

РАЗВИТИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА И СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ СТАЛРАЗЛИВОЧНЫЙ КОВШ - ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОВШ - КРИСТАЛЛИЗАТОР СОРТОВОЙ МНЛЗ

Специальность 05.02.13 - Машины, агрегаты и процессы (Металлургия).
Технические науки.

Докладчик:
Марочкин Олег Александрович

Научный руководитель –доктор технических наук
Точилкин Виктор Васильевич

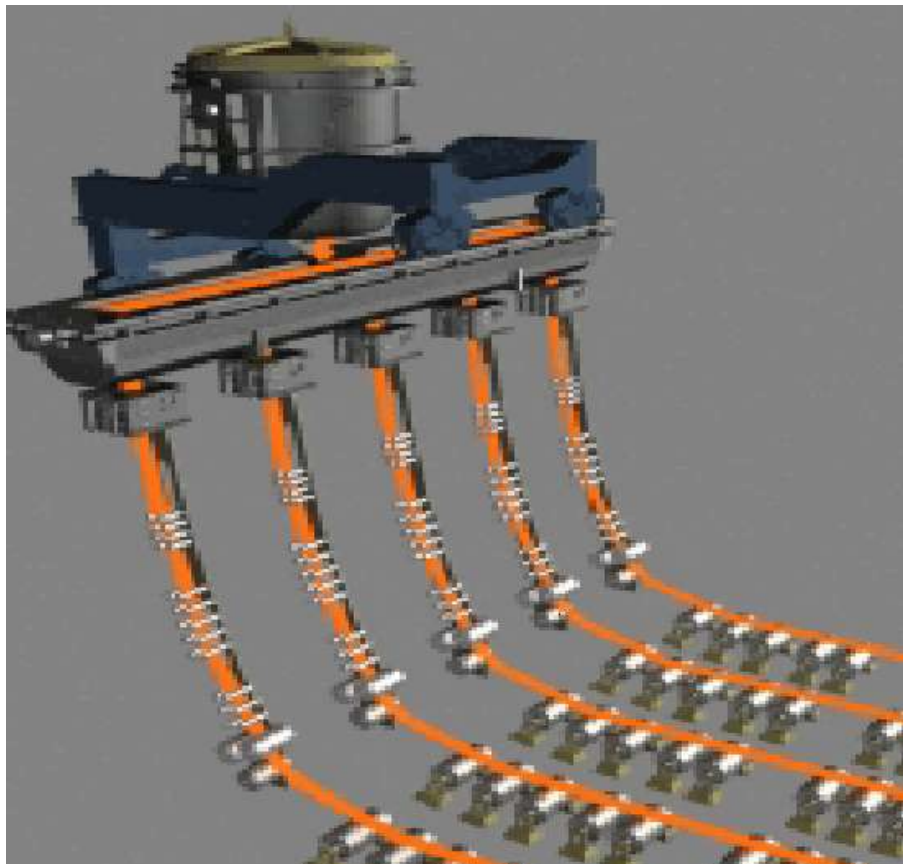
Магнитогорск, 2014 г.

Актуальность работы

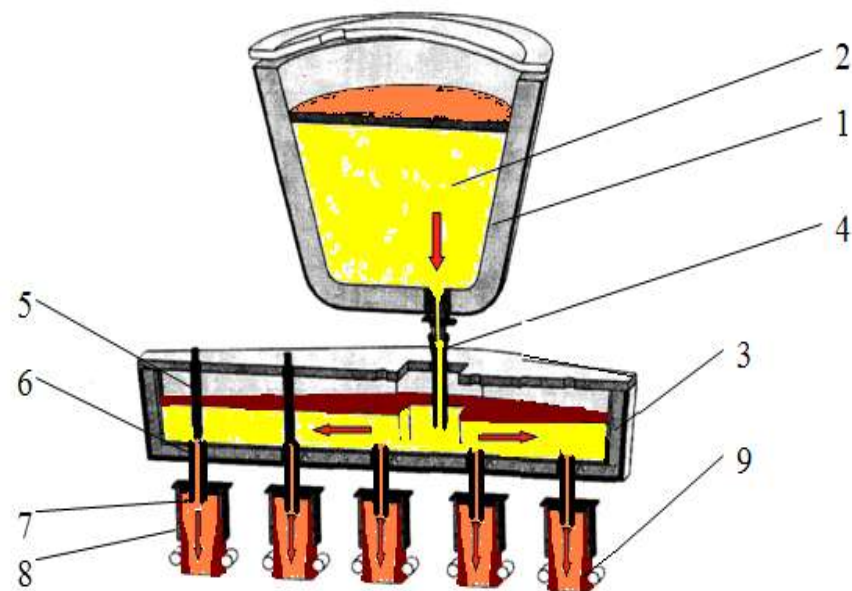
- Создание, развитие и модернизация элементов сортовых МНЛЗ - важная задача современной металлургической промышленности, решение которой обеспечивает повышение производительности и качества выпускаемой продукции.
- Исследования, направленные на создание и совершенствование методов расчетов и конструирования, а также внедрение новых элементов МНЛЗ, являются актуальными.
- МНЛЗ, являясь сложной технологической системой требуют постоянного внимания со стороны не только технологов, но и конструкторов. МНЛЗ с продолжительным сроком эксплуатации должны подвергаться модернизации, которая будет способствовать увеличению производительности и ресурса элементов, и повышению качества непрерывно-литой заготовки.

Сортовые машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ)

МНЛЗ представляют собой металлургический агрегат, принцип действия которого, заключается в следующем: Жидкая сталь с требуемыми температурными и химическими параметрами в СК, поступает на МНЛЗ.



Система сталеразливочный ковш-промежуточный ковш-кристаллизатор (СПК)



1 – сталеразливочный ковш; 2 – жидкий металл; 3 – промежуточный ковш;
4 – защитная труба; 5 – стопор; 6 – стакан дозатор; 7 – погружаемый стакан;
8 – кристаллизатор; 9 - заготовка

Математическое моделирование процесса разлива металла в металлургических машинах и агрегатах Сортовые машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ)

Процесс движения потоков жидкой стали, не достаточно широко рассмотрен это приводит к затруднению при решении конкретных задач, направленных на улучшение качества непрерывно-литой заготовки. Выходом из создавшегося положения может быть создание математических моделей поведения потоков стали в агрегатах МНЛЗ. Известны работы Закели, Вдовина, Точилкина по математическому моделированию распределения потоков стали в ПК, основанные на системе дифференциальных уравнений.

Система дифференциальных уравнений:

- Уравнение Навье –Стокса (для анализа движения потоков стали в системе СПК)

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \frac{1}{\rho} \nabla \mu \cdot \nabla \vec{u}$$

- Уравнения теплового баланса (для анализа распределения тепла в гильзе кристаллизатора)

$$\rho C_p = \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla k \cdot \nabla T$$

развитие которых позволит получать решения направленные на создание и совершенствование методов расчетов и конструирования, а также внедрение новых элементов МНЛЗ.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационного исследования: развитие методик расчета и создание на их основе усовершенствованных конструкций кристаллизатора и сопутствующих элементов системы сталеразливочный ковш - промежуточный ковш – кристаллизатор сортовой МНЛЗ для улучшения качества сортовой непрерывно-литой заготовки.

Задачи исследований:

1. Разработать математическую модель процесса прохождения стали в системе сталеразливочный ковш - промежуточный ковш - кристаллизатор сортовой МНЛЗ, позволяющую определять скорость потоков жидкой стали для определения проблемных мест этой системы и путей их решений.
2. Развить методику расчета гильз кристаллизатора на основе математической модели процесса прохождения стали в системе СПК и создать на её основе конструкции гильз кристаллизаторов сортовых МНЛЗ, с новыми геометрическими параметрами, для обеспечения стабильности процесса непрерывной разливки стали.
3. Развить методику расчета на основе математической модели процесса прохождения стали в системе СПК и создания элементов системы СПК, основанных на исключении проникновения воздуха в соединения элементов, выполненных из огнеупорных материалов, и по требуемым осевым отклонениям потока жидкой стали в подсистеме ПК-кристаллизатор от 0..5 мм.
4. Провести опытно-промышленные опробования созданных конструкций кристаллизатора сортовой МНЛЗ и сопутствующих элементов системы СПК для оценки эффективности их работы и внедрения в производство.

