А. А. Вопнерук[1, 6], Р. Ф. Исхаков[2, 6], А. Б. Котельников[1, 2], К. Ямасаки[3], К. Окада[4], А. А. Киричков[5], М. С. Фомичев[5], Е. В. Шеховцов[5]

[1] ООО «Совместное предприятие «Мишима-Машпром» (г. Екатеринбург, Россия),
[2] ЗАО «НПП «Машпром» (г. Екатеринбург, Россия),
[3] Mishima Kosan Co., Ltd (г. Китакюсю, Япония),
[4] Японская ассоциация ROTOBO (г. Токио, Япония),
[5] ОАО «ЕВРАЗ НТМК» (г. Нижний Тагил, Россия),
[6] ФГАОУ ВПО «УРФУ имени Б. Н. Ельцина»

УДК 621.74.047.06

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ПЕРЕДОВЫХ ЯПОНСКИХ РАЗРАБОТОК НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ В ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

Описаны результаты опытно-промышленной эксплуатации плит кристаллизаторов МНЛЗ с повышенным ресурсом, изготовленных по технологии «Mishima Kosan Co., Ltd» на ОАО «ЕВРАЗ НТМК». Приведены примеры примененных технических решений, а также анализ экономической эффективности их реализации.

Ключевые слова: *МНЛЗ, кристаллизатор, газотермическое покрытие, стойкость.*

В последние пять лет в отечественной металлургии наблюдается постоянное снижение рентабельности отечественных металлургических комбинатов. Безусловно, основная причина этого — активная конкуренция со стороны китайских производителей металлопродукции в условиях существенного падения спроса на внешних рынках.

В сложившейся ситуации отечественные металлурги вынуждены минимизировать производственные затраты. Бесспорно, наиболее эффективный способ поддержания конкурентоспособности — постоянная модернизация и реконструкция производственных мощностей, однако в условиях перекредитованности комбинатов реализация подобных проектов существенно осложнена. Наиболее перспективным и быстро реализуемым способом снижения производственных расходов является сокращение затрат на закупку запасных частей и ремонт оборудования на основных переделах вследствие увеличения ресурса эксплуатации.

В 2008 г. специалисты инжиниринговой компании ЗАО «НПП Машпром» при поддержке японской ассоциации ROTOBO впервые посетили Японию, стабильно удерживающую второе место по объему выпускаемой стали и являющейся бесспорным лидером по применению наукоемких технологий в металлургии. В ходе визита была достигнута договоренность об опытно-промышленных испытаниях технических решений ряда японских компаний на российских металлургических комбинатах. Одними из первых на предложение откликнулись специалисты ОАО «ЕВРАЗ НТМК», заинтересовавшиеся возможностью увеличения стойкости основного оборудования и улучшения качества стальных заготовок на этапе непрерывной разливки.

В настоящее время процесс непрерывной разливки стали на МНЛЗ с учетом технико-экономических показателей позиционируется как наиболее рациональный способ получения заготовок для дальнейших переделов. Кристаллизатор является основным узлом МНЛЗ, стойкость которого преимущественно влияет на экономические показатели процесса отливки стали [1, 2].

Затвердевание слитка начинается в кристаллизаторе, внутренняя полость которого соответствует профилю отливаемой заготовки. Условия в кристаллизаторе в значительной мере определяют качество поверхности непрерывнолитой заготовки. При разливке возникает большой градиент температуры на границе внутренней поверхности кристаллизатора с образовавшейся корочкой, приводящий к возникновению температурных напряжений и соответствующих им деформаций. Движущаяся корочка заготовки вызывает на контакте высокий износ рабочей поверхности кристаллизатора. При появлении зазора изнашивание поверхности ускоряется [1].

Высокие требования к качеству непрерывнолитых заготовок, возрастающее количество сложных марок стали и стремление к увеличению стойкости кристаллизаторов делают актуальными совершенствование конструкции кристаллизаторов, а также разработку эффективных защитных покрытий на их рабочей поверхности.

Настоящая статья посвящена описанию результатов промышленных испытаний в ОАО «ЕВРАЗ НТМК» стенок кристаллизаторов МНЛЗ, проведенных по технологии японской компании «Mishima Kosan Co., Ltd», которая осуществляет проектирование, изготовление и сервис кристаллизаторов МНЛЗ разных типов: от мелкосортовых до слябовых, в том числе с применением технологий нанесения высокоизносостойких покрытий на их рабочую поверхность.

