



Разработка конструкции кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок с двухконтурной высокоэффективной системой охлаждения



Потенциальные заказчики

Заводы, производящие/использующие в своем производственном процессе:

↓

Непрерывнолитые заготовки из высоколегированных сталей для труб атомной и химической промышленности



↓

Слябовые заготовки из высоколегированных сталей



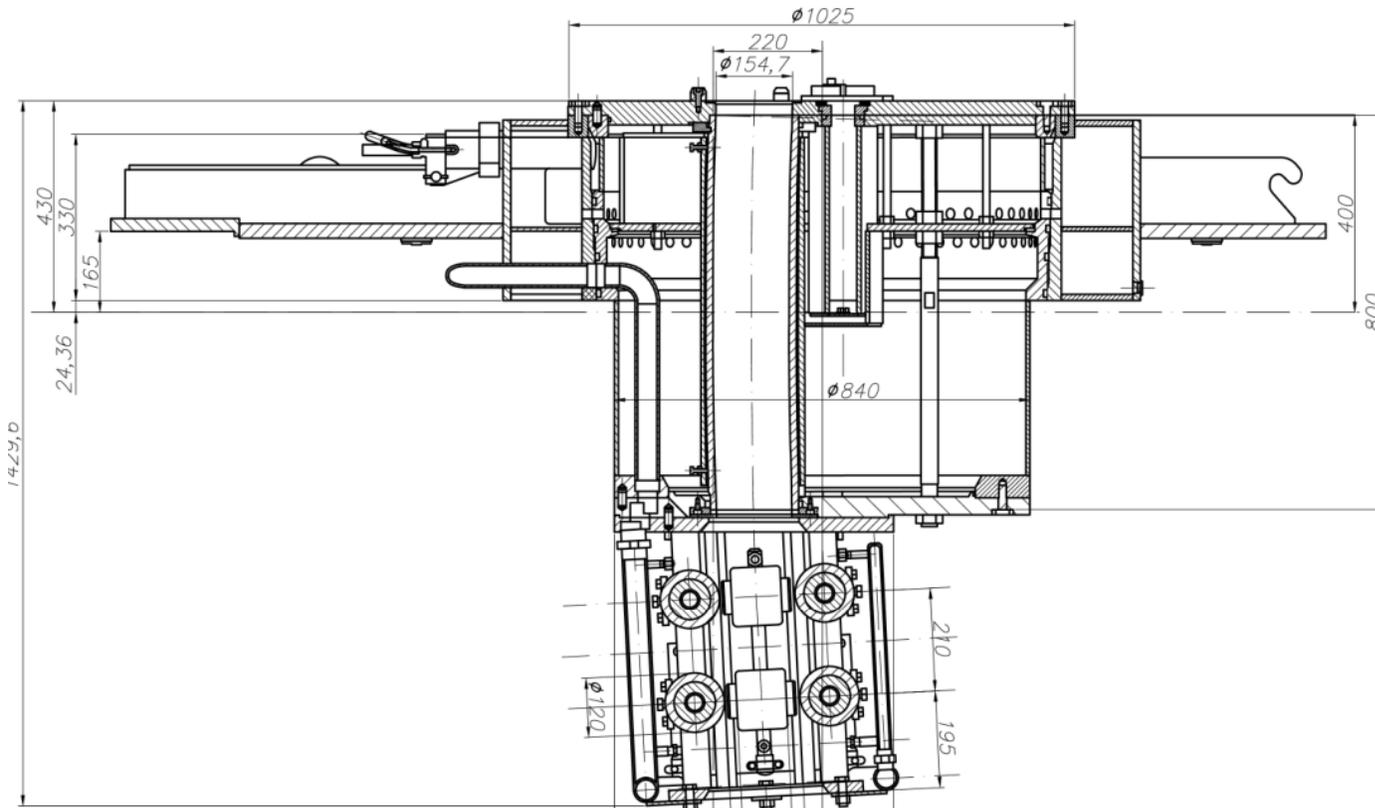
↓

Непрерывнолитые заготовки для ж/д колес



Сравнение с аналогами

Существующие конструкции кристаллизаторов



Промышленный кристаллизатор скольжения

Недостатки:

1. Низкое термическое сопротивление стенки медной гильзы (около $0,25 \times 10^{-4} \frac{\text{М}^2}{\text{Вт} \times ^\circ\text{C}}$)
2. Охлаждение холодной водой → значительный перепад температур в корочке заготовки (свыше 100°C)
3. Неравномерное охлаждение заготовки



Невозможность получения качественных заготовок из Ni-Cr-Mo сплавов

4. Высокий расход охлаждающей воды
5. Потеря тепла в градирнях
6. Высокий износ и стоимость материала стенок кристаллизатора скольжения

Описание технологии и конструкции кристаллизатора (Патент № 2739358 РФ Оpubл. 23.12.2020 Бюл. №36)

Кристаллизатор с замкнутым испарительно – конденсационным контуром

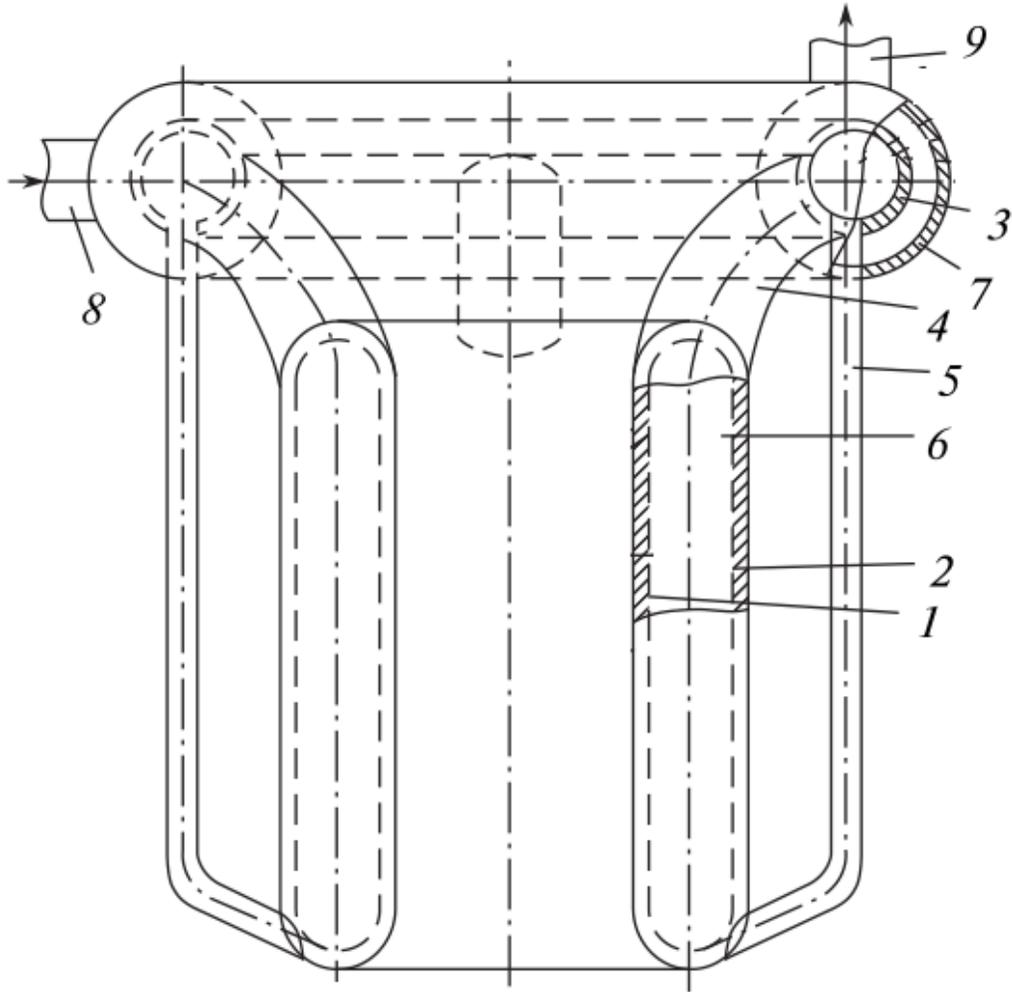


Схема кристаллизатора с двухконтурной системой охлаждения:

