

На правах рукописи

**ШЕВЕЛЕВ Максим Михайлович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ОЧАГЕ  
ДЕФОРМАЦИИ НА УСТАНОВКЕ СОВМЕЩЕННОГО ЛИТЬЯ И  
ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВ**

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:** **Колмогоров Герман Леонидович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор кафедры «Динамика и прочность машин»;

**Железков Олег Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор кафедры механики

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Защита состоится 16 мая 2019 г. в 16:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 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=289078>

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук

Раскатов Евгений Юрьевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

В России и за рубежом ведутся работы по созданию эффективных технологий и оборудования для производства широких стальных листов на основе литейно-прокатных агрегатов и комплексов. При этом важной задачей является уменьшение расхода энергии и удельных капиталовложений. Однако валковые агрегаты имеют низкую производительность, степень деформации полосы не превышает 10-15 %, что не обеспечивает получение высоких механических свойств стальных листов.

Для решения изложенных выше проблем производства стальных листов для последующего производства сварных труб целесообразно использовать установку непрерывного литья и деформации, технологические возможности которой предусматривают отливку тонких слябов и их обжатие за один проход и в заданном узком температурном интервале, что позволит существенно снизить энергозатраты и улучшить качество стальных листов.

В результате интенсификации производства стальных листов для сварных труб значительно возрастает нагруженность бойков установки и требования к качеству их поверхности. Таким образом, актуальной задачей для повышения стойкости бойков, которые одновременно воспринимают усилия обжатия и температурную нагрузку, является обоснованный выбор конструктивных параметров и материала бойков.

### **Степень разработанности проблемы**

При разработке конструкции и выборе материала бойков установки важно оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) металла в очаге циклической деформации, что позволит установить нагруженность бойков. При этом также целесообразно определить напряженное состояние бойков установки от температурной нагрузки и усилия обжатия при получении стальных листов. Это позволит более обоснованно выбирать конструктивные параметры и материал бойков установки с целью повышения их стойкости.

В работах Лехова О.С., Михалева А.В., Билалова Д.Х. даны результаты расчета температурного поля и термоупругого напряженного состояния бойков установки с

учетом каналов для охлаждения бойков при получении стальных листов. Установлено, что каналы в бойках являются концентраторами напряжений, приводящие к существенному увеличению напряжений в бойках как от усилия обжатия, так и температурной нагрузки. В связи с этим в диссертации выполнен расчет напряженного состояния бойков без каналов для их охлаждения.

**Цель диссертационного исследования:** с использованием современных методов решения задач упруго-пластичности определить напряженно-деформированное состояние системы бойки-полоса при получении листов из стали на установке, для повышения стойкости бойков разработать рекомендации по выбору их конструктивных параметров и материала и исследовать температурный режим работы бойков опытной установки ОАО «Уральский трубный завод».

**Задачи диссертационного исследования:**

- определить закономерности распределения осевых напряжений в очаге циклической деформации и нагруженность бойков установки при получении стальных листов толщиной 3 мм и шириной 2250 мм;

- установить закономерности распределения осевых и эквивалентных напряжений в бойках без каналов установки от усилия обжатия;

- установить закономерности распределения в бойках без каналов температуры и осевых термоупругих и эквивалентных напряжений при обжатии сляба и на холостом ходу;

- установить зависимость осевых термоупругих напряжений в бойках от температуры их контактной поверхности;

- установить закономерности распределения суммарных напряжений в бойках без каналов от усилия обжатия сляба и температурной нагрузки;

- выполнить сравнительный анализ напряженного состояния бойков различного конструктивного исполнения;

- провести освоение опытной установки ОАО «Уральский трубный завод» и выполнить исследование температурного режима работы бойков.

**Методология и методы исследования**

Методы МКЭ-моделирования НДС металла в очаге деформации и напряжений в бойках установки в пакете ANSYS.

**Научную новизну и теоретическую ценность** представляют следующие разработки диссертации:

- установлены закономерности распределения осевых напряжений в очаге циклической деформации тонкого сляба с учетом силы его вытягивания из кристаллизатора установки при получении стальных листов толщиной 3 мм и шириной 2250 мм на установке;

- установлены закономерности распределения осевых и эквивалентных напряжений в бойках без каналов установки от усилия обжатия сляба;

- установлены закономерности распределения температуры и осевых и эквивалентных термоупругих напряжений в бойках без каналов при обжатии сляба и на холостом ходу;

- установлена зависимость осевых термоупругих напряжений в бойках без каналов установки от температуры их контактной поверхности;

- определено суммарное поле напряжений в бойках без каналов установки от температурной нагрузки и усилия обжатия сляба.

**Практическую значимость диссертации составляют:**

- оценка схемы напряженного состояния металла при обжатии тонкого сляба и определение нагруженности бойков установки;

- результаты расчета температурных полей и суммарных напряжений в бойках без каналов установки и рекомендации по выбору конструктивных параметров и материала бойков;

- результаты освоения и исследования температурного режима работы бойков опытной установки ОАО «Уральский трубный завод».

Установка непрерывного литья и деформации для производства листов из стали толщиной 3-22 мм и шириной 220 мм принята к внедрению на ОАО «Уральский трубный завод».

**На защиту выносятся:**

- результаты расчета НДС металла в очаге циклической деформации с учетом силы вытягивания сляба из кристаллизатора и нагруженность бойков без каналов установки при получении листов толщиной 3 мм и шириной 2250 мм;

- результаты расчета напряженного состояния бойков без каналов установки от усилия обжатия сляба;

- результаты расчета температурных полей, осевых и эквивалентных термоупругих и суммарных напряжений в бойках без каналов установки при обжатии сляба и на холостом ходу;

- результаты сравнительного анализа напряженного состояния бойков различного конструктивного исполнения;

- результаты освоения и исследования температурного режима работы бойков опытной установки литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод».

