

На правах рукописи



**Андросенко Мария Владимировна**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДВЕСНОГО  
БЛОКА ЗОНЫ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МНЛЗ С  
ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ  
ФОРМИРОВАНИЯ**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (металлургия)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Магнитогорск – 2021**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
Мезин Игорь Юрьевич

Официальные оппоненты: Лехов Олег Степанович,  
доктор технических наук, профессор,  
Российский государственный  
профессионально-педагогический университет

Шахов Сергей Иосифович,  
кандидат технических наук,  
начальник лаборатории непрерывной разливки  
АО АХК «ВНИИМЕТМАШ им. акад. Целикова»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится «30» июня 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.111.03 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте [www.magtu.ru](http://www.magtu.ru).

Автореферат разослан " " 2021 года

Ученый секретарь диссертационного совета



Терентьев  
Дмитрий Вячеславович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Зона вторичного охлаждения (ЗВО) МНЛЗ предназначена для затвердевания и поддержки отливаемого слитка. При затвердевании происходит воздействие силовых факторов, вызывающих выпучивание корки слитка.

Компании-производители стали на машинах непрерывного литья, как в России, так и за рубежом, нацелены на повышение конкурентоспособности их продукции. Главным показателем конкурентоспособности продукции является её качество, формируемое в ЗВО в подвесном роликовом блоке кристаллизатора (К), определяющем рациональное прохождение непрерывнолитой заготовки из К в оборудование ЗВО сортовой МНЛЗ.

Актуальными являются задачи, связанные с определением конструктивных параметров машины, направленные на достижение высоких показателей качества и эффективности производства.

Таким образом, совершенствование оборудования машин непрерывной разливки, направленное на выпуск заготовок повышенного качества, является актуальной задачей.

**Степень разработанности.** Существенный вклад в развитие научных основ по проблемам повышения выпуска качественной заготовки на МНЛЗ внесли: - в области кристаллизатора: А.И. Белоусов, С.И. Шахов, Б.А. Сивак, К.Н. Вдовин, Б.Н. Гоголов, Т.Д. Ермолюк, В.В. Савченко, А.М. Столяров, В.Н. Селиванов, В.В. Точилкин, А.А. Целиков, и др., - в области ЗВО: М.Я. Бровман, Д.П. Евтеев, В.М. Нисковских, В.М. Паршин, В.И. Лебедев, А.В. Третьяков, В.А.Пиксаев и др.

Разработаны подходы для выбора режимов охлаждения формируемой заготовки в кристаллизаторе и в ЗВО с целью исключения макро- и микродефектов, составляющих качество непрерывнолитой заготовки.

Однако в трудах этих ученых не рассматривается местоположение и количество роликов в подвесном блоке, отсутствуют технические указания по геометрии конструкции блока, а компании-производители МНЛЗ выполняют выбор схемы расположения роликов на основании эмпирического опыта, результатов экспериментальных исследований, общих рекомендаций.

Большой вклад в оценку качества продукции внесли Г.С. Гун, М.Б. Гитман, С.А. Орловский, С.А. Смоляк, Д.В. Юречко и др. В значительной части эти исследования охватывают только некоторое число количественных и качественных показателей.

Однако в трудах этих учёных не в полной мере разработан алгоритм определения показателя качества, позволяющий оценивать влияние каждого из факторов на потребительские свойства производимой литой сортовой заготовки.

Исследования выполнялись в рамках хозяйственных работ с ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

**Объект исследования:** Подвесной роликовый блок ЗВО сортовой МНЛЗ, расположенный под кристаллизатором.

**Предмет исследования:** Конструкция, устройство подвешенного роликового блока ЗВО сортовой МНЛЗ и влияние на него сил от напряжённо-деформированного состояния (НДС) формируемой заготовки.

**Методы исследования:** В работе использованы методы математической статистики, САД, САЕ, теории нечетких множеств, метод экспертных оценок, математическое программирование.

**Цель исследования:** Совершенствование конструкции подвешенного роликового блока зоны вторичного охлаждения МНЛЗ на основе проектных решений по схеме расположения роликов в подвешенном блоке для снижения ромбичности непрерывнолитой заготовки.

**Задачи исследования:**

1. Разработать модель определения НДС заготовки с жидкой сердцевиной и роликов, находящихся в зоне выхода заготовки из кристаллизатора.
2. Усовершенствовать конструкцию подвешенного роликового блока ЗВО сортовой МНЛЗ за счёт увеличения количества роликов в блоке.
3. Провести оценку предлагаемых решений по повышению качества сортовой заготовки по критерию «ромбичность».
4. Разработать алгоритм определения показателя качества сортовых заготовок для подтверждения результатов исследования и проектных решений, позволяющий выявить пути совершенствования конструкций машин и агрегатов, а также технологических процессов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Модель определения НДС заготовки с жидкой сердцевиной, находящейся в зоне выхода её из кристаллизатора.
2. Решения по проектированию подвешенного роликового блока ЗВО, обеспечивающего поддержку корочки заготовки, имеющей жидкую сердцевину, с большей площадью контакта.
3. Алгоритм определения показателя качества сортовых заготовок, позволяющий выявлять пути совершенствования зоны вторичного охлаждения.
4. Результаты апробирования новой конструкции блока ЗВО и анализа ее эффективности.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

- Усовершенствована модель оценки НДС формируемой непрерывнолитой заготовки в зоне выхода из кристаллизатора, отличающаяся от известных учетом наличия в ней двух составляющих: жидкой (до 85%) и твердой, что позволило спрогнозировать положение зон критических напряжений, приводящих к прорыву корочки слитка.