Математическое моделирование процесса прохождения потоков жидкой стали в системе СПК сортовой МНЛЗ

Определены допущения при анализе, заданы геометрические параметрам элементов системы СПК, начальные условия в виде значений и граничные условия в виде систем дифференциальных уравнений.

Допущения при анализе системы СПК сортовой МНЛЗ:

- моделируемый процесс протекает в объеме, ограниченном контуром области моделирования; жидкая сталь является вязкой и несжимаемой;
- *процесс разливки жидкой стали закрытой струей;*
- расход жидкости из ПК в кристаллизаторы равен расходу жидкости из сталеразливочного ковша в промежуточный ковш;
- вязкость жидкой стали остается постоянной;
- *тепловые потоки определены для ручья с максимальной скоростью истечения жидкости в кристаллизатор;*
- скорость истечения жидкости из сталеразливочного ковша в промежуточный ковш постоянна и задана; объемы СК, ПК и кристаллизатора изначально заполнены;
- *жидкая сталь распространяется по всем элементам системы СПК сортовых МНЛЗ;*
- расход жидкости из ПК в кристаллизаторы сортовых МНЛЗ равен расходу жидкости из сталеразливочного ковша в ПК.

Начальные условия, рассматриваемой системы

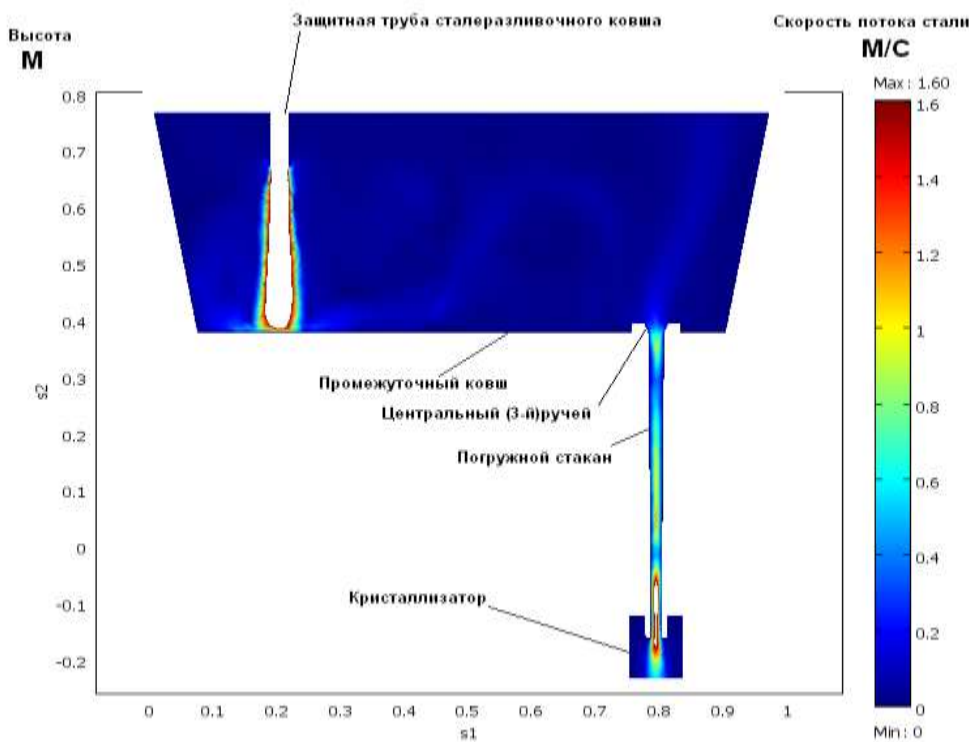
Название константы	Обозначение	Значение
Плотность стали, кг/м ³	ρ_c	7000
Плотность неметаллических частиц, кг/м ³	ρ_s	3000
Динамическая вязкость стали, Па·с	η_c	0,006
Начальная объемная доля частиц, $\frac{м^3}{м^3}$	ϕ_s	0,0001
Коэффициент теплопроводности, $\frac{Вт}{м \cdot К}$	k	30
Теплоемкость при постоянном давлении, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$	C_p	656

Граничные условия модели СПК

Граничные условия дифференциальных уравнений	
Навье-Стокса	Теплового баланса
Входной поток $\vec{u} = -u_0 \vec{e}_x = -3$	Температура входного потока: $T = 1823$
Плоскость симметрии $\vec{n} \cdot \vec{u} = 0$	Непроницаемость $\vec{n} \cdot \vec{q} = 0$
Свободная граница $\vec{n} \cdot \vec{u} = 0$	Тепловой поток $-\vec{n} \cdot \vec{q} = q_0 = -6$
Непроницаемость $\vec{u} = 0$	Тепловой поток $-\vec{n} \cdot \vec{q} = q_0 = -6$
Выходной поток $p = p_0 = 0$	Конвективный теплообмен $\vec{n} \cdot (-k\nabla T) = 0$

Результаты моделирования процесса прохождения стали в системе СПК сортовой МНЛЗ в виде полей скоростей

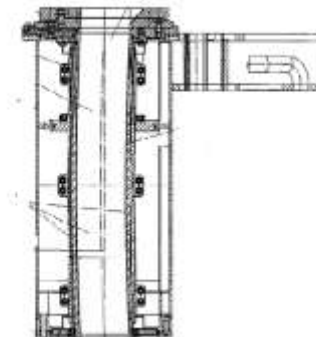
По результату определено, что скорости потоков стали в системе неоднородны. По возникновению максимальных скоростей система СПК условно разделена на три подсистемы



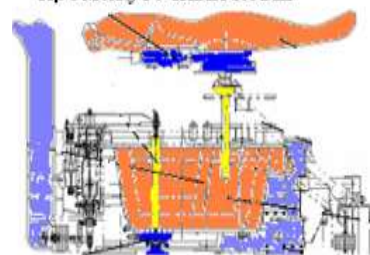
Центральный ручей №3, имеющий максимальные температуру стали и скорость теплового потока

подсистема кристаллизатор

создаются условия высокие центральные скорости и нулевых скоростей на границах стенок гильз кристаллизатора, что негативно сказывается на распределении тепла по периметру

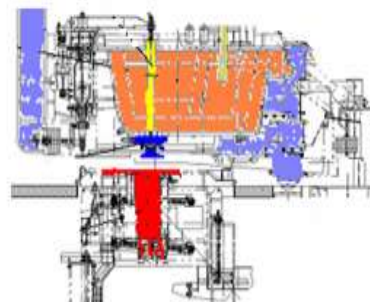


Подсистема сталеразливочный ковш-промежуточный ковш



подсистема СК-ПК создаются условия образования высоких скоростей на входе стали в ПК, что приводит к инжекции воздуха в стыках защитных элементов

Подсистема промежуточный ковш-кристаллизатор



подсистема ПК-кристаллизатор создаются условия образования высоких скоростей на границе подсистемы, что при осевом смещении приводит к образованию газового зазора в угловых частях гильз

Модель системы СПК сортовой МНЛЗ:

Основные использованные уравнения модели: Навье-Стокса и теплового баланса.