**Достоверность полученных в диссертации результатов** подтверждается применением современных методов расчета НДС металла в очаге циклической деформации, напряжений в бойках от усилия обжатия и температурной нагрузки, а также результатами разработки и освоения опытной установки ОАО «Уральский трубный завод».

**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); Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2018).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 13 печатных трудах, в том числе в 9 рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и изложена на 153 страницах машинописного

текста, включая 81 рисунок, 21 таблицу и библиографический список из 84 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

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

Во **второй** главе изложена общая постановка задачи, и представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния системы бойки-полоса при получении листов толщиной 3 мм и шириной до 2250 мм на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Бойки установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб циклически воспринимают усилия обжатия и одновременно температурную нагрузку. Поэтому необходимо оценить нагруженность бойков установки, что позволит определить закономерности распределения напряжений в бойках от усилия обжатия.

Для исследования НДС металла в очаге циклической деформации рассмотрим процесс получения листа толщиной 3 мм и шириной до 2250 мм из стали 09Г2С. Толщина тонкого сляба равна 30 мм. Степень деформации сляба за проход составляет 90%. На внешней поверхности очага деформации принимаем температуру равную 1200 °С.

Результаты получены решением задачи механики сплошной среды методом конечных элементов. Для решения задачи была использована программа ANSYS. Величина эксцентриситета эксцентриковых валов равна 5 мм, а их угловая скорость 110 мин<sup>-1</sup>. Угол наклона рабочей поверхности бойка 12,5 градусов. Ферростатическое давление для оболочки с жидкой фазой принято равным 0,066 МПа, а коэффициент трения между бойком и полосой составил 0,5.

Выполнен расчет НДС металла в плоской постановке с учетом силы вытягивания оболочки с жидкой фазой из кристаллизатора.

Рабочая длина кристаллизатора 625 мм, длина геометрического очага деформации 60,9 мм.

На рисунке 1 представлен характер распределения осевых контактных напряжений при получении листов толщиной 3 мм из стали 09Г2С.

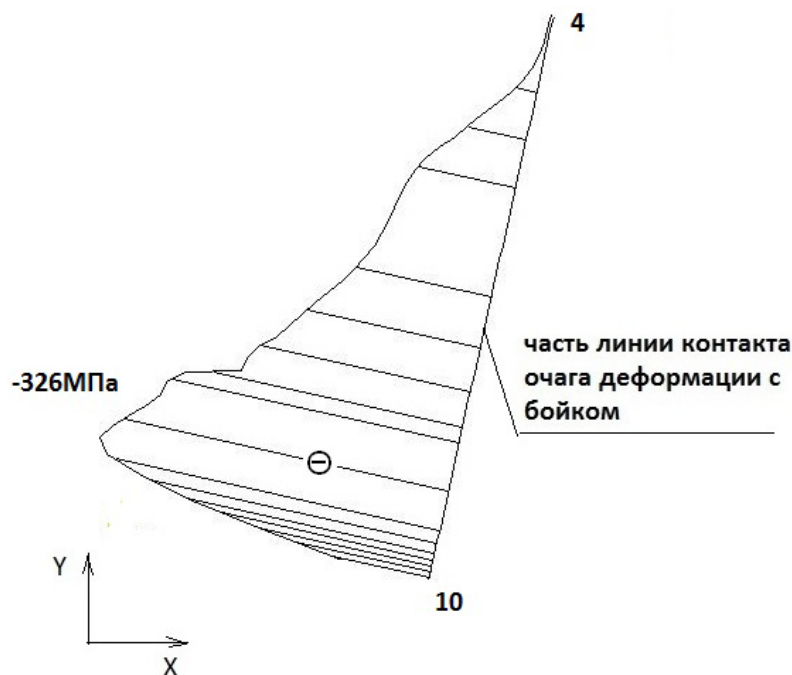


Рисунок 1– Характер напряжений по оси ОХ на части линии контакта очага деформации с бойком. Толщина полосы на выходе – 3мм

Сжимающие напряжения в направлении оси ОХ достигают величины минус 326 МПа, а усилия обжатия сляба 2430 кН.

На рисунке 2 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 полости нового медного водоохлаждаемого кристаллизатора 60×180 мм, 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<sup>-1</sup>. Скорость вытягивания слитка из кристаллизатора 2,5 м/мин. Мощность приводного электродвигателя 200 кВт.

Рассмотрим результаты исследования напряжений в бойках без каналов установки от усилия обжатия при получении листов из стали. Материал бойка – сталь 45ХНМ.



Геометрия бойка для расчета его напряженного состояния дана на рисунке 3, а. Толщина бойка по верхней поверхности 70 мм. Длина бойка 570 мм. Характер нагружения стенки-бойка дан на рисунке 3, б.