1, 2 – трубы кристаллизатора,

3 – конденсатор,

4 – паропровод,

5 – конденсатопровод,

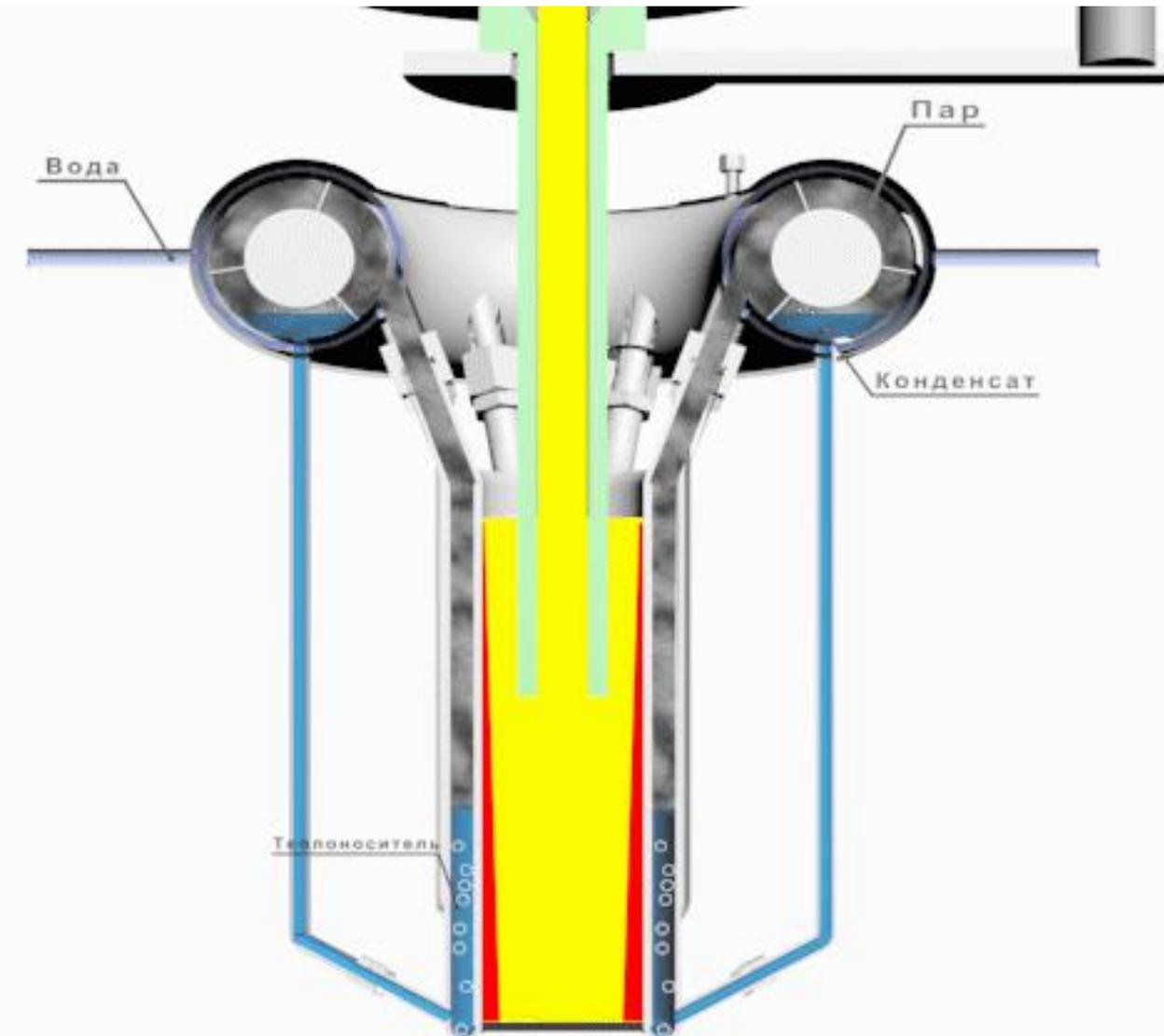
6 – пространство замкнутое,

7 – кожух,

8,9 - патрубки

Описание технологии и конструкции кристаллизатора (Патент № 2739358 РФ Оpubл. 23.12.2020 Бюл. №36)

Кристаллизатор с замкнутым испарительно – конденсационным контуром



Новая конструкция кристаллизатора скольжения позволит:

Обеспечить разогрев стенки кристаллизатора перед разливкой расплава (до 300 °С)

Обеспечить более равномерную температуру стенки по высоте и периметру кристаллизатора

Увеличить t° стенки кристаллизатора (до 300 °С) →
Мягкое охлаждение заготовки, снижение брака

Заменить материал стенки на более дешевый и прочный →

Увеличение срока службы, снижение стоимости

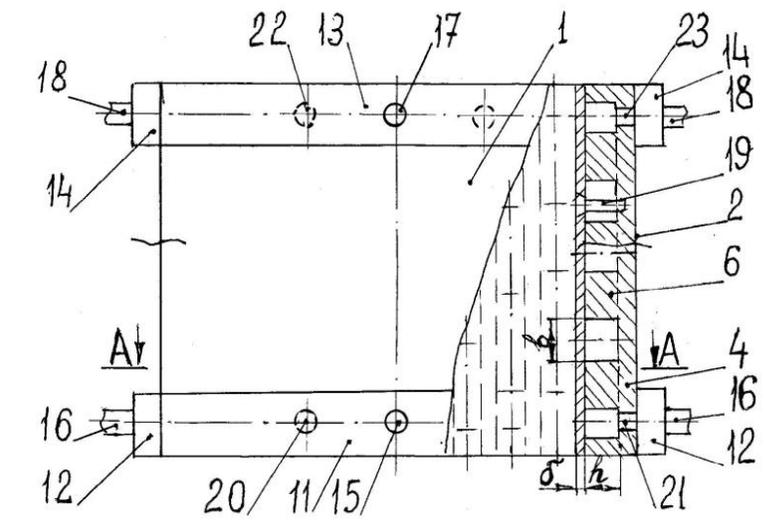
Уменьшить расхода воды в 2-3 раза и использовать горячую воду на бытовые нужды →

Экологичность и экономичность производства

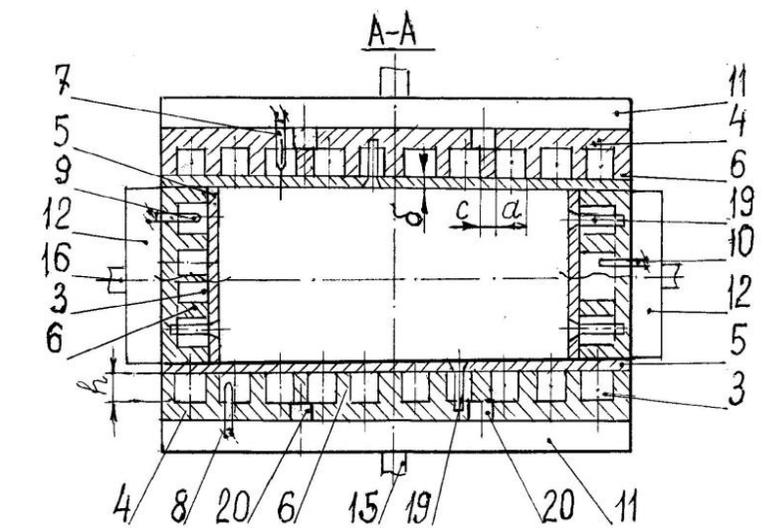
Описание технологии и конструкции кристаллизатора

(Патент № 2601713, заявка на изобретение № 2019113750 от 7.05.2019 г. Решение от 28.04.2021 о выдаче патента РФ)

