

Более 96% мирового объема стали производится с помощью машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), поэтому обеспечение работоспособности и повышение эффективности непрерывной разливки являются стратегически важными задачами по обеспечению национальной безопасности РФ в области черной металлургии. Кристаллизаторы МНЛЗ (рисунок 1) являются основным технологическим оборудованием процесса непрерывной разливки (рисунок 2). Их поставки критично зависят от санкционной политики западных стран и активной интервенции со стороны китайских производителей, что несет огромные риски в долгосрочной перспективе.

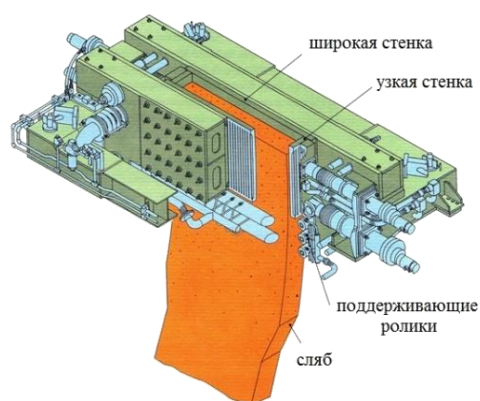


Рисунок 1 - Кристаллизатор МНЛЗ

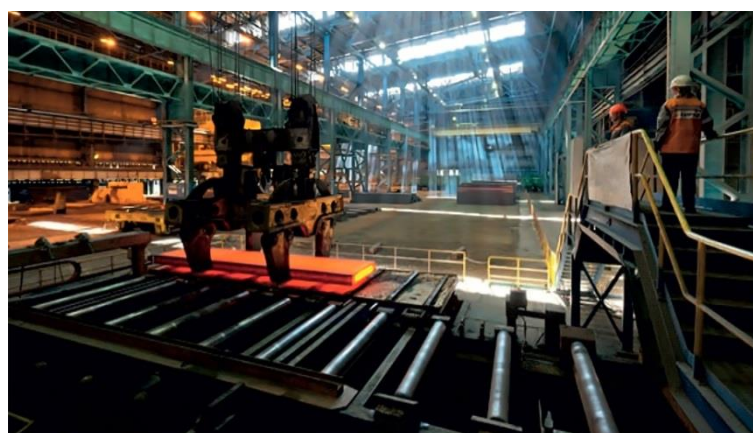


Рисунок 2 - Отделение непрерывной разливки стали

В рамках данной работы выполнен комплекс научно-исследовательских и проектных работ по созданию отечественных материалов и технологий производства, ремонта и проектирования кристаллизаторов МНЛЗ, их масштабному промышленному внедрению для обеспечения технологического суверенитета металлургического комплекса РФ и снижению угроз остановки производства на предприятиях металлургического комплекса.

**Основная научно-техническая идея работы.** Заключается в создании новых материалов и технологий производства кристаллизаторов из отечественных заготовок, их восстановления методами плоскостной сварки трением с перемешиванием и роботизированной сварки, разработке отечественных порошковых материалов и технологии нанесения защитных композиционных покрытий, кардинально превосходящих применяемые зарубежные аналоги, формировании научной школы проектирования инновационных конструкций кристаллизаторов на базе математического моделирования.

**Описание результатов и их значение для практики.** На основе исследований особенностей легирования, структурообразования и влияния режимов термомеханической обработки на свойства жаропрочных медных сплавов были разработаны требования к комплексу физико-механических и теплофизических свойств плит (заготовок) из дисперсионно-твердеющего медного сплава БрХЦр (CuCrZr). На базе ряда предприятий цветной металлургии РФ (АО «КЗОЦМ» ООО «УГМК ОЦМ», ООО «Астринсплав СК», ООО «Завод Уралпрокат», АО «Завод «Красный Выборжец») освоено производство отечественных плит из сплава БрХЦр.