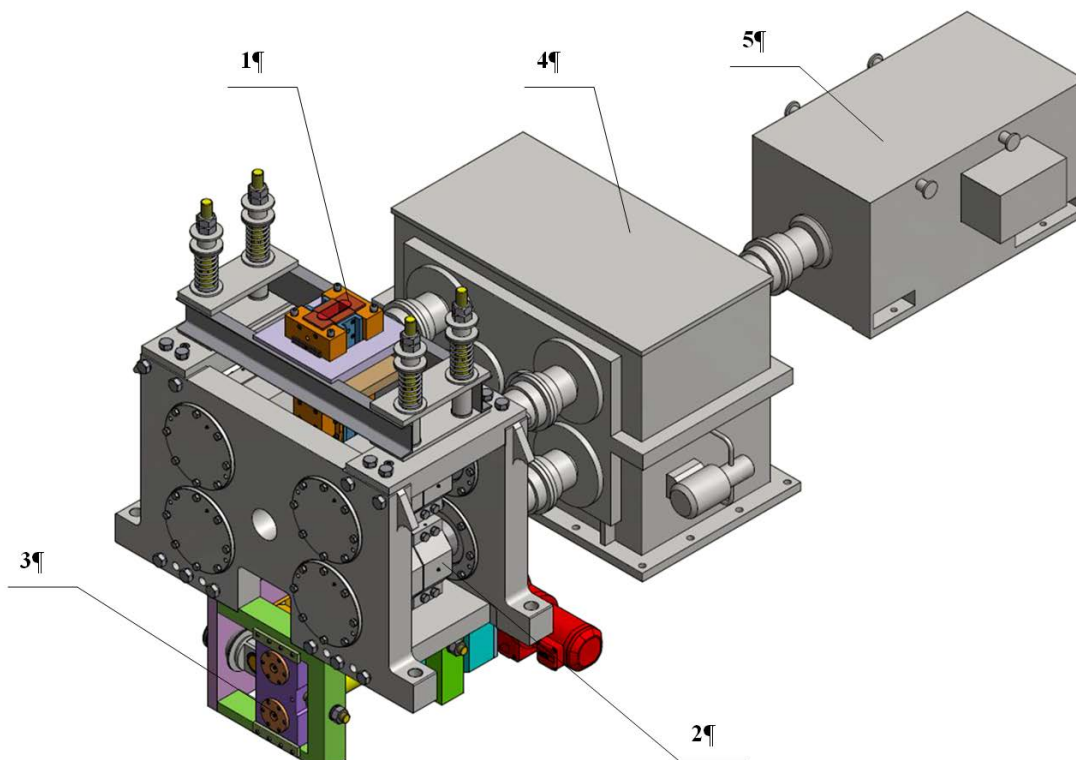
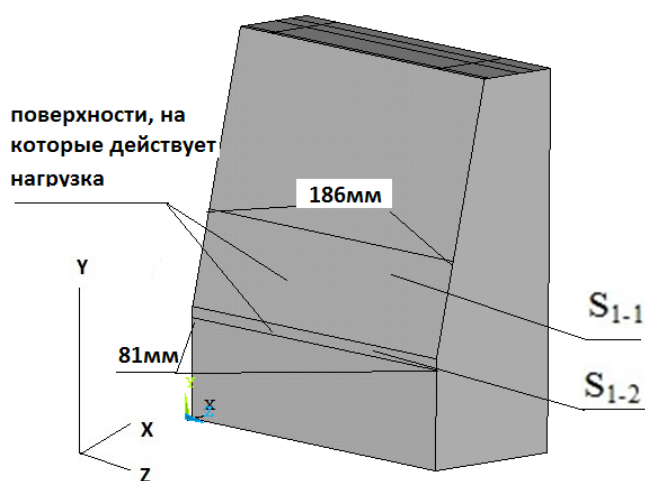


Рисунок 2 – Опытная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации: 1- водоохлаждаемый медный кристаллизатор; 2 – суппорт со стенкой-бойком; 3 – тянущее устройство; 4 – редуктор-синхронизатор; 5 – приводной электродвигатель



а) б)  
Рисунок 3 – Модель для расчета и характер нагружения бойка

Для определения напряжений в бойках от усилия обжатия использованы зависимости и алгоритм решения краевых задач теории упругости методом конечных элементов в объемной постановке. Расчет напряженного состояния бойка в данной

постановке производится в пакете ANSYS. Результаты расчета напряженного состояния бойка без каналов от усилия обжатия при получении листа сечением  $3 \times 2250$  мм из стали 09Г2С приведены на рисунке 4.

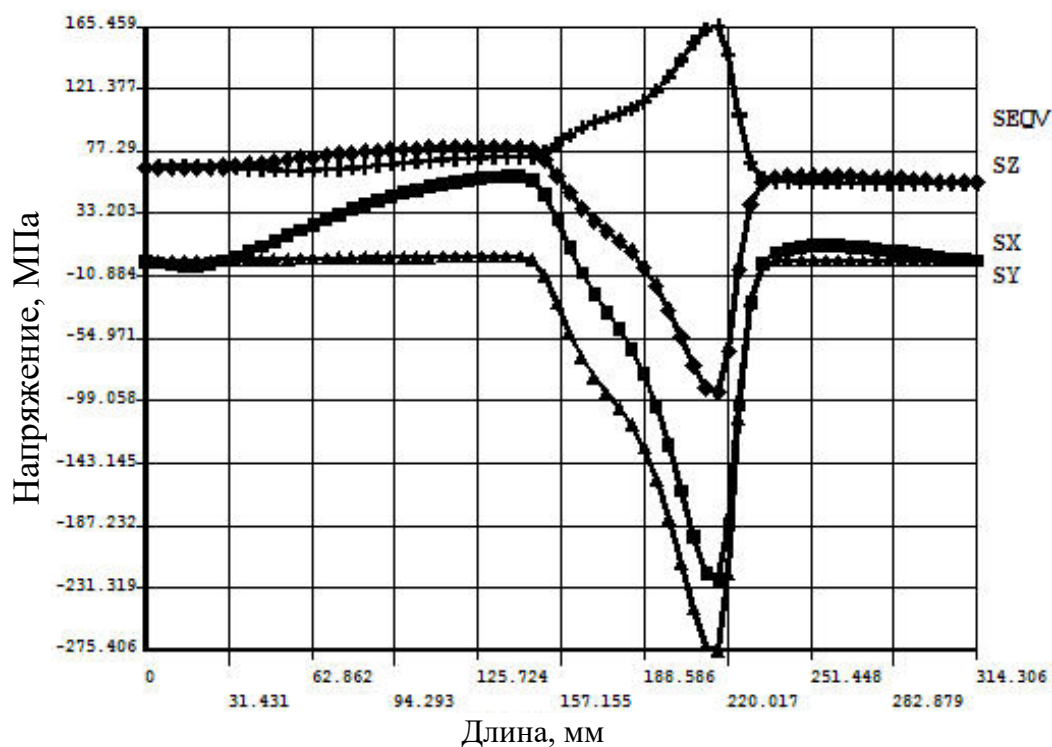


Рисунок 4 – Характер напряжений вдоль линии P\_9 от воздействия на боек без каналов усилия обжатия

Наибольшие сжимающие напряжения в бойке возникают в области очага деформации заготовки и достигают в направлении осей X, Y и Z соответственно значений минус 275 МПа, минус 231 МПа и минус 113 МПа.

