированное состояние металла в очаге циклической деформации при получении трех стальных сортовых заготовок на установке и установлены закономерности распределения осевых перемещений и напряжений по длине и ширине

очага деформации, температуры и термоупругих напряжений распределения в калиброванных бойках.

5. Выполнено исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации на опытно-промышленной установке ОАО «Уральский трубный завод», которое позволило оценить конструктивные, технологические, скоростные и энергосиловые параметры установки и структуру полос из стали для сварных труб. Установлено, что в осевой зоне полос из стали 09Г2С отсутствует строчечное расположение ликватов, что способствует повышению качества листов для сварных труб.

6. Создана и освоена на ОАО «Уральский трубный завод» опытная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения стальных полос толщиной 3-22 мм и шириной 220 мм. Проведено опытно-промышленное опробование созданных конструкций элементов установки непрерывного литья и деформации, с определением основных параметров промышленной установки.

7. Получены патенты Российской Федерации № 2658761, № 2761373, № 2754336 на разработанные технологии и агрегаты установки непрерывного литья и деформации, описывающие технологические процессы и конструкции машин для непрерывной разливки и деформирования.

8. Промышленная реализация результатов использования опытной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации обеспечивает суммарный экономический эффект более 151 млн. руб. в год..

Приложение содержит акты внедрения и использования результатов диссертации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, определяемых ВАК РФ

1. Михалев, А.В. Рационализация технологии и агрегатов машины непрерывного литья и деформации при непрерывной разливке/ А.В. Михалев // Кузнецко-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2024. - № 8. - С. 18-20.
2. Михалев, А.В. / Развитие технологии непрерывного литья и деформации заготовок с применением установки С-CAD // Современные научноемкие технологии. - 2024. - № 5. - С. 71-75.
3. Гузанов, Б.Н. Оценка совмещенного процесса литья и деформации при производстве трехслойной стальной полосы / Б.Н. Гузанов, О.С. Лехов, Д.Х. Билалов, **А.В. Михалев** // Сталь. - 2024. - № 2. - С. 42-46.
4. Лехов, О.С. Напряженное состояние системы заготовка – оправка при получении стальной полой заготовки на установке непрерывного литья и деформирования. Часть 1. / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, С.О. Непряхин // Известия вузов. Черная металлургия. - 2023. - Том 66. - № 4. - С. 485-491.

5. Лехов, О.С. Исследование структурообразования при производстве листовой стали на установке непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, Б.Н. Гузанов, **А.В. Михалев**, Д.Х. Билалов // Известия вузов. Черная металлургия. - 2022. - Том 65. - № 4. - С. 278-274.
6. Лехов, О.С. Расчет температурных и термоупругих напряжений в бойках с буртами установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении стальных сортовых заготовок. Сообщение 2. / О.С. Лехов, Б.Н. Гузанов, **А.В. Михалев**, Д.Х. Билалов // Известия вузов. Черная металлургия. - 2021. - Том. 64. - № 2. - С. 143-148.
7. Лехов, О.С. Установка непрерывного литья и деформации для получения стальных сортовых заготовок / О.С. Лехов, **А.В. Михалев** // Сталь. - 2021. - № 10. - С. 54-56.
8. Лехов, О.С. Напряженное состояние системы бойки–биметалл при получении трехслойных стальных биметаллических полос на установке непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев // Известия вузов. Черная металлургия. - 2020. - Т 63. - № 2. - С. 140-145.
9. Лехов, О.С. Исследование совмещенного процесса получения сортовых заготовок на установке непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, Д.Х. Билалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2020. - Т. 18. - № 2. - С. 56-61.
10. Лехов, О.С. Напряжения в бойках с буртами при получении стальных сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, **А.В. Михалев** // Сталь. - 2020. - № 3. - С. 37-39.
11. Лехов, О.С. Напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации при получении сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Сообщение 1 / О.С. Лехов, **А.В. Михалев** // Известия вузов. Черная металлургия. - 2020. - Т. 63. - № 7. - С. 548-553.
12. Лехов, О.С. Расчет температурного поля бойков при получении стальных полос на установке непрерывного литья и деформирования / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // Технология металлов. - 2020. - № 8. - С. 47-51.
13. Лехов, О.С. Напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации при получении сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Сообщение 2 / О.С. Лехов, **А.В. Михалев** // Известия вузов. Черная металлургия. - 2020. - Т. 63. - № 9. - С. 730-734.