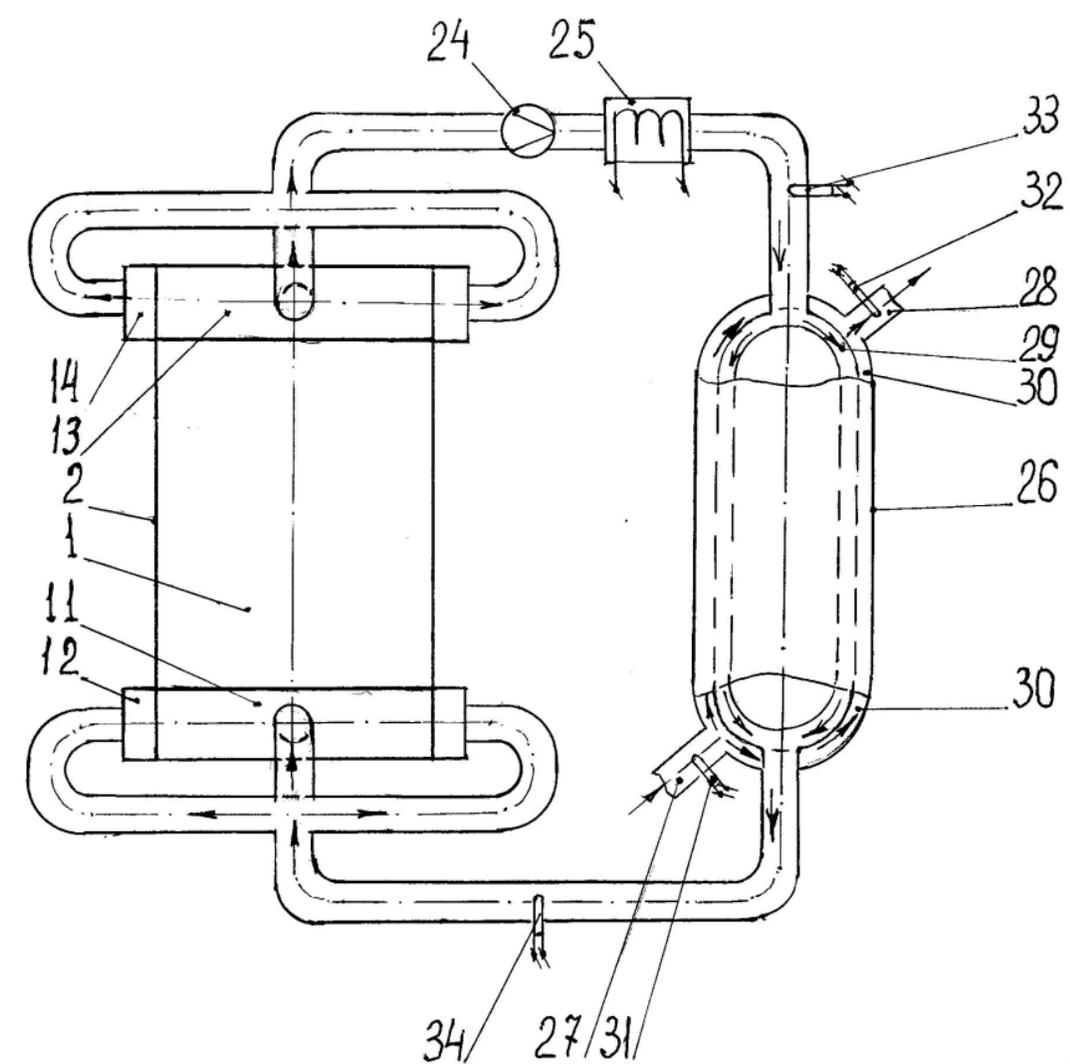
Кристаллизатор с охлаждением стенок перегретой водой



Фиг.1



Фиг.2



Фиг.3

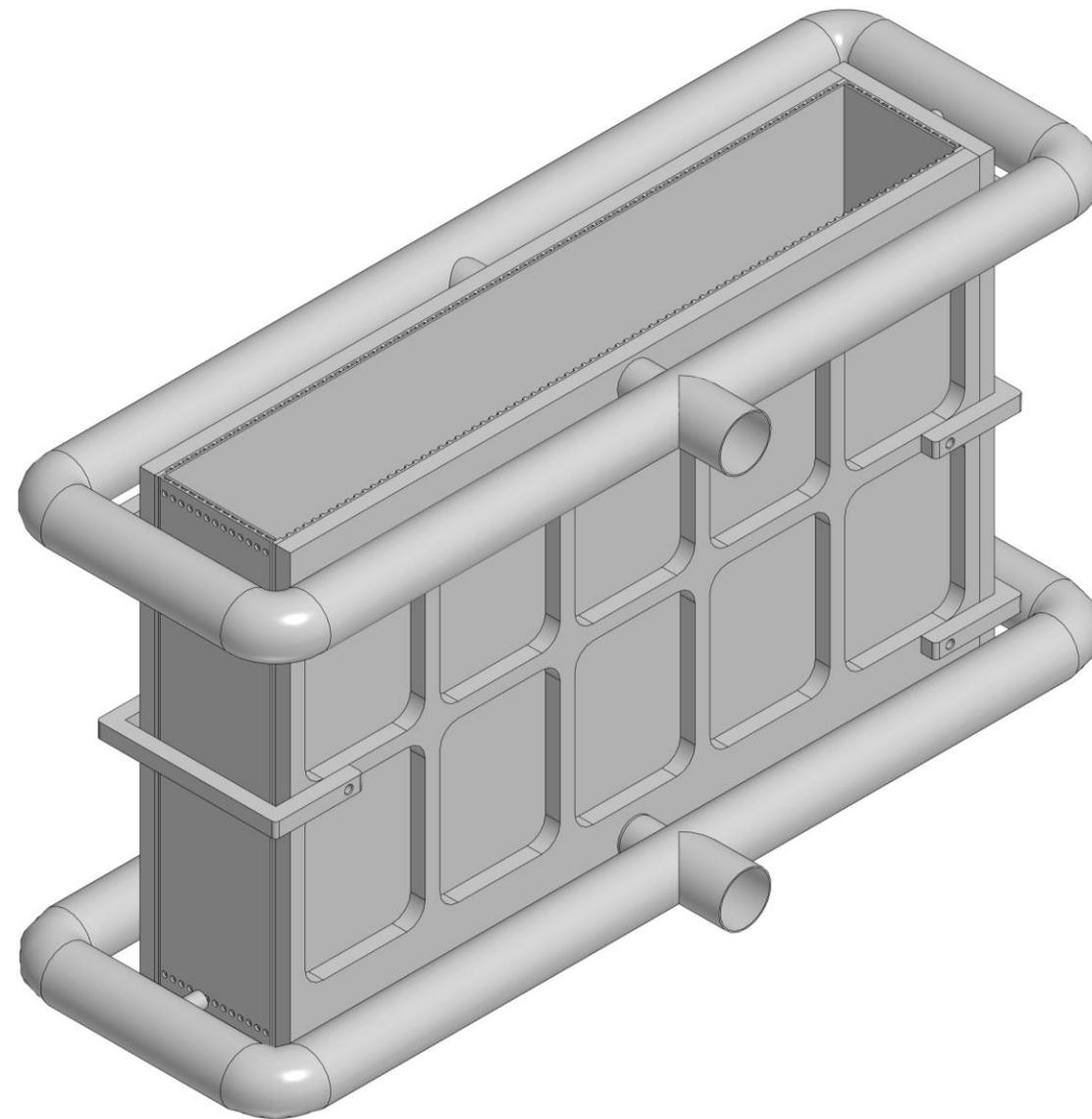
- 1,2 – рабочие стенки,
- 3 – вертикальные каналы для охлаждающей воды,
- 4 – опорная часть стенки,
- 5 – рабочая часть стенки,
- 6 – выступы,
- 7 – 10, 31 – 34 – термодары,
- 11, 12 – коллекторы для подвода воды,
- 13, 14 – коллекторы для отвода воды
- 15 – 18 – патрубки,
- 19 - болты потайные,
- 20, 21 – отверстия в опорных частях стенок для подвода воды,
- 22, 23 – отверстия для отвода воды,
- 24 – насос водяной,
- 25 – нагреватель электрический,
- 26 – теплообменник,
- 27, 28 – патрубки для холодной воды,
- 29, 30 – щелевые каналы для горячей и холодной воды, соответственно.

