



УДК 669.187.58

## ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ И СПОСОБЫ УПРОЧНЕНИЯ МЕДНЫХ ПЛИТ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ

**В. Г. Кожемякин, В. А. Шаповалов,  
В. Р. Бурнашев, Д. М. Жиров, Д. В. Ботвинко**

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.  
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены механизмы появления дефектов, основные типы разрушений и причины выхода из строя медных кристаллизаторов МНЛЗ. Определены недостатки и критерии отбраковки узких и широких стенок кристаллизатора МНЛЗ. Рассмотрены некоторые способы повышения стойкости стенок кристаллизатора (упрочнение металла и применение износостойких покрытий). Дана характеристика материалу, используемому для стенок кристаллизаторов. Рассмотрены легирующие элементы, служащие для упрочнения и повышения температуры рекристаллизации медных сплавов при практически неизменной теплопроводности. Выявлены недостатки существующих способов упрочнения медных плит кристаллизаторов МНЛЗ. Проведен анализ сплавов на основе меди для изготовления кристаллизаторов МНЛЗ. Показаны наиболее распространенные покрытия. Выявлены основные недостатки применяемых покрытий. Рассмотрены основные способы восстановления и упрочнения поверхностного слоя плит кристаллизаторов. Предложена технология плазменно-дугового рафинирования поверхности для восстановления и легирования поверхностного слоя медных плит кристаллизаторов МНЛЗ. Библиогр. 28, табл. 2, ил. 11.

**Ключевые слова:** кристаллизатор МНЛЗ; дефекты; износ; основные типы разрушения; способы повышения стойкости; упрочнение металла; износостойкие покрытия; теплопроводность

В металлургическом производстве значительную часть себестоимости продукции составляют затраты на ремонт агрегатов, сменное оборудование и запасные части. В связи с этим задача повышения износостойкости быстроизнашивающихся деталей металлургических агрегатов, работающих в особо жестких условиях нагрева, напряжений, агрессивных сред и других неблагоприятных факторов, в настоящее время наиболее актуальна.

Важнейшей проблемой в черной металлургии является повышение ресурса медных стенок кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Это связано с тем, что медь, имеющая высокую теплопроводность, обеспечивает быстрое формирование корочки металла на поверхности образующегося слитка. При движении металла через кристаллизатор в зоне взаимодействия поверхностей происходит значительный абразивный износ меди, особенно боковых стенок, движущаяся корочка заготовки вызывает при контакте сильный износ поверхности кристаллизатора, приводящий к изме-

нению исходной геометрии кристаллизатора (рис. 1).

Основной механизм появления дефектов (риски, раковины, истирание поверхности) и разрушения кристаллизаторов связан преимущественно с износом (рис. 1) [1, 2].

Выделяют следующие причины выхода из строя кристаллизаторов: истирание меди, трещины на рабочей поверхности медных облицовок, коробление кристаллизаторов, а также небрежность пер-

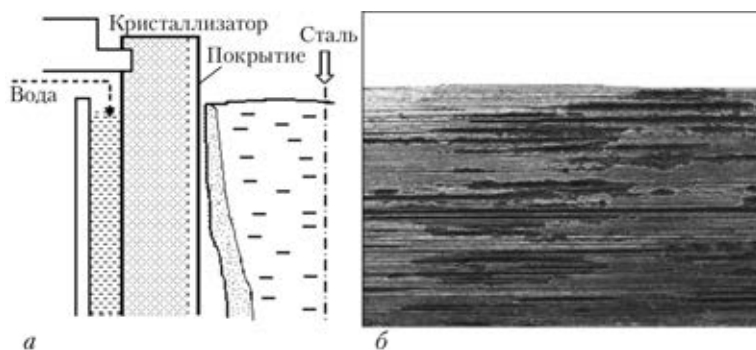


Рис. 1. Схема работы кристаллизатора (а) и вид поверхности стенки кристаллизатора МНЛЗ после эксплуатации (б) [2]

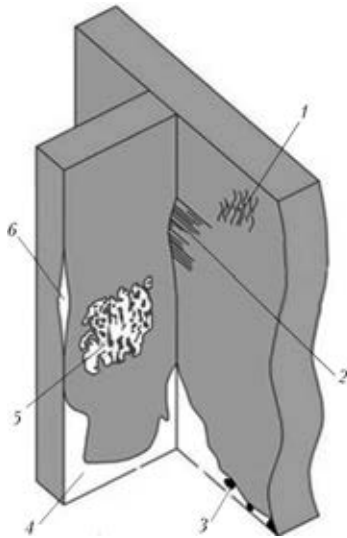


Рис. 2. Основные типы повреждения стенок кристаллизатора: 1 – тепловые трещины; 2 – трещины вследствие температурного расширения; 3 – коррозия; 4 – износ; 5 – разрушение покрытия в участках эрозии; 6 – уменьшение ширины

сонала [3, 4]. Основной является сравнительно быстрый износ его нижней части, который начинается с истирания защитного покрытия, а затем и непосредственно тела медной плиты. При этом износ может составлять 1,5...2,5 мм, существенно колебаться по периметру медной плиты [3].

