На правах рукописи

МИХАЛЕВ Александр Викторович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЬНЫХ ПОЛОС

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Лехов Олег Степанович

Официальные оппоненты: **Платов Сергей Иосифович,** доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», заведующий кафедрой машин и технологий обработки давлением и машиностроения;

Коновалов Анатолий Владимирович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, заведующий лабораторией механики деформаций.

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург

Защита состоится 16 мая 2019 г. в 12:00 ч на заседании диссертационного совета Д212.285.10 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»: http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=289017

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук Раскатов Евгений Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Дальнейшее развитие нефтегазового и топливно-энергетического комплексов ставит перед трубной промышленностью задачу увеличения объема производства труб повышенного качества и разнообразного сортамента.

При обжатии крупных непрерывнолитых слябов на станах толстолистовой прокатки имеет место значительная неравномерность деформации по высоте сляба, что приводит к получению неоднородной структуры толстолистового проката. Для снижения неравномерности деформации необходимо увеличивать обжатия за проход, что практически трудно осуществить, поскольку степень деформации за проход недостаточна и составляет 10-15 %. 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.

За рубежом ведутся работы по разработке литейно-прокатных агрегатов для производства тонких стальных полос с целью снижения расхода энергозатрат и удельных капиталовложений. В литейно-прокатных агрегатах жидкий металл подают в валки-кристаллизаторы, которые одновременно являются и кристаллизатором и деформирующим инструментом. При обжатии тонкого сляба степень деформации составляет 10-15%, что недостаточно для получения достаточно высоких механических свойств стальных листов. Так же не следует в валковых агрегатах получать стальные полосы толщиной 8-10 мм, поскольку при этом существенно возрастает время затвердевания жидкого металла. Подача жидкого металла в валки-кристаллизаторы приводит к привариванию к их поверхности отдельных частиц металла слитка, что снижает качество поверхности полос.

Решить изложенные выше проблемы толстолистовой прокатки и литья полос в валковых литейно-прокатных агрегатах позволит компактная и ресурсосберегающая установка непрерывного литья и деформации для производства листов из стали.

Степень разработанности проблемы. За рубежом для получения стальных листов для сварных труб разработана технология, при которой выходящий из

кристаллизатора машины непрерывного литья тонкий сляб толщиной 60-70 мм с жидкой сердцевиной обжимается двумя парами роликов до толщины 15-28 мм. Сравнительный анализ структуры металла стандартных слябов толщиной 200-250 мм и тонких слябов толщиной 60-70 мм показал, что величина зерна и область осевой ликвации у тонких слябов значительно меньше, чем у стандартных слябов. Таким образом, для снижения энергозатрат и улучшения качества толстолистового проката для сварных труб следует отливать тонкие слябы, и осуществлять их обжатие с высокой степенью деформации за проход и в заданном температурном интервале.

Изложенное выше позволило сформулировать **цель диссертационного исследования**: на основе теоретического исследования определить параметры совмещенного процесса и оборудования установки непрерывного литья и деформации, направленные на повышение качества и экономию материально-энергетических ресурсов при производстве листов из стали для сварных труб, создать и освоить опытную установку на ОАО «Уральский трубный завод».

Задачи диссертационного исследования:

- поставить и решить задачи определения напряженно-деформированного состояния (НДС) металла в очагах деформации при гибке боковых стенок оболочки с жидкой фазой и обжатии сляба при получении листов из стали на установке;

- по результатам решения указанных задач определить закономерности распределения осевых, касательных и эквивалентных напряжений в очагах циклической деформации с учетом усилия вытягивания сляба из кристаллизатора;

- установить при формировании тонкого сляба закономерности распределения перемещений, напряжений и деформаций в боковых стенках оболочки с учетом подпора;

- поставить и решить объемную задачу определения осевых и эквивалентных напряжений в бойках с каналами установки от усилия обжатия сляба;

- поставить и решить задачу определения силовых параметров тянущего устройства, напряжений и деформаций в стальной полосе при ее вытягивании из кристаллизатора установки;

-создать и освоить на ОАО «Уральский трубный завод» опытную установку для получения стальных полос толщиной 3-22 мм и шириной 220 мм.

Научную новизну и теоретическую ценность представляют следующие разработки диссертации:

- закономерности распределения осевых напряжений в узких стенках оболочки с жидкой фазой при их гибке при получении листов из стали на установке;

- закономерности распределения осевых и касательных напряжений в очаге циклической деформации тонкого сляба с учетом усилия вытягивания стальной оболочки с жидкой фазой из кристаллизатора установки;

- закономерности распределения осевых и эквивалентных напряжений в бойках с каналами от усилия обжатия при получении листов из стали на установке;

- закономерности распределения напряжений и деформаций в стальной полосе при ее вытягивании из кристаллизатора установки непрерывного литья и деформации.

Практическую ценность диссертации представляют:

- результаты исследования напряженно-деформированного состояния металла и бойков с каналами установки;

- силовые параметры тянущего устройства установки;

- результаты создания и освоения на ОАО «Уральский трубный завод» опытной установки для получения полос из стали толщиной 3-22 мм и шириной 220 мм;

- основные параметры промышленной установки для производства стальных полос.

Полученные в диссертации разработки будут использованы при проектировании и изготовлении промышленной установки для производства полос из стали толщиной 3-22 мм и шириной до 2250 мм на ОАО «Уральский трубный завод».

Методы исследования: методы конечно-элементного моделирования совмещенного процесса непрерывного литья и деформации в пакете ANSYS.

На защиту выносятся:

- результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла в боковых стенках оболочки с жидкой фазой при их гибке в процессе формирования тонкого сляба;

- результаты расчета осевых и касательных напряжений в очаге деформации тонкого сляба и перемещений металла на границе с жидкой фазой;

- результаты расчета осевых и эквивалентных напряжений в бойках с каналами от усилия обжатия;

- результаты расчета силовых параметров тянущего устройства, напряжений и деформаций в стальной полосе при ее вытягивании из кристаллизатора установки;

- результаты создания и освоения на ОАО «Уральский трубный завод» опытной установки для получения стальных полос толщиной 3-22 мм и шириной 220 мм;

- основные параметры промышленной установки для производства стальных полос на ОАО «Уральский трубный завод».