С целью обеспечения эксплуатационной надежности кристаллизаторов разработана технология двухэтапной термической обработки стенок (рисунок 3), обеспечивающая высокие физико-механические и теплофизические характеристики дисперсионно-твердеющего медного сплава, которые не уступают зарубежным аналогам (рисунок 4) и полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к заготовкам для производства кристаллизаторов МНЛЗ.



Рисунок 3 - Процесс термической обработки стенки в защитной атмосфере

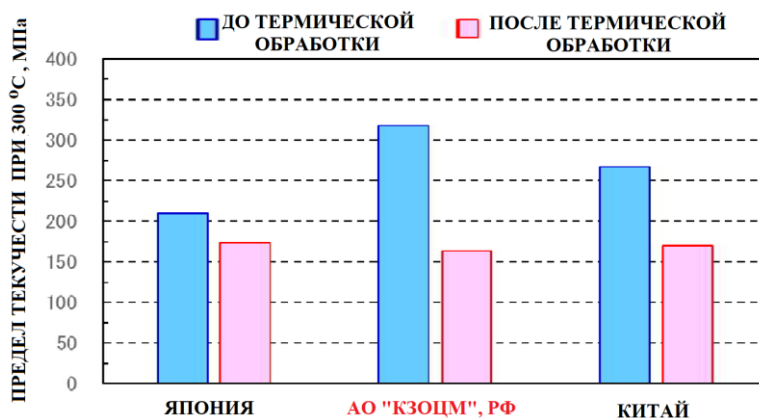


Рисунок 4 - Сравнение механических свойств заготовок из сплава БрХЦр

Для восстановления геометрических размеров и обеспечения возможности повторного использования стенок кристаллизаторов после достижения ими минимально допустимой толщины в результате эксплуатации и ремонтов, создана аддитивная технология многопроходной плоскостной сварки трением с перемешиванием (СТП) в воде (рисунки 5, 6). Разработаны научные основы, инструмент и оснастка для нанесения на восстанавливаемую стенку присадочной пластины из этого же материала, что существенно повышает экологичность и ресурсоэффективность, позволяет практически полностью отказаться от импорта.