Замена плит, как правило, производится в следующих случаях: при значительной деформации профиля, наличии грубых дефектов на рабочей поверхности (особенно в верхней части), существенном механическом износе в нижней части.

Критерием отбраковки узких стенок служит износ или истирание контактных поверхностей стали, широких стенок, трещинообразование в зоне зеркала расплава.

На рис. 2 схематично показаны основные типы повреждений кристаллизаторов на МНЛЗ, обусловленные низкой механической прочностью материала кристаллизатора – меди [2].

Недостатком медных кристаллизаторов являются их низкие прочностные свойства при рабочих температурах (около 400 °С). При значениях температуры медных стенок в процессе разливки (300...400 °С) в меди происходит процесс рекристаллизации (150...200 °С), т. е. укрупнение зерен. Крупные зерна имеют меньшую твердость, из-за чего металл разупрочняется [5].

После разливки определенного количества металла изношенные кристаллизаторы отправляют в ремонт, который заключается в механической обработке поверхности – острожке. Пройдя 4...8 циклов строжек, медные стенки кристаллизатора утилизируются [5]. Исходя из этого, необходимо повышать стойкость стенки кристаллизатора не меняя теплопроводность. Данную проблему решают путем обеспечения высокого ресурса стенок за счет применения более толстых стенок, увеличения количества их перестрожек или применения более тонких уп-

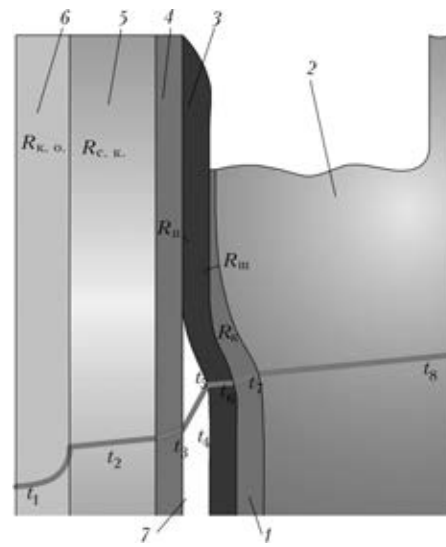


Рис. 3. Схема теплоотвода в кристаллизаторе, система жидкая сталь–охлаждающая вода: 1 – твердая корочка; 2 – жидкий металл; 3 – шлаковая охлаждающая смесь; 4 – защитное покрытие; 5 – стенка кристаллизатора; 6 – охлаждающая вода; 7 – газовый зазор

роченных стенок кристаллизатора с износостойким покрытием [6].

Основной характеристикой кристаллизатора является его высокая теплопроводность. На тепловое состояние кристаллизатора (плотность теплового потока) влияет термосопротивление от жидкой стали к охлаждающей воде (рис. 3), т. е. корка заготовки, шлак (газовый зазор), покрытие кристаллизатора, стенка кристаллизатора и термосопротивление конвективного теплообмена на поверхности канала охлаждения [6, 7].

$$q = \frac{T_{ж.м} - T_{в}}{R_{к} + R_{ш} + R_{п} + R_{с.к} + R_{к.о}},$$

где  $q$  – плотность теплового потока;  $T_{ж.м}$  и  $T_{в}$  – температура соответственно жидкого металла и воды;  $R_{к}$ ,  $R_{ш}$ ,  $R_{п}$ ,  $R_{с.к}$ ,  $R_{к.о}$  – термосопротивления корки, шлака, покрытия, стенки кристаллизатора, обусловленные теплоотдачей на поверхности канала охлаждения.

Термосопротивление покрытия кристаллизатора определяется уравнением

$$R_{п} = \frac{\delta_{п}}{\lambda_{п}}, \tag{1}$$

где  $\delta_{п}$ ,  $\lambda_{п}$  – толщина и коэффициент теплопроводности корки.

Термосопротивление стенки кристаллизатора вычисляется по уравнению

$$R_{с.к} = \frac{\delta_{с.к}}{\lambda_{с.к}}, \tag{2}$$

где  $\delta_{с.к}$ ,  $\lambda_{с.к}$  – толщина и коэффициент теплопроводности стенки кристаллизатора.