В **третьей** главе представлены постановки задач и алгоритмы расчета температурных полей и напряженного состояния бойков без каналов. Расчет температурных полей производился методом конечных элементов в объемной постановке в пакете ANSYS. При расчете температурного поля по первому варианту приняты следующие граничные условия: а) на торце бойка, задней стенке, сверху и снизу бойка – охлаждение водой с коэффициентом теплоотдачи  $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  и температурой окружающей среды  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б) на рабочую поверхности бойка во время рабочего хода в течение  $0,1364$  секунды действует плотность теплового потока  $20 \text{ МВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Во время паузы  $0,4092$  секунды эффективный коэффициент теплоотдачи  $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

При расчете температурного поля по второму варианту значение плотности теплового потока уменьшено в 2 раза.

При расчете температурных полей по третьему варианту (охлаждение бойка воздухом) в отличие от первого варианта коэффициент теплоотдачи принят равным  $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Температурное поле бойков определяется на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности (1) с соответствующими начальными и граничными условиями.

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

где  $c$  – теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Все коэффициенты принимаем в зависимости от температуры бойков. Начальное условие для функции  $T(\vec{X}, t)$  имеет вид

$$T(\vec{X}, t) = T_0(\vec{X}), \quad (2)$$

При рабочем ходе для рабочей поверхности бойка принимаются граничные условия второго рода

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_S (t) = q, \quad (3)$$

В период паузы для рабочей поверхности бойка принимаются граничные условия третьего рода

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -a_1(T - T_k), \quad (4)$$

На торце бойка, задней стенке, сверху и снизу бойка принимаются граничные условия третьего рода

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -a_2(T - T_0), \quad (5)$$

В формулах (3) – (5) приняты следующие обозначения:  $q$  – плотность теплового потока от металла очага деформации;  $T_k$  – температура воды;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $a_1$  – эффективный коэффициент теплоотдачи, принятый на рабочую поверхность во время паузы;  $a_2$  – коэффициент теплоотдачи при охлаждении задней стенки, верха и низа бойка водой либо воздухом в зависимости от варианта расчета.

По найденному полю температур в последующем в каждый момент времени можно определить поле деформаций и термоупругих напряжений в соответствии со следующим алгоритмом.

Основное соотношение для определения термоупругих напряжений:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl}(\varepsilon_{kl} - \alpha_{kl}\Delta T), \quad (6)$$

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

Для тел, механические и теплофизические свойства которых изотропны, соотношение (6) принимает вид:

$$\sigma_{ij} = 2G \left( \varepsilon_{ij} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \delta_{ij} - \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha \Delta T \delta_{ij} \right), \quad (7)$$

где  $G$  – модуль сдвига;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $e$  – объёмное расширение,  $e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ .

Последнее слагаемое в правой части формулы (7) отражает влияние на напряжения температурной деформации.

Если ввести обозначение

$$\sigma_{ij}^{(0)} = -2G \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha \cdot \Delta T \cdot \delta_{ij}, \quad (8)$$

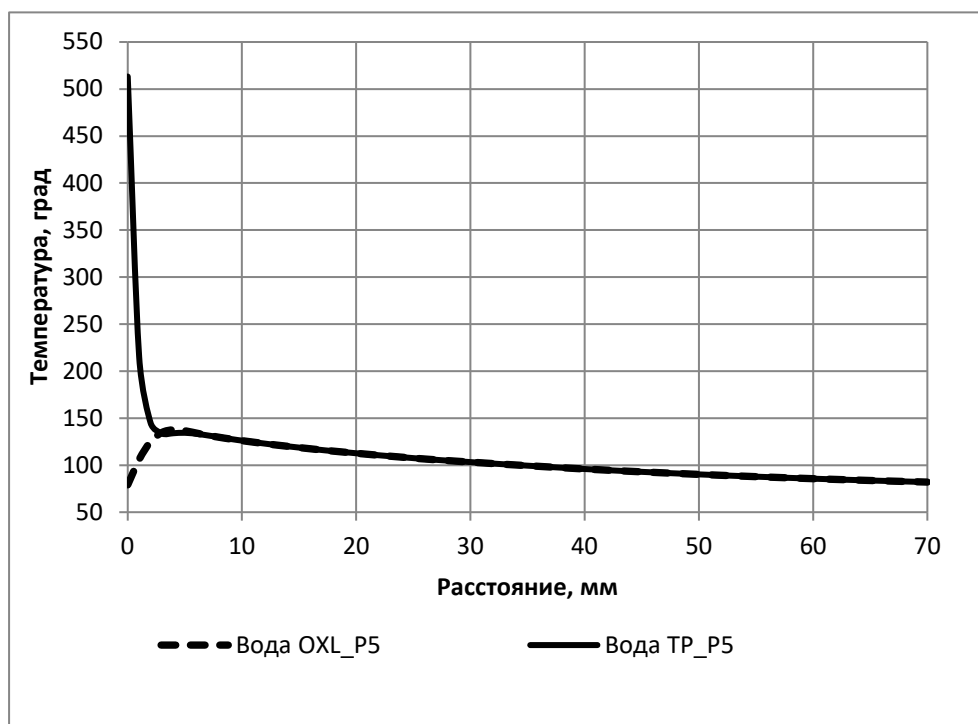
то определяющее уравнение (6) примет вид уравнения, где начальные напряжения заменены соответствующими напряжениями от температурной деформации.