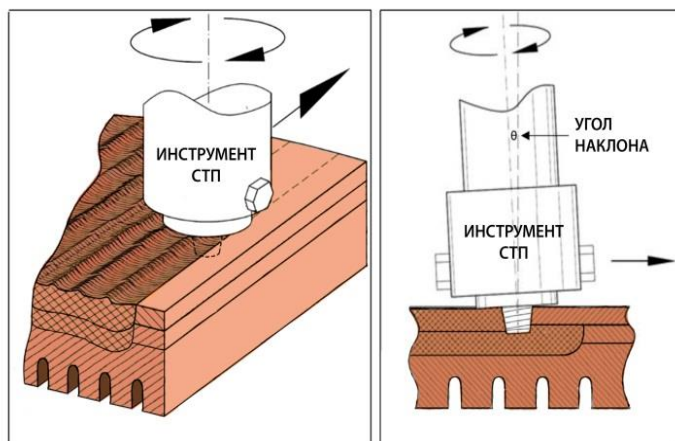


Рисунок 5 - Схема процесса послойной плоскостной СТП

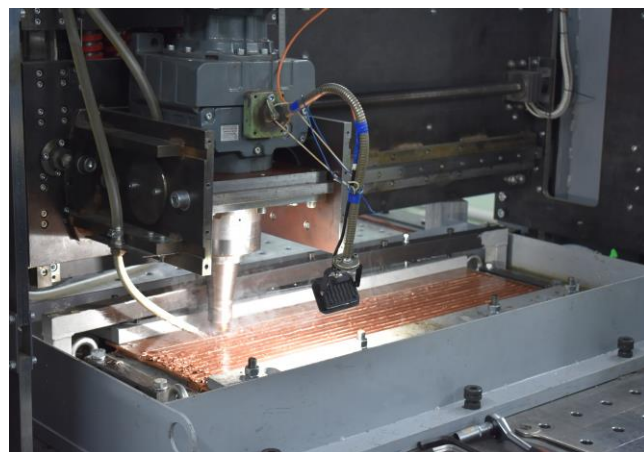


Рисунок 6 - Экспериментальная установка для плоскостной СТП в воде

Результаты измерений температуропроводности и механических свойств полученного аддитивной СТП в воде слоя соответствуют аналогичным значениям для основного металла и справочным данным для сплава БрХЦр. Восстановленные слои (рисунки 7, 8) сохраняют механизм упрочнения за счёт выделений из пересыщенного твердого раствора большого количества мелкодисперсных частиц, обеспечивая достаточный для производства кристаллизаторов МНЛЗ комплекс механических и теплофизических свойств материалы основы.



Рисунок 7 - Фрагмент стенки, восстановленный способом СТП в воде

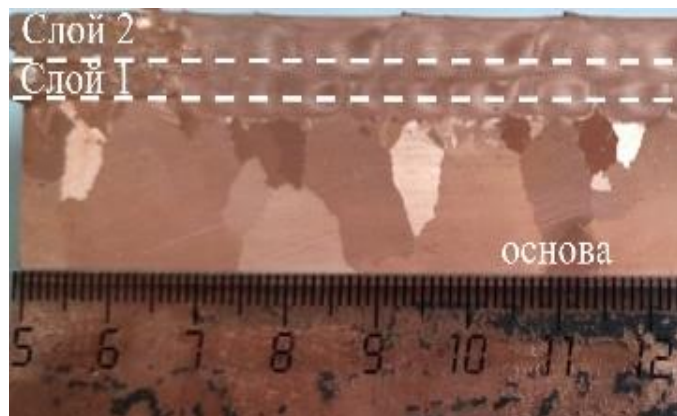


Рисунок 8 - Макроструктура поперечного сечения восстановленных слоев и основы

Применение для восстановления плит прогрессивного способа СТП наряду с экономической эффективностью также обеспечит несомненные экологические преимущества, поскольку уменьшится потребность во вредном металлургическом производстве заготовок из медных сплавов.

Применяемые в качестве защитных покрытий импортные гальванические покрытия на основе никеля и его сплавов являются распространенным способом защиты рабочей поверхности стенок кристаллизаторов МНЛЗ, но обладают

серьезными ограничениями: низкой стойкостью и плохой экологичностью технологии. Кроме того, они уже не способны обеспечить требуемый уровень свойств для современных МНЛЗ.

Анализ результатов структурных и трибологических исследований применяемых покрытий показал, что наиболее эффективными являются композиционные покрытия системы NiCrBSi. На основе обнаруженного нового эффекта повышения твердости и износостойкости покрытий при отжиге (1000 - 1075°C) за счет формирования высокопрочного износостойкого каркаса из крупных карбидов и боридов хрома в пластичной матрице из твердых растворов  $\gamma$  на основе никеля и эвтектики  $\gamma + \text{Ni}_3\text{B}$  (рисунок 9) предложен способ формирования хромоникелевых покрытий, обеспечивающий также высокий уровень адгезионной прочности покрытия за счет развитого диффузионного взаимодействия и формирования мягкой прослойки в переходной зоне покрытие-основа (рисунок 10).

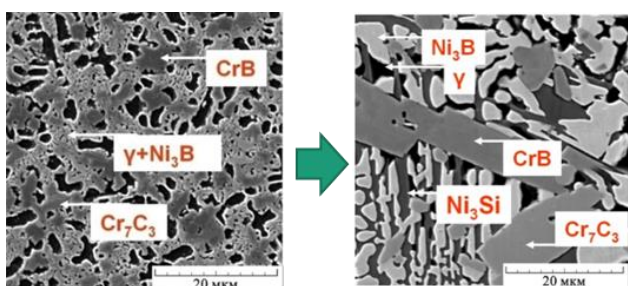


Рисунок 9 - Формирование износостойкого каркаса в структуре покрытия при высокотемпературном отжиге