Из уравнений (1) и (2) следует, что для увеличения теплопроводности необходимо иметь наи-

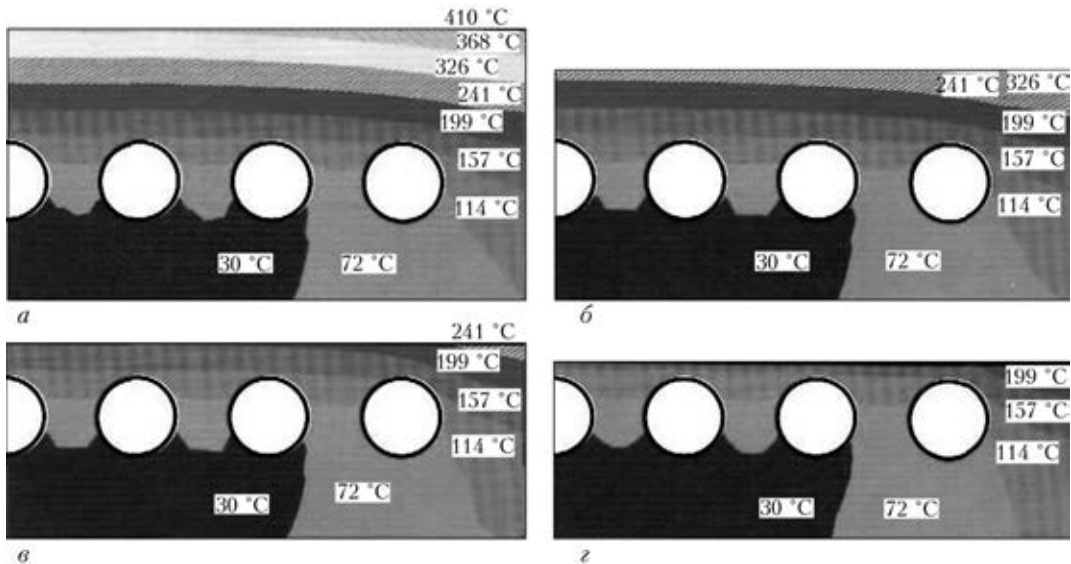


Рис. 4. Пример изменения теплового состояния стенок кристаллизатора с цилиндрическими сверленными каналами в зависимости от полезной толщины стенки, мм [6]: а – 29; б – 19; в – 9; з – 4

меньшую толщину покрытия и стенки кристаллизатора с высоким коэффициентом теплопроводности. Для крупнослябовых МНЛЗ, работающих в диапазоне скоростей до 1,6...2,0 м/мин, применение стенок с полезной толщиной до 30 мм оправдано. Для тонкослябовых МНЛЗ следует стремиться к минимальной толщине стенки кристаллизатора, поскольку при высоких скоростях литья актуальна борьба за каждый миллиметр толщины корки отливаемого металла. Допустимое минимальное расстояние от рабочей поверхности до поверхности каналов охлаждения составляет 10 мм.

Использование медных плит кристаллизаторов с большей полезной толщиной не является целесообразным с точки зрения теплопроводности и экономии дорогостоящей меди. Стойкость кристаллизаторов с медными рабочими стенками в условиях высокопроизводительной работы МНЛЗ недостаточна [6]. В этом случае восстановление производят с помощью перестожки, рациональная глубина перестожки рабочей поверхности определяется износом в углах и внизу медной плиты (1,5...2,5 мм). Таким образом, износ имеет небольшую долю в общей площади рабочей поверхности, большая часть меди сострагивается, что не является экономичным способом восстановления кристаллизатора.

Использование более тонких стенок кристаллизатора способствует лучшему теплообмену между жидкой сталью и охлаждающей водой и в результате – улучшению качества слитка на выходе из кристаллизатора. Это видно из уравнений термосопротивления (1), (2) для стенки кристаллизатора и рис. 4. Уменьшение полезной толщины стенки кристаллизатора при разливке крупных слябов приводит к росту толщины корки на выходе из кристаллизатора с темпом 0,16 мм прироста корки на 1 мм.

Существует несколько способов повышения стойкости узких стенок кристаллизаторов [8]: изготовление из более износостойких медных сплавов;

нанесение износостойких покрытий на рабочую поверхность (удаляемых во время ремонта несмотря на локальный характер износа); использование неплюсской формы.

Эффективным способом увеличения износостойкости является упрочнение металла. Материал стенок кристаллизаторов должен быть достаточно теплопроводным и жаропрочным, химически не активным по отношению к расплаву, довольно твердым, выдерживать дополнительное термоциклирование в диапазоне рабочих температур разливки, отличаться стабильностью свойств [9].

Существенно повысить прочность меди можно путем легирования. Суммарное содержание легирующих элементов в сплавах высокой теплопроводности находится в пределах от 0,1 до 3,0...5,0 % [10, 11].

Легирующим элементом, существенно упрочняющим медь, является хром. Так, при введении 1 % хрома твердость меди повышается в 2,5 раза, а электропроводность уменьшается всего на 20...30 %. Данные о растворимости свидетельствуют о том, что на основе системы Cu–Cr возможно создание дисперсионно-твердеющих медных сплавов. Серебряные бронзы прочнее меди и характеризуются более высокими значениями электро- и теплопроводности. Температуру рекристаллизации меди больше всего повышают переходные металлы IVА группы – цирконий, гафний, титан (рис. 5). Сплав меди с 0,03...0,10 % циркония имеет температуру рекристаллизации 500 °С. Цирконий обеспечивает значительный рост сопротивления ползучести при повышенных температурах [10, 11].