Геометрия модели – определяется компоновкой элементов конструкций системы СПК

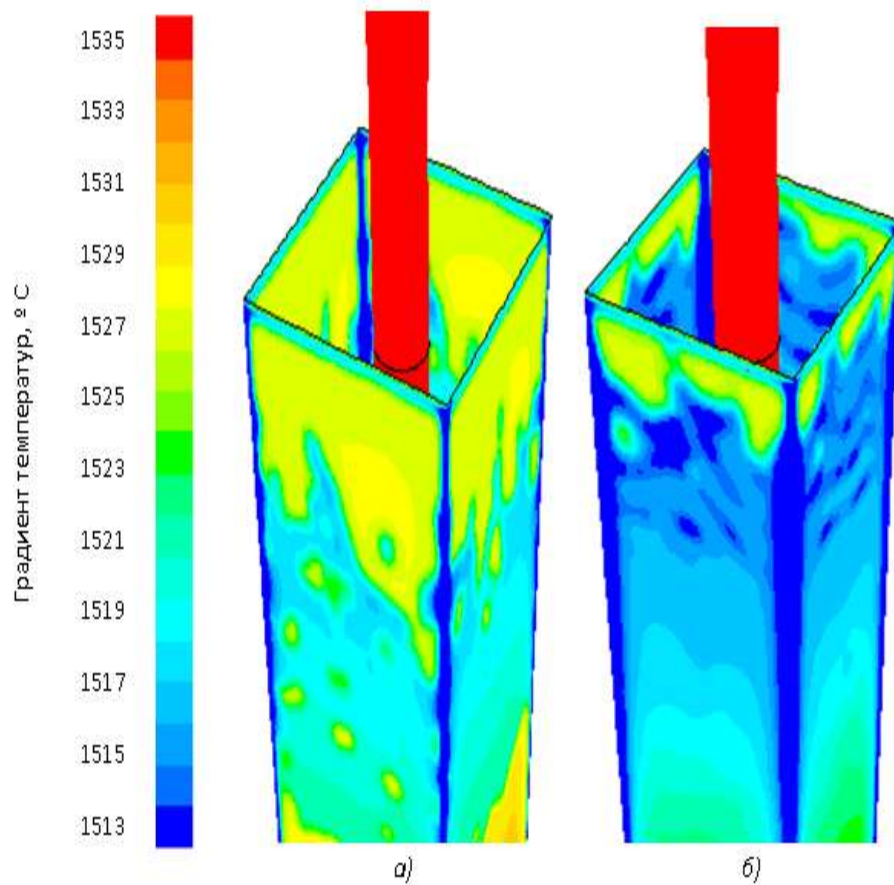
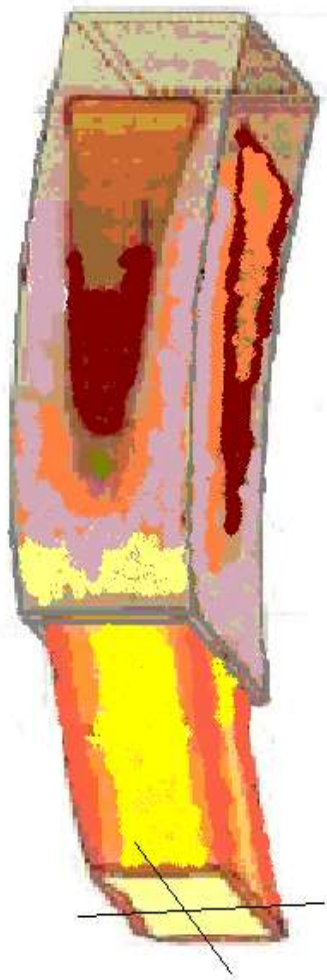
Масштаб модели 1:1.

Методика расчета гильз кристаллизатора

Для рассмотрения подсистемы кристаллизатор, по полученным полям скоростей и температур при моделировании процесса прохождения потоков стали в системе СПК, построена модель, позволяющая определять распределение тепла по периметру гильз кристаллизаторов с различными формами угловых зон.

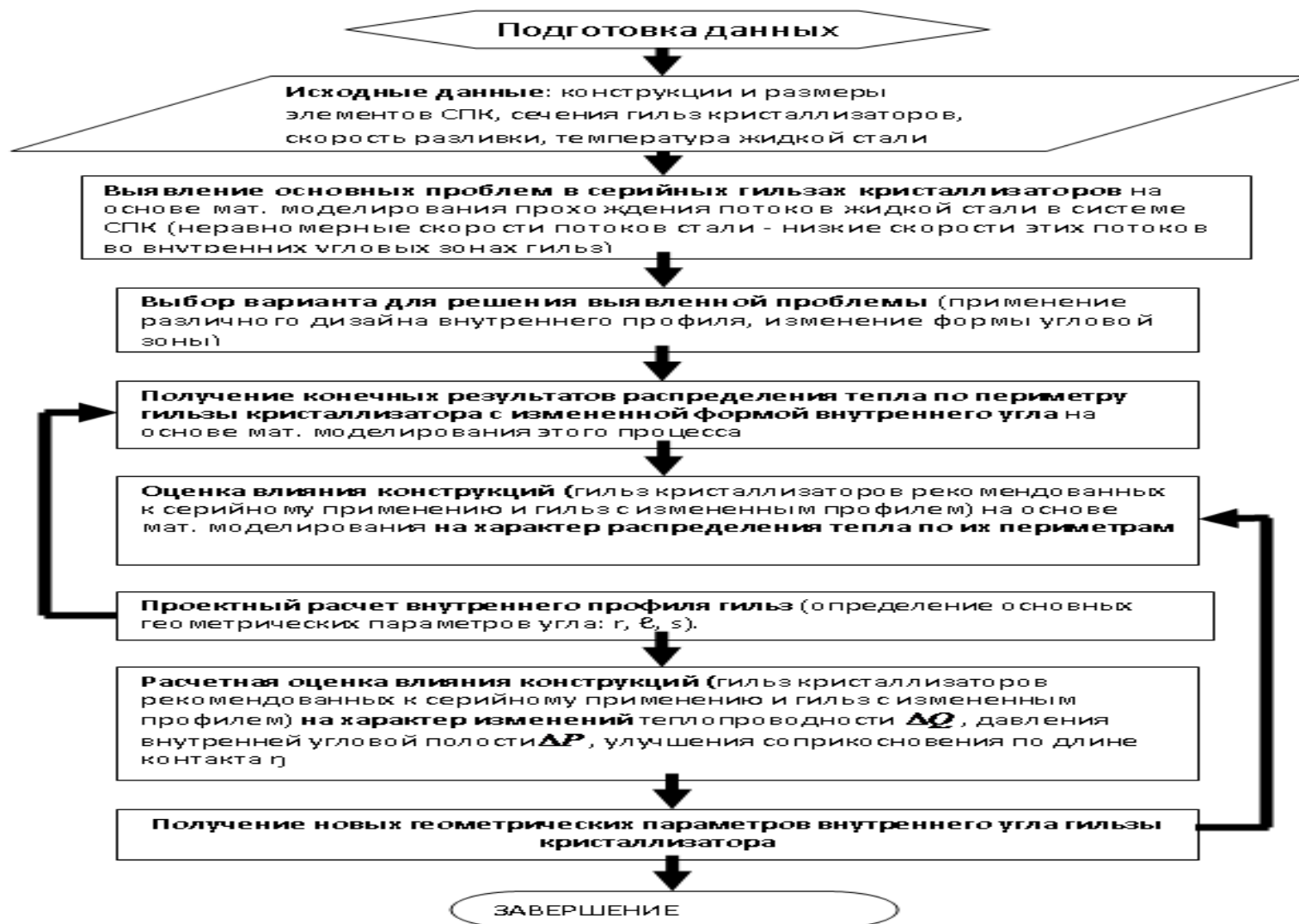
По которой определено, что более сбалансированное распределение тепла по своему периметру, имеет гильза с внутренним углом, выполненном в виде фаски, в сравнении с гильзой с внутренним углом, выполненном в виде радиуса.

Это позволяет утверждать, что угловые зоны имеют более низкую скорость потоков и температуру стали, поэтому для удовлетворения условий равномерности распределения тепловых потоков по периметру гильз кристаллизаторов необходимо снижение теплоотдачи через её стенку. Это достигается при изменении формы внутреннего угла гильзы кристаллизатора.



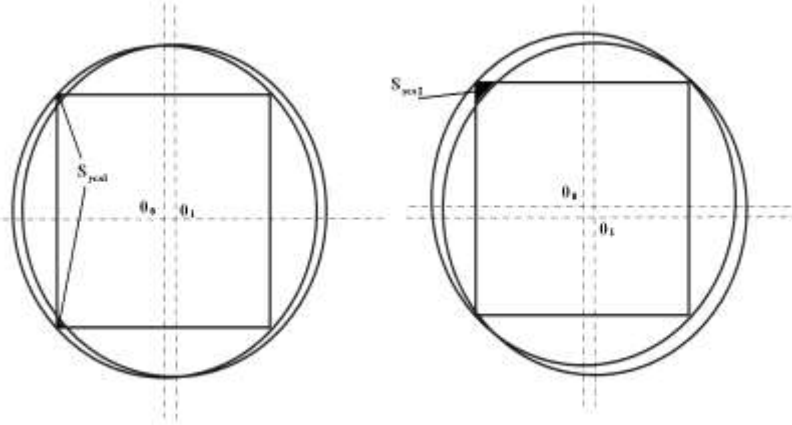
а- исходная гильза кристаллизатора
б- гильза с новыми геометрическими параметрами

Алгоритм для последовательного выполнения условий задачи направленной на определение формы внутреннего угла гильзы



Методика расчета гильз кристаллизатора

В кристаллизаторе при условии смещения струи жидкой стали по одной из осей кристаллизатора происходит образование областей снижения нормального соприкосновения жидкой стал и стенок кристаллизатора в нескольких угловых зонах, а при смещении относительно двух осей - образование области образования газового зазора в углу кристаллизатора. При разработке кристаллизаторов в работах Б.А. Сивака, В.М. Паршина и других существование этих областей описано как зоны отхода от одного или нескольких углов кристаллизатора.