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl} + \sigma_{ij}^{(0)} \quad (i, j = \overline{1,3}), \quad (9)$$

Таким образом, если температурное поле бойка известно, то соотношения МКЭ (6) – (9) применимы к задачам термоупругости, где все параметры являются функциями температуры. Данная схема выполнения расчетов повторяется и реализована в одном из модулей пакета ANSYS.

В **четвертой** главе приведены результаты расчета температурных полей и термоупругих напряжений в бойках без каналов для трех вариантов граничных условий.

На рисунке 5 показан характер распределения температуры по толщине и высоте бойка без каналов для первого варианта расчета (верхняя оценка температурного поля).

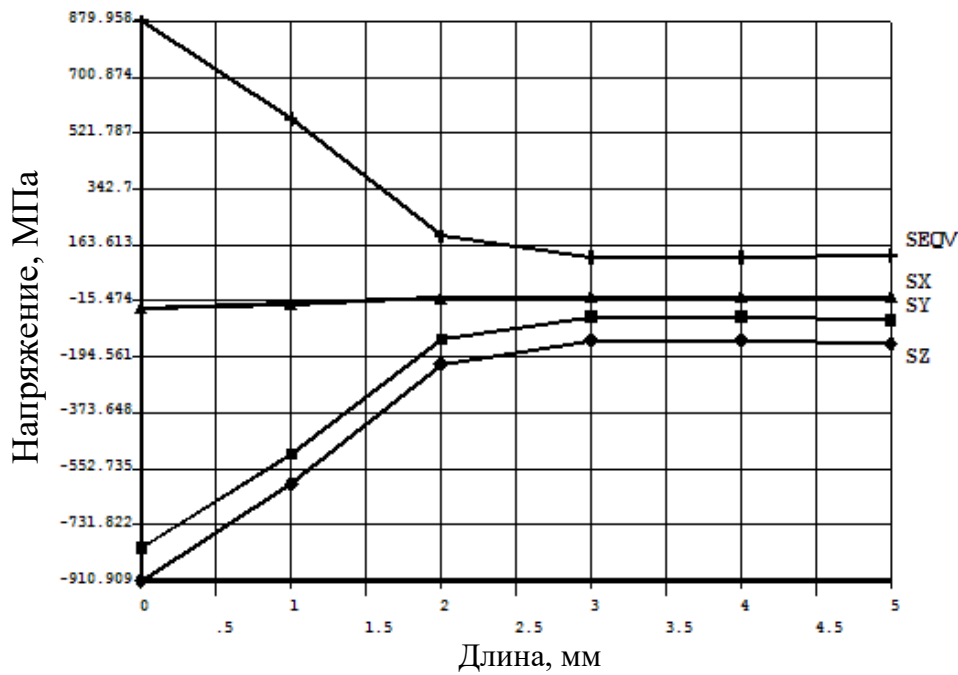


По толщине бойка

Рисунок 5 – Характер распределения температур от воздействия на боек теплового потока и охлаждения водой

Для рассчитанных полей температур были определены величины осевых термоупругих напряжений ( $SX$ ,  $SY$  и  $SZ$ ) и эквивалентных напряжений по Мизесу ( $SEQV$ ), возникающих в бойках без каналов при обжати заготовки и при охлаждении их водой во время холостого хода (рисунок 6).

Представленные результаты свидетельствуют о том, что в зоне контакта бойка с заготовкой от воздействия температурной нагрузки в приконтактном слое бойка возникают сжимающие напряжения. Максимальные термоупругие напряжения возникают вдоль осей  $Y$  и  $Z$  и достигают величин минус 740-910 МПа. Затем по толщине приконтактного слоя эти напряжения снижаются и на глубине 2 мм они становятся равными минус 108-140 МПа.



В конце контакта

Рисунок 6 – Характер термоупругих напряжений от воздействия на боек без каналов температурного поля

На рисунке 7 показаны закономерности распределения осевых суммарных напряжений в бойках от усилия обжатия и температурной нагрузки по высоте бойка без каналов (верхняя оценка напряженного состояния бойков).