Новизна решения

1. Разработка и изготовление кристаллизаторов нового типа и систем их охлаждения
2. Разработка новой технологии непрерывной разливки цилиндрических и слябовых заготовок из высоколегированных сплавов в запатентованные конструкции кристаллизаторов машин с 2-х контурной системой охлаждения



№1 – Кристаллизатор с замкнутом испарительно – конденсационным контуром
(Патент № 2739358 РФ Оpubл. 23.12.2020 Бюл. №36)



№2 – Кристаллизатор с охлаждением стенок перегретой водой

(Патент № 2601713, заявка на изобретение № 2019113750 от 7.05.2019 г. Решение от 28.04.2021 о выдаче патента РФ)

Научное обоснование

Тепловой расчет

Таблица 1. Параметры охлаждения цилиндрического никелевого кристаллизатора перегретой горячей водой ($q = 1,5$ МВт/м.кв.)

№	Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Значение
1.	Диаметр цилиндрической заготовки	d_3	мм	150
2.	Средняя плотность теплового потока	q	МВт/м ²	1,5
3.	Тепловой поток в кристаллизатор	Q	кВт	354
4.	Толщина стенки	δ_c	мм	5
5.	Высота кристаллизатора	H	мм	500
6.	Скорость воды в щелевом зазоре (δ_3)	ω_B	м/с	10
7.	Расход горячей воды	$d_T V_{BT}$	м ³ /час	86,4
8.	Температура горячей воды	t_B	°С	150-180
9.	Теплообменник: длина x диаметр	$L \times D$	м	1,2x0,16
10.	Перепад температур воды в тепл-ке	Δt	°С	60
11.	Расход воды в тепл-ке	$d_T V_B$	м ³ /час	5,15
12.	Температура рабочей поверхности стенки кристаллизатора	t_1	°С	250

Таблица 2. Параметры охлаждения цилиндрического никелевого кристаллизатора перегретой горячей водой ($q = 2,5$ и $3,5$ МВт/м.кв.)

№ п/п	Наименование параметра	Обознач.	Единица измерен.	Значение
1.	Толщина никелевой стенки	δ_c	м	0,005
2.	Толщина щелевого канала	δ_3	м	0,005
3.	Тепловой поток ($q = 2,5$ МВт/м ²)	Q	кВт	590
4.	Тепловой поток ($q = 3,3$ МВт/м ²)	Q	кВт	778,8
5.	Коэффициент теплоотдачи воды в щелевом канале ($\omega_{B2} = 14$ м/с)	α_{B2}	Вт/(м ² ·К)	78357
6.	Расход воды на кристаллизатор	$d_T V_{B2}$	м ³ /час	121
7.	Температура внутренней пов-ти стенки при $q = 2,5$ МВт/м ²	t_2	°	210
8.	Температура внутренней пов-ти стенки при $q = 3,3$ МВт/м ²	t_2	°	220
9.	Температура рабочей пов-ти стенки при $q = 2,5$ МВт/м ²	t_1	°	381
10.	Температура рабочей пов-ти стенки при $q = 3,3$ МВт/м ²	t_1	°	464
11.	Перепад тем-ры воды в кристаллизаторе при $q = 3,3$ МВт/м ²	Δt_B	°	5
12.	Высота кристаллизатора	H	м	0,5
13.	Площадь теплообмена внутренней поверхности кристал-ра	F_{KB}	м ²	0,251

Научное обоснование

Тепловой расчет

Таблица 3. Параметры охлаждения существующего слябового медного кристаллизатора холодной водой (при среднем значении $q = 1,5$ мВт/м²)

№	Наименование параметра	Обознач.	Размерность	Значение	
				кр-р 1	кр-р 2
1.	Диаметр цилиндрического канала	d	мм	20	20
2.	Толщина стенки	δ	мм	30	10
3.	Скорость воды в канале	ω_B	м/с	8,3	8,3
4.	Коэффициент теплоотдачи воды	α_B	Вт/(м ² К)	25000	25000
5.	Температура стенки на поверхности водоохлаждаемого канала	t_{c2}	°С	115	115
6.	Температура на рабочей поверхности стенки	t_{c1}	°С	270	161
7.	Температура шлакообразующей смеси	$t_{ш}$	°С	1170	1061-1361
8.	Коэффициент затвердевания стали	κ	$10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}^{0,5}$	2,22	2,44
9.	Толщина корочки стали на выходе	ξ	$10^{-3}, \text{ м}$	17,2	18,9

Научное обоснование

Тепловой расчет

Таблица 5. Параметры охлаждения слябовых кристаллизаторов с бронзовой № 1 и никелевой № 2 стенками ($q = 1,5 \text{ МВт/м}^2$)

№ п/п	Наименование параметра	Обозн	Размерность	Значение	
				бронза	никель
1.	Материал стенки			БрХ	Ni
2.	Размер охлаждаемого канала	$d, a \times h$	мм	60 - 100	15 x 5
3.	Коэффициент теплоотдачи воды	α_B	кВт/(м ² К)	47,8	59,9
4.	Скорость горячей воды в канале	ω_B	м/с	-	10
5.	Толщина стенки	δ_c	мм	10 - 15	5
6.	Температура воды (смеси)	t_B, t_s	°С	141 - 190	180
7.	Коэффициент теплоотдачи при конденсации	$\alpha_{кд}$	кВт/(м ² К)	28 - 50	-
8.	Температура стенки на поверхности охлаждаемого канала	t_{c2}	°С	190	204
9.	Температура рабочей поверхности стенки	t_{c1}	°С	298 - 315	303
10.	Температура шлакообразующей смеси	$t_{ш}$	°С	1215	1203
11.	Коэффициент затвердевания стали	K	10 ⁻³ , м/с ^{0,5}	2,07	2,11
12.	Толщина корочки на выходе из кристаллизат.	ξ	10 ⁻³ , м	16,03	16,4

Научное обоснование

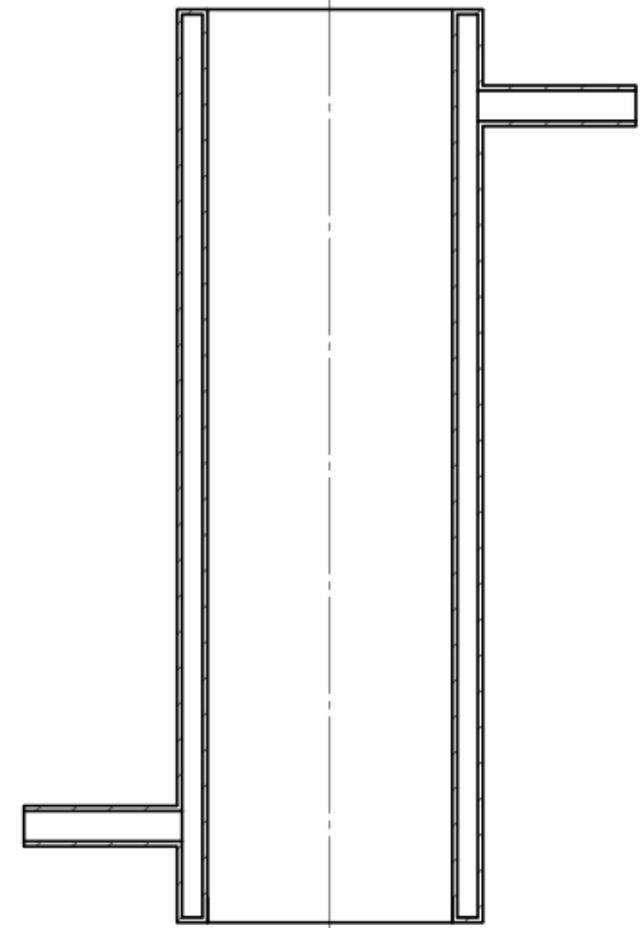
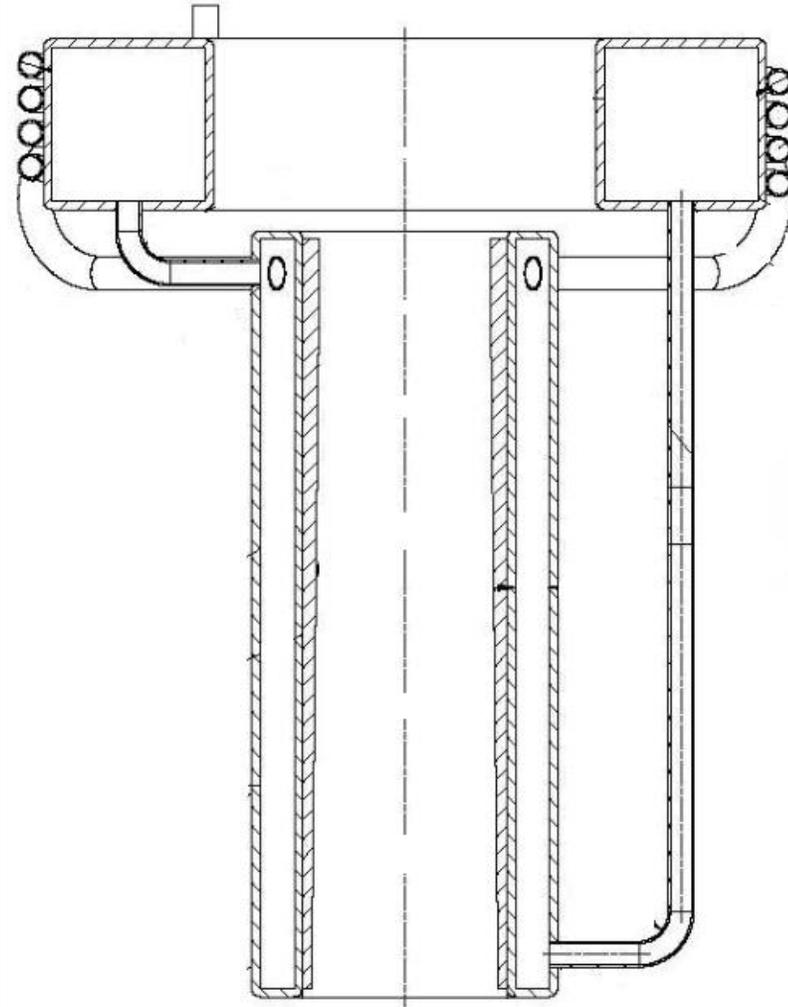
Моделирование кристаллизации расплава