Путем геометрических построений описанной и вписанной в квадрат гильзы кристаллизатора, удалось определить размер фаски внутреннего профиля, для исключения выше перечисленных несоответствий

$$x = R - r = 0,207a, \quad (3)$$

где R- радиус окружности, описывающей квадрат;
r- радиус окружности, вписанной в квадрат

Определены параметры угловых зон гильз кристаллизатора, выполненных в виде фаски и радиуса:

$$l_{фас} = \sqrt{2}r_{угл} = 0,072a \quad (4)$$

$$r_{угл} = \frac{x}{k_{угл}} = \frac{0,207a}{4} = 0,051a$$

где $k_{угл}$ - количество углов правильного равностороннего многоугольника

Определено отношение, характеризующее улучшения условий соприкосновения жидкой стали к угловой контактируемой плоскости по длине контакта угла, выполненного в виде фаски к углу, выполненному в виде радиуса :

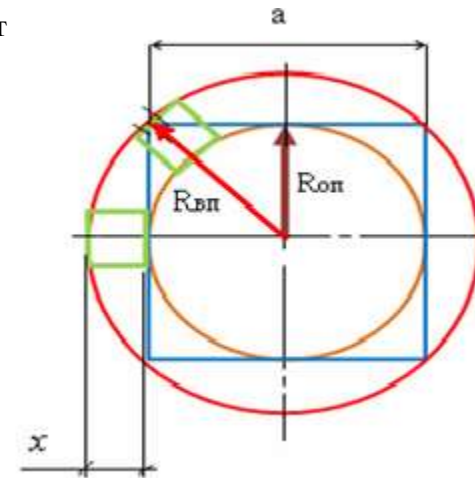
$$\eta = \frac{l_{рад}}{l_{фас}} = 1,3728 \quad (5)$$

где $l_{рад}$ - длина контакта жидкой стали с угловой контактируемой плоскостью, выполненной в виде радиуса;

$l_{фас}$ - длина контакта жидкой стали с угловой контактируемой плоскостью, выполненной в виде фаски.

Величина, характеризующая увеличения теплопроводности для различных внутренних углов гильзы кристаллизатора:

$$\Delta Q = \frac{k \times s_{рад} \times \frac{\Delta T}{l} \times t}{k \times s_{фас} \times \frac{\Delta T}{l} \times t} = \frac{s_{рад}}{s_{фас}}$$

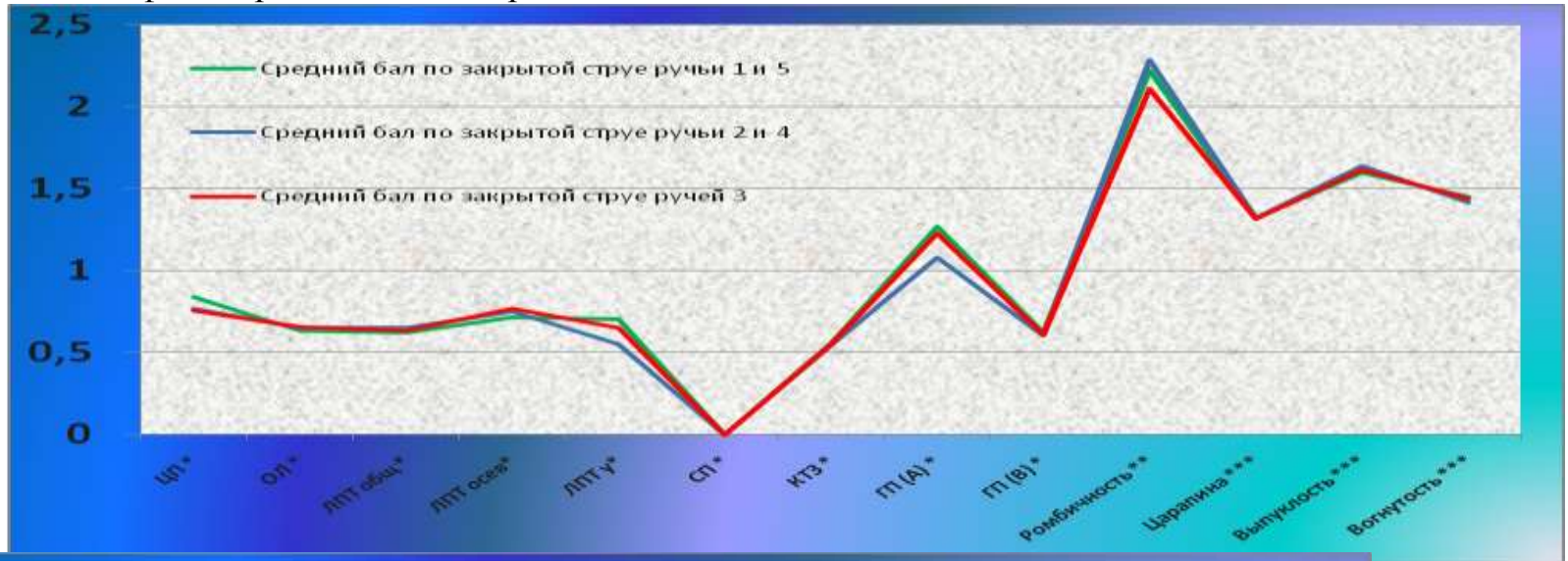


Проведение статистических исследований образования дефектов

Исследовано свыше 6717 темплетов заготовок, для определения основного дефекта:

- при различных типах разливки открытой / закрытой струями;
- при различных расположениях сталевыпускных отверстий ПК.

Средние баллы дефектов рассчитаны с погрешностью – 0,01



выявлено, что основным является – ромбичность, или разность диагоналей заготовки.

$$\delta = D_1 - D_2$$

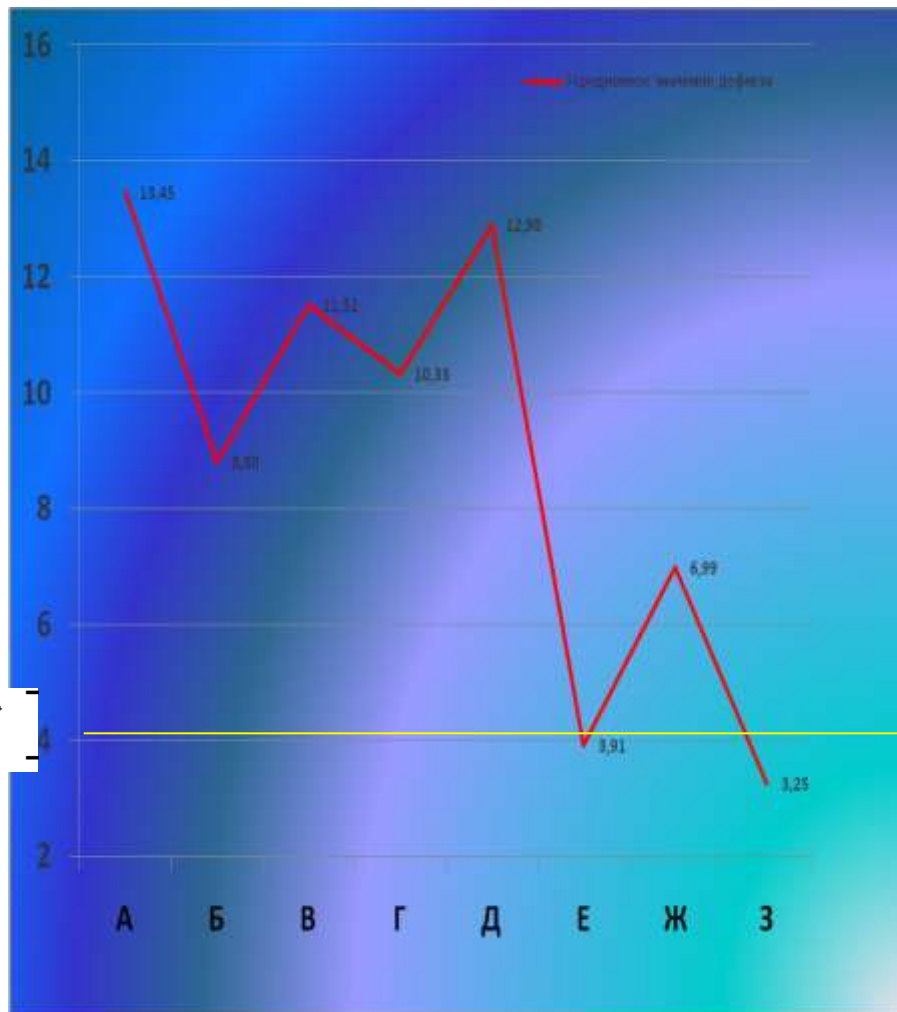
Зависимости возникновения дефекта «ромбичность» заготовки от химического состава стали