- Усовершенствована методика расчёта координат осей роликов подвешенного роликового блока, позволившая создать конструкцию, приводящую к равномерному распределению нагрузки на выходе заготовки из кристаллизатора, обеспечивающую снижение ромбичности заготовки на 75%, с учетом радиального расположения роликов.

- Получены новые научные знания о влиянии конструкции подвесной секции ЗВО сортовой МНЛЗ с тремя рядами роликов на снижение внутренних напряжений слитка и уменьшение ромбичности непрерывнолитой заготовки в процессе ее формирования. Установлено, что использование подвесной секции ЗВО с тремя рядами роликов снижает указанные напряжения с  $8,5062 \cdot 10^6$  Па до  $5,2872 \cdot 10^6$  Па.

**Практическая значимость:**

- Разработана новая конструкция и проведены испытания подвесного роликового блока с тремя рядами роликов ЗВО, обеспечившая уменьшение ромбичности на 75% и снижение коробления заготовки на 10 - 20% без выпучивания боковых стенок. Получен патент Российской Федерации на ПМ № 105849.

- Предложена методика оценки показателей качества сортовой заготовки МНЛЗ и разработана программа для реализации данной методики. Программа позволяет прогнозировать уровень качества заготовки в зависимости от состояния оборудования, технологии, обслуживающего персонала на данный момент и позволяет воздействовать на него. Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660392 «Математическая модель для оценки и управления показателями качества сортовой заготовки МНЛЗ». Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 15.09.2016г.

- Использование результатов работы подтверждены актами: внедрения на ПАО «ММК», внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

**Соответствие паспорту специальности.** Работа соответствует паспорту специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (металлургия) в части пункта:

1.Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов; механизации производства в соответствии с современными требованиями внутреннего и внешнего рынка, технологии, качества, надежности, долговечности, промышленной и экологической безопасности.

**Методология и методы исследования.**

При проведении теоретических исследований использованы основные положения теории обработки металлов давлением, теоретической механики, сопротивления материалов.

При обработке данных использованы методы математической статистики.

Оценка напряжённо-деформированного состояния заготовки, имеющей жидкую сердцевину от действия ферростатического давления, выполнена в системе твердотельного моделирования Autodesk Inventor и импортирована в Ansys Workbench 3D, при этом в моделях были созданы контакты сопрягаемых элементов конструкции, а также произведена фиксация верхнего элемента кристаллизатора.

**Достоверность научных и технических решений** подтверждаются использованием апробированных методов исследования, адекватностью используемых конечно-элементных моделей, результатами экспериментальных исследований в промышленных условиях, эффективностью использования научно-технических результатов в условиях промышленного производства.

**Личный вклад соискателя** заключается в проведении теоретических исследований, направленных на определение реологических свойств формируемого слитка с жидкой сердцевиной; в формулировании идей создания и в разработке новой конструкции подвешенного роликового блока ЗВО; в разработке алгоритма оценки качества непрерывнолитой заготовки в процессе ее формирования.

**Реализация результатов работы** заключается в разработке технической документации на изготовление подвешенного роликового блока ЗВО МНЛЗ, в изготовлении и испытании опытного образца подвешенного роликового блока и проведении оценки качества отлитой на нём заготовки; во внедрении конструкции на ПАО «ММК»; в разработке программы для ЭВМ №2016660392. «Математическая модель для оценки и управления показателями качества сортовой заготовки МНЛЗ»; в использовании результатов работы в учебном процессе студентов, обучающихся по специальности 15.05.01 «Проектирование металлургических машин и оборудования», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование».

**Апробация работы:** Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на 69-70-77ой межрегиональных научно-технических конференциях. Магнитогорск, 2011-12-19гг., на «Научно-техническом конгрессе в металлургии» в рамках Всероссийской научно-практической конференции «Череповецкие научные чтения». Череповец, 2011г., на международной конференции International science conference SPBWOSCE-2018 “Business technologies for sustainable urban development” St. Petersburg, 10-12 декабря 2018 г. Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Севастополь, 2019г.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 15 публикациях, из которых 3 статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, и 3 публикации в изданиях, индексируемых в международной наукометрической базе Scopus, 1 патент РФ на полезную модель № 105849, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660392.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 136 страниц машинописного текста, включающего 45 рисунков, 11 таблиц, библиографический список из 139 наименований и 7 приложений.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показано, что вопрос повышения качества непрерывнолитых заготовок решается за счет совершенствования оборудования и технологии. Сделан вывод об актуальности работы.

Сформулирована цель работы и раскрыт методологический подход к ее достижению, состоящий в последовательном решении ряда задач, содержащих основные научные положения, выносимые на защиту.

**В главе 1 «Обзор работы и конструкций оборудования машины непрерывной разливки сортовой заготовки и методов оценки её качества»** приведён аналитический обзор публикаций и разработок в области непрерывной разливки сортовой заготовки. Выявлены особенности функционирования агрегатов сортовой МНЛЗ в современных условиях, совершенствование её элементов с целью повышения выпуска заготовки с качеством, требуемым заказчиком.

Проводимые изменения конструкции узлов и деталей МНЛЗ с целью повышения технических характеристик приводят к улучшению работы, уменьшению простоев и, как следствие, к повышению объёмов выпускаемой продукции повышенного качества.

Кристаллизатор предназначен для получения и застывания струи жидкой стали, выливающейся из промежуточного ковша, для формирования достаточно толстой и прочной корки слитка.