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается применением современных методов расчета НДС металла в очагах деформации и напряжений в бойках установки от усилия обжатия, а также результатами исследования на опытной установке.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: I Международная научно-практическая конференция «Инновации в образовании, науке и промышленности» (г. Пермь, 2016); X Международная научно-техническая конференция «Проблемы исследования и проектирования машин» (г. Пенза, 2016); XXI Международная научно-техническая конференция «Приоритетные направления развития науки и технологий» (г. Тула, 2017); X Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2017); XI Международный конгресс прокатчиков (г. Магнитогорск, 2017).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 16 научных трудах, включая 10 научных статей, опубликованных в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 монографию.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и изложена на 137 страницах машинописного текста, включая 98 рисунков, 11 таблиц и библиографический список из 92 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, и дана общая характеристика работы.

В первой главе представлен аналитический обзор по теме диссертации, обоснована цель и определены задачи диссертационного исследования.

Во второй главе изложены результаты теоретического исследования напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при получении стальных полос на установке непрерывного литья и деформации. На рисунке 1 представлена схема установки, которая состоит из неразъемного медного кристаллизатора 1 и двух суппортов 2 с бойками 4. Установка имеет новую конструкцию медного кристаллизатора, у которого боковые стенки выполнены в виде полукруга с радиусом равным 50 мм.

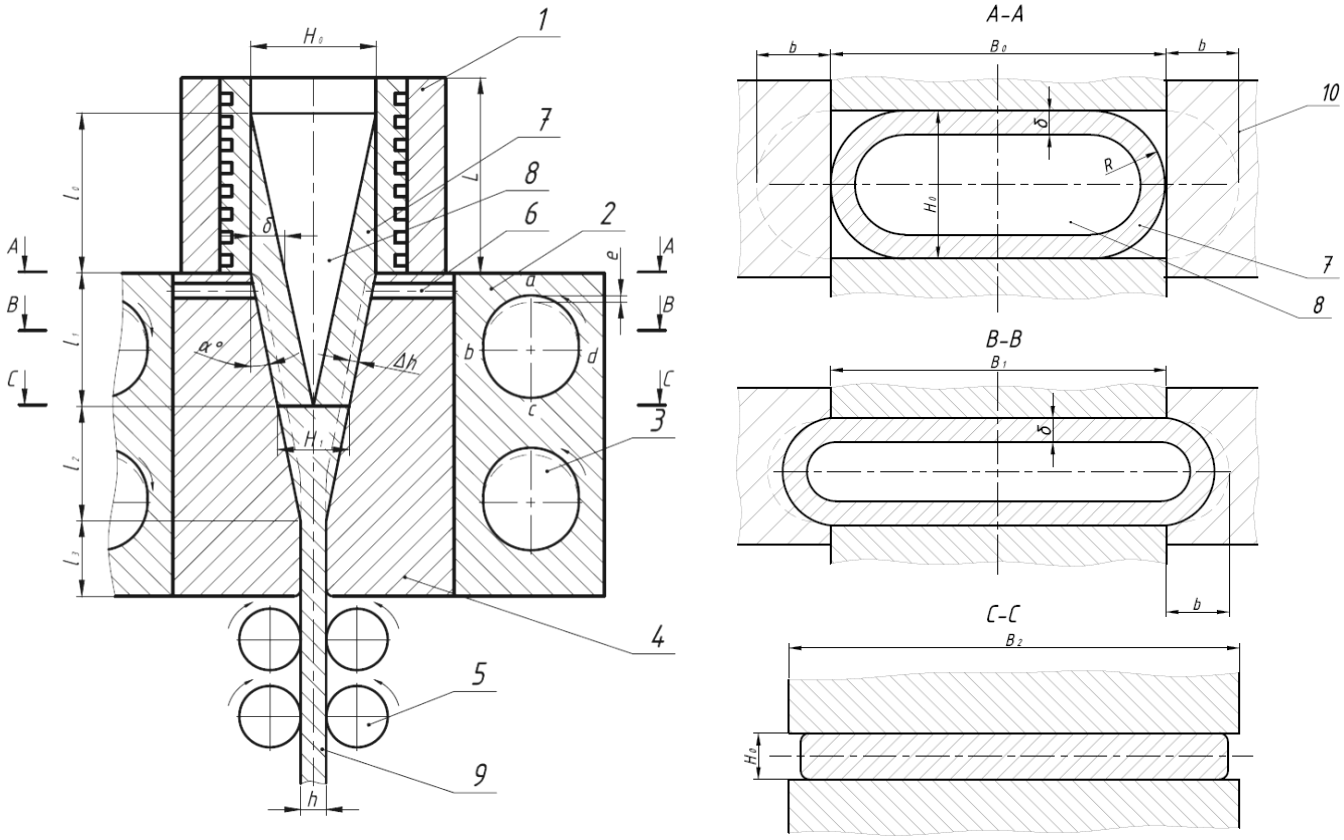


Рисунок 1 – Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации

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. Синхронное

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

Для оценки параметров промышленной установки непрерывного литья и деформации при получении стальных полос поставлены и решены две задачи по определению НДС металла при формировании полосы в зоне гибки боковых стенок оболочки с жидкой фазой (рисунок 1, участок l_1) и при циклической деформации бойками сляба (рисунок 1, 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 8мм и 16мм 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 эксцентриситета 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 ¼ оборота эксцентрикового вала, поэтому время обжатия сляба $t_{обж}$=0,136 с, а холостого хода - $t_{хх}$=0,409 с.

На рисунке 2 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.