Получен график распределения дефекта ромбичность, в зависимости от химического состава разливаемых сталей. Для выявления наиболее выраженных значений дефекта ромбичность стали на отобранных темплатах, условно разделены на следующие группы:

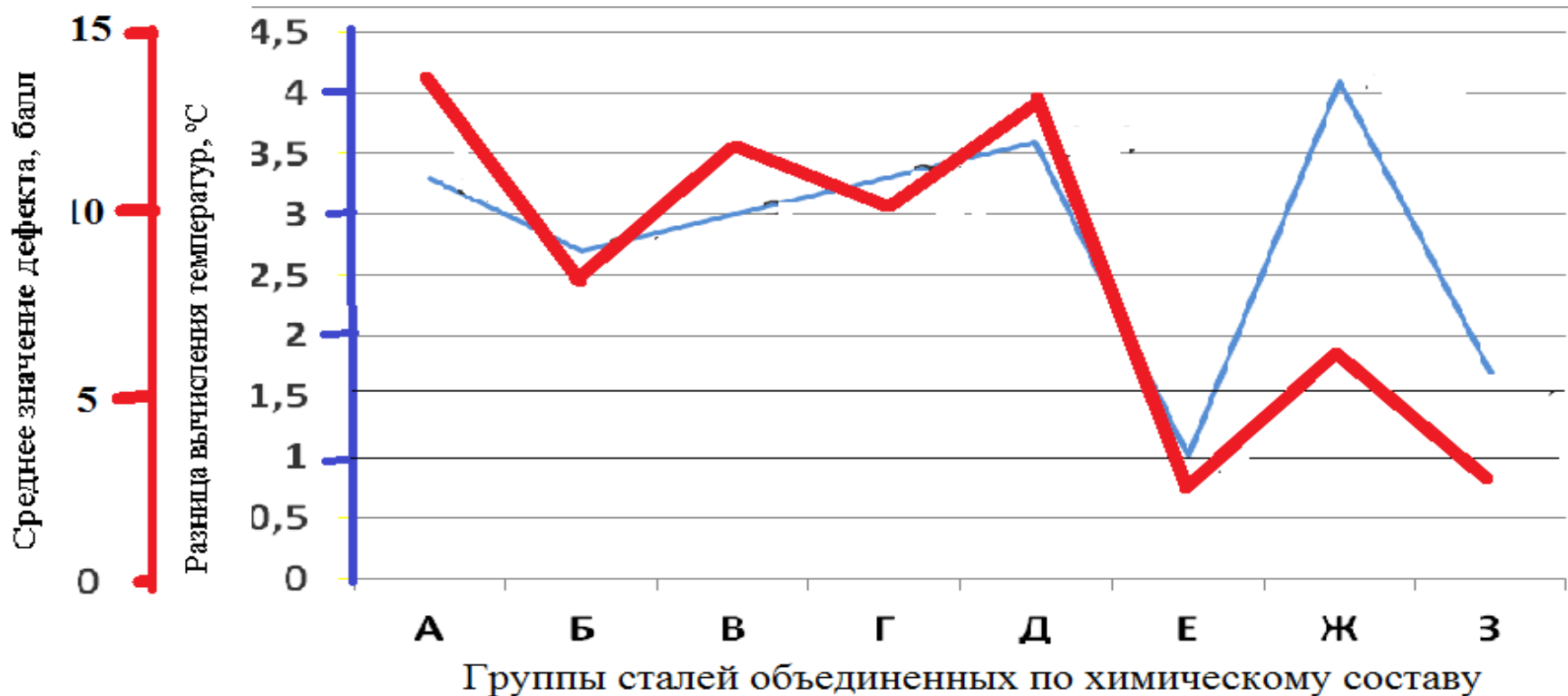
- А – группа сталей обыкновенного качества с содержанием углерода 0,15-0,23% (Ст3сп, Ст3пс, Ст4сп, Сталь 20, А500С);
- Б – группа сталей обыкновенного качества (Ст2, Ст1) с улучшенными механическими свойствами;
- В – группа сталей обыкновенного качества (Ст5);
- Г – группа сталей с содержанием углерода 0,4-0,6% кремния 1-2% (сталь 40С2, 55С2, 60С2);
- Д – группа сталей с содержанием марганца (сталь 09Г2С, 15Г, 25Г2С, 35ГС, 40Г1Р);
- Е – группа сварных сталей (сталь Св08, Св08А, Св08пс);
- Ж – группа кордовых сталей с содержанием углерода свыше 0,6%.
- З – группа автоматных сталей (А12).

Допустимая величина дефекта «ромбичность» для разливки стали закрытой струей:

$$\delta \leq 4 \text{ мм}$$



Зависимости возникновения дефекта «ромбичность» заготовки от температуры ликвидус



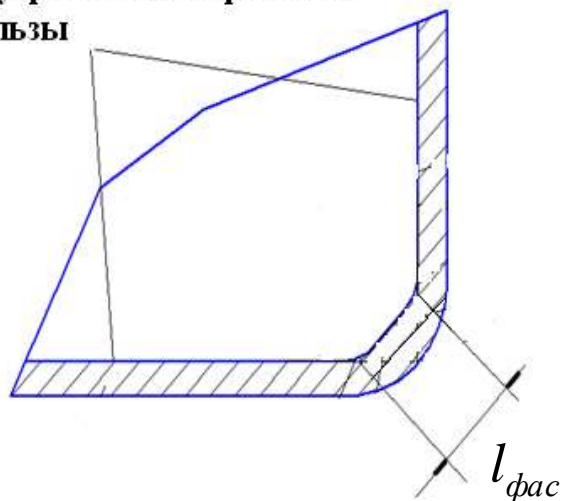
Влияние температур ликвидус в угловых зонах гильз кристаллизатора, при различном химическом составе сталей на величину образования дефекта ромбичность. Максимальное значение $T_{ликв}$, имеют группы Е, З.

• Определено, что при увеличении температуры ликвидус, снижением теплопроводности, изменением внутреннего профиля (величины и формы) в угловых зонах гильз кристаллизаторов возможно уменьшение величины ромбичности.

Гильза кристаллизатора с новыми геометрическими параметрами

По результатам исследований разработана и изготовлена гильза кристаллизатора с улучшенным внутренним профилем

Внутренняя поверхность
гильзы



Конструкция гильзы кристаллизатора защищена патентом на полезную модель:
Пат. 97070 U1 РФ, МКИ В22D 11/04/. Кристаллизатор машины непрерывного литья металлов.