№ 1

№ 2

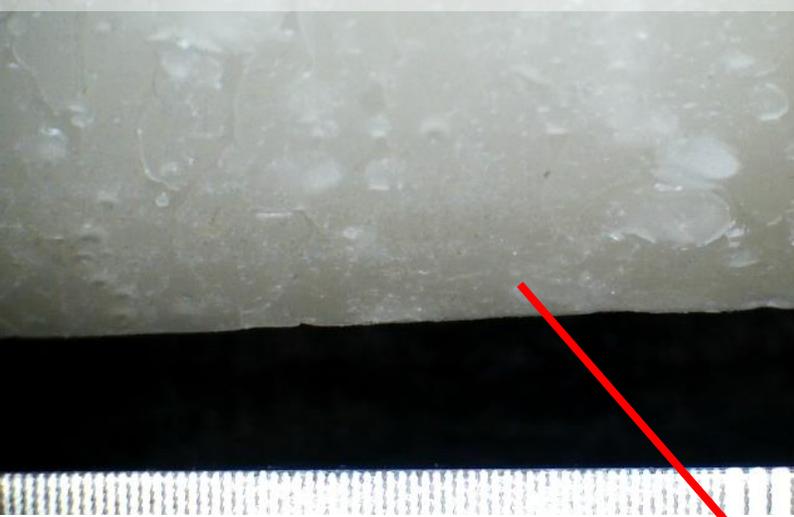
Модели кристаллизаторов:
№1 - с кипящим теплоносителем, №2 - водоохлаждаемый



Схемы моделей

Научное обоснование

Результаты моделирования на парафине



На поверхности заготовки, полученной в кристаллизаторе №1 складки отсутствуют.
На поверхности заготовки, полученной кристаллизаторе №2 имеются складки.
Глубина складок $\Delta_1 = 0,5 - 0,75$ мм
Расстояние между складками $\Delta_2 = 2,5$ мм

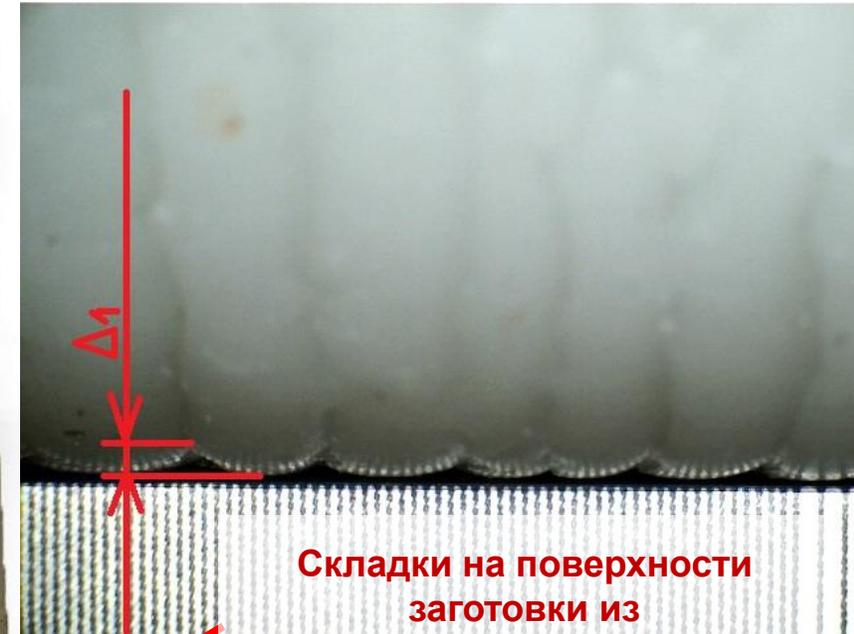


А



Б

Поверхности заготовок из моделей кристаллизаторов А - №1 и Б - №2



Складки на поверхности заготовки из водоохлаждаемого кристаллизатора



Научное обоснование

Результаты моделирования на сплаве Sn-Pb



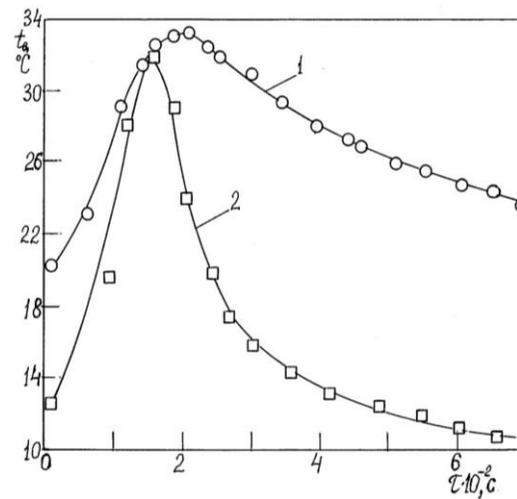
А



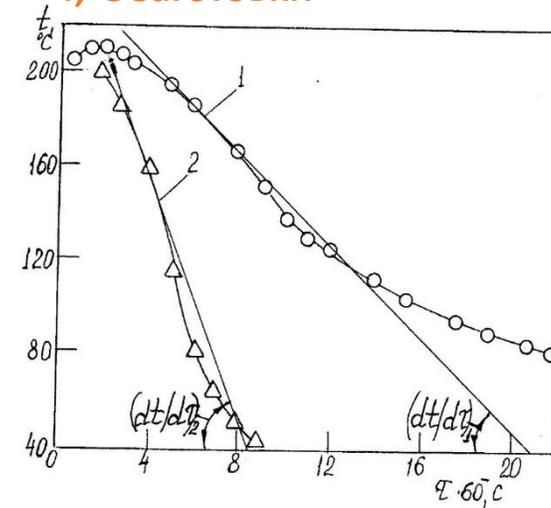
Б

Отливки из моделей кристаллизаторов
А - №1 и Б - №2

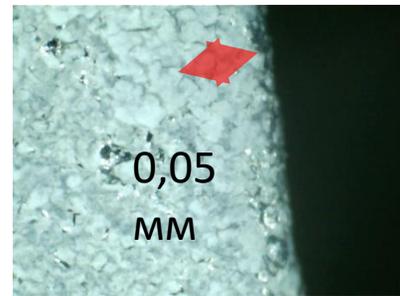
$T, ^\circ\text{C}$ воды из кристаллизатора