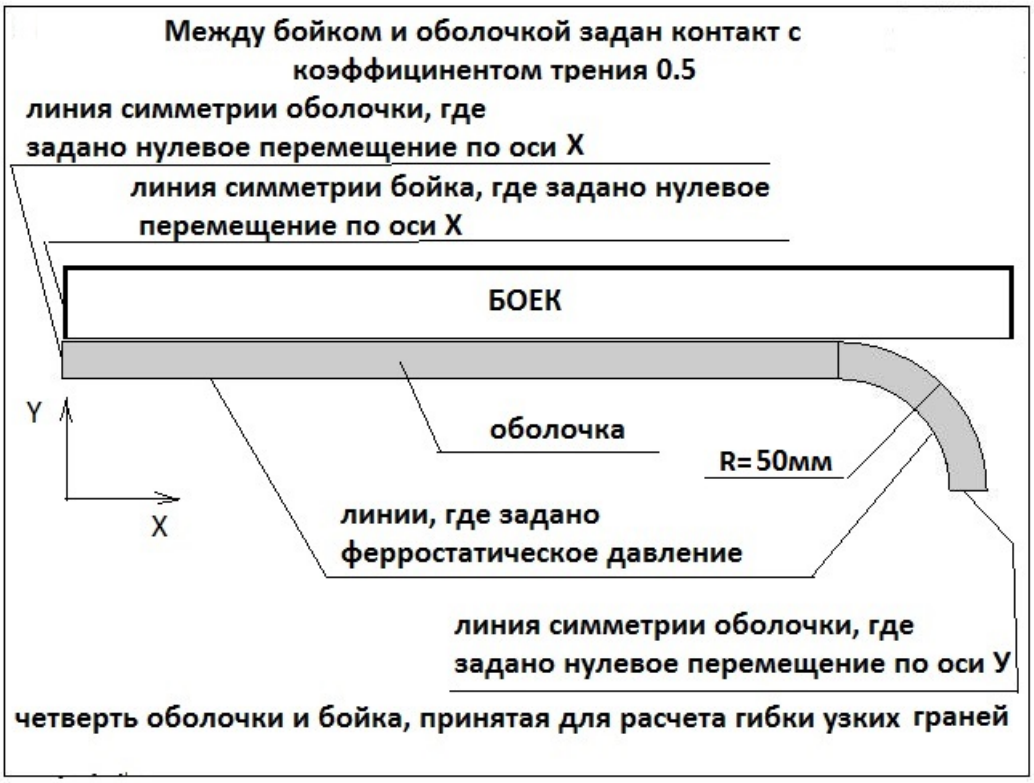


Рисунок 2 – Четвертая часть оболочки, принятая для расчета

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 3 и 4).

Анализ результатов расчета (рисунок 3, 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 МПа до 143,5 МПа, а по оси X (σ_x) – от 10,81 МПа до 94,19 МПа. На внутренней поверхности анализ эпюр деформаций (рисунок 4) показывает, что на наружной поверхности узкой стенки оболочки деформации - растягивающие и по мере гибки деформации по оси Y (ε_y) возрастают с 0,04 МПа до 0,346 МПа.

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. Из полученных данных следует, что при гибке боковых стенок оболочки 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.

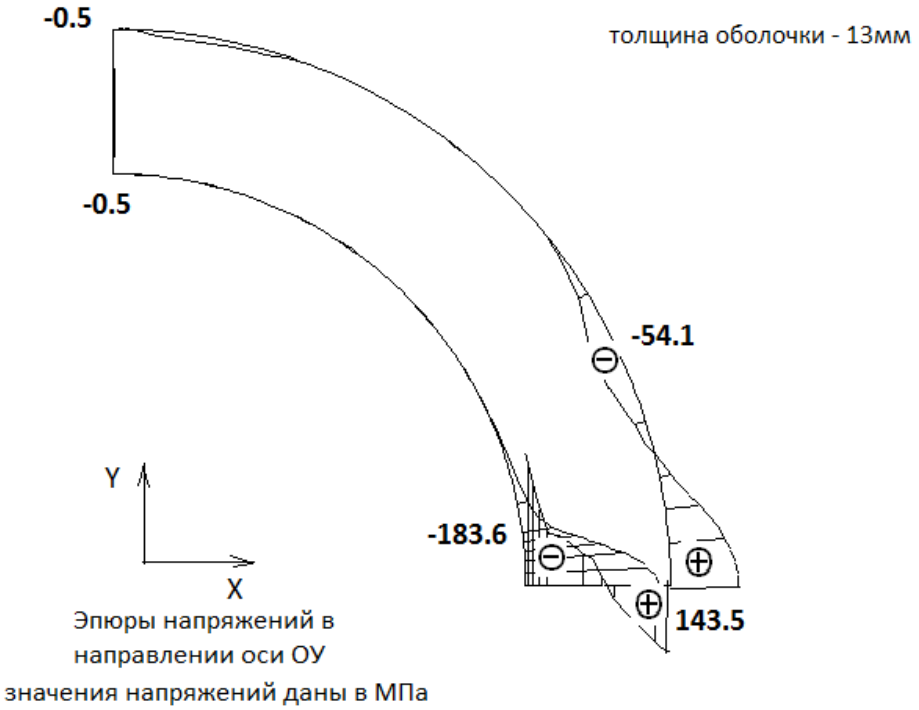


Рисунок 3 – Эпюры напряжений в направлении оси Y после полного обжатия оболочки бойками (сближение широких стенок – 74мм). Результаты даны только для узкой грани. Материал оболочки – 09Г2С

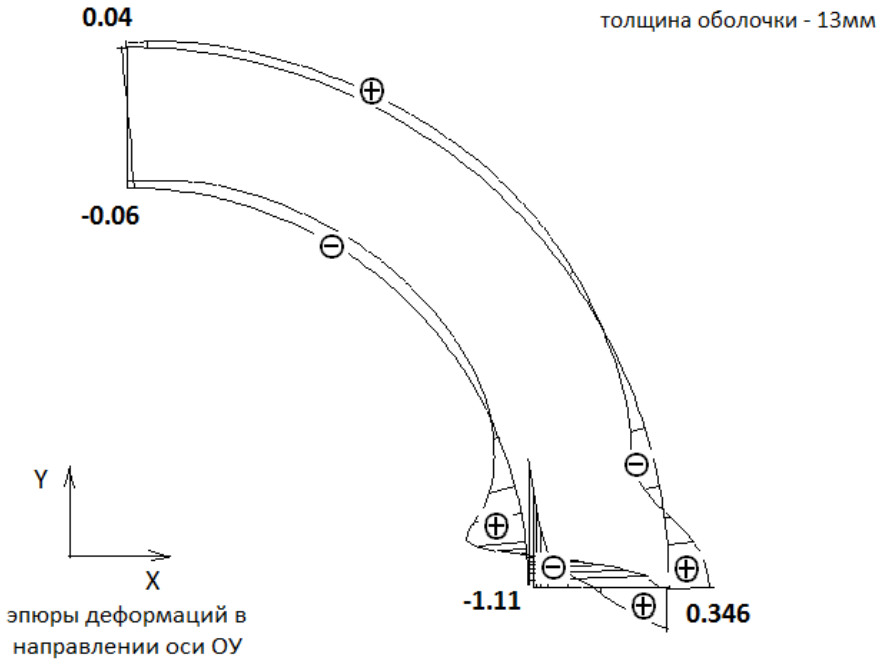


Рисунок 4 – Эпюры деформаций в направлении оси Y после полного обжатия оболочки бойками (сближение широких стенок – 74мм)

Геометрическая модель для расчета НДС металла в очаге деформации показана на рисунке 5.