При подготовке технических решений для ОАО «ЕВРАЗ НТМК» были поставлены следующие задачи:

применение для стенки кристаллизатора материала повышенной стойкости при высоких температурах;

уменьшение градиента температуры на рабочей поверхности стенки кристаллизатора в результате реализации более эффективного и равномерного процесса теплоотвода;

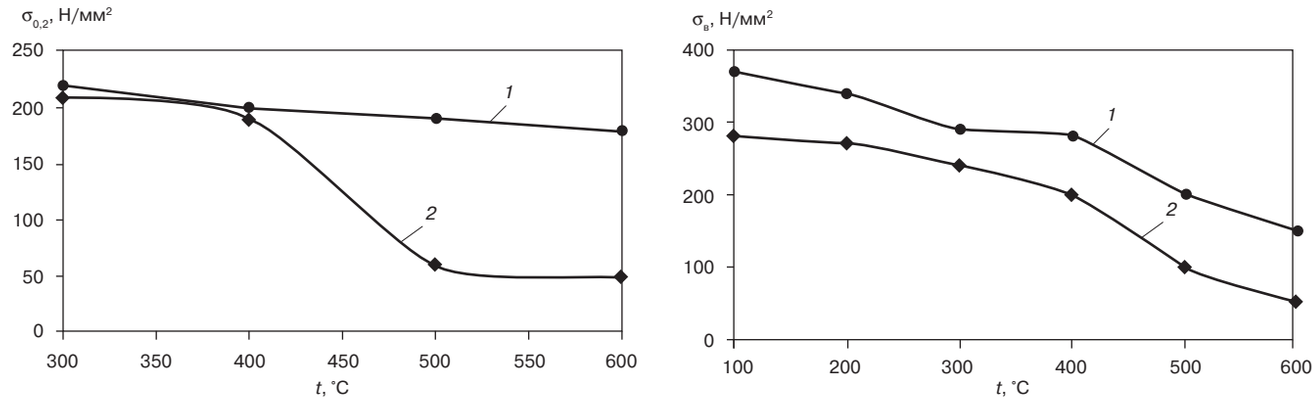


Рис. 1. Сравнение механических свойств сплавов Cu – Zr – Cr (*1*) и Cu – Ag (*2*)

придание необходимых эксплуатационных свойств рабочей поверхности кристаллизатора нанесением газотермических покрытий.

Для их реализации был проведен комплекс мероприятий, позволивших существенно повысить стойкость кристаллизатора.

Материал стенок кристаллизаторов должен быть достаточно твердым, теплопроводным, жаропрочным, химически инертным по отношению к расплаву, стойким к термоциклированию в диапазоне рабочих температур разливки, иметь высокостабильные свойства.

Традиционный материал для кристаллизаторов — высокотеплопроводная медь довольно существенно разупрочняется в интервале рабочих температур вследствие собирательной рекристаллизации. Долгое время в России и за рубежом применяют сплавы Cu – Ag, Cu – Cr и Cu – Zr, однако это не позволяет решить всех проблем.

Альтернативными материалами являются дисперсионно-твердеющие бронзы (в частности, хромциркониевая).

Хромциркониевая бронза (Cu – Zr – Cr) по сравнению с Cu – Ag имеет более высокие условный предел текучести и предел прочности при повышенных температурах. Сравнительные характеристики физико-механических свойств этих сплавов приведены на рис. 1 и ниже:

Сплав	Ag – Cu	Cr – Zr – Cu
α, 10^{-5} K^{-1}	1,68	1,70
λ, Вт/(м · К)	340	325
$t_{рекр}$, °С	350	900
E, МН/мм^2	0,12	0,13

Повышенная температура начала рекристаллизации (~ 900 °С) позволяет избежать изначального разупрочнения металла и предотвратить эффект ползучести с изменением геометрии как кристаллизатора, так и каналов охлаждения. Немаловажно влияние температуры рекристаллизации на ход нанесения защитного покрытия.

В процессе формирования заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ в его углах корочка нарастает быстрее и раньше становится более прочной и твердой, чем у грани, вследствие двумерного теплового потока. Чрезмерный градиент температуры по периметру кристаллизатора приводит к термическим деформациям стенки, неодинаковым в продольном и поперечном направлениях. Неравномерность охлаждения кристаллизатора — причина интенсивного износа в углах на первых этапах затвердевания заготовки.