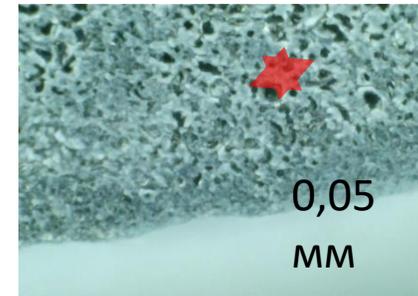
$T, ^\circ\text{C}$ заготовки



Срез заготовок



А

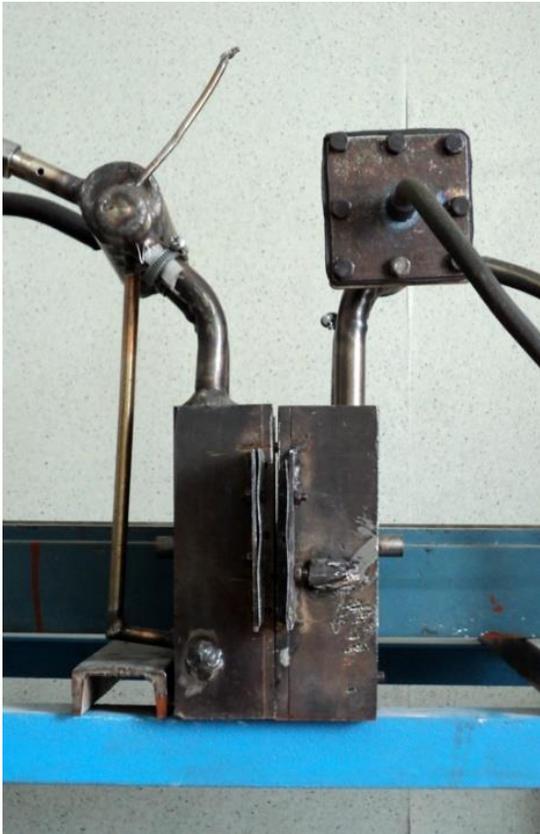


Б

Заготовка из модели кристаллизатора инновационной конструкции обеспечивает более мягкое охлаждение и дает более равномерную структуру заготовки по периметру и высоте кристаллизатора

Научное обоснование

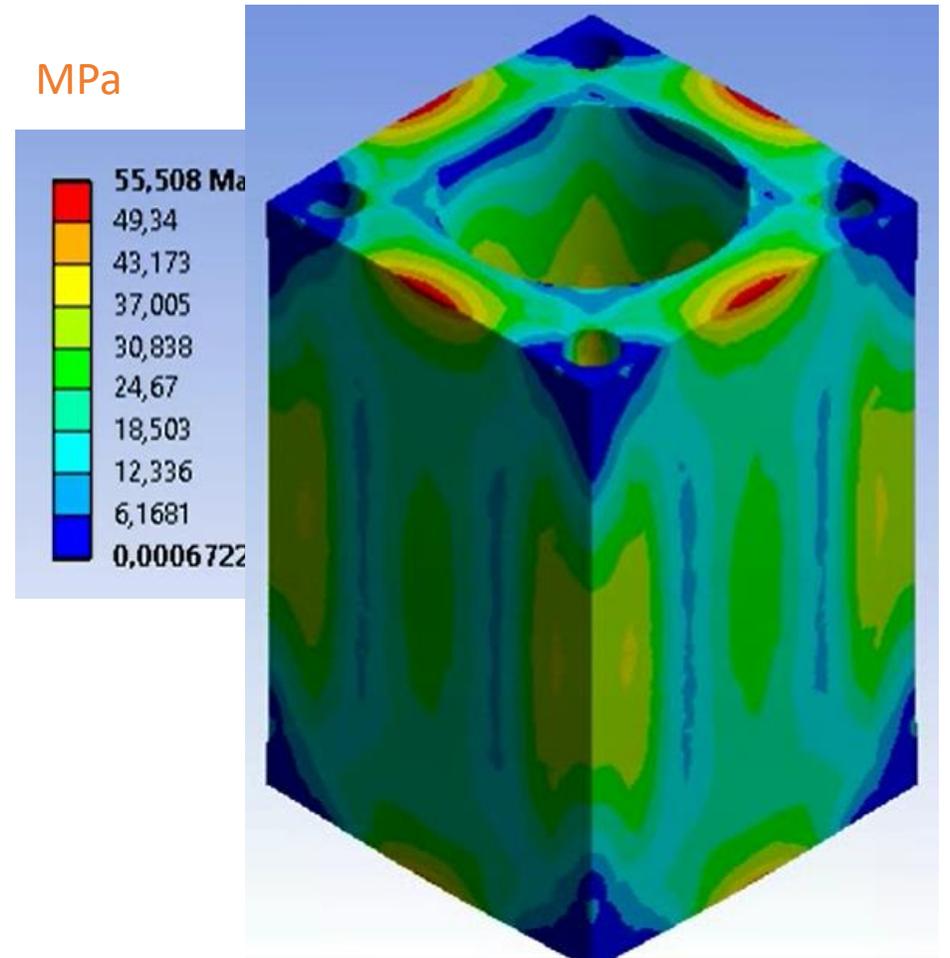
Моделирование на алюминиевом сплаве



Модель кристаллизатора



Полученная отливка Al



Расчет на прочность ANSYS

Научное обоснование

Опытный кристаллизатор под алюминиевый сплав



Гидроиспытание при давлении 15 атм.

Потенциал развития / рынок для решения

Направленность развития

- Организация непрерывной разливки высоколегированных сталей и сплавов и обеспечение их конкурентоспособности за счет снижения стоимости производства заготовок на 10 – 30 %.
- Расширение сортамента непрерывно разливаемых сталей в слябовые заготовки за счет создания благоприятных условий формирования корочки заготовки и улучшения качества ее поверхности с одновременным уменьшением затрат на зачистку поверхностного слоя и потерь металла.
- Вывод на рынок новых инновационных кристаллизаторов машин.

Потенциал развития / рынок для решения

Таблица 1. Сравнительные характеристики кристаллизаторов

Наименование характеристики кристаллизатора	Существующий с медной стенкой	Инновационный Кристаллизатор
1. Возможность предварительного разогрева воды и внутренней стенки до рабочих температур 150 – 180 °С	Нет	Есть
2. Равномерность температур по периметру и высоте кристаллизатора	Низкая ±10 °С	Высокая ± 2°С
3. Интенсивность охлаждения внутренней стенки (гильзы) кристаллизатора	Средняя 35 кВт/(м ² ×°С)	Высокая До 100 кВт/(м ² ×°С)
4. Давление воды и мощность насоса на прокачивание воды	Высокие	Средние
5. Запотевание гильзы перед разливкой стали	Есть	Нет
6. Режим охлаждения образующейся корочки заготовки по периметру и высоте кристаллизатора	«Жесткий»	«Мягкий»
7. Возможность уменьшения расхода воды на охлаждение кристаллизатора и увеличения ее температуры на выходе до 60 – 80 °С	Нет	Есть (в 2 – 3 раза)

Потенциал развития / рынок для решения

Использование инновационных кристаллизаторов позволяет:

1. Уменьшить напряжения в корочке и ее искривление без образования «крюков»;
2. Уменьшить и исключить образование складок на поверхности заготовки, в которых зарождаются поперечные трещины;
3. Уменьшить и исключить затраты на зачистку поверхности заготовок от трещин;
4. Обеспечить разливку непрерывным способом высоколегированных сталей и Ni-Cr сплавов вместо их разливки в изложницы, снизить их себестоимость до 10 % за счет исключения дополнительных операций;
5. Обеспечить более мелкую и равномерную структуру в заготовке, отсутствие обреза по причине усадочной раковины (по сравнению с разливкой в изложницы);
6. **При производстве 10 тыс.т /год цилиндрических заготовок диаметром 150 мм из высоколегированной стали (например, Сталь ХН77ТЮГ-у, цена металла Ц2 = 4,49 млн.руб. /т) и снижении затрат на производство на 10 % обеспечивает экономию Э = 4,5 млрд. руб./год.**