Непрерывно-литая заготовка, полученная при использовании существующей и новой гильз кристаллизатора

При применении гильз с различными внутренними профилями были получены сортовые заготовки:



а

а - с радиальной формой угла;



б

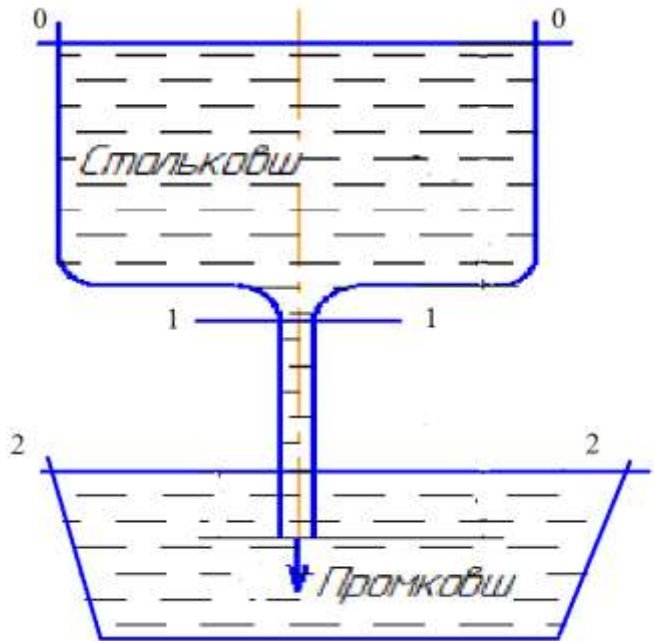
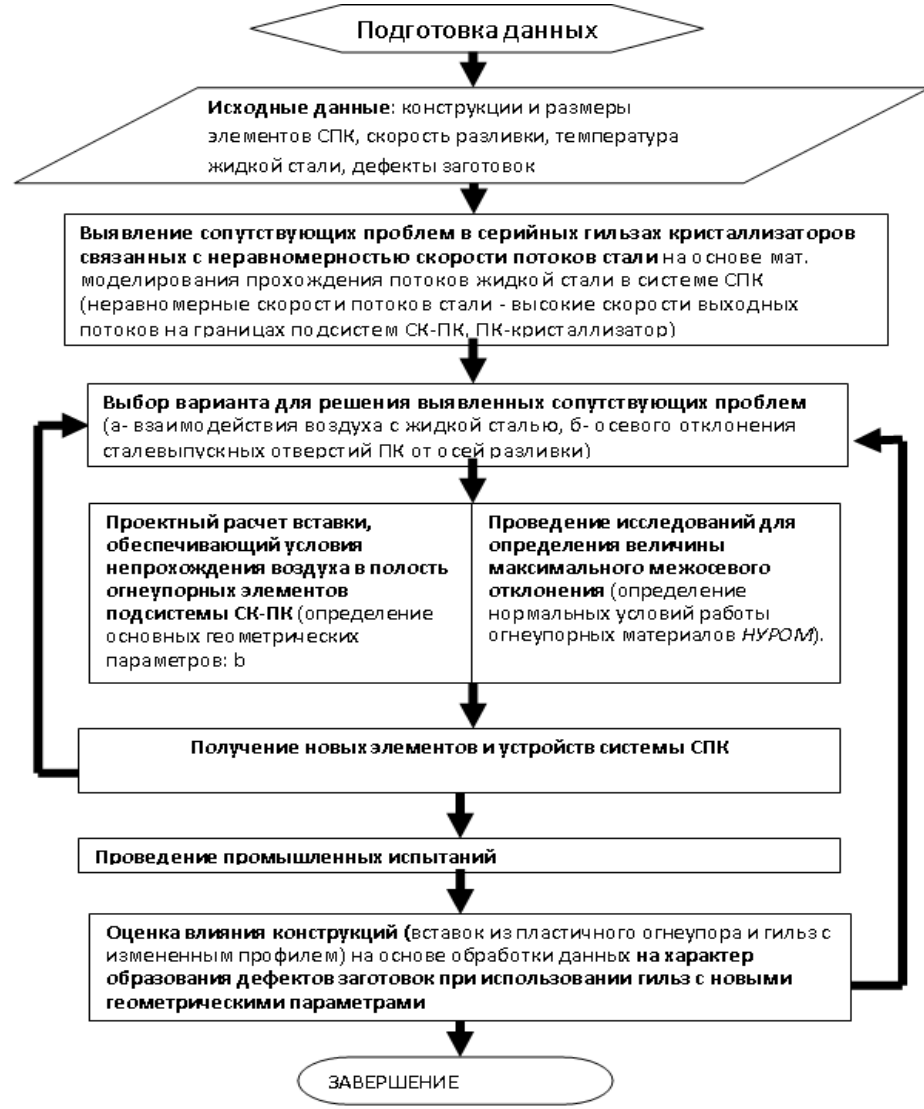
б - с усеченной формой угла

Развитие методики расчета на основе математической модели

процесса прохождения стали в системе СПК и создание сопутствующих элементов системы СПК, основанных на исключении проникновения воздуха в соединения элементов, выполненных из огнеупорных материалов, и по требуемым осевым отклонениям потока жидкой стали в подсистеме ПК-кристаллизатор от 0..5 мм

Алгоритм процедур исследования сопутствующего оборудования

позволяющий поэтапно выполнять условия задачи для двух подсистем



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВСТАВОК ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ В ПОДСИСТЕМАХ СК-ПК

Определена максимальная величина образования зазоров в полости между стаканом-коллектором и защитной трубой:

$$k = k_1 \times k_2 \times k_3 = 1,0225 \times 1,03125 \times 1,15 = 1,2126$$

где k_1 - величина образования зазора от температурного расширения защитной трубы, выполненной из материала кварц, $k_1=1,0225$;

k_2 - величина выгорания вставки из пластичного огнеупора, $k_2=1,03125$;

k_3 - величина зазора при эрозии огнеупорных изделий, $k_3=1,15$.

Определена рациональная величина бурта при проектировании вставок:

$$D_{\text{бурта}} = kD_{\text{от}} = 1,2126D_{\text{от}} \approx 1,2D_{\text{от}}$$



Получен патент на полезную модель №102552



а

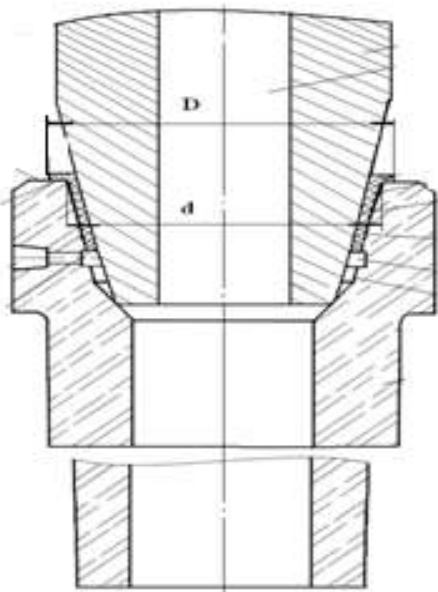


б

Защитные трубы со вставками: а - до внедрения; б - после внедрения

КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАЩИТЫ СТРУИ ЖИДКОЙ СТАЛИ ПОДСИСТЕМЫ СТАЛРАЗЛИВОЧНЫЙ КОВШ - ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОВШ

Величина бурта	Величина относительно диаметра	Зазор в полости соприкосновения огн. материалов	Прирост азота в жидкой стали, %	Трещинообразование
b=0	$1,0625 D_{BT}$	$0,0537 D_{BT}$	$\geq 0,001$	Да
b=2	$1,1 D_{BT}$	$0,0045 D_{BT}$	$\geq 0,0005$	Да
b=4	$1,2 D_{BT}$	$0,00 D_{BT}$	$< 0,0005$	Нет
b<4	более $1,2 D_{BT}$	$0,00 D_{BT}$	$\geq 0,0005$	Да



Отсутствие трещинообразования привело к уменьшению эрозии специальных устройств из огнеупорных материалов для прохождения жидкой стали, что позволило увеличить срок их эксплуатации и снизить норму-расхода с 5,7 шт/тыс.т (2007-2008 гг) до 3,2 шт/тыс.т (2009-2013 гг)

Проведены промышленные испытания, по которым получено положительное заключение, устройство применяется на МНЛЗ в условиях ММК.

Снижение нормы расхода позволило, получить экономию 7,74 руб/т.