Анализ существующей системы охлаждения стенок кристаллизатора МНЛЗ № 4 ОАО «ЕВРАЗ НТМК» показал неудовлетворительную картину градиента температуры на поверхности стенок кристаллизатора. Для предотвращения возникновения высокого уровня термических напряжений была предложена улучшенная схема каналов охлаждения стенок кристаллизатора. На рис. 2 показаны поля распределения температуры при существующей системе каналов охлаждения и при предложенной системе каналов охлаждения.

Изменение каналов охлаждения позволило снизить температуру на острой кромке «уса» узкой стенки

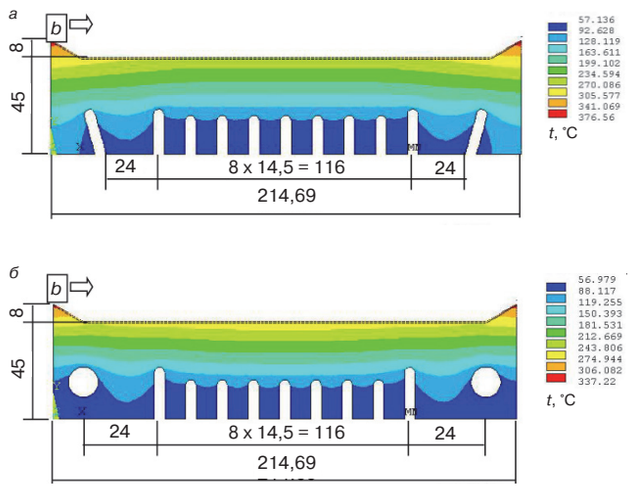


Рис. 2. Распределение температуры в узкой стенке кристаллизатора № 6 МНЛЗ № 4 ОАО «ЕВРАЗ НТМК» (температура воды на охлаждение 50 °С): *а* — существующее (средняя скорость внутри канала 8,8 м/с); *б* — вследствие изменения системы каналов охлаждения с распределением температуры (средняя скорость внутри канала 7,8 м/с)

с 375 до 325 °С и уменьшить неравномерность температуры на всей поверхности с 26 до 15 %.

Известно много решений по повышению износостойкости поверхности кристаллизатора для уменьшения абразивного износа поверхности при скольжении заготовки. Ресурс кристаллизаторов из меди без защитных покрытий не превышает 50 плавок [3]. Повышение твердости меди за счет использования эффекта упрочнения при холодной деформации и применение сплавов меди с серебром увеличивают стойкость кристаллизаторов до 100 – 110 плавок.

Эффективный способ повышения стойкости кристаллизаторов — применение износостойких покрытий. Наиболее распространенными являются гальванические покрытия Ni, Co – Ni, Fe – Ni. Авторы [4] приводят анализ этих покрытий и статистику по стойкости кристаллизаторов во взаимосвязи с твердостью покрытий. По представленным данным [4] стойкость гальванического Ni-покрытия составляет в среднем 300 плавок, стойкость Co – Ni-покрытия — 400 плавок. Однако данная статистика не подтверждается результатами эксплуатации стенок кристаллизаторов МНЛЗ с гальваническим Co – Ni-покрытием на территории РФ. Стойкость стенок кристаллизаторов с гальваническим Co – Ni-покрытием на предприятиях РФ варьируется от 260 до 300 плавок.

Активное развитие получили технологии газотермического нанесения покрытий на поверхность кристаллизаторов [4, 5]. В работах [4, 5] показана перспективность и эффективность данного способа нанесения износостойких покрытий. По данным компании «Siemens VAI» [4], покрытия «Ceramic» с экстремально высоким показателем твердости (до 1200 *HV*) способны достигать стойкости в 1200 плавок. Однако применение хрупкого керамического покрытия требует особой культуры производства и применимо только для нанесения на узкие плиты кристаллизатора. Кроме того, соотношение стоимости покрытия и стойкости дает сомнительные результаты по их экономической эффективности.

Технология японской компании «Mishima Kosan Co., Ltd.» предполагает использование газотермического напыления покрытий системы Ni – Cr твердостью 500 – 600 *HV*. Данная технология успешно применяется для нанесения покрытий как на узкие, так и на широкие рабочие стенки кристаллизаторов МНЛЗ. На рис. 3 показано сравнение стойкости и величины износа гальванических покрытий и газотермического покрытия по технологии «Mishima Kosan Co., Ltd».

Для снижения интенсивного коррозионного изнашивания в конструкции кристаллизатора были применены отбойные планки по низу кристаллизатора, способствующие снижению интенсивности образования кислоты — продукта взаимодействия входящих в состав ШОС фтора и примесей серы с водой от форсунок подбоя на выходе слитка из кристаллизатора.