Дальнейшее формирование слитка происходит в области роликовых блоков ЗВО.

С целью решения проблем, возникающих при формировании заготовки, необходимо развивать методологические основы модернизации роликовых блоков.

В результате выполнения аналитического обзора сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Глава 2 «Исследование НДС конструкции поддерживающих и формирующих роликовых блоков ЗВО сортовой МНЛЗ, обеспечивающих сохранение геометрии заготовки»** посвящена определению свойств формируемой заготовки сечением 150×150мм и состояния подвесного роликового блока, имеющего два ряда роликов Ø100мм, установленного на сортовой МНЛЗ, разработанного фирмой «VAI FUCHS» (таблица 1).

Таблица 1 - Параметры действующей конструкции подвесного блока ЗВО сортовой МНЛЗ

Обозначения	Расстояния до контрольных точек $l_i$ , м	Время до расчётных точек $T_i$ , мин	Толщина корочки $\delta_i$ , мм	Ширина жидкой фазы $u_i$ , мм	Величина ферростатического давления $P_{fi}$ , Па
1	0,9	0,333	11,5	127	57065,4
2	1,066	0,395	12,5	125	67590,796
3	1,281	0,474	13,5	124	81223,086

Для автоматизации процесса расчет проводили в системе инженерных расчетов Mathcad.

Последовательность подготовительных операций для расчёта НДС 3D модели кристаллизатора с подвесным блоком приведена на рисунке 1.

Разработаны компьютерные модели кристаллизатора с подвесным блоком, состоящим из двух рядов роликов в системе твердотельного моделирования Autodesk Inventor и импортированы в Ansys Workbench 3D, при этом в моделях были созданы контакты сопрягаемых элементов конструкции, а также произведена фиксация

верхнего элемента кристаллизатора, что необходимо для дальнейшего шага работы в расчёте напряжённо-деформированного состояния (НДС).

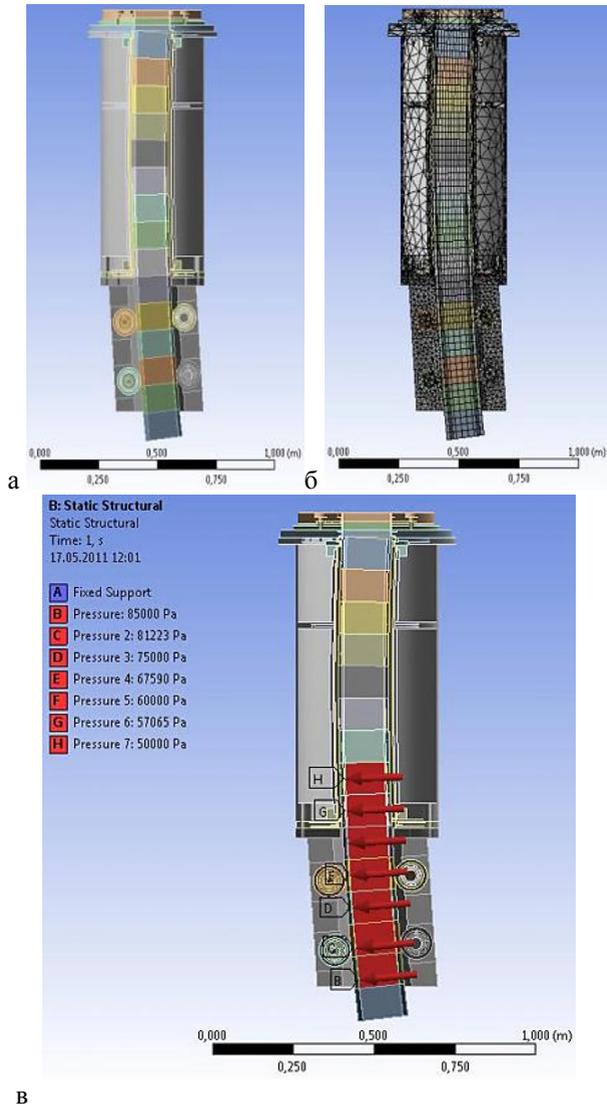


Рисунок 1 – Последовательность подготовительных операций для расчёта НДС 3D модели кристаллизатора с подвесным блоком: а - импортированная в Ansys Workbench; б - с нанесённой конечно-элементной сеткой; в - с заданными силами в контакте «слиток-ролики».

Расчёты производились для следующих материалов: материал слитка – сталь марки СтЗсп: при  $t=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  $E=1,6\cdot 10^{11}\text{ Па}$ ;  $\rho=7600\text{ кг/м}^2$ ;  $\mu=0,3$ ;  $\zeta=1,3\cdot 10^{-5}\text{ 1/}^{\circ}\text{C}$ ; материал роликов – сталь марки 25Х1М1Ф: при  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $E=2\cdot 10^{11}\text{ Па}$ ;  $\rho=7850\text{ кг/м}^2$ ;  $\mu=0,3$ ;  $\zeta=1,2\cdot 10^{-5}\text{ 1/}^{\circ}\text{C}$ ; окружающая среда – воздух,  $t=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На 3D модели кристаллизатора с подвесным блоком роликов была нанесена конечно-элементная сетка, которая нужна для дальнейшего расчёта напряжений и деформаций во всех точках конструкции.

Модель была нагружена предварительно посчитанными, действующими на элементы конструкции силами от ферростатического давления в контакте «слиток - ролики».

На рисунке 2 представлены итоговые результаты расчёта напряжённно-деформированного состояния 3D модели кристаллизатора с подвесным блоком, на котором указаны максимальные значения расчетных параметров.