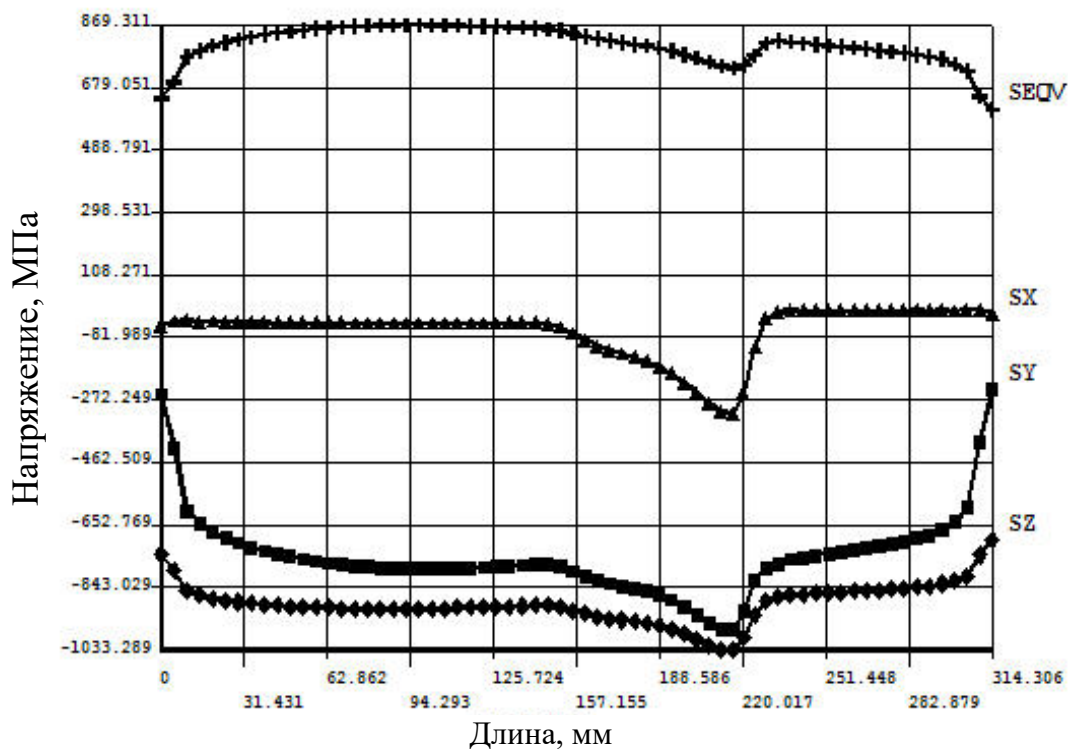


Рисунок 7 – Характер суммарных напряжений от воздействия на боек без каналов температурного поля и усилия обжатия

Так суммарные напряжения от усилия обжата и температурной нагрузки в направлении осей  $Y$  и  $Z$  в сечении 3 достигают соответственно максимальных значений минус 980 МПа и минус 1033 МПа (рисунок 7).

Также выполнен расчет напряженного состояния бойков без каналов при уменьшенных в два раза значениях плотности теплового потока (вариант 2). Представленные ниже результаты будем считать нижней оценкой напряженного состояния бойков. Результаты расчета осевых термоупругих напряжений и эквивалентных напряжений по Мизесу, возникающих в приконтактном слое бойка без каналов (вариант 2), приведены на рисунке 8.

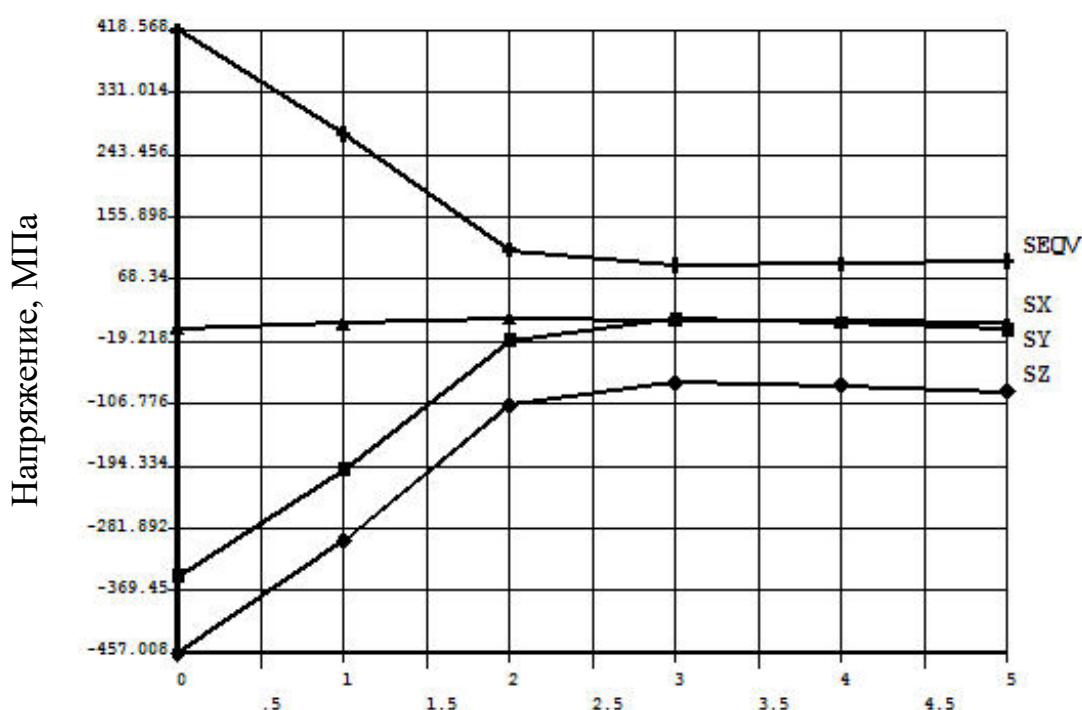


Рисунок 8 – Характер термоупругих напряжений от воздействия на боек без каналов температурного поля

Результаты расчета температурного поля бойков показали, что температура на поверхности бойков при обжати заготовки достигает величины порядка 320 °С, затем на глубине 2,5 мм она снижается до 120 °С.

Термоупругие напряжения в направлении оси  $Z$  достигают на контактной поверхности бойка максимальной величины, равной минус 486 МПа, а затем по толщине приконтактного слоя снижается до величины минус 138 МПа.

Результаты расчета напряженного состояния бойка от усилия обжатия и температурной нагрузки при получении листов сечением 3×2250 мм из стали 09Г2С приведены на рисунке 9. Температура контактной поверхности бойка равна 311 °С.

Для обоснованного выбора конструкции и материала бойков необходимо определить их напряженное состояние при различных режимах нагружения. Для сравнительной оценки напряженного состояния бойков различной конструкции рассмотрено два их конструктивного исполнения: с каналами для их охлаждения и без каналов.