На рис. 4 приведена конструкция отбойных планок, реализованная на кристаллизаторе № 6 МНЛЗ № 4 ОАО «ЕВРАЗ НТМК». Для первого этапа опыт-

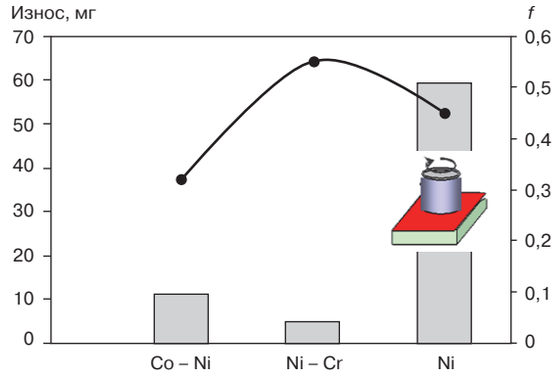


Рис. 3. Сравнение износа (■), коэффициента трения (—•—) газотермического покрытия Ni – Cr и гальванопокрытий Co – Ni, Ni при высокотемпературных испытаниях

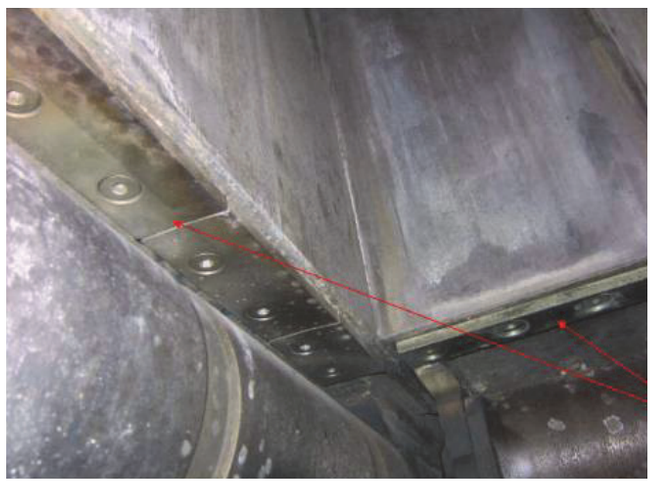


Рис. 4. Отбойные планки по низу кристаллизатора

но-промышленных испытаний на МНЛЗ № 4 ОАО «ЕВРАЗ НТМК» компания «Mishima Kosan Co., Ltd» и ЗАО «НПП «Машпром» поставили комплект рабочих стенок кристаллизатора с газотермическим покрытием Ni – Cr на рабочих поверхностях узких и широких стенок для разливки сляба толщиной 250 мм, а также аналогичный комплект с гальваническим Ni – Co-покрытием на широких стенках для разливки сляба толщиной 200 мм.

По результатам опытно-промышленной эксплуатации наработка плит кристаллизатора с газотермическим покрытием составила 3984 плавки, что соответствует 637440 т разлитого металла, или 151,4 км сляба толщиной 250 мм.

Применение устройства защиты нижней части кристаллизатора от коррозии показало высокую эффективность, следы коррозионного изнашивания покрытия не наблюдались вплоть до наработки 2523 плавок (рис. 5). Данные дефекты не влияли на качество разливаемой заготовки, поэтому было решено продолжить испытания. При осмотре рабочей поверхности кристаллизатора после 3576 плавок на уровне мениска были обнаружены дефекты, локализованные на узких и частично широких стенках (рис. 6). Имен-



Рис. 5. Широкая стенка. Наработка 2523 плавки (403608 т)

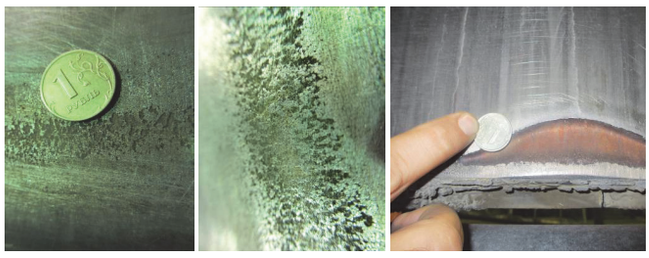


Рис. 6. Дефекты на рабочей поверхности кристаллизатора № 6. Наработка 3576 плавок