Никель, существенно упрочняя медь, мало меняет характеристики ее пластичности и ударную вязкость, при этом повышает показатели жаропрочности, модуля упругости и понижает коэффициент линейного расширения [10, 11]. Наилучшее сочетание прочностных свойств и теплопроводности до-

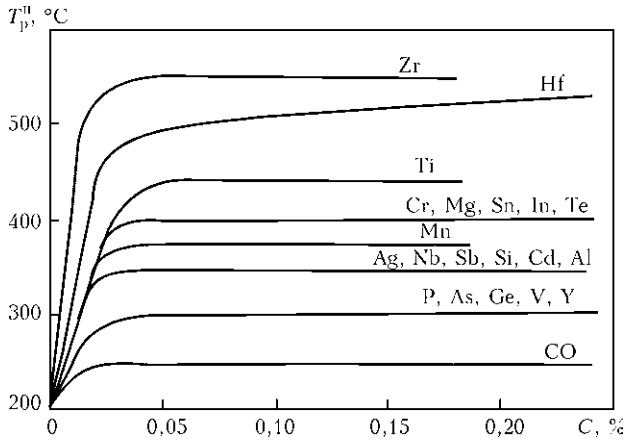


Рис. 5. Влияние примесей и легирующих элементов на температуру рекристаллизации меди;  $T_p^H$  — температура начала рекристаллизации [10];  $C$  — содержание компонентов, %

стигается при комплексном легировании меди несколькими элементами.

Хромоциркониевая бронза БрХЦр по механическим свойствам, температуре разупрочнения при нагревах, жаропрочности существенно превосходит двойную хромовую бронзу БрХ. При этом электро- и теплопроводность двойного и тройного сплавов практически одинакова. С понижением температуры растворимость хрома и циркония в меди уменьшается, что важно для термической обработки сплава и последующего увеличения его твердости через  $\sigma_n$ , МПа

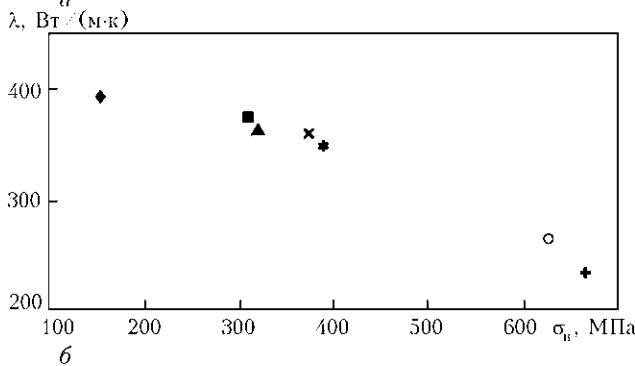
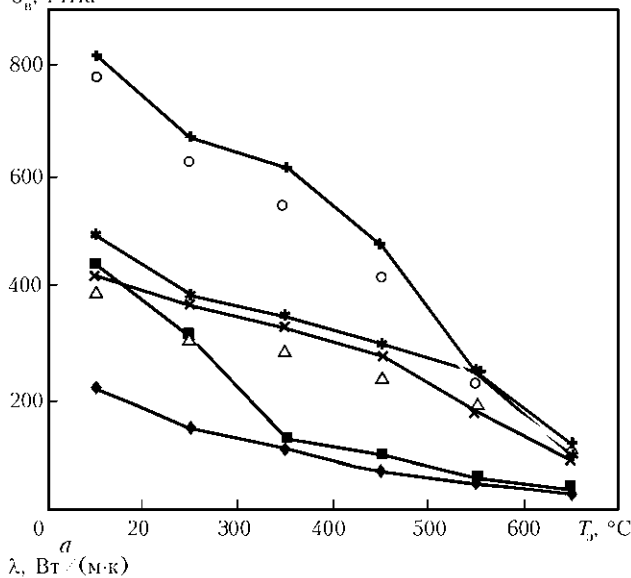


Рис. 6. Временное сопротивление меди и медных сплавов:  $a$  —  $\sigma_n$  и теплопроводность  $\lambda$  при 300 °С;  $b$  —  $\sigma_n$  в зависимости от температуры [10, 11]

дисперсионное твердение [10, 11]. В качестве легирующих элементов в хромовые бронзы вводят также тугоплавкие переходные металлы — ванадий и ниобий [10, 11].

Основными требованиями к материалу кристаллизатора являются его высокие значения теплопроводности и прочности при повышенных температурах. На рис. 6 показаны данные предела текучести медных сплавов в зависимости от температуры прочности и теплопроводности меди и медных сплавов.