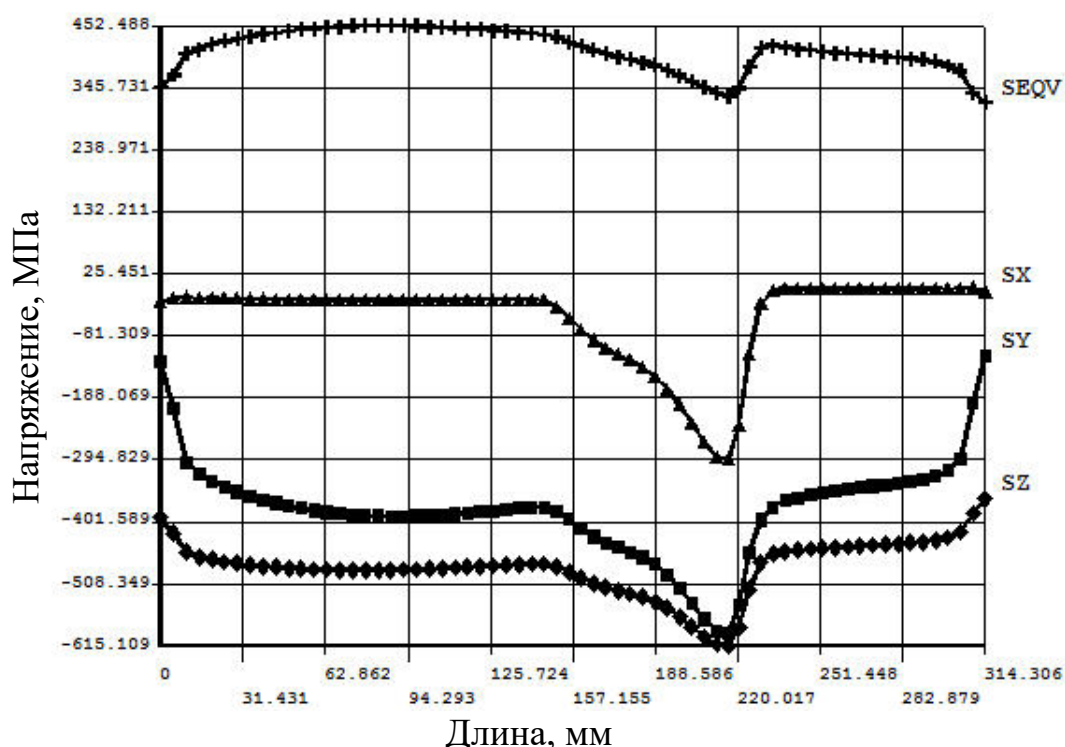


Рисунок 9 – Характер суммарных напряжений от воздействия на боек без каналов температурного поля и усилия обжатия

В результате расчетов определены температурные поля и осевые термоупругие напряжения в бойках с каналами и без них (таблица 1).

При расчете бойков с каналами температура их контактных поверхностей снизилась до 380-400 °С, что привело к снижению максимальных осевых сжимающих термоупругих напряжений до минус 730 МПа (таблица 1).

Установлено, что каналы для охлаждения бойков не только приводят к возникновению в области каналов высоких растягивающих напряжений (до 240 МПа), но существенно повышают уровень сжимающих суммарных напряжений до значения минус 840 МПа (таблица 1).



Установлено, что каналы для охлаждения бойков не только приводят к возникновению в области каналов высоких растягивающих напряжений (до 240 МПа), но существенно повышают уровень сжимающих суммарных напряжений до значения минус 840 МПа (таблица 1).

Таблица 1 – Напряженное состояние бойка различной конструкции при получении листов из стали на установке непрерывного литья и деформации

Конструкция бойка			Боек с каналами $q=20 \text{ МВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	Боек без каналов $q=20 \text{ МВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	Боек без каналов $q=10 \text{ МВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
Температура контактной поверхности бойка, °С			380-400	510-535	310-320
Напряжения от усилия обжатия, МПа	SX	кп	-200	-275	-275
		ок	-300	-	-
	SY	кп	-210	-233	-233
		ок	120	-	-
	SZ	кп	-100	-115	-115
		ок	140	-	-
Термоупругие напряжения, МПа	SX	кп	-50	-50	-39
		ок	-530	-	-
	SY	кп	-600	-831	-410
		ок	110	-	-
	SZ	кп	-730	-910	-486
		ок	140	-	-
Суммарные напряжения, МПа	SX	кп	-280	-324	-297
		ок	-840	-	-
	SY	кп	-670	-967	-592
		ок	180	-	-
	SZ	кп	-780	-1033	-615
		ок	220	-	-

График зависимости осевых сжимающих термоупругих напряжений в бойках от температуры контактной поверхности приведен на рисунке 10.

Таким образом, 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. С другой стороны, 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.

Экспериментальное исследование параметров совмещенного процесса непрерывного литья и деформации проведено на опытной установке (рисунки 2 и 11), которая спроектирована, изготовлена и установлена на участке литейно-ковочного производства ОАО «Уральский трубный завод». В состав участка входит индукционная печь, промежуточный ковш и система автоматического управления.

Экспериментальное исследование совмещенного процесса непрерывного процесса литья и деформации проводили при получении на опытной установке листа толщиной 18-20 мм из трубной стали 20. Толщина тонкого сляба перед обжатием стенками-бойками равна 30 мм.

В результате установлено, что температура сляба, выходящего из кристаллизатора, находится в пределах 1200÷1270 °С.