Рис. 7. Стенки кристаллизатора с гальваническим Ni – Co покрытием на широких плитах и газотермическим Ni – Cr покрытием на узких после наработки 2540 плавок (406 400 т металла)

но эти дефекты послужили основной причиной вывода плит из эксплуатации при наработке 3984 плавок. Остальная поверхность стенок не имеет трещин, отслоений, каверн, прочих дефектов, препятствующих продолжению эксплуатации кристаллизатора. В конце июня 2013 г. завершилась опытно-промышленная эксплуатация комплекта с гальваническим Ni – Co-покрытием на широких плитах и газотермическим

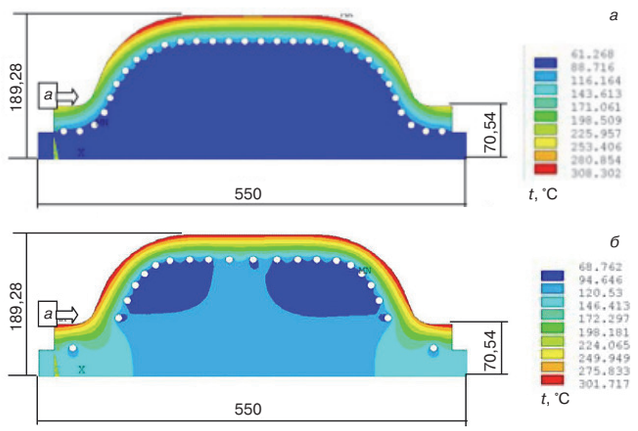


Рис. 8. Результаты оптимизации конструкции системы охлаждения стенок кристаллизатора для разливки балочной заготовки (температура охлаждающей жидкости 40 °С): *а* — до оптимизации (средняя скорость охлаждающей жидкости 6,78 м/с), *б* — после (средняя скорость охлаждающей жидкости 9,68 м/с)

Ni – Cr на узких (рис. 7). Его наработка составила более 2500 плавок.

Высокие результаты испытаний на МНЛЗ № 4 ОАО «ЕВРАЗ НТМК» подтвердили высокую эффективность применения плит кристаллизаторов, изготовленных по технологии «Mishima Kosan Co., Ltd», поэтому следующим этапом опытной эксплуатации была выбрана МНЛЗ № 2. В настоящий момент два комплекта плит для сдвоенных кристаллизаторов двухручьевой блюмовой МНЛЗ № 2 находятся в эксплуатации. Текущая наработка — 249 плавок. Эксплуатация продолжается, однако при плановом осмотре были выявлены зарождающиеся дефекты, которые в дальнейшем могут стать причиной преждевременного вывода плит из эксплуатации.

Любая работа по оптимизации требует тщательной и планомерной проработки, реализуемой по алгоритму «step by step», и попадание в цель с первого раза — скорее исключение. Поэтому на основе промежуточных результатов на МНЛЗ № 2 проводятся повторная оптимизация конусности кристаллизатора, схемы нанесения и материала покрытия, конструкции системы охлаждения, а также анализ причин интенсивного коррозионного изнашивания.

В условиях обостряющейся конкуренции на рынке едва ли не решающий фактор — качество металлопродукции. Балочный прокат, как известно, является базовым элементом в строительстве, машино- и мостостроении. Отливка заготовок балочного профиля обусловливает определенную специфику как конструкции кристаллизатора, опорных и охлаждающих устройств зоны вторичного охлаждения, так и технологии разливки (в частности, способа подачи металла в кристаллизатор, защиты металла в нем, распределение охлаждения отдельных элементов кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения) [6]. Поэтому предложение компании ЗАО «НПП «Машпром» по оптимизации конструкции кристаллизации (рис. 8) и

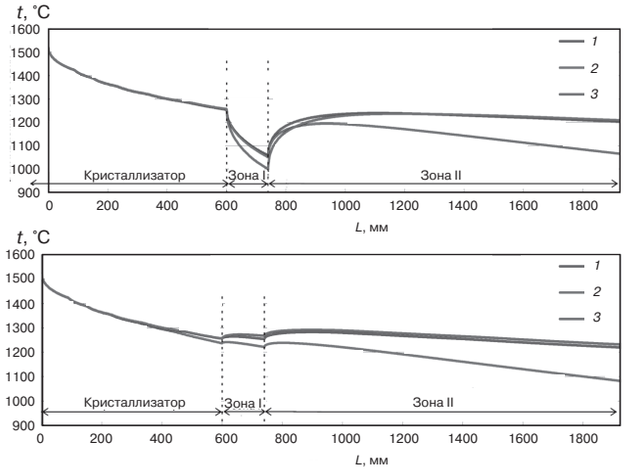


Рис. 9. Результаты анализа распределений (*1 – 3*) температурных полей в разливаемой балочной заготовке: *а* — текущее состояние, *б* — после оптимизации

распределения охлаждения отливаемой заготовки для МНЛЗ № 2 ОАО «ЕВРАЗ НТМК» (рис. 9) получило активную поддержку специалистов комбината.