В настоящее время существует множество сплавов на основе меди для изготовления кристаллизаторов МНЛЗ — CuAg, CuAgP, CuCr, CuZrCr, CuNiBe, CuZrNiBe, CuBeZrTi [10–13]. Однако они имеют существенный недостаток: теплопроводность у них ниже, чем у меди, а кроме того, изготовление специальных сплавов весьма дорого и трудоемко [5].

Повышение стойкости кристаллизаторов способствует значительному уменьшению склонности кристаллизаторов к термическим трещинам и искажению геометрии, незначительному повышению сопротивления против износа стенок. Поэтому в мировой практике для увеличения стойкости кристаллизаторов в последнее время применяются процессы поверхностного упрочнения, т. е. нанесение защитных покрытий [14].

Эффективным способом повышения стойкости кристаллизаторов является применение износостойких покрытий химическими, электрохимическими, электролитическими, лазерными и электронно-лучевыми способами. Существуют различные варианты и способы нанесения защитных покрытий — одно- и многослойные, наносимые способами электрохимическим, напыления, накатки.

Наносимые покрытия должны иметь высокие значения износостойкости и твердости, незначительную смачиваемость жидкой сталью, высокую адгезию покрытий с медной основой, способность обеспечить достаточный теплоотвод и, по возможности, небольшую разницу в коэффициентах теплового расширения покрытий и основы.

Наиболее распространенными покрытиями являются гальванические, а также газопламенное напыление Ni, Cr, Ni-Fe, Ni-Co, Ni-P, Ni-B, Ni-Cr [3, 8, 15].

Нанесение покрытий на поверхности гильз и плит кристаллизаторов производят, как правило, для увеличения их долговечности, а также улучшения качества отливаемых заготовок. Рабочие поверхности пластин кристаллизаторов довольно часто подвергают частичному или полному покрытию слоем хрома, никеля или никелевых сплавов [13].

Материалы износостойких покрытий имеют низкий коэффициент теплопроводности по сравнению с чистой медью. Хромовые покрытия рабочих поверхностей стенок кристаллизаторов толщиной 0,10...0,15 мм меняют температурные характеристики, повышая температуру ребра на 2...3, а середины стенки — на 6...8 °С. Никелевые покрытия увеличивают температуру стенок в зависимости от



толщины, °С: при 0,7 мм на 11; 1 мм на 15; 2 мм — на 30; 3 мм — на 45 [16].

Недостатком защитных покрытий для кристаллизаторов является их низкая теплопроводность, в результате чего повышается температура стенок, возрастают термические напряжения из-за разницы в коэффициентах теплового расширения меди и покрытия, при значениях температуры 300 °С (выше температуры начала рекристаллизации и размягчения меди) возможно отслаивание покрытия вследствие ослабления сил адгезии между медью и хромом [17].

Главным недостатком данных покрытий является их незначительная толщина (до 1 мм). Получение покрытий большей толщины сопряжено с ухудшением прочности сцепления покрытия с медной основой [18].

Существующие технологии нанесения различных защитных покрытий позволяют увеличить стойкость медных панелей кристаллизаторов, но через 4...8 циклов механической обработки (остройки) и нанесения нового защитного покрытия слой меди на плите истирается до браковочного состояния, и плита утилизируется.

Наибольший интерес представляют способы, с помощью которых можно достичь значительного упрочнения поверхностных слоев медных плит кристаллизаторов (сочетание высокой твердости и прочности поверхностного слоя с вязкостью и высокой пластичностью основы медных кристаллизаторов).

Значительный эффект поверхностного упрочнения достигается за счет повышения не только твердости, но и износо- и коррозионной стойкости рабочей поверхности кристаллизаторов.

Целью упрочнения поверхностного слоя кристаллизаторов МНЛЗ является повышение его стойкости, т. е. увеличение количества плавков.

Кристаллизаторы из меди без покрытий имеют ресурс, не превосходящий 50 плавков (7,5 тыс. т разливки стали) [8]. Применение различных сплавов меди дает увеличение стойкости кристаллизаторов (средняя стойкость за одну кампанию эксплуатации) сплава МЗрЖ — 125 плавков (4850 т), сплава МСр<sub>0,1</sub> — до 290 плавков (11252 т), сплава БрХ1Цр — 474 плавков (18201,6 т), сплава МНБ2,0-0,4 — 656 плавков (25190,4 т) [19]. На ОАО «НТМК» холоднокатаные стенки из сплава МСр<sub>0,1</sub> показали износостойкость в 1,5 раза большую, чем у стенок производства «Фест-Альпине», изготовленных из обычной меди. Стойкость применяемых в России стенок кристаллизаторов в настоящее время составляет в среднем от 400 до 600 плавков (т. е. от 64...96 тыс. т разлитой стали) [20].