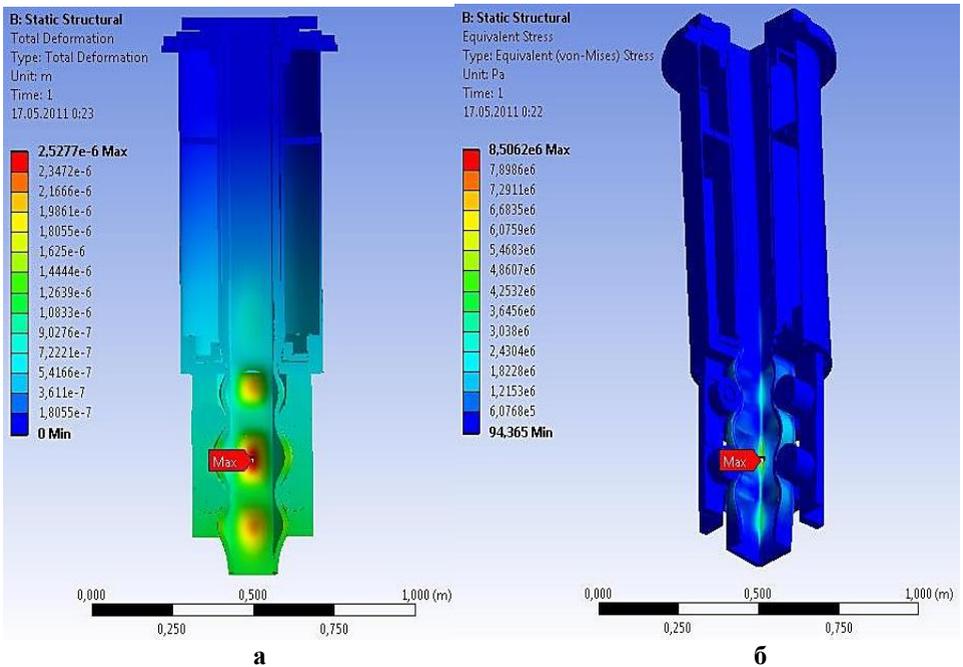


Рисунок 2 - Картина результирующего расчета напряжённно-деформированного состояния 3D модели кристаллизатора с подвесным блоком с двумя рядами подерживающих роликов: а - деформация, б - эквивалентные напряжения

Картина деформированного состояния 3D модели кристаллизатора с подвесным блоком показала, что максимальная деформация ( $\Delta$ ) и напряжение ( $\sigma_{\text{vonMises}}$ ) слитка в

блоке соответствует месту между первым и вторым рядами роликов в наружном радиусе слитка и соответствует  $\Delta=2,5277 \cdot 10^{-6}$  м,  $\sigma_{\text{vonMises}}=8,5062 \cdot 10^6$  Па.

Проведя исследование, можно сделать вывод, что даже незначительное отклонение от технологии может привести к нарушению геометрических параметров заготовки и даже к аварийной ситуации в местах с максимальными показателями, а сама конструкция требует доработки.

**Глава 3 «Разработка новой конструкции подвесного роликового блока ЗВО сортовой машины непрерывного литья заготовки ЭСПЦ»** посвящена определению реологических свойств формируемой заготовки и роликов разработанного подвесного роликового блока.

Предложение изменения конструкции роликовых блоков, приводящих к снижению нагрузок на элементы подвески, и, как следствие, к снижению контактных нагрузок между роликами и сортовой заготовкой, которые приводят к деформации поверхности и формы заготовки, реализовано согласно «Программе испытания роликовой подвески кристаллизатора сортовой МНЛЗ», принятой техническим отделом. При существующих базовых размерах основания и кронштейнов установить три ряда роликов, вместо двух рядов, тем самым уменьшив расстояние между роликами, не меняя геометрических параметров металлоконструкции.

Силовой анализ конструкции подвесного блока роликов ЗВО сортовой МНЛЗ ЭСПЦ ПАО «ММК» проводили по методике, описанной во второй главе.

Рассчитаны параметры формируемой заготовки, находящейся в подвесном роликовом блоке ЗВО сортовой МНЛЗ (таблица 2).

Таблица 2- Параметры предлагаемой конструкции подвесного блока ЗВО сортовой МНЛЗ

Обозначения	Расстояния до контрольных точек $l_i$ , м	Время до расчётных точек $T_i$ , мин	Толщина корочки $\delta_i$ , мм	Ширина жидкой фазы $u_i$ , мм	Величина ферростатического давления $P_{\phi}$ , Па
1	0,9	0.333	11,5	127	57065,4
2	1,041	0,386	12,5	125	66005,645
3	1,173	0,434	13	124	74375,238
4	1,1305	0,483	14	122	82744.83

На рисунке 3 представлены итоговые результаты расчёта напряжённо-деформированного состояния 3D модели кристаллизатора с подвесным блоком, на котором указаны максимальные значения расчетных параметров.