Потенциал развития / рынок для решения

Преимущества инновационного кристаллизатора перед существующим

Существующий кристаллизатор



Складки на поверхности из-за пульсаций теплового потока

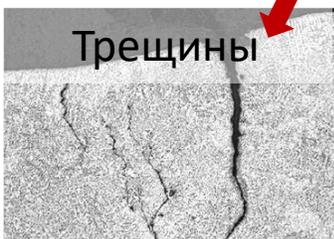
На модели



На производстве



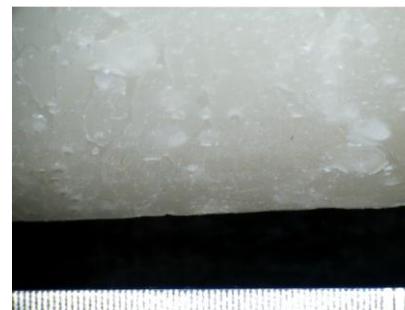
Трещины



Инновационный кристаллизатор



→ Поверхность без складок



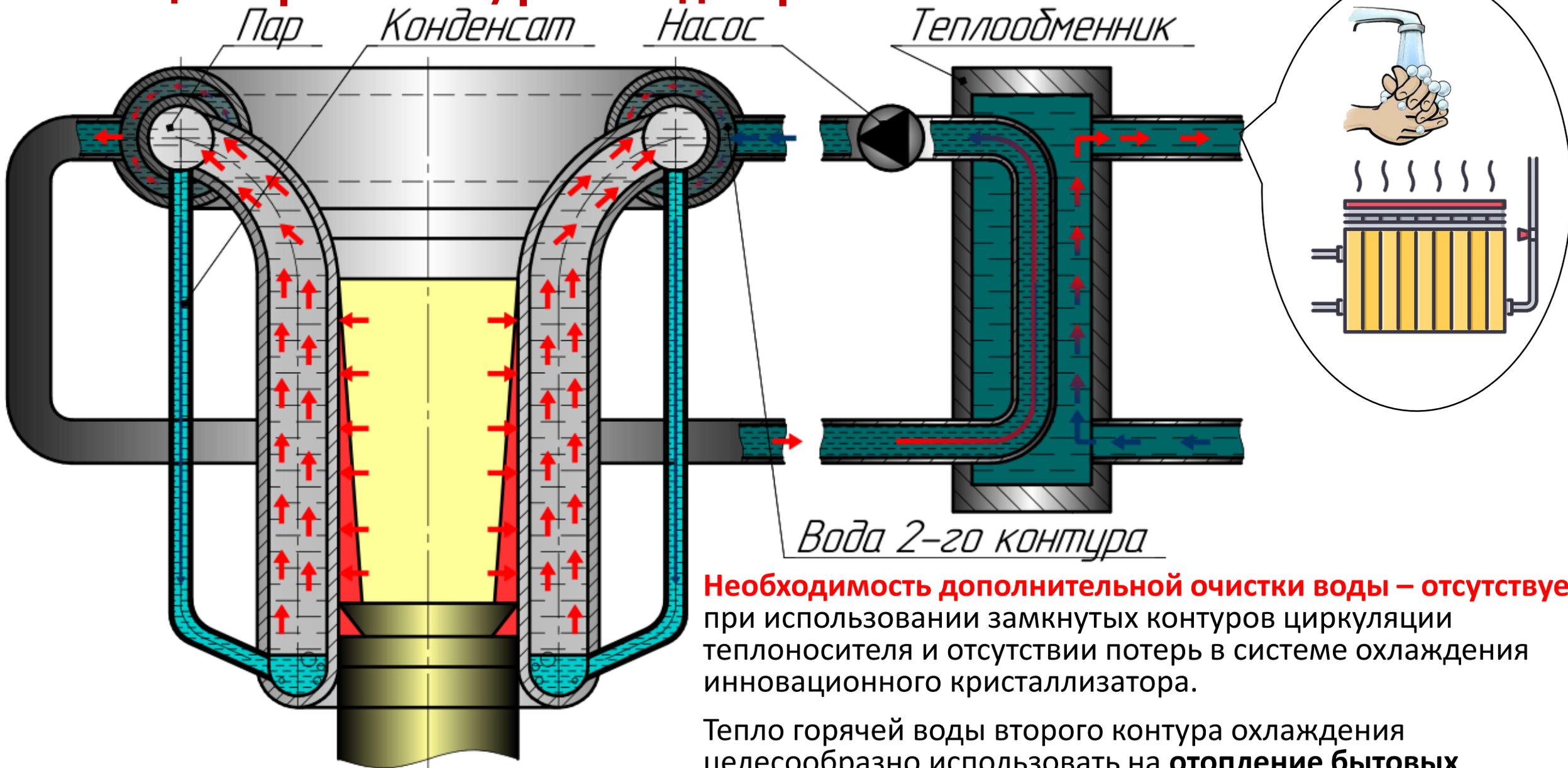
Уменьшение глубины складок на поверхности заготовки создает благоприятные условия для повышения прочности корочки на выходе из никелевого кристаллизатора при новой технологии разливки по сравнению с существующей технологией разливки стали в медный кристаллизатор.

Потенциал развития / рынок для решения

Таблица 2. Экономические показатели модернизации системы охлаждения слябового кристаллизатора машины непрерывной разливки стали

№	Параметры	ЕИ	Существующий медный кристаллизатор	Инновационный кристаллизатор
1.	Расход охлаждающей воды	м ³ /час	600	200
2.	Время работы в году	час.	6132	6132
3.	Расход воды за год	тыс. м ³	3679	1226,4
4.	Затраты на перекачивание воды за год при цене холодной воды 35 руб. /м.куб	млн. руб.	128,8	42,9
5.	Перепад температур охлаждающей воды	°С	9	50
6.	Потери низкопотенциального тепла охлаждающей воды в год	10 ⁹ Дж	137,7	-
7.	Стоимость горячей воды	руб./м ³		125
8.	Затраты на получение эквивалентного тепла горячей воды с t = 70 °С в год	млн. руб.	153,3	-
9.	Затраты на перекачивание горячей и холодной воды (2 контура) в год	млн. руб.		106,9
10.	Затраты на модернизацию системы охлаждения кристаллизатора и НИОКР	млн. руб.		25
11.	Затраты на подачу воды и с потерями тепла	млн. руб.	58 - 83	0
12.	Экономия на горячей воде за год	млн. руб.	-	46,4
13.	Срок окупаемости вложений	лет		0,5

Потенциал развития / рынок для решения

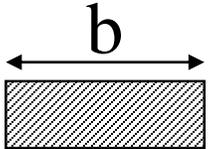


Необходимость дополнительной очистки воды – отсутствует при использовании замкнутых контуров циркуляции теплоносителя и отсутствии потерь в системе охлаждения инновационного кристаллизатора.

Тепло горячей воды второго контура охлаждения целесообразно использовать на **отопление бытовых помещений, для подогрева воды**, используемой на бытовые нужды, а также для подогрева холодной сетевой воды.

Потенциал развития / рынок для решения

Таблица 3. Снижение затрат на зачистку поверхности

Заготовка	Сляб
Сечение	 $a=250 \text{ мм},$ $b=1800 \text{ мм}$
Толщина снимаемого слоя	$\delta = 2,5 \text{ мм}$
Объем снимаемого слоя	$V = 291 \text{ м}^3$
Масса снимаемого слоя	$M = 2,27 \text{ тыс. т}$
Цена металла	$C = 45 \text{ тыс. руб. /т}$
Объем производства	$\Pi_1=100 \text{ тыс.т/год}, \Pi_2 = 1 \text{ млн.т /г}$
Экономия	$\text{Э}_1 = 102,2 \text{ млн. руб}, \text{Э}_2 = 1022 \text{ млн.руб. /год}$