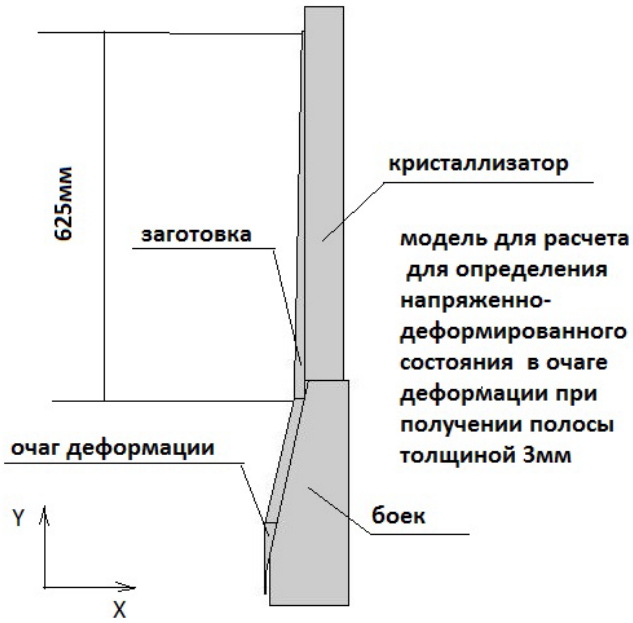


Рисунок 5– Модель для расчета очага деформации. Толщина полосы на выходе – 8 мм. Положение показано перед рабочим ходом

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 6 представлен характер распределения напряжений при получении листов толщиной 8 мм из стали 09Г2С.

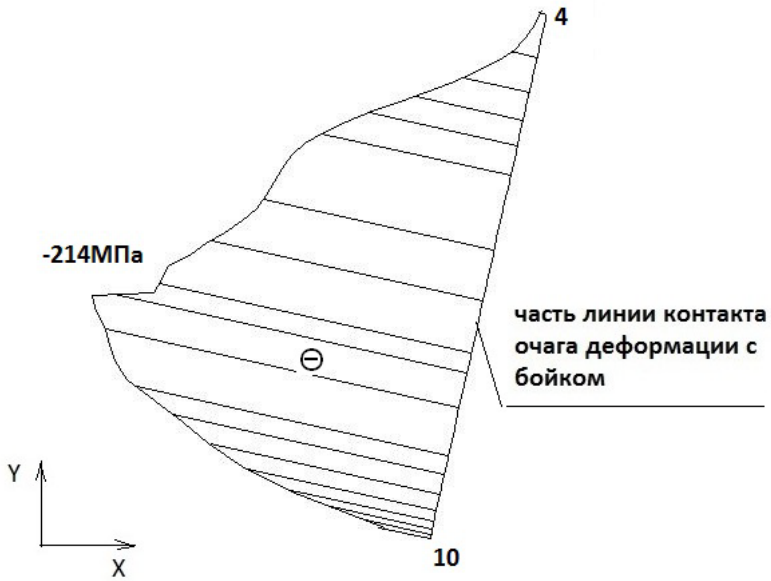


Рисунок 6– Характер напряжений по оси OX на части линии контакта очага деформации с бойком. Толщина полосы на выходе – 8мм

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

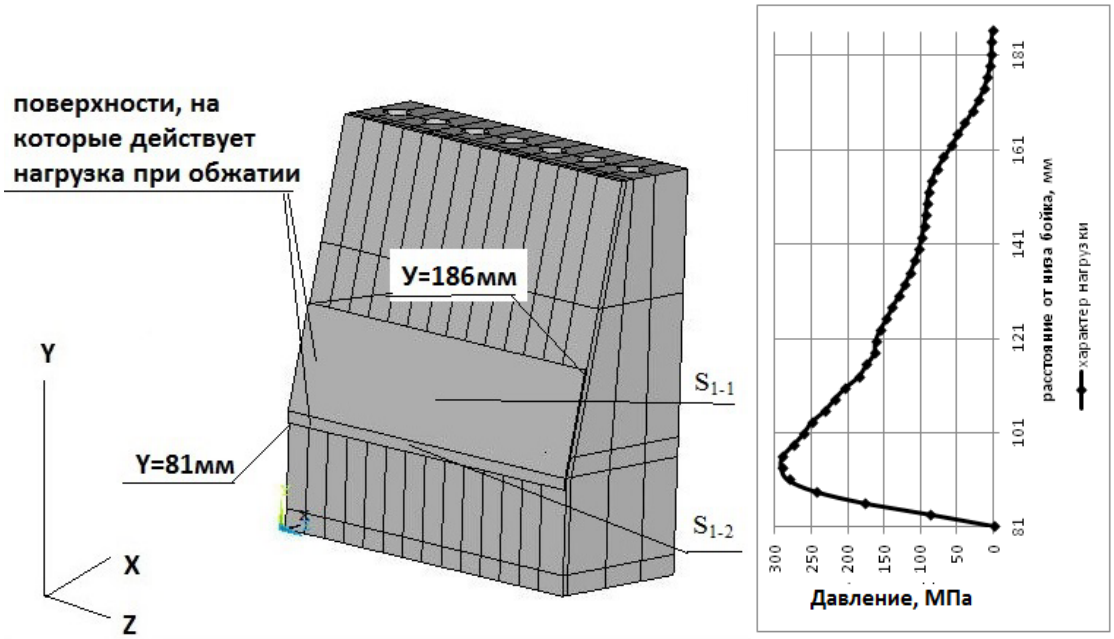
Полученные результаты свидетельствуют о благоприятной с позиции получения листов из стали высокого качества схемы напряженного состояния в очаге циклической деформации с преобладанием высоких (до минус 214 МПа) сжимающих напряжений.