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СПК СОРТОВОЙ МНЛЗ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНЫХ ОСЕВЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ПОТОКА СТАЛИ В ПОДСИСТЕМЕ ПК - КРИСТАЛЛИЗАТОР

исследованы свыше 100 отработанных промежуточных ковшей

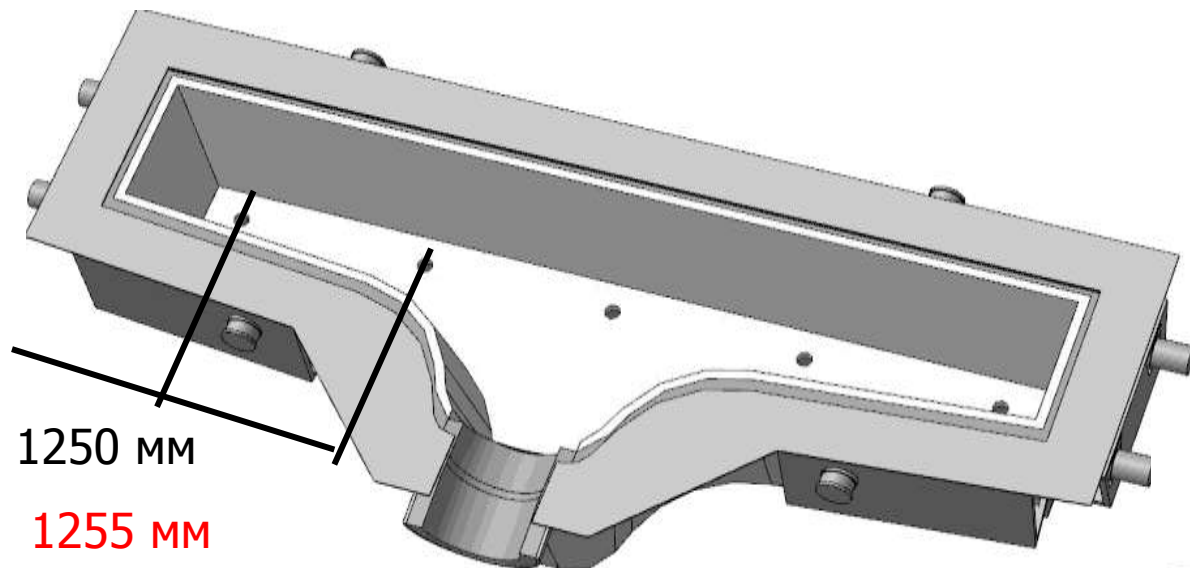


Рисунок - Образование эрозии погружаемого стакана при смещении межосевого расстояния в промежуточном ковше



Рисунок - Образование угла наклона погружаемого стакана при смещении межосевого расстояния

Устройство для снижения осевых отклонений потока стали промежуточного ковша

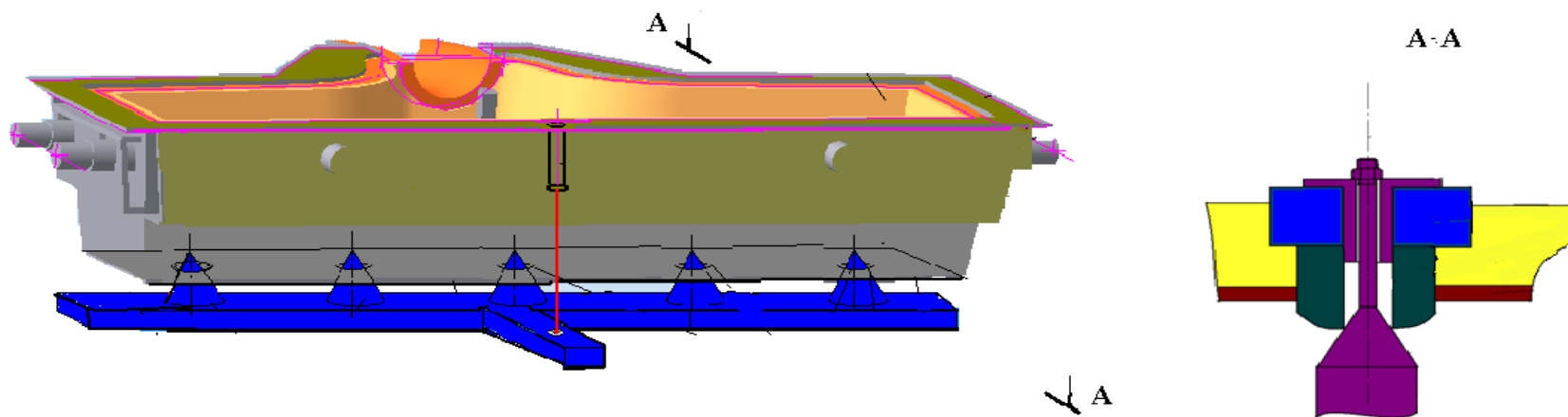
Эмпирически определена допустимая величина отклонения от межосевого расстояния, равная 5 мм., при разливке заготовки сечением 150 150 мм. при которой происходит необратимая боковая эрозия, приводящая к преждевременному выходу из строя стакана-коллектора прекращению разливки стали. Эта величина составляет:

$$B_{эр} = 0,89 \% h, \quad (6)$$

где h – расстояние от торцевой части стакана-коллектора до уровня менисковой части кристаллизатора.

Нормальные условия работы огнеупорных материалов $\Delta H_{УРОМ}$ примут выражение:

$$0 \leq \Delta H_{УРОМ} < B_{эр}, \quad (7)$$



Разработана рабочая документация для изготовления конструкции устройства для снижения осевых отклонений потока стали промежуточного ковша, представляющая собой жесткую опорную балку, на которой установлены направляющие ручки для правильной фиксации элементов ПК относительно друг друга, после выставки элементов, они фиксируются в днище ПК, по центральной оси установлен датчик положения опорного элемента для выставки осей сталеразливочных каналов стаканов-коллекторов относительно осей кристаллизаторов на разливочной площадке сортов МНЛЗ-1,2 ЭСПЦ.

Конструкция устройства защищена патентом на полезную модель № 122318.

Промышленные испытания новых элементов системы СПК

Цель промышленных исследований заключается в практической оценке эффективности применения гильз кристаллизатора с улучшенным внутренним профилем, разработанных на основе математического моделирования по сравнению с гильзами, рекомендованными к серийному применению на сортовых МНЛЗ ЭСПЦ ММК. Критерием при сравнении гильз для оценки их эффективности принята средняя стойкость гильз, применяемых на сортовых МНЛЗ, на момент испытания.

Применение гильз кристаллизатора с улучшенной внутренней геометрией, позволило улучшить условия тепло- и массопереноса.

Это подтверждено различными цветами побежалости на наружной поверхности гильзы кристаллизатора