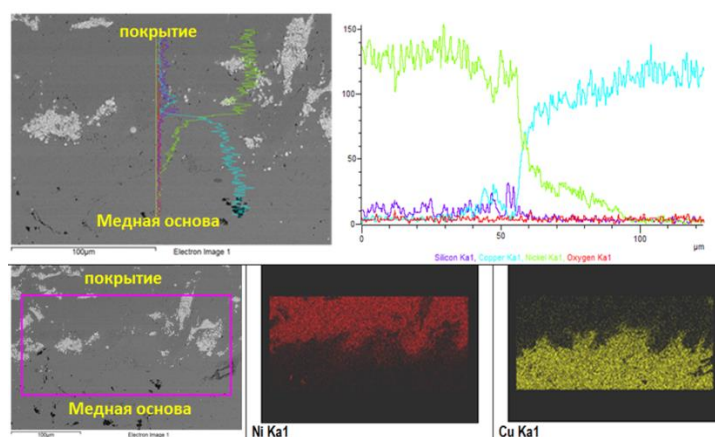


Рисунок 10 - Диффузионный механизм адгезионной прочности покрытия

Такие покрытия обладают одновременно высокой твердостью, износостойкостью и пластичностью при особо высоком уровне теплостойкости, что принципиально недостижимо для гальванических покрытий. На основе исследований влияния состава упрочняющих фаз и структурно-фазового состояния хромоникелевых покрытий на износостойкость разработана линейка порошковых материалов на базе отечественных порошков системы NiCrBSi с введением в состав карбидных (WC,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , SiC, TiC), боридных ( $\text{CrB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ ), и металлических (Cr, Mo) систем в виде дисперсных частиц и гетеродисперсных конгломератов (рисунок 11).

На основе анализа процессов в переходной зоне между подложкой из медного сплава и композиционным покрытием на основе никеля создана технология сверхзвукового газотермического нанесения защитных композиционных покрытий (рисунок 12) из разработанных отечественных порошковых материалов.

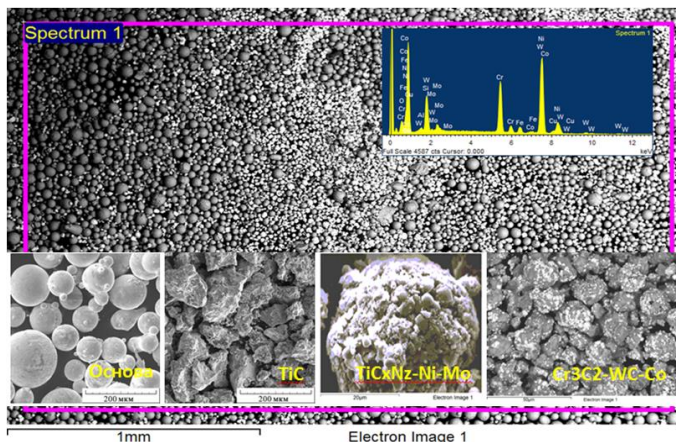


Рисунок 11 - Порошковые материалы для создания композиционных покрытий

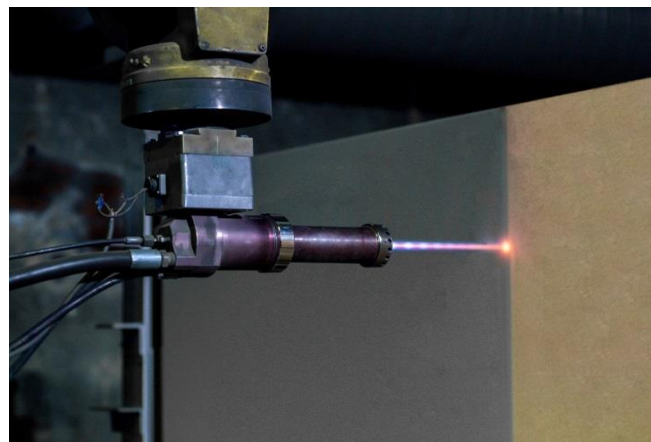


Рисунок 12 - Процесс нанесения газотермического покрытия

Разработанная технология роботизированной TIG-сварки проволокой из сплава БрХЦр и легированных никелевых сплавов позволила повысить эффективность процесса восстановления стенок кристаллизаторов, обеспечила возможность реализации технологии локального восстановления защитного покрытия, даже без демонтажа с водохлаждаемого коллектора кристаллизатора МНЛЗ (рисунки 13, 14).