Стойкость никеля гальванического покрытия составляет в среднем 300 плавков, покрытия Со-Ni — 400 плавков. При газотермическом способе напыления сплавом Ni-Cr по технологии японской компании «Mishima Kosan» стойкость стенок кристаллизаторов повышается до 8 раз — 3984 плавки

(600 тыс. т) [9, 20]. Испытания компании VAI показали, что покрытия с «экстремально» высоким показателем твердости (до 1200 HV), называемые «Ceramic», дают показатель стойкости в 1200 плавков. Соотношение стоимости покрытия и стойкости свидетельствует об их экономической неэффективности.

При высокой стойкости кристаллизатора экономический эффект достигается за счет сокращения количества ремонтов кристаллизатора, времени, затрачиваемого на обслуживание кристаллизатора, и как следствие, — повышения годовой производительности и относительной стоимости разливки одной плавки металла.

Как следует из анализа литературных источников [21–26], восстановление и упрочнение поверхностного слоя кристаллизатора МНЛЗ возможно с помощью следующих способов сварки, напыления, наплавки и электрохимического (рис. 7):

сварка давлением (сварка трением с перемешиванием, сварка взрывом);

газотермическое напыление (газопламенное, высокоскоростное газопламенное, детонационное, плазменное, напыление с оплавлением, электродуговая металлизация и активированная электродуговая металлизация);

наплавка (газовая, электродуговая, плазменно-дуговая, электрошлаковая, электронно-лучевая, лазерная);

электрохимический способ.

Из рассмотренных способов восстановления и упрочнения поверхностного слоя кристаллизатора МНЛЗ можно выделить три основных способа обработки: электродуговой, плазменно-дуговой и электрошлаковой.

При выборе рационального способа восстановления и упрочнения медных плит кристаллизаторов МНЛЗ необходимо учитывать следующие факторы: требования к качеству наплавленного металла; размер проплавления; производительность наплавки и др. Определенные преимущества имеют способы наплавки, обеспечивающие минимальное проплавление основного металла и малую толщину наплавленного слоя.

Для выбора подходящего способа восстановления и упрочнения поверхностного слоя кристаллизатора МНЛЗ сравним их основные параметры (табл. 1).

Плазменная наплавка относится к прецизионным процессам, поскольку позволяет наплавить слой заданной толщины (от 0,3 до 10 мм) как на всю деталь, так и на определенный участок с лимитированной долей основного металла (5...10 %). Плазменно-дуговую наплавку выполняют в контролируемой инертной атмосфере в герметичной камере. Преимущества этого вида наплавки заключаются в малой глубине проплавления основного металла, возможности наплавки тонких слоев, высоком качестве наплавленного металла без напылов. Большая концентрация тепловой энергии в плазменной струе, стабильность дугового разряда, воз-



Рис. 7. Способы восстановления и упрочнения поверхностного слоя плит кристаллизаторов МНЛЗ

возможность отдельного регулирования степени нагрева основного и присадочного материалов обеспечивают преимущества плазменной наплавки перед другими видами, особенно в тех случаях, когда присадочный материал по составу и свойствам отличается от основного. Малое вложение тепла в обрабатываемую деталь обеспечивает небольшие деформации и термические воздействия на структуру основы, небольшие припуски на последующую механическую обработку. Плазменная наплавка характеризуется такими важными преимуществами, как возможность легирования слоев наплавки, применение любых наплавочных металлов.

По сравнению с аналогами (электрошлаковая и электродуговая) процесс плазменно-дуговой наплавки имеет следующие преимущества:

- высокую стабильность и устойчивость дуги;
- увеличенный зазор между изделием и соплом плазмотрона позволяет снизить требования к точности его поддержания, облегчить наблюдение за наплавкой и обеспечить свободу маневра с присадочным материалом;
- большую номенклатуру наплавочных материалов;
- возможность обеспечения необходимого состава, структуры и свойств уже в первом слое металла наплавки;

точно заданную глубину проплавления и толщину покрытия, высокую равномерность по толщине слоя;

минимальную долю основного металла в наплавленном, отсутствие разбавления наплавленного покрытия основным металлом;

малые остаточные напряжения и деформации, наименьшее снижение сопротивления усталости наплавленного изделия;

незначительный припуск на последующую механическую обработку;

возможность процесса наплавки деталей малых размеров;

высокий уровень механизации и автоматизации технологического процесса.

Из рассмотренных способов восстановления и упрочнения поверхностного слоя кристаллизатора МНЛЗ наиболее подходящим для данного процесса восстановления и повышения стойкости медных кристаллизаторов является плазменно-дуговой.

Восстановление и упрочнение медных плит кристаллизаторов МНЛЗ возможно с помощью разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона способа плазменно-дугового рафинирования поверхности (ПДРП) [28].

Плазменно-дуговой переплав поверхностного слоя — это безотходная технология устранения дефектов в виде газовых пузырей, крупных неметаллических включений и оксидных плен, образующихся в наружном слое слитков и заготовок в процессе их формирования. Этот процесс разработан для замены существующих способов подготовки слитков к последующей модификации, основанных на удалении дефектного слоя.