Картина деформированного состояния 3D модели кристаллизатора с подвесным блоком показала, что максимальная деформация ( $\Delta$ ) и напряжение ( $\sigma_{\text{vonMises}}$ ) слитка соответствует месту между первым рядом роликов и основанием, а также месту после третьего ряда роликов в наружном радиусе слитка, и соответствует  $\Delta=1,792 \cdot 10^{-6}$  м,  $\sigma_{\text{vonMises}} = 5,2872 \cdot 10^6$  Па

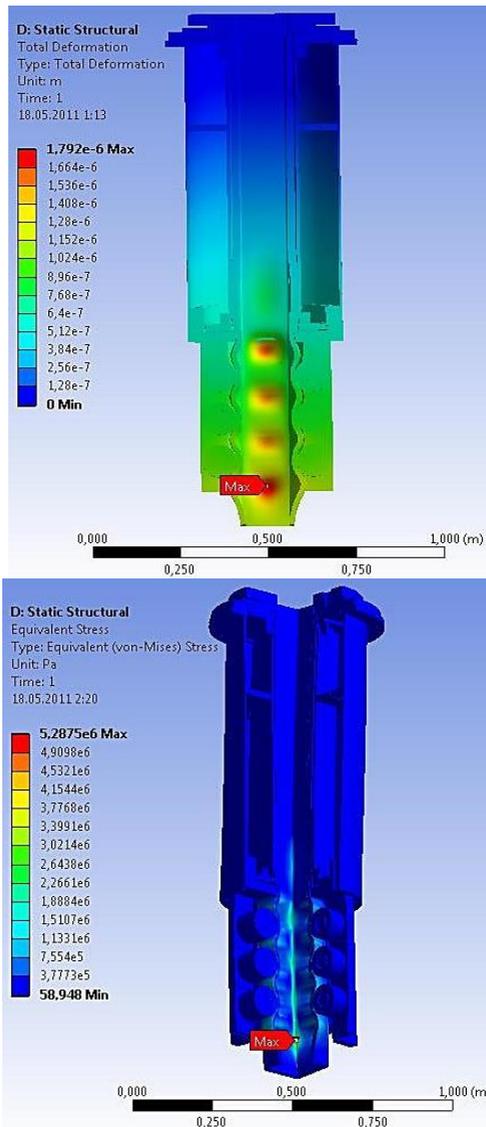


Рисунок 3 - Результирующие расчеты напряжённно-деформированного состояния 3D модели кристаллизатора с подвесным блоком с тремя рядами поддерживающих роликов: а-деформация, б-эквивалентные напряжения

Новая конструкция позволяет производить непрерывно-литую заготовку, даже при более высоких скоростях разлива, в результате уменьшения внутренних напряжений и деформации.

**Глава 4 «Рекомендации по изготовлению, испытанию и внедрению в производство конструкции подвесного роликового блока ЗВО сортовой МНЛЗ»** посвящена разработке и промышленной апробации подвесного блока с тремя рядами роликов, установленного в существующее пространство между кристаллизатором и роликовыми секциями, представленного на рисунке 4 и 5.

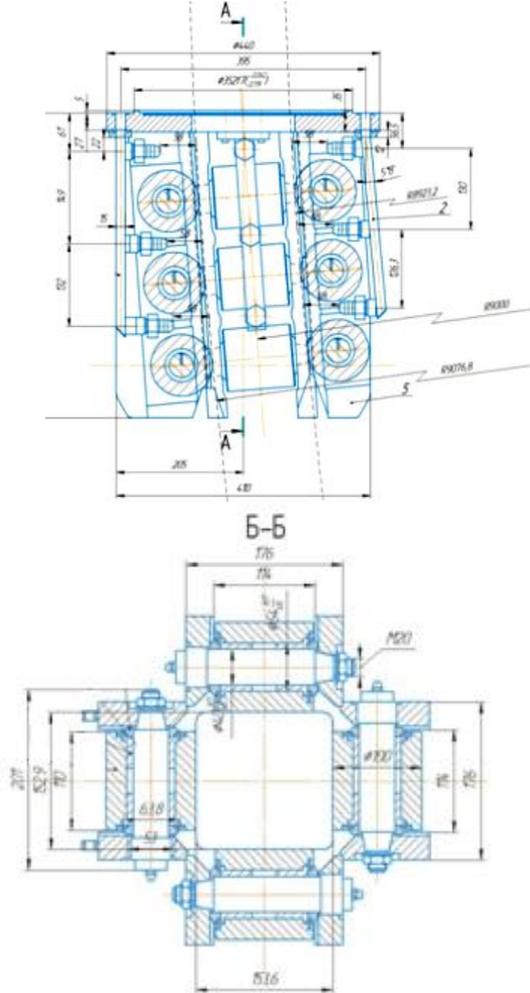


Рисунок 4 - Общий вид и схема расположения координат осей отверстий под ролики ЗВО

Радиальное расположение роликов зависит от координат осей отверстий под ролики разработанной подвески в направлении оси  $u$  с учётом номера пояса ( $i$ ), диаметра роликов ( $d$ ), радиуса машины ( $R$ ), размера отливаемой заготовки ( $L$ ) определяли как:

$$b_{yi} = i \cdot 1,5d; \quad (1)$$

$$b'_{yi} = \frac{b_{yi} \cdot (2R+d)}{2 \cdot (R-L)-d}, \quad (2)$$

а в направлении оси x:

$$b_{xi} = \frac{L}{2} + \frac{d}{2} + b_{yi} \cdot \sin \frac{2 \cdot \sin^{-1} \frac{b_{yi}}{2 \cdot (R-L)-d}}{2}, \quad (3)$$

$$b'_{xi} = \frac{L}{2} + \frac{d}{2} - b'_{yi} \cdot \operatorname{tg} \frac{2 \cdot \sin^{-1} \frac{b_{yi}}{2 \cdot (R-L)-d}}{2}. \quad (4)$$

По выполненным чертежам изготовлен модернизированный блок трехсекционной роликовой подвески и установлен на первом ручье сортовой МНЛЗ ЭСПЦ ПАО «ММК», являющимся наиболее дефектным в выпуске продукции.