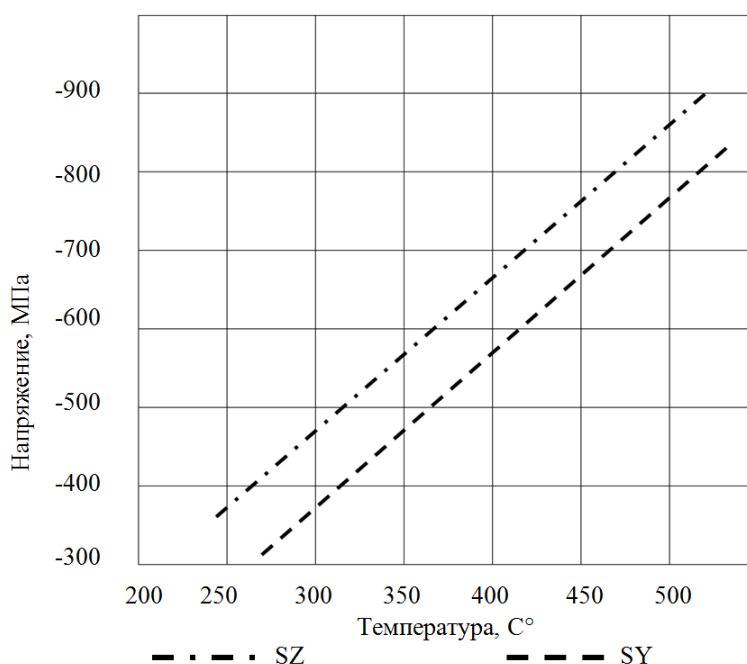


Рисунок 10 – Зависимость осевых сжимающих термоупругих напряжений в стенках-бойках без каналов от температуры контактной поверхности при обжатии полосы



Рисунок 11– Установка непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод»

Температура контактной поверхности бойков после выхода горячего сляба составила 300 °С. Эта величина соответствует температуре, полученной при расчете температурных полей и термоупругих напряжений в бойках без каналов установки.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основе теоретического исследования определено напряженное состояние системы бойки-полоса при получении листов из стали, разработана и освоена опытная установка ОАО «Уральский трубный завод».

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

- в результате расчета НДС металла в очаге циклической деформации определена нагруженность бойков установки при получении листов толщиной 3 мм и шириной 2250 мм. Установлено, что на контактной поверхности очага деформации возникают высокие сжимающие напряжения (до минус 326 МПа), которые воздействуют на бойки установки;

- поставлена и решена объемная задача определения напряженного состояния бойка без каналов от воздействия усилия обжатия при получении листов на установке. Установлены закономерности распределения осевых и эквивалентных напряжений в бойках без каналов установки от усилия обжатия сляба. Наибольшие сжимающие напряжения в бойке без каналов возникают в области очага деформации сляба в направлении осей X и Y и соответственно равны минус 275 МПа и минус 233 МПа;

- поставлена и решена объемная задача определения температурных полей и осевых термоупругих напряжений в бойках без каналов установки;

- установлен характер распределения температуры в приконтактном слое и по толщине бойка без каналов в зависимости от способов его охлаждения;

- установлены закономерности распределения осевых и эквивалентных термоупругих напряжений в бойках без каналов установки при обжатии полосы и на холостом ходу. При нагреве контактной поверхности бойков без каналов до температуры 510-535 °С в них возникают максимальные осевые сжимающие термоупругие напряжения величиной до минус 910 МПа (верхняя оценка уровня напряжений), а при температуре 320 °С осевые термоупругие напряжения снижаются до минус 490 МПа (нижняя оценка уровня напряжений);

- установлены закономерности распределения суммарных напряжений в бойках без каналов от усилия обжатия и температурной нагрузки. Установлено, что суммарные напряжения в бойках без каналов в направлении осей Y и Z достигают максимальных значений при температуре контактной поверхности бойков равной 520 °С, соответственно минус 980 МПа и 1033 МПа, а при температуре 320 °С минус 596 МПа и минус 615 МПа;

- установлены закономерности распределения температуры, осевых и эквивалентных термоупругих и суммарных напряжений в бойках без каналов при охлаждении их боковых поверхностей воздухом при обжатии сляба и на холостом ходу. При температуре контактной поверхности бойков без каналов равной 520 °С наибольшие термоупругие и суммарные напряжения в бойках без каналов возникают в направлении осей Y и Z и, соответственно, равные минус 767 МПа и минус 923 МПа.

- проведен сравнительный анализ напряженного состояния бойков различного конструктивного исполнения установки. Установлено, что каналы в бойках 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. С другой стороны, каналы в бойках позволяют снизить на 130 °С температуру их контактной поверхности в сравнении с бойками без каналов и, соответственно, уменьшить максимальные сжимающие термоупругие напряжения с минус 910 МПа до минус 730 МПа;

- разработана и освоена на ОАО «Уральский трубный завод» опытная установка непрерывного литья и деформации для получения стальных полос толщиной 3-22 мм и шириной 220 мм. Проведено экспериментальное исследование температурного режима системы бойки-полоса опытной установке ОАО «Уральский трубный завод».

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

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. Шевелев М.М. 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. Шевелев М.М. 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. Shevelev M.M. Cyclic-deformation system for the reduction of continuous-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. Шевелев М.М. 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. Шевелев М.М. 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. (0,4 п.л./0,1 п.л.)

6. Шевелев М.М. 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 (0,4 п.л./0,1 п.л.)

7. Шевелев М.М. Установка непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб / О.С. Лехов, М.Ю. Туев, Д.Х. Билалов, **М.М. Шевелев** // Производство проката. 2017. № 7. С. 13-15 (0,4 п.л./0,1 п.л.)

8. Шевелев М.М. 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 (0,4 п.л./0,1 п.л.)

9. Шевелев М.М. 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. (0,4 п.л./0,1 п.л.)

#### **Публикации в других изданиях:**

10. Шевелев М.М. 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.)

11. Шевелев М.М. 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./0,1 п.л.)

12. Шевелев М.М. 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./0,2 п.л.)

13. Шевелев М.М. 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./0,2 п.л.)

Подписано в печать 15.03.2019 г. Формат 60×84 1/16  
Бумага 80 г/м<sup>2</sup>. Цифровая печать.  
Тираж 100 экз. Заказ № 5.

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