ПДРП слоя проводится в контролируемой инертной атмосфере в герметичной камере. При движении заготовки относительно плазмотрона перемещается фронт плавления и кристаллизации ме-

Таблица 1. Основные технологические параметры способов восстановления и упрочнения поверхностного слоя плит кристаллизаторов МНЛЗ [27]

Способ восстановления / упрочнения	Толщина наплавленного слоя, мм	Расход электрической энергии, кВт·ч / кг	Производительность, кг / ч
Электродуговой	2...15	0,4...0,5	5
Плазменно-дуговой	0,3...10,0	0,9...1,2	1,3
ЭШН	Более 14...16	До 18	До 150

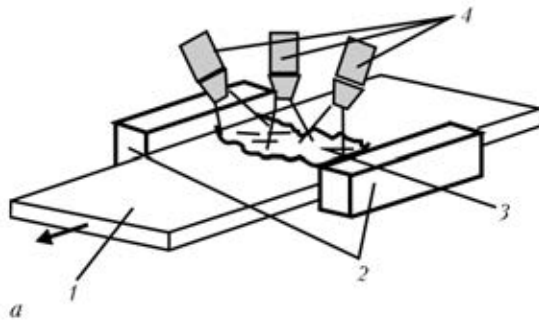


Рис. 8. Плазменно-дуговая установка ОБ-1957: а — схема; б — внешний вид; 1 — обрабатываемая заготовка; 2 — кристаллизатор; 3 — ванна жидкого металла; 4 — плазмотроны

талла, последовательно обрабатывается вся поверхность заготовки (рис. 8).

Высокопроизводительный процесс переплава поверхностного слоя при обработке плоских заготовок обеспечивается путем поддержания слоя расплавленного металла по всей ширине заготовки в результате равномерного рассредоточения тепловых потоков от плазменных дуг по поверхности обрабатываемой заготовки, при котором осуществляется рафинирование и формирование качественной поверхности (рис. 9).

При этом формируется качественная поверхность слитков — переплавленный слой плотный; трещины, завороты, плены, поры, свищи и другие макроскопические дефекты в процессе переплава исчезают. Толщина переплавленного слоя составляет 5...20 мм.

При ПДРП возможно также легирование поверхностного слоя. Совмещение переплава с легированием и дисперсионным упрочнением поверхностного слоя позволяет не только восстанавливать медные панели кристаллизаторов, обеспечивая надежное соединение металла панели с наплавленным слоем, но и повышать их износостойкость при незначительном изменении теплопроводности. Благодаря легированию поверхностный слой приобретает новые свойства с возможностью их

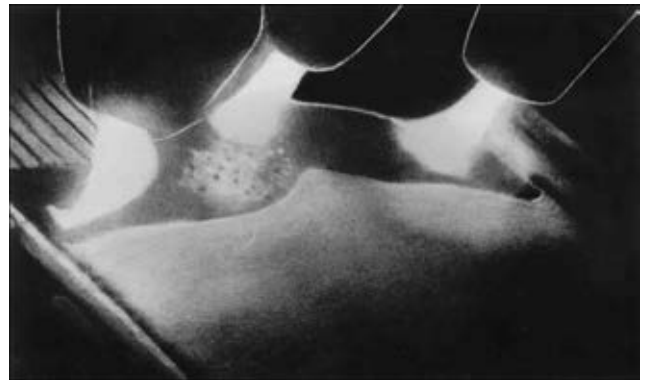


Рис. 9. Процесс ПДРП слоя

изменения в нужном направлении в зависимости от вводимых модификаторов и легирующих добавок.

Выбраны элементы для упрочнения поверхностного слоя медных плит кристаллизаторов МНЛЗ, существенно повышающие стойкость поверхностного слоя меди при рабочих температурах (300...400 °С) и практически не снижающие теплопроводность меди.

Таким образом, определены сплавы на основе меди с высокими значениями теплопроводности, температуры разупрочнения и стойкости для упрочнения поверхностного слоя медных плит кристал-

Таблица 2. Свойства медных сплавов для изготовления стенок кристаллизаторов

Марка сплава	При 20 °С			При 300 °С			Температура разупрочнения, °С
	$\lambda$ , Вт/(м·к)	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\lambda$ , Вт/(м·к)	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	
Cu (г/д)	410	60	45	393	50	40	250...280
CuAg (х/д)	380	220	20	375	160	25	350
CuNi	180	600	10	240	480	6	550
CuCr (т/о)	350	280	20	360	220	15	500
CuCrZr (т/о)	340	330	25	350	280	20	550
CuZr (х/д)	370	300	15	365	280	15	500
CuHf	360	430	15	355	410	10	520
CuTi	160	800	15	230	680	10	450
CuNiB	170	550	10	220	440	6	550

Примечание. Здесь г/д — горячедеформированная; х/д — холоднодеформированная; т/о — термообработанная; т/к — теплокатаная заготовка.