Рисунок 5 – Общий вид блока трехсекционной роликовой подвески

Данные по результатам контроля макроструктуры непрерывнолитой сортовой заготовки производства МНЛЗ весом плавки 182 тонны приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Данные по результатам контроля макроструктуры непрерывнолитой сортовой заготовки производства МНЛЗ весом плавки 182 тонны

Машина	Марка стали	№ ручья	Макрогеометрия, мм		
			Ромбичность	Выпуклость	Вогнутость
МНЛЗ	Ст3сп	5	4	3	1
		1	1	1	1
		5	4	4	2
		1	1	-	1

После проведённого испытания составлен акт внедрения. Из акта внедрения следует, что данная конструкция значительно эффективнее по сравнению с предыдущей. По данным указанного акта внедрения ромбичность на первом ручье составила 1 мм, а на пятом – 4 мм. Таким образом, удалось снизить ромбичность на 75%.

Для оценки достоверности результатов исследования, правильности принятого технического решения и определения направления дальнейшего совершенствования процесса производства непрерывнолитой заготовки предлагается использовать принципы управления качеством продукции на основе использования интегрального комплексного показателя качества и метода нечетких множеств.

Предлагается алгоритм интегральной оценки с элементами нечеткой логики для управления показателем качества литой сортовой заготовки МНЛЗ ЭСПЦ, который приведен на рисунке 6.

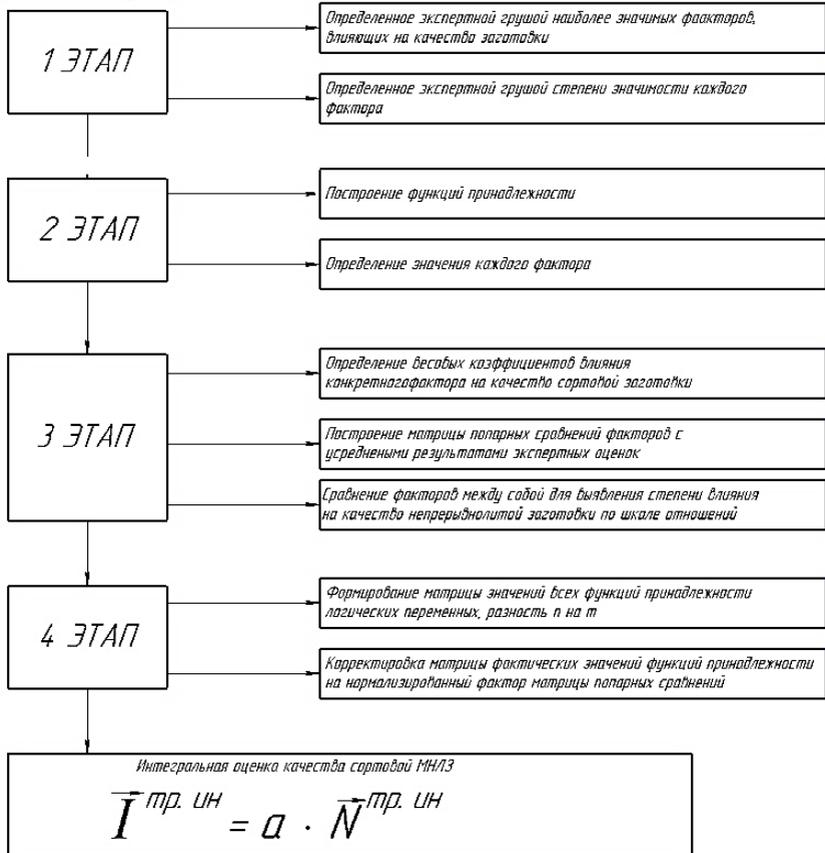


Рисунок 6 - Алгоритм интегральной оценки показателей качества сортовой заготовки с элементами нечеткой логики

В результате обработки данных были выявлены основные факторы, влияющие на качество отливаемой заготовки.

В результате анкетирования экспертной группы, для каждого фактора была выставлена оценка степени их значимости согласно шкале степени влияния факторов от 1 до 9 баллов.

Сформированная матрица значений всех функций принадлежности лингвистических переменных размерностью  $n$  на  $m$  приведена на рисунке 7.

дата	содержание серы	содержание фосфора	способ разлива	температура в прокате	скор. разлива	конструкция прокатна	инес криста	контр.ЗВО ч.з ро мбич.	возраст	о браз-е	стаж	проффецион-м	Нормализованный вектор	Промышленное значение	Оценка качества плавки
11.10.2010	1	1	1	1	1.0	1	1	0.8	1	0.8	0.9	1	0,166666667	1,333333333	0,150943
14.10.2010	1	1	1	1	1.0	1	1	1	0.8	0.9	1	1	0,166666667	1,5	0,169811
10.09.2010	0.8	0.8	1	1	0.6	1	1	1	0.9	0.8	1	1	0,1875	1,3125	0,148585
10.09.2010	0.8	0.8	1	1	0.6	1	1	0.8	0.9	0.8	1	1	0,145833333	0,875	0,099057
16.09.2010	0.6	0.8	0.7	0.8	0.8	1	1	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0,125	0,25	0,028302
16.09.2010	0.6	0.8	0.7	0.8	0.8	1	1	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0,125	0,25	0,028302
20.09.2010	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	1	1	1	0.8	0.8	0.9	1	0,145833333	0,583333333	0,066038
20.09.2010	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	1	1	0.6	0.8	0.8	0.9	1	0,145833333	0,4375	0,049528
21.09.2010	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0	0.4	0.4	0.6	0.6	0,125	0	0
21.09.2010	0.8	0.8	0.7	0.8	1.0	1	1	0.8	1	0.6	1	1	0,125	0,625	0,070755
24.09.2010	0.8	0.8	1	1	0.6	1	1	1	0.9	1	1	1	0,083333333	0,666666667	0,075472
24.09.2010	0.8	0.8	1	1	0.6	1	1	1	0.9	1	1	1	0,125	1	0,113208