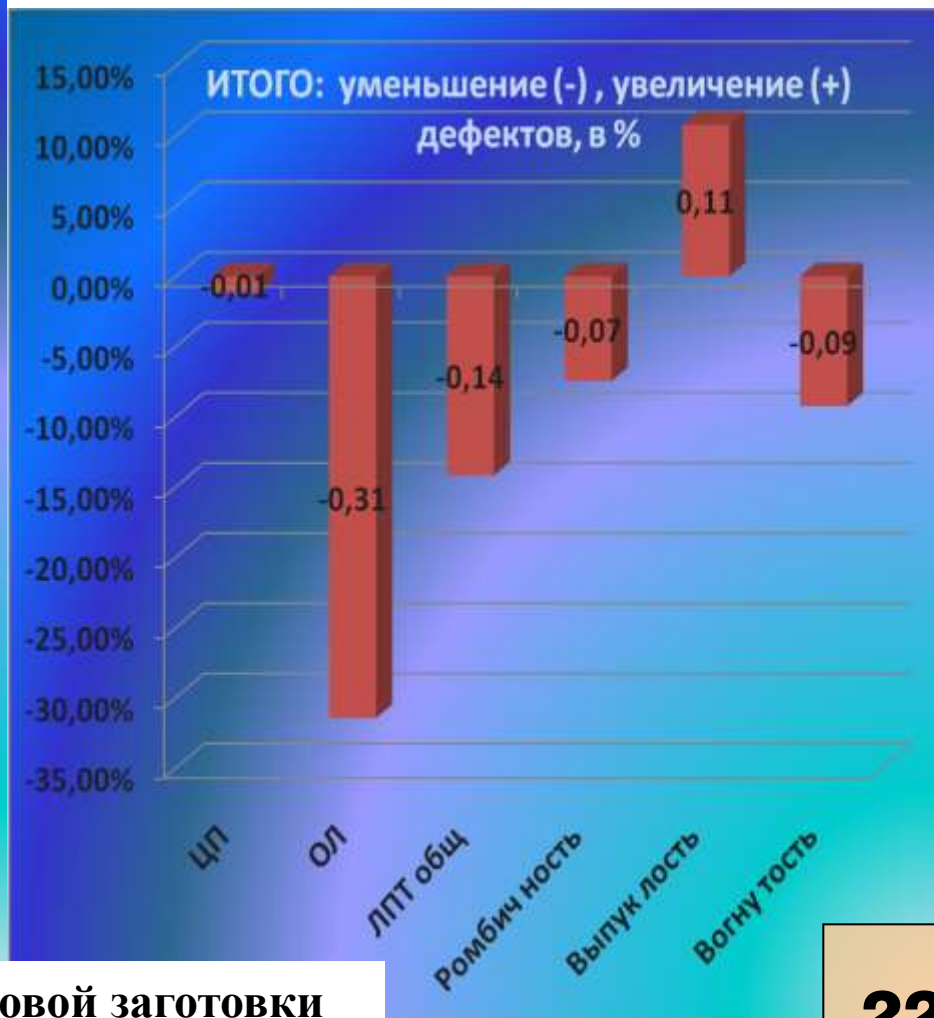
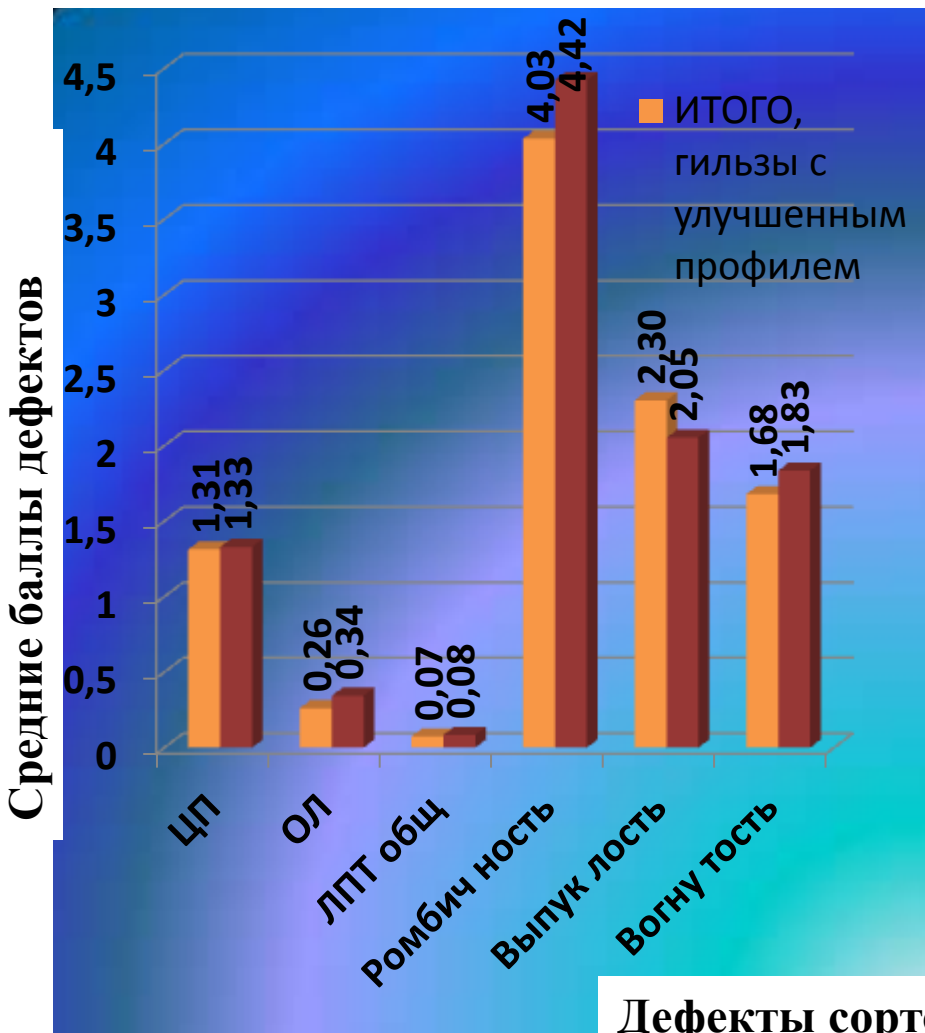


Применение гильз кристаллизатора с улучшенной внутренней геометрией, позволило улучшить качество непрерывно-литой заготовки на 0,51%, за счет снижения баллов по дефектам. Дополнительным эффектом применения этих гильз позволило увеличить гарантированную стойкость гильз с 250 (9750 т) до 283 плавков (11037т), максимальная стойкость составила 335 плавков (13065 т)

Улучшение качества при промышленных испытаниях новых элементов системы СПК

Типы дефектов сортовых заготовок при испытании новых элементов системы СПК

Фактическое уменьшение дефектов сортовых заготовок при применении новых элементов системы СПК





Ручей 2

Темплет заготовки,
полученный при
разливке стали
обыкновенного
качества (группа А)
при использовании
гильзы с улучшенной
внутренней формой



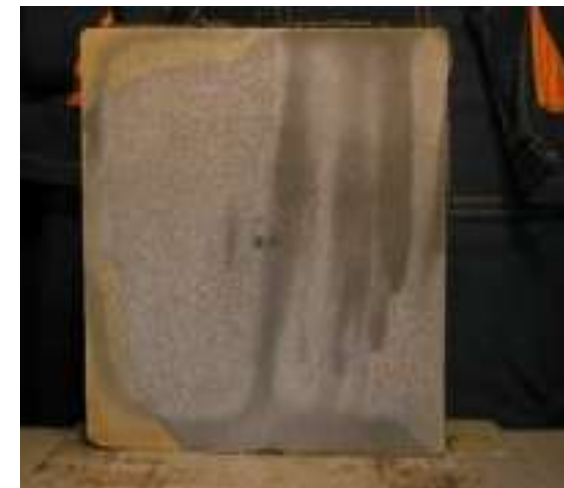
Ручей 4



Ручей 3



Ручей 1



Ручей 5

**Темплет заготовки,
полученный при
разливке стали с
содержанием марганца
(группа Д) при
использовании гильзы
с улучшенной
внутренней формой**



Ручей 2



Ручей 4



Ручей 1



Ручей 3



Ручей 5

**Темплеты заготовки, полученные при
установки гильз с улучшенной внутренней
формой на ручки №№ 2,3 с высокой
температурой стали**



Ручей 1



Ручей 4



Ручей 5



Ручей 2



Ручей 3

Заключение

Исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Получены математические модели прохождения потоков жидкой стали в системе СПК, и равномерного распределения тепловых потоков по периметру гильзы кристаллизатора для улучшения качества непрерывно-литой сортовой заготовки.
2. Разработана методика расчета гильз кристаллизаторов сортовой МНЛЗ и создана на её основе гильза, позволяющая на всех стадиях проектирования разрабатывать конструкции и рассчитывать их основные геометрические параметры.
3. Дополнена методика, основанная на полученных геометрических параметрах гильз кристаллизатора, для расчета при конструировании устройств для снижения осевых отклонений потока жидкой стали, поступающей в ПК. Определена величина предельного отклонения элементов этих устройств.

Разработанные методики расчета, результаты проведенного математического моделирования, а также внедрение элементов системы СПК в производство позволили создать:

а) конструкцию кристаллизатора сортовой машины непрерывного литья заготовок, обеспечивающую повышение стабильности работы и увеличение производительности машины. На разработанные элементы кристаллизатора МНЛЗ выдан патент на полезную модель РФ № 97070;

б) конструкцию устройства для защиты струи металла при разливке на машине непрерывного литья заготовок, обеспечивающую повышение стабильности работы кристаллизатора сортовой МНЛЗ. На разработанное устройство выдан патент на полезную модель РФ № 102552;

в) конструкцию устройства для снижения осевых отклонений потока стали промежуточного ковша сортовой МНЛЗ, обеспечивающую повышение стабильности работы и увеличение производительности машины. На разработанное устройство выдан патент на полезную модель РФ № 122318.

4. Проведены опытно-промышленные испытания и внедрение созданных конструкций.

Благодарю за внимание!

Доклад окончен.

Научная новизна работы

1. Развита методика проектирования гильзовых кристаллизаторов, позволяющая определять геометрические параметры внутренних углов гильз кристаллизаторов сортовых МНЛЗ, выполненных в виде фаски, способствующих снижению длины контакта жидкой стали с углами и стенками гильзы, что обеспечило уменьшение дефекта ромбичность.
2. Усовершенствована методика проектирования рациональных конструкций пластичных огнеупоров, которая обеспечивают защиту струи жидкой стали от воздуха и получение остаточного содержания азота ниже 0.0005%.
3. Экспериментально определена величина отклонения осей сталеразливочных отверстий промежуточного ковша относительно технологических осей МНЛЗ от 0 до 5 мм, что увеличивает серийность ПК.