14. Лехов, О.С. Расчет температурных и термоупругих напряжений в бойках с бортами установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении стальных сортовых заготовок. Сообщение 1 / О.С. Лехов, **А.В. Михалев** // Известия вузов. Черная металлургия. - 2020. - Том. 63. - № 11-12. - С. 960-964.
15. Лехов, О.С. Численное определение плотности теплового потока по экспериментальным данным процесса деформации стальной полосы на опытной установке непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2019. - Т. 17. - № 3. - С. 19-24.
16. Лехов, О.С. Исследование напряжений в бойках различной конструкции установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев // Известия вузов. Черная металлургия. - 2019. - Том 62. - № 4. - С. 270-275.
17. Лехов, О.С. Расчет силовых параметров тянувшего устройства установки непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев, Билалов Д.Х. // Производство проката. - 2019. - № 6. - С. 3-6.
18. Лехов, О.С. Исследование процесса получения трехслойных стальных биметаллических полос на установке непрерывного литья и деформации. Сообщение 1 / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев // Известия вузов. Черная металлургия. - 2019. - Том 62. - № 8. - С. 594-599.
19. Лехов, О.С. Исследование процесса получения трехслойных стальных биметаллических полос на установке непрерывного литья и деформации. Сообщение 2 / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев // Известия вузов. Черная металлургия. - 2019. - Т. 62. - № 10. - С. 763-768.
20. Лехов, О.С. Технология получения многослойных стальных полос на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, Б.Н. Гузанов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // Сталь. - 2019. - № 11. - С. 70-74.
21. Лехов, О.С. Нагруженность и напряженное состояние бойков установки непрерывного литья и деформации полосы при получении листов из стали для сварных труб. Сообщение 2 / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев // Известия вузов. Черная металлургия. - 2018. - Том 61. - № 6. - С. 431-438.
22. Лехов, О.С. Использование установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для улучшения качества листов из стали для сварных труб / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев // За-

готовительные производства в машиностроении. - 2018. - Том 16. - № 9. - С. 387-390.

Монографии

23. Лехов, О.С. Установка непрерывного литья и деформации для производства стальных листов и сортовых заготовок / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. - 304 с.
24. Лехов, О.С. Установка непрерывного литья и деформации для производства стальных листов и сортовых заготовок / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2020. - 307 с.
25. Лехов, О.С. Напряжения в системе бойки-полоса при получении листов из стали на установке непрерывного литья и деформации // О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2018. - 125 с.
26. Лехов, О.С. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Теория и расчет / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**. Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2017. - 307 с.

Патенты и свидетельства о государственной регистрации

27. Платов, С.И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024616916 Российская Федерация. Расчет напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации: № 2024614943: заявл. 13.03.2024: опубл. 27.03.2024 / С.И. Платов, Д.В. Терентьев, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».
28. Терентьев, Д.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024616815 Российской Федерации. Расчет температурных полей и термоупругих напряжений в бойках установки непрерывного литья и деформации: № 2024614872: заявл. 12.03.2024: опубл. 25.03.2024 / Д.В. Терентьев, С.И. Платов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

29. **Михалев, А.В.** Патент № 2754336 С2 Российская Федерация, МПК B22D 11/04. Способ непрерывного литья полых заготовок и устройство для его осуществления: № 2019131633: заявл. 07.10.2019: опубл. 01.09.2021 / **А.В. Михалев**, О.С. Лехов, М.М. Шевелев [и др.].

30. Лехов, О.С. Патент № 2761373 С2 Российская Федерация, МПК B22D 11/04. Способ непрерывного литья заготовок и устройство для его осуществления: № 2019122944: заявл. 16.07.2019: опубл. 07.12.2021 / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, Д.Х. Билалов.

31. Лехов, О.С. Патент № 2658761 С2 Российская Федерация, МПК B22D 11/04. Способ непрерывного литья заготовок и устройство для его осуществления; № 2016145190: заявл. 17.11.2016: опубл. 22.06.2018 / О.С. Лехов, И.В. Ухлов, **А.В. Михалев**; заявитель ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет».

Прочие публикации

32. Лехов, О.С. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов, сортовых заготовок и биметаллических полос / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // Сборник научных трудов по материалам 25 международной научно-практической конференции «Наука России: цели и задачи». Изд. НИЦ «Л-Журнал». - 2021. - С.129-132.

33. Лехов, О.С. Напряженное состояние и выбор материала бойков установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении стальных листов / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // Материалы 3 Международной научно-практической конференции «Машиностроение: инновационные аспекты развития». Санкт-Петербург, 2020. - С. 39-44.

34. Лехов, О.С. Исследование технологии получения стальных биметаллических полос на установке непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, Б.Н. Гузанов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // Материалы научно-технической конференции с международным участием «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» – Екатеринбург: УрО РАН, 2020. - С. 403-406.

35. Лехов, О.С. Исследование напряжений и выбор материала бойков установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении стальных листов / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // Материалы научно-технической конференции с международным участием «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР»– Екатеринбург: УрО РАН, 2020. - С. 39-44.

36. Лехов, О.С. Исследование напряжений в системе бойки полоса при получении стальных листов на установке непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Уфа, 2019. - С. 45-48.

37. Лехов, О.С. Напряженное состояние и выбор материала бойков установки непрерывного литья и деформации для получения стальных листов / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев // Труды XII международного конгресса прокатчиков, 2019. - Том 1. - С. 211-215.

38. Лехов, О.С. Исследование совмещенного процесса получения сортовых заготовок на установке непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, Д.Х. Билалов // Труды XII международного конгресса прокатчиков, 2019. - Том 1. - С. 202-205.

39. Лехов, О.С. Напряженное состояние бойков установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, Д.Х. Билалов, М.М. Шевелев // Материалы XI Международного конгресса прокатчиков. Магнитогорск, 2017. - С. 95-100.