Рисунок 7 - Матрица значений функции принадлежности, для показателей качества сортовой заготовки

Вычисление вектора интегральной оценки качества получаемой непрерывнолитой заготовки произведено по формуле:

$$\vec{I}_{\text{тр.ин}} = \mathbf{a} \cdot \vec{N}_{\text{тр.ин.}} ; \quad (5)$$

где  $a_{ij}$  – матрица значений всех функций принадлежности лингвистических переменных;

$\vec{N}_{\text{тр.ин.}}$  – нормализованный вектор матрицы попарных сравнений.

Рассчитывается индекс согласованности по формуле:

$$IS = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{n-1} ; \quad (6)$$

Данное отношение должно находиться вблизи 0,1.

Отношение согласованности (OC) рассчитывается по формуле:

$$OC = \frac{IS}{CS} ; \quad (7)$$

где  $CS$  – случайная согласованность, которую принимали по табличным значениям в зависимости от размерности матрицы.

Определяли вектор влияния факторов на качество непрерывнолитой заготовки.

Для проверки полученных результатов пользовались методом имитационного моделирования. Для этого анализировали данные по результатам контроля макроструктуры заготовки и данные о персонале за время эксперимента в условиях электросталеплавильного цеха ПАО “ММК”. Выбранные данные за время эксперимента заносили в таблицу и рассчитывали в программе Microsoft Excel. После заполнения матрицы в соответствии с данными, полученными в результате экспертных оценок, произвели оценку качества, которая показала уровень качества полученной заготовки.

Расчёты показали, что при одинаковых параметрах производства заготовки, отличающиеся только конструкцией подвесного блока ЗВО, качество плавки по па-

параметру «ромбичность» оценено показателем качества 0,1698, в то время как до эксперимента этот показатель составлял 0,1509. Таким образом, на качество плавки влияют как все факторы в сумме, так и единичные, повлияв на которые, можно улучшить качество готовой продукции.

Предлагаемая методика оценки позволяет найти более короткий путь получения готовой продукции с необходимым уровнем потребительских свойств через интегральный комплексный показатель, учитывающий влияние всех факторов.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана методика определения НДС заготовки с жидкой сердцевинной и роликов, находящихся в зоне выхода заготовки из кристаллизатора, для чего:

- проведён силовой анализ в системе инженерных расчетов Mathcad с использованием закона парности сил и интеграла Максвелла-Мора существующей и новой конструкции подвесного блока роликов ЗВО сортовой МНЛЗ;

- разработана компьютерная 3D модель зоны в системе твердотельного моделирования Autodesk Inventor,

- проведён анализ компьютерных моделей подвесных блоков роликов в комплексе Ansys Workbench,

- проведён анализ картин напряжённо-деформированного состояния заготовки с жидкой сердцевинной и роликов, находящихся в зоне выхода заготовки из кристаллизатора, который показал, что основной нагрузке подвергается место между первым и вторым рядами блока роликов, где максимальные эквивалентные напряжения соответствует  $\sigma_{\text{vonMises}}=5,2872 \cdot 10^6$  Па - в трёхроликовой подвеске и  $8,5062 \cdot 10^6$  Па - в двухроликовой подвеске. Напряжённо-деформированное состояние 3D модели кристаллизатора с подвесным блоком - с тремя рядами поддерживающих роликов (деформации в слитке -  $\Delta=1,792 \cdot 10^{-6}$  м, эквивалентное напряжение (по Мизесу) -  $\sigma_{\text{vonMises}}=5,2872 \cdot 10^6$  Па), - с двумя рядами поддерживающих роликов (деформации в слитке -  $\Delta=2,5277 \cdot 10^{-6}$  м, эквивалентное напряжение (по Мизесу) -  $\sigma_{\text{vonMises}}=8,5062 \cdot 10^6$  Па).

2. Разработан комплекс конструктивных решений, направленных на разработку конструкции подвесного роликового блока ЗВО, включающий в себя:

- анализ конструкции по всем параметрам, соответствующим главному критерию работоспособности;

- определение координат осей отверстий под ролики с учётом номера пояса (i), диаметра роликов (d), радиуса машины (R), размера отливаемой заготовки (L) в направлении оси y по зависимости:  $b_{yi} = i \cdot 1,5d$ ,  $b'_{yi} = \frac{b_{yi} \cdot (2R+d)}{2 \cdot (R-L)-d}$ ,

- в направлении оси x, по зависимостям:

$$b_{xi} = \frac{L}{2} + \frac{d}{2} + b_{yi} \cdot \sin \frac{2 \cdot \sin^{-1} \frac{b_{yi}}{2 \cdot (R-L)-d}}{2}, \quad b'_{xi} = \frac{L}{2} + \frac{d}{2} - b'_{yi} \cdot \text{tg} \frac{2 \cdot \sin^{-1} \frac{b_{yi}}{2 \cdot (R-L)-d}}{2}.$$

3. Оценка предлагаемых решений по повышению качества сортовой заготовки по критерию «ромбичность» показала снижение ромбичности на 75% при разливке 182 тонн стали марки СтЗсп. при использовании трехсекционной роликовой под-

вески. Полученные решения апробированы и внедрены на сортовой МНЛЗ ПАО ММК, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

4. Разработан алгоритм оценки качества литых сортовых заготовок через единый показатель ( $G^{р.мн}$ ), для чего проведена систематизация факторов, влияющих на качество сортовой заготовки; произведено распределение факторов по степени их влияния на качество заготовок экспертным методом, что позволило прогнозировать качество продукции и выявить степень влияния комплекса показателей на качество сортовой заготовки.