В настоящее время проводится комплексный анализ причин появления деформации полки балочной заготовки как в кристаллизаторе, так и в зоне вторичного охлаждения.

Опытно-промышленная эксплуатация плит кристаллизаторов оптимизированной конструкции на МНЛЗ № 3 ОАО «ЕВРАЗ НТМК» запланирована на 2014 г.

ВЫВОДЫ

Применение технологии газотермического напыления покрытий системы Ni – Cr, а также полный комплекс мероприятий по повышению стойкости кристаллизаторов МНЛЗ по технологии «Mishima Kosan Co., Ltd» позволяет увеличить ресурс стенок кристаллизатора в 20 раз по сравнению со стенками без покрытия и в шесть раз по сравнению с гальваническим покрытием Co – Ni от текущих поставщиков. Высокое сопротивление износу подтверждено многочисленными промышленными испытаниями аналогичных кристаллизаторов на металлургических комбинатах Японии, а также опытно-промышленной эксплуатации на МНЛЗ № 4 ОАО «ЕВРАЗ НТМК». Наработка кристаллизатора с газотермическим покрытием на ОАО «ЕВРАЗ НТМК» — 3984 плавки.

Благодаря высокой стойкости кристаллизатора достигаются: экономический эффект применения стенок кристаллизаторов «Mishima Kosan Co., Ltd» за счет сокращения количества ремонтов кристаллизатора и времени на его обслуживание; как следствие, повышение годовой производительности; главное — снижение относительной стоимости разливки одной плавки металла. Экономия за счет снижения затрат на плиты кристаллизаторов МНЛЗ № 4 ОАО «ЕВРАЗ НТМК» при достижении 3984 плавок составила 138,41 EUR с каждой плавки по сравнению с известными европейскими производителями стенок с гальваническим Co – Ni-покрытием.

Высокие показатели стойкости, достигнутые на МНЛЗ № 4 ОАО «ЕВРАЗ НТМК», позволяют с уверенностью прогнозировать большой потенциал для возможности снижения производственных затрат и улучшения качества стальных заготовок на этапе непрерывной разливки.

Принимая во внимание активную заинтересованность технических специалистов металлургических комбинатов стран СНГ и результаты опытно-промышленной эксплуатации, компаниями ЗАО «НПП «Машпром» и «Mishima Kosan Co., Ltd» было принято решение о создании совместного предприятия — ООО «СП ММП» с локализацией производства в Нижнем Тагиле. Данное предприятие будет специализироваться на оказании полного комплекса услуг в области непрерывной разливки, включая техническое сопровождение и производство плит по технологии «Mishima Kosan Co., Ltd». Уже закончен монтаж основного технологического оборудования. Выпуск первой продукции запланирован на осень 2013 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лейрих И. В., Смирнов А. Н., Жибоедов Е. Ю.** и др. Особенности разрушения покрытий гильз кристаллизаторов высокоскоростных сортовых МНЛЗ // Электрометаллургия. 2007. № 4. С. 29 – 32.
2. **Николаев А. К.** Материалы для кристаллизаторов непрерывного литья слитков // Современные материалы для кристаллизаторов, новые конструкции и покрытия кристаллизаторов. Киров. 2002. С. 1 – 5.
3. Повышение износостойкости медных стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок // Металлы и цены. 2002. № 20. С. 8.
4. **Brower K. J., Rapp K. D., Powers M. J.** Advanced Alternative Coatings for Mold Copper Liner // Tech. Paper Alt Coatings – AIST. Spring 2005. — 15 p.
5. **Алексеева Л. Е., Желобцова Г. А., Невский В. А.** и др. Плазменная наплавка на медь и проблема повышения ресурса медных кристаллизаторов МНЛЗ // ОАО «Черметинформация». Бюл. «Черная металлургия». 2005. № 11. С. 46 – 48.
6. **Куклев А. В., Лейтес А. В.** Практика непрерывной разливки стали. — М. : Металлургия, 2011. — 432 с.