В третьей главе представлены результаты исследования напряжений в бойках с каналами от усилия обжатия при получении полос из стали.

Модель бойка и характер ее нагружения представлен на рисунке 7.

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



а) б)

Рисунок 7 – Геометрия стенки бойка (а) и характер нагружения стенки (б)

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

$$\sum_{j=1}^{3} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \ (i = \overline{1,3}) \qquad (1)$$

- геометрические соотношения Коши, связывающие компоненты малого перемещения и тензора деформаций

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \ (i,j = \overline{1,3}) \qquad (2)$$

- физические (или определяющие) соотношения линейной теории упругости

$$\sigma_{ij} = \sum_{r,l=1}^{3} C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} + \sigma_{ij}^{(0)}, (i,j = \overline{1,3}) \qquad (3)$$

- граничные условия

$$\sum n_j \cdot \sigma_{ij} = \widehat{t_i} \text{ на поверхность } S_1 \ (i = \overline{1,3}) \qquad (4)$$

В уравнениях (1) – (4) использована декартовая ортогональная система координат. Обозначения σ_{ij}, ε_{ij}, C_{ijkl}, $\sigma_{ij}^{(0)}$, n_j, u_i, f_i, $\hat{t}_i$, $\hat{U}_i$ – представляют собой компоненты тензора напряжений, деформаций, упругих постоянных, начальных напряжений, векторов единичной внешней к поверхности нормали, перемещений, объемных и поверхностных сил, а также заданных перемещений соответственно.

Поверхность S_1 является рабочей поверхностью бойка, которая контактирует с металлом очага деформации при обжатии заготовки (рисунок 7). На данной поверхности задается усилие обжатия.

Расчет напряженного состояния бойка в данной постановке производился в пакете ANSYS.

Результаты расчета напряженного состояния бойка от усилия обжатия при получении на установке листа сечением 3×2250 мм из стали 09Г2С приведены на рисунке 8.

Результаты расчета свидетельствуют, что увеличение напряжений в каналах бойков связаны с наличием концентрации напряжений (рисунок 8). По линии Р5, расположенной между каналами, напряжение по оси X находится на уровне минус 158 МПа, а по линии Р6, проходящей через канал, в области канала напряжение равно минус 300 МПа. Коэффициент концентрации для данного канала в этом сечении равен 300/158 = 1,9. Наибольшие сжимающие напряжения возникают в направлении осей X и Y и достигают в сечении 3 значения от минус 220 МПа до минус 300 МПа.

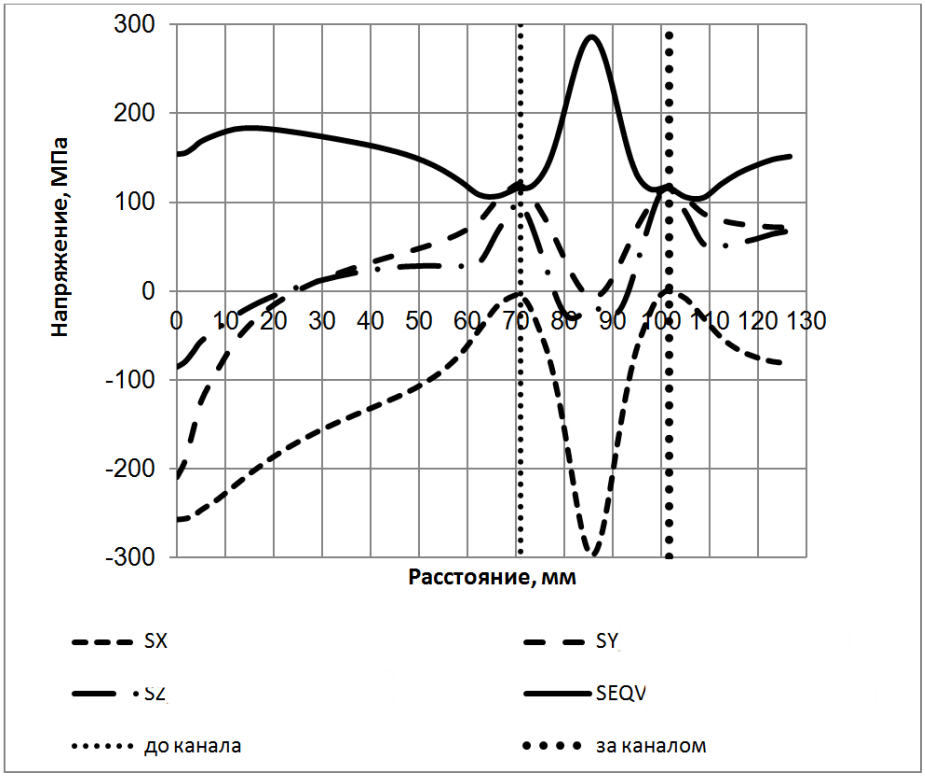


Рисунок 8– Характер напряжений от воздействия на боек усилия обжатия

В четвертой главе рассмотрены вопросы разработки компактных установок непрерывного литья и деформации для получения стальных полос.

На рисунке 9 представлена опытная установка для получения полос толщиной 3÷22 мм и шириной 220 мм из стали, которая спроектирована, изготовлена и установлена на ОАО «Уральский трубный завод». Сечение рабочей полости нового медного водоохлаждаемого кристаллизатора 60×180, в котором боковые стенки выполнены полукруглыми с радиусом 30 мм, высота полости – 800 мм. Максимальное усилие деформирования – 2000 кН. Угловая скорость вращения

эксцентриковых валов – 110 мин$^{-1}$. Скорость вытягивания слитка из кристаллизатора – 2,5 м/мин. Мощность приводного электродвигателя - 200 кВт.

Следует отметить, что при выполнении проекта опытной установки все основные ее параметры, кроме ширины полости медного кристаллизатора, стенок-бойков и роликов тянущего устройства, а также угловая скорость эксцентриковых валов, скорость вытягивания сляба из кристаллизатора и параметры очагов деформации приняты как для промышленной установки непрерывного литья и деформации для производства листов толщиной 3÷22 мм и шириной до 2250 мм из стали с производительностью 80 т/ч.