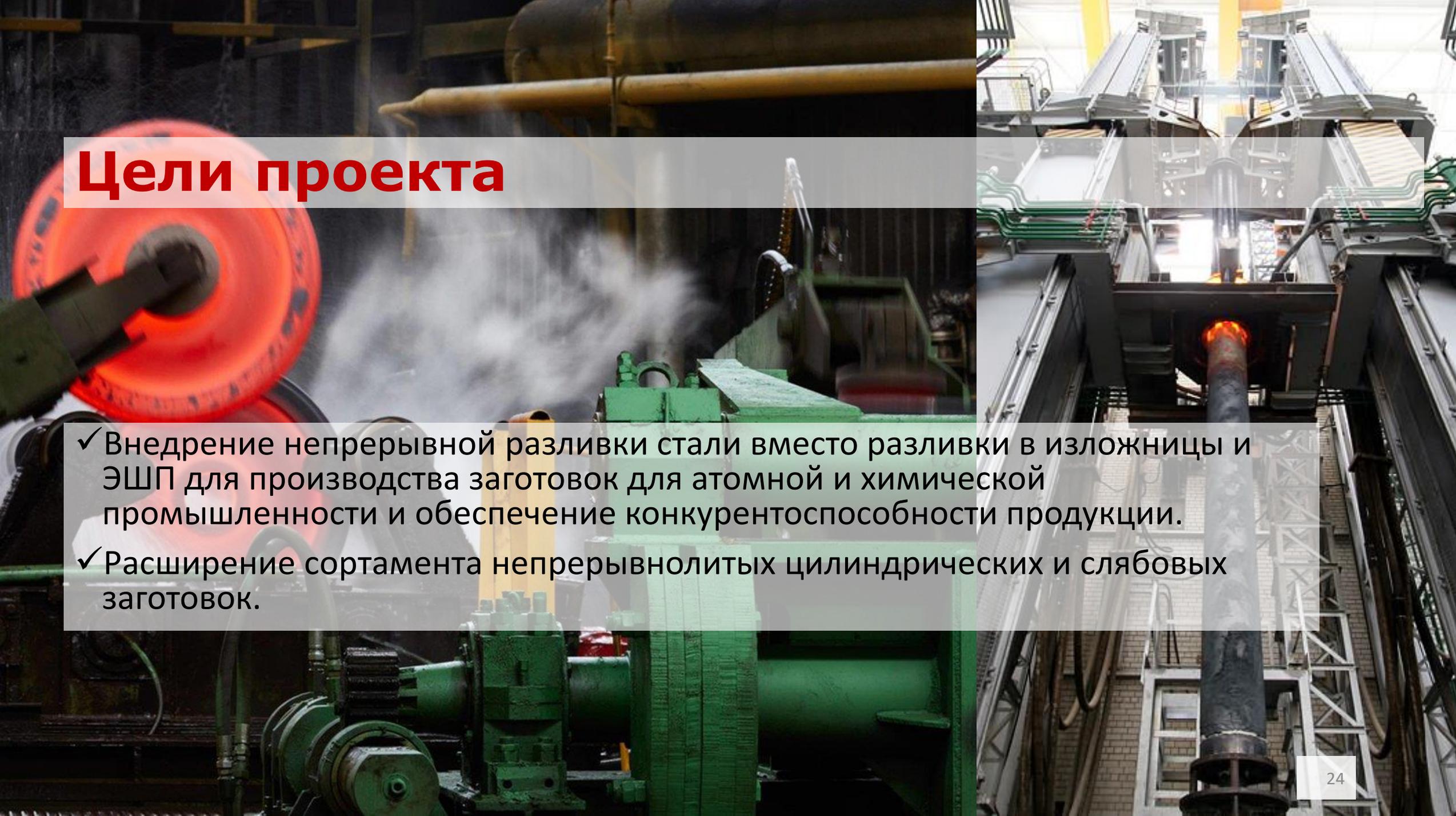
Потенциал развития / рынок для решения

Таблица – Цены на продукцию из высоколегированных сталей

№	Компания – продавец стальной продукции	Марка продаваемой стали	Продукция	Цена, млн.руб./т	Источник
1.	ООО «ПО «Трубное решение»	25X18H9C2 (ЭИ95)	Круг d = 60 мм	2,934	www.truboproduct.ru , https://tiu.ru/Vysokolegirovannaya.html.sort=price
		36XHTЮ (ЭИ702)	Круг d = 92; 100;120 мм	2,5	
		08X18H5Д2ТУ-Ш (ЭП410У-Ш)	Круг d = 125 мм	11,736	
		08X15H5Д2ТУ (ЭП410У), ЭИ961	Круг d = 140 мм	0,86	
		Э-10X20H70Г2М2Б2В	Электроды сварочные	6,28	
2.	ООО «НПК «Специальная металлургия»	ХН77ТЮР-у	Квадрат 75x75 мм	4,497	www.specstal.ru
3.	ООО «Спецмашметалл»	ХН45МВТЮБР ХН75МБТЮ	Круг Поковки	3,5	https://tiu.ru/Vysokolegirovannaya.html.sort=price

Наша задача – освоение производства цилиндрических заготовок из высоколегированных сталей и сплавов в инновационном кристаллизаторе и снижение затрат на их производство, расширение сортамента непрерывнолитых цилиндрических и слябовых заготовок

При производстве **5 – 10 тыс.т/год** и снижение затрат на их производство в среднем на **10 % (86 тыс.руб./т)** обеспечивает получение прибыли **П = 430–860 млн. руб./год.**



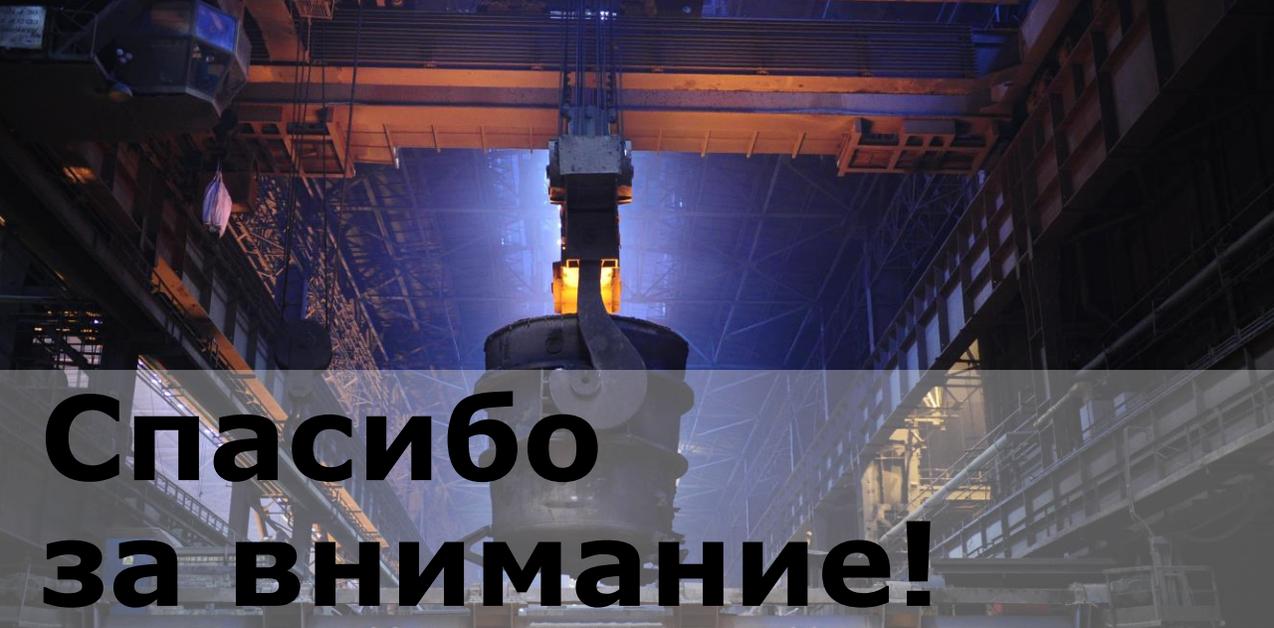
Цели проекта

- ✓ Внедрение непрерывной разливки стали вместо разливки в изложницы и ЭШП для производства заготовок для атомной и химической промышленности и обеспечение конкурентоспособности продукции.
- ✓ Расширение сортамента непрерывнолитых цилиндрических и слябовых заготовок.

Риски

Возникновение форс-мажорных обстоятельств непреодолимой силы (чрезвычайные происшествия, происходящие не по воле отдельного человека и участников проекта)





**Спасибо
за внимание!**



Компания ООО «Сталь 21»,
Генеральный директор: Шафиев О.М.,
E-mail: oleg.shafiev2016@gmail.com