### **Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

#### **- в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК:**

1. **Андросенко, М.В.** Оценка напряженно-деформированного состояния слитка и конструкции МНЛЗ в области подвесных роликов зоны вторичного охлаждения. / М.В. Андросенко // *Металлург*. - 2019. - №4. - С.36 - 40.
2. **Андросенко, М.В.** Исследование и анализ качества сортовых заготовок машин непрерывного литья заготовок / М.В. Андросенко, И.Д. Кадошникова // *Тяжелое машиностроение*. 2015. - №9. - С.30 - 33.
3. **Аксенова, М.В. (Андросенко М.В.)** Влияние технологического персонала на качественные показатели работы участка разлива сортовой МНЛЗ ЭСПЦ ОАО «ММК» / М.В. Аксенова (М.В. Андросенко), Н.А. Квасова // *Научно-технический вестник Поволжья*. - 2013. - №4. - С.94-98.

#### **- патентные документы и зарегистрированные программные средства:**

4. Пат. на ПИМ № 105849 (РФ), Устройство для поддержания слитка в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / В.И. Кадошников, И.М. Захаров, А.Б. Великий, С.Ю. Зайцев, **М.В. Аксенова (М.В. Андросенко)**, А.П. Батрашкин. Заявка №2010144659; заявл. 01 ноября 2010; опубл. 24.06.2011. БИПМ №18.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660392 Математическая модель для оценки и управления показателями качества сортовой заготовки МНЛЗ / **М.В. Аксенова (М.В. Андросенко)**, В.И. Кадошников, И.Д. Кадошникова. и др. // Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 15.09.2016г.

#### **- в зарубежных изданиях, индексируемых в международной наукометрической базе Scopus:**

6. **Androsenko, M.V.** Improvement in billets quality from billet caster by roller suspension of secondary cooling zone stiffening / M.V.Androsenko, E.V.Kulikova, O.A.Ocipova // *International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2018)*. - 2018. - p.02048
7. **Androsenko, M.** Determining the quality of continuous casting from billet caster / M. Androsenko, E. Kulikova, N.Tyuteryakov, E. Reshetnikova, K. Pashenko, A. Yaroslavtsev // *E3S WEB OF CONFERENCES*. - 2019. - p. 01034

8. **Androsenko, M.** Analysis of acting forces on rollers under the billet caster mould in the zone of secondary cooling / M.Androsenko, E. Reshetnikova, N.Tyuteryakov // MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS. 2019. - p. 2458 - 2461

– в сборниках научных трудов и материалах конференций:

9. **Андросенко, М.В.** Контроль качества литой заготовки / М.В. Андросенко, И.П. Баландюк, И.Д. Кадошникова // Проблемы и перспективы технических наук. Сборник статей Международной научно-практической конференции. Уфа. - 2015. - С. 20 - 22.
10. **Андросенко, М.В.** Экспертный метод оценки поставленных задач. Современный взгляд на будущее науки / М.В. Андросенко // Сборник статей Международной научно-практической конференции. Уфа. - 2016. - С. 15-18.
11. **Аксенова, М.В. (Андросенко М.В.)** Влияние химического состава и способа разлива на качество сортовой заготовки МНЛЗ ЭСПЦ «ММК» / М.В. Аксенова (М.В. Андросенко), И.Ю. Мезин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 70-ой межрегиональной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. - 2012. - Том1. - С. 312 - 315.
12. **Андросенко, М.В.** Прогнозирование качества сортовых заготовок, полученных способом непрерывного литья применением теории нечётких множеств / М.В. Андросенко, И.Д. Кадошникова, И.А. Катеринина // Механическое оборудование металлургических заводов: Междунар. сб. науч. тр. под ред. Корчунова А.Г. Вып. 2. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. - 2013. - С. 52 - 55.
13. **Кадошников, В.И.** Напряженно - деформированное состояние роликовой подвески ЗВО сортовой МНЛЗ, разработанное в многофункциональном программном комплексе конечно-элементных расчётов ANSYS / В.И. Кадошников, **М.В. Аксенова (Андросенко М.В.)**, А.П. Батрашкин и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 68 - ой межрегиональной научно - технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. - 2010. - Том1. - С. 251 - 254.
14. **Аксенова, М.В. (Андросенко М.В.)** Сопоставление жесткости конструкций двух и трех секционных роликовых блоков ЗВО сортовой МНЛЗ ЭСПЦ и влияние их на качество заготовок / М.В. Аксенова (М.В. Андросенко), В.И. Кадошников, А.П. Батрашкин и др. // Материалы 69-ой научно-технической конференции: Сб. докл., Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г. И. Носова. - 2011. - Том1. - С. 144 - 146.
15. **Аксенова, М.В. (Андросенко М.В.)** Влияние позиционирования роликов при изготовлении блоков на качество сортовой заготовки МНЛЗ / Сб. научн. Тр. SWorld. // Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании - 2011». Выпуск 4. Одесса: Черноморье. - 2011. - Том 7. - С. 37 - 39.