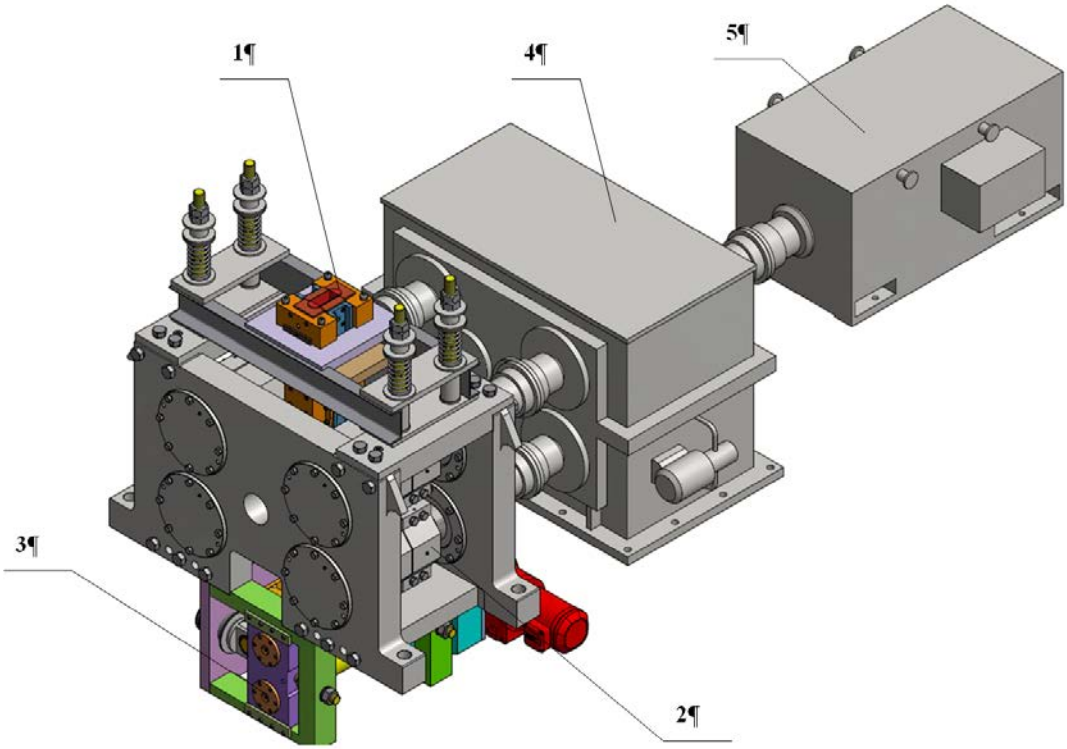


Рисунок 9 – Опытная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб: 1- водоохлаждаемый медный кристаллизатор; 2 – суппорт со стенкой-бойком; 3 – тянущее устройство; 4 – редуктор-синхронизатор; 5 – приводной электродвигатель

Тянущее устройство установки состоит из двух пар роликов, каждый из которых является приводным и имеет заданную угловую скорость. Вторая пара роликов является холостыми, они закреплены в кассете и с заданным усилием прижимаются к полосе, обеспечивая вытягивание полосы.

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 упруго-пластическая задача с учетом больших деформации и перемещений. Расчет выполнен методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS.

Диаметр роликов равен 120 мм и 310 мм. Температура полосы за зоной очага деформации принята равной 1100 °С. Геометрическая модель для расчета усилия прижатия роликов при вытягивании полосы толщиной 8 мм во время холостого хода показана на рисунке 10.

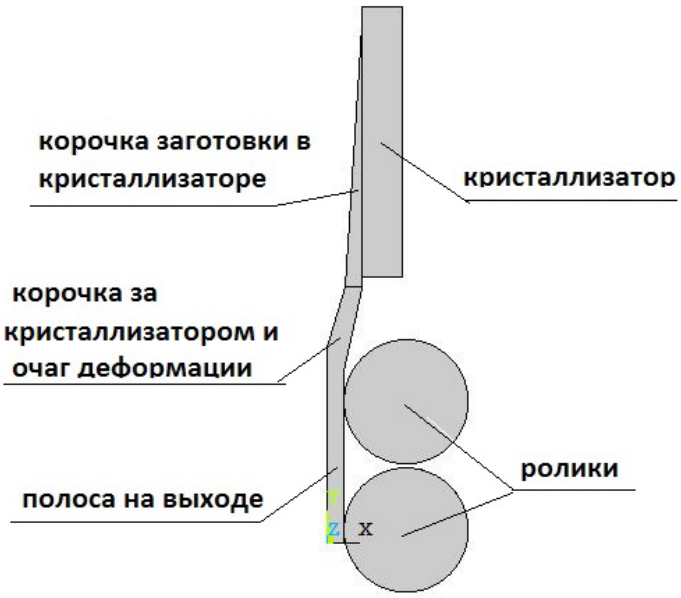


Рисунок 10 - Геометрическая модель для расчета усилия прижатия роликов

Результаты расчета для роликов диаметром 310 мм приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты для роликов диаметром 310 мм при трении в кристаллизаторе и роликах соответственно 0.3 и 0.4. Полоса 8х2250 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

На рисунках 11 и 12 показаны закономерности распределения напряжений SX и SY и напряжений по Мизесу (SM) в вытягиваемой полосы в характерных участках.