Рисунок 13 - Комплекс роботизированной TIG-сварки проволокой БрХЦр

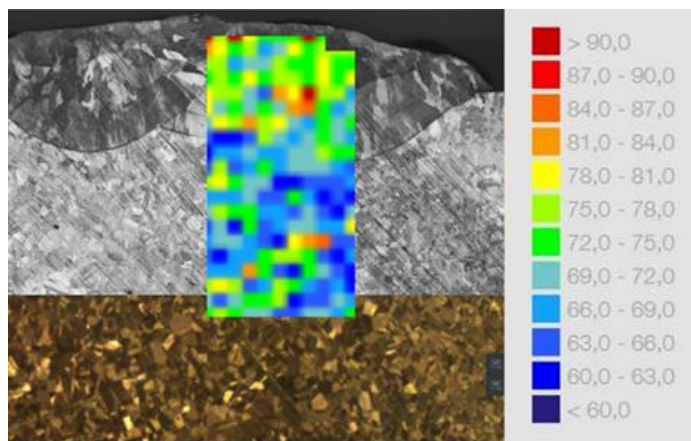


Рисунок 14 - Распределение твердости HV1 в поперечном сечении слоя, наплавленного сваркой

Авторским коллективом проведена комплексная оценка параметров эксплуатации кристаллизаторов и нагрузок в системе конечно-элементного анализа, созданы математические модели тепловых потоков и распределения температур в стенке слябового кристаллизатора. Спроектированы и внедрены в эксплуатацию конструкции кристаллизаторов с композиционным покрытием, обеспечивающие

благоприятные условия формирования корочки слитка за счет равномерного охлаждения (рисунок 15) и расчетного профиля (конусности) рабочей полости (рисунок 16), соответствующего усадке стального слитка в кристаллизаторе МНЛЗ.