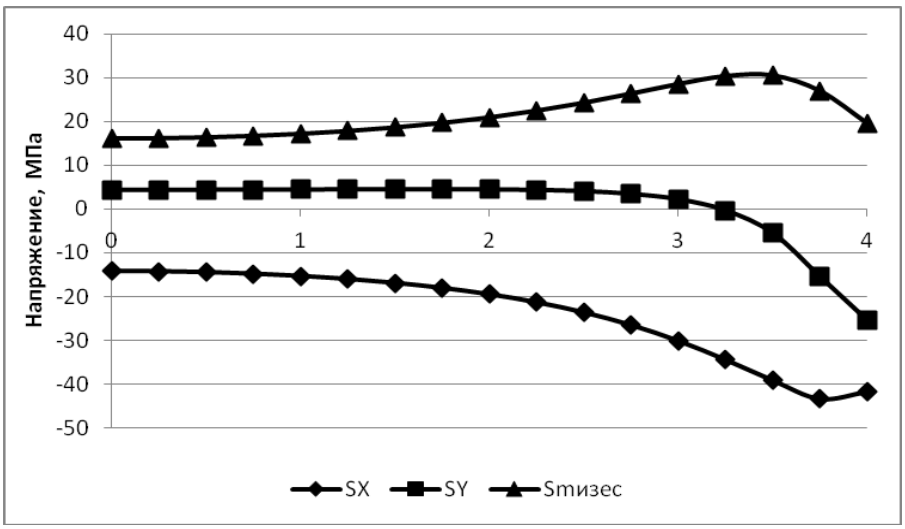


Рисунок 11 – Напряжения в полосе под роликом, МПа. «0» по горизонтальной оси соответствует середине толщины полосы

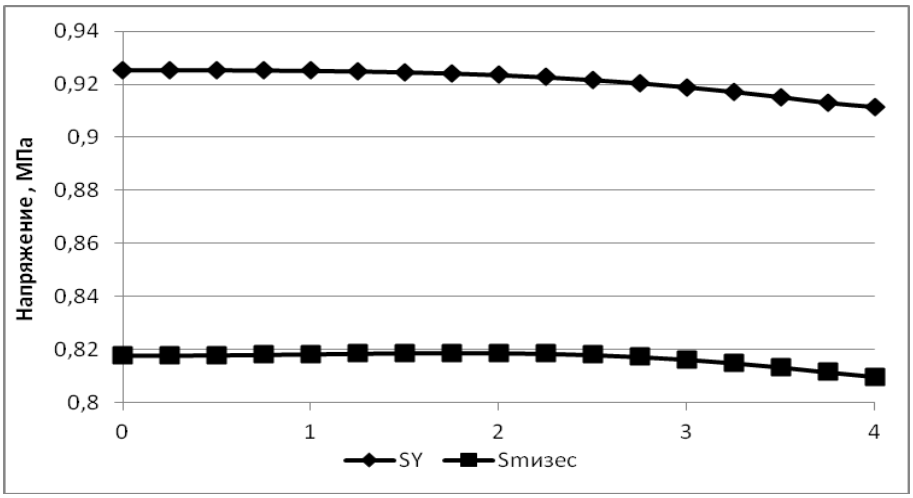


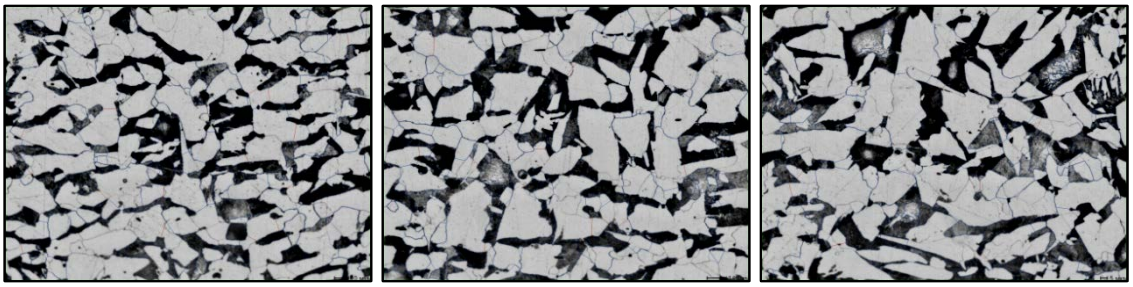
Рисунок 12 – Напряжения в полосе посередине между концом наклонного участка и первым роликом, МПа

Для освоения и экспериментального исследования опытной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения полос из стали создан участок в ОАО «Уральский трубный завод» (рисунок 13).

Экспериментальное исследование совмещенного процесса непрерывного процесса литья и деформации проводили при получении на опытной установке листа толщиной 18-20 мм из трубной стали. Толщина тонкого сляба перед обжатием бойками равна 30 мм. Температура сляба, выходящего из медного кристаллизатора, находилась в пределах 1200-1270 °С. Скорость вытягивания сляба из кристаллизатора 1,5 м/мин.

Рисунок 13 – Установка непрерывного литья и деформации литейно-ковочного участка ОАО «Уральский трубный завод»

С целью изучения структуры листа получаемого на установке непрерывного литья и деформации был выполнен металлографический анализ. Микроанализ показал, что на всех образцах наблюдается характерная для стали марки 20 феррито-перлитная структура с усредненным соотношением объемных долей перлита и феррита 24% и 76% соответственно (рисунок 14).



а) б) в)

Рисунок 14 - Структура образца (×500):

а) внешняя поверхность; б) середина образца; в) внутренняя поверхность

Таким образом установлено, что совмещенной процесс непрерывного литья и деформации позволяет получить лист с мелкозернистой и однородной структурой металла по всему сечению листа.

На основании проведенного исследования определены основные параметры промышленной установки непрерывного литья и деформации для производства листов из стали толщиной 3÷22 мм и шириной 1400 ÷ 2250 мм для сварных труб:

- максимальная производительность – 81 т/ч;
- величина эксцентриситета эксцентриковых валов – 5 мм;
- угол наклона рабочей поверхности стенок-бойков сборного кристаллизатора – 12,5°;
- сечение полости нового медного кристаллизатора – 60×2200 мм, в котором боковые стенки выполнены полукруглыми с радиусом 30 мм;
- скорость вытягивания слитка из кристаллизатора – 2,5 м/мин;
- угловая скорость эксцентриковых валов – 110 мин$^{-1}$;
- максимальное усилие деформации - 30000 кН;
- мощность приводного электродвигателя постоянного тока – 4000 кВт.
-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе теоретического исследования определены основные параметры промышленной установки непрерывного литья и деформации для производства стальных полос, создана и освоена опытная установка на ОАО «Уральский трубный завод».

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие научные и практические задачи:

- в результате решения задачи определения НДС металла при получении сляба толщиной 20 мм путем гибки боковых стенок оболочки установлено, что на наружной поверхности узкой стенки оболочки возникают растягивающие напряжения величиной до 143 МПа.