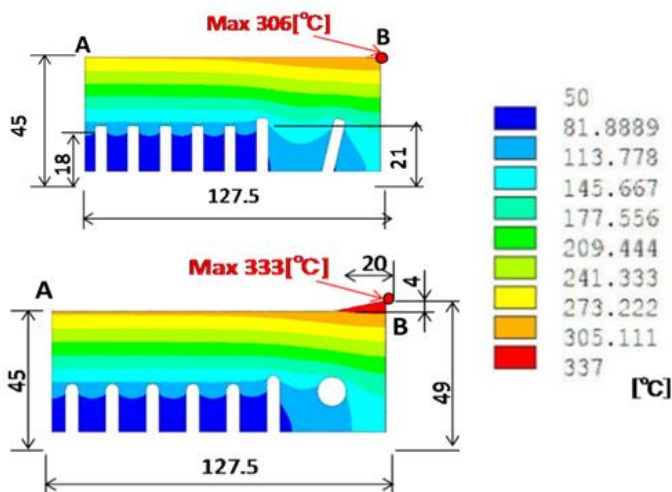


Рисунок 15 - Пример расчета конструкции системы охлаждения узкой стенки

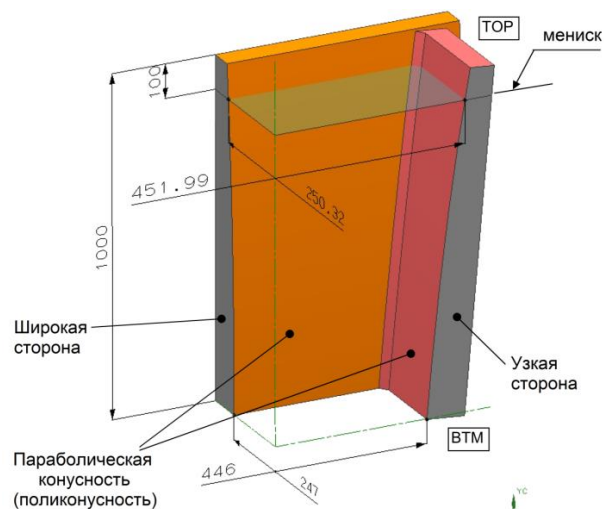


Рисунок 16 - Конструкция кристаллизатора с мультиконусностью

Инновационные кристаллизаторы по надежности и ресурсу превосходят зарубежные аналоги от 4 до 20 раз (рисунки 17, 18) с повышением уровня качества отливаемых непрерывнолитых слэбов по ужиминам, поперечным ребровым и продольным околоребровым трещинам, дефектам плоского проката сталеплавильного происхождения (раскатанная трещина, плена и т.п.).

Металлургический комбинат	Гальваника		Газотермическое покрытие	
	плавков	плавков	тонн стали	увеличение х раз
<b>ЕВРАЗ</b>	500	4 100	630 000	<b>6</b>
<b>Северсталь</b> Российская Сталь	300	1 500	262 000	<b>5</b>
<b>МАГНИТОГОРСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ</b>	500	1 937	700 000	<b>4</b>
<b>НЛМК</b>	300	3 000	480 000	<b>от 8 до 20</b>
<b>УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ</b>	700	1 500	260 000	<b>2</b>
<b>МЕЧЕЛ</b>	600	2 000	260 000	<b>4</b>
<b>ОМК</b>	150	980	156 000	<b>6</b>

Рисунок 17 - Сравнительные показатели стойкости инновационных кристаллизаторов



Рисунок 18 - Стенка кристаллизатора 3984 плавки (629 440 тонн стали)

Опыт АО «ЕВРАЗ НТМК» и ПАО «ММК» показал, что достижение рекордных показателей межремонтной стойкости кристаллизаторов МНЛЗ на

уровне 600 –700 тыс. тонн отлитой стали, при средней годовой производительности слябовых МНЛЗ на уровне 1,5 млн тонн, позволяет существенно сократить парк кристаллизаторов, а с учетом применения технологии восстановления стенок аддитивной технологией послойной СТП с последующим нанесением композиционных покрытий, обеспечит практически бесконечный цикл эксплуатации кристаллизаторов и исключит потребность в их импорте.

В рамках формирования Производственного комплекса, занятого выпуском инновационных кристаллизаторов, на территории монопрофильного муниципального образования г. Нижний Тагил создано новое промышленное производство (рисунки 19, 20) общей площадью 8100 м<sup>2</sup>, включая 123 новых рабочих места, в том числе 26, отвечающих критериям высокопроизводительных рабочих мест. Технология реализована на базе роботизированных производственных ячеек с достигнутым уровнем роботизации на уровне лидирующих стран.



Рисунок 19 - Механическая обработка стенки кристаллизатора МНЛЗ

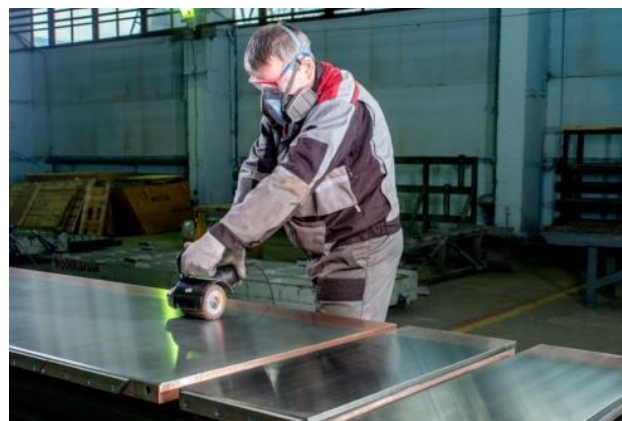


Рисунок 20 - Финишная слесарная обработка стенок кристаллизатора МНЛЗ

Организован выпуск продукции из перечня Плана мероприятий по импортозамещению в отрасли тяжелого машиностроения РФ на период до 2024 года. Доля отечественной продукции в применении слябовых кристаллизаторов с защитным покрытием на российских металлургических комбинатах увеличена с 3 % в 2012 году до 60 % к концу 2023 года, что превышает показатель, заданный указанным Планом. Сокращено количество плановых ремонтов металлургического оборудования, это высвободило дополнительные рабочие ресурсы, повысило энерго- и ресурсоэффективность сталеплавильного передела.