- проведена оценка НДС металла при гибке боковых стенок оболочки толщиной 10 мм с учетом их подпора боковыми стенками сборного кристаллизатора установки. В результате расчета установлено, что при гибке боковых стенок оболочки

с подпором растягивающие напряжения снижаются с 95 МПа до 59 МПа, что будет способствовать предотвращению образования трещин на боковых поверхностях тонкого сляба.

- результате исследования НДС металла в очаге циклической деформации установлено, что на контактной поверхности очага деформации с бойком возникают высокие сжимающие напряжения величиной до минус 214 МПа, а в осевой зоне симметрии очага деформации – до минус 199 МПа. Такая схема напряженного состояния обеспечивает равномерную деформацию тонкого сляба (толщиной 30-40 мм) со степенью до 75 % за проход, что способствует улучшению качества стальных полос;

- установлен характер течения металла в очаге циклической деформации и изменения скорости выхода листа из установки;

- определен уровень и характер распределения осевых и эквивалентных напряжений в бойках с каналами от усилия обжатия сляба. Установлено, что каналы в бойках установки приводят к повышению осевых сжимающих напряжений до величины минус 300 МПа. Наибольшие растягивающие осевые напряжения наблюдаются в области каналов бойков, и они изменяются в диапазоне 100 -140 МПа;

– определены силовые параметры тянущего устройства и закономерности распределения напряжений и деформаций для характерных мест полосы сечением 8×2250 мм из стали 09Г2С при ее вытягивании из кристаллизатора установки;

- создана и освоена на литейно-ковочном участке ОАО «Уральский трубный завод» опытная установка для получения стальных полос толщиной 3-22 мм и шириной 220 мм, что позволило оценить конструктивные, технологические, скоростные и энергосиловые параметры установки и структуру полос из стали;

– выполнен расчет параметров промышленной установки для получения листов толщиной 3-22 мм и шириной до 2250 мм из стали для сварных труб на ОАО «Уральский трубный завод».

Перспективы дальнейшей разработки темы

Полученные в диссертации разработки будут использованы при проектировании и изготовлении промышленной установки для получения стальных

листов 3÷22 мм и шириной до 2250 мм для сварных труб на литейно-ковочном участке ОАО «Уральский трубный завод»

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Михалев А.В. Нагруженность и напряженное состояние бойков установки непрерывного литья и деформации полосы при получении листов из стали для сварных труб. Сообщение 1 / О.С. Лехов, **А.В. Михалев,** М.М. Шевелев // Известия вузов. Черная металлургия. 2018. Т. 61. №4. С.268-273. (0,5 п.л./ 0,2 п.л.) (Scopus)

2. Михалев А.В. 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. Т. 61. №6. С.431-438. (0,5 п.л./ 0,2 п.л.) (Scopus)

3. Mikhalev A.V. Cyclic-deformation system for the reduction of continuos-cast slabs/ O.S. Lekhov, **A.V. Mikhalev,** D. Kh. Bilalov, M.M. Shevelev // Steel in Translation.2017. No. 4.Pp. 225-228. (0,3 п.л./0,1 п.л.) (Scopus)

4. Михалев А.В. Установка циклической деформации для обжатия непрерывнолитых слябов / О.С. Лехов, **А.В. Михалев,** Д.Х. Билалов, М.М. Шевелев // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. №4. С.24-26. (0,3 п.л./ 0,1 п.л.) (Scopus)

5. Михалев А.В. Исследование установки непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Сообщение 1 / О.С. Лехов, **А.В. Михалев** // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. №6. С. 430-435. (0,5 п.л./ 0,3 п.л.) (Scopus)

6. Михалев А.В. Исследование установки непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Сообщение 2. / О.С. Лехов, **А.В. Михалев** // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. №7. С. 522-526. (0,3 п.л./ 0,1 п.л.) (Scopus)

7. Михалев О.С. Моделирование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев, М.Ю. Туев, Д.Х. Билалов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2017. № 8. С. 31 - 34. (0,2 п.л./ 0,1 п.л.)

8. Михалев А.В. Исследование напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора от усилий обжатия при получении листов из стали для сварных труб на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2017. № 11. С. 30-33. (0,3 п.л./ 0,1 п.л.)

9. Михалев А.В. Литье и обжатие тонких слябов при получении листов из стали для сварных труб на 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. 2017. № 3. С. 32-36 (0,3 п.л./ 0,1 п.л.)

10. Михалев А.В. Моделирование течения металла в очаге циклической деформации при получении листов из стали на установке непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, **А.В. Михалев,** М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // Производство проката. 2017. №10. С. 35-37 (0,2 п.л./ 0,1 п.л.)

Монографии:

11. Михалев А.В. 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. 151 с. (9 п.л./1,8 п.л.).

Публикации в других изданиях:

12. Михалев А.В. Моделирование совмещенного процесса непрерывного литья и циклической деформации при получении листов из стали для сварных труб / О.С. Лехов, **А.В. Михалев,** М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // Доклады XXI Международной научно-технической конференции. Тула, 2017. С. 69-73. (0,3 п.л./ 0,1 п.л.)

13. Михалев А.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для производства сварных труб / О.С. Лехов, М.Ю. Туев, **А.В. Михалев**, Д.Х. Билалов, М.М. Шевелев // Материалы XI

Международного Конгресса Прокатчиков. Магнитогорск, 2017. С. 50-55. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.)

14. Михалев А.В. 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. (0,4 п.л./ 0,1 п.л.)

15. Михалев А.В. Напряженное состояние системы бойки-полоса при получении листов из стали для сварных труб на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, Д.Х. Билалов, М.М. Шевелев // Будущее машиностроения России: материалы X Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов с международным участием, МГТУ им. Баумана. Москва, 2017. С. 85-88 (0,4 п.л./ 0,1 п.л.)

16. Михалев А.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения трехслойных биметаллических полос / О.С. Лехов, **А.В. Михалев**, Д.Х. Билалов // Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: материалы международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2018. № 1. С. 172-175 (0,3 п.л./ 0,1 п.л.)

Подписано в печать 15.03.2019 г. Формат 60×84 1/16
Бумага 80 г/м^2. Цифровая печать.
Тираж 100 экз. Заказ № 3.

Отпечатано в учебной лаборатории полиграфических машин кафедры
«Металлургические и роторные машины» ИНМиТ УрФУ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-120