**Объемы внедрения.** Инновационные конструкции кристаллизаторов всех типов МНЛЗ для производства слитков толщиной от 90 до 400 мм со скоростью разливки 0,6-5,0 м/мин успешно применяются более чем на 90 % слябовых МНЛЗ при отливке стали для нужд судостроения, нефтегазовой, строительной и оборонной отраслей промышленности РФ.

Результаты внедрения на ПАО «НЛМК» и АО «ОМК» отмечены Золотой медалью выставки «Металл Экспо' 2018» за комплекс работ по модернизации технологического оборудования и совершенствование процесса разливки крупноформатных слябов из стали с уникальными качественными характеристиками для производства толстого листа на стане-5000 АО «ВМЗ» и выпуска из него труб большого диаметра, которые используются в строительстве крупнейших российских и международных нефтегазовых магистралей, в том числе по заказам Газпрома и Транснефти для расширения Единой сети газопроводов «Северный поток», «Турецкий поток», «Южный коридор», «Сила Сибири» и другие.

В 2022 году авторский коллектив работы награжден региональной премией имени В.Н. Татищева и Г.В. де Генина «За заслуги в области науки, техники, окружающей среды и медицины».

Технология внедрена на основных металлургических комбинатах РФ: ПАО «НЛМК», ПАО «Северсталь», ПАО «ММК», АО «ЕВРАЗ НТМК» и включена в реестр современных технологий Минпромторга, нашла мировое признание, продукция поставлялась на экспорт. Технология определена мировыми лидерами в области металлургического машиностроения Primetals Technologies (Австрия) и Danieli & C. Officine Meccaniche S.p.A. (Италия) в качестве приоритетной и реализуется при строительстве первого в РФ проекта зеленой металлургии «Эколант» в г. Выкса.

Ряд исследований выполнен в рамках программ федерального Фонда содействия инновациям, РФФИ, РАН и реализации комплексного проекта Уральского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня (УМНОЦ) «Передовые производственные технологии и материалы».

По результатам работы получено 11 патентов на изобретения, опубликовано 115 научных публикаций, издано 5 монографий.



**Достигнутый экономический и социальный эффект от внедрения.** Созданы новые высокопроизводительные рабочие места, реализованная технология позволила в 8 раз снизить экологическую нагрузку по сравнению с гальваническим производством.

Для подготовки высококлассных специалистов с целью обеспечения дальнейшего развития направления по повышению ресурса металлургического оборудования, совместно с ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», сформирован коллектив из научных сотрудников, студентов, представителей машиностроительных и металлургических предприятий, компетенции которых обеспечивают эффективную взаимосвязь науки, образования и производства.

Суммарный экономический эффект от реализации работы за 2019-2023 годы составил 34,106 млрд рублей.

Инновационная технология производства кристаллизаторов представлена руководству Правительства РФ и Свердловской области на Международной промышленной выставке ИННОПРОМ-2022 (рисунок 21).

Результаты работы доложены на научной сессии общего собрания членов РАН «Российская академия наук в решении проблем научно-технологического развития РФ» (рисунок 22) и Постановлением общего собрания от 13 декабря 2023 года рекомендованы в качестве прогрессивной российской технологии для обеспечения технологического суверенитета по критичному по безопасности переделу стали в Российской Федерации.



Рисунок 21 - Презентация результатов работы на выставке ИННОПРОМ-2022



Рисунок 22 - Презентация результатов работы на научной сессии общего собрания членов РАН