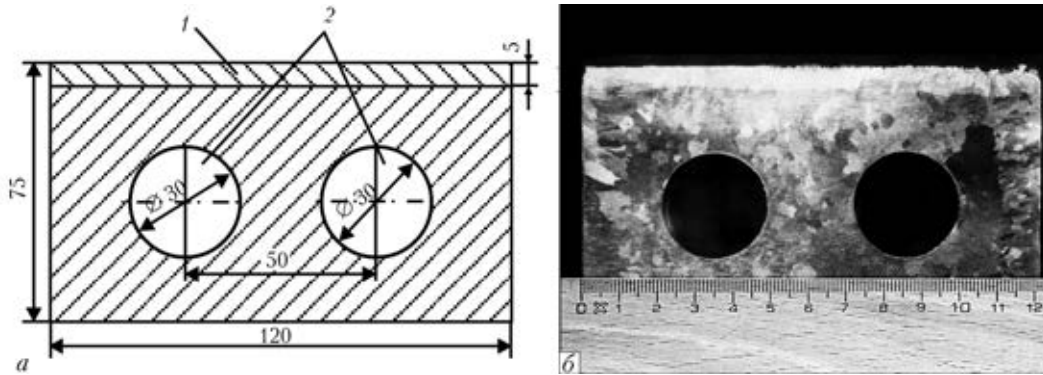


Рис. 10. Схема (а) и макрошлиф (б) поперечного сечения модели медного кристаллизатора МНЛЗ с упрочненным слоем: 1 – упрочненный слой; 2 – каналы охлаждения

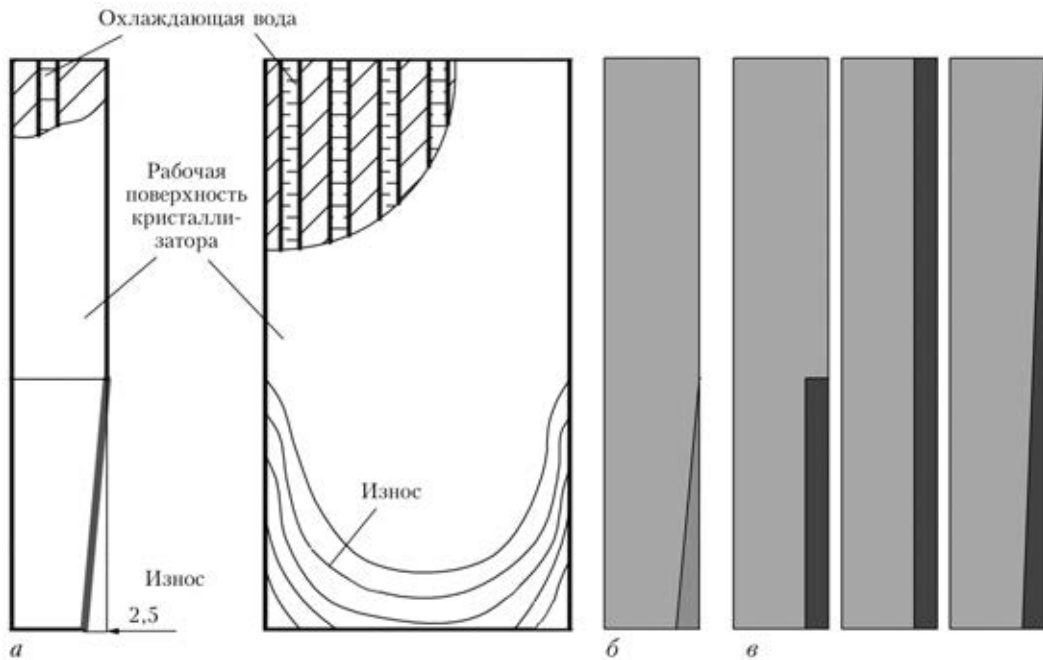


Рис. 11. Медная плита кристаллизатора МНЛЗ: а – износ медной плиты; б – восстановление изношенной поверхности плиты; в – упрочнение поверхностного слоя плиты

лизаторов МНЛЗ: CuNi, CuNiB, CuHf, CuZr, CuTi, CuAg, CuCr, CuCrZr (табл. 2).

Согласно разработанной технологии проведены эксперименты по упрочнению поверхностного слоя медного кристаллизатора МНЛЗ. Из полученных образцов изготовлены макрошлифы (рис. 10), где поверхностный слой сплошной, без дефектов. Толщина наплавленного слоя составила 5...10 мм в зависимости от технологических режимов.

Применение технологии ПДРП позволит сэкономить дорогостоящую медь (100 грн за 1 кг) в результате сокращения операции строжки и сохранить теплопроводность стенки кристаллизатора за счет частичного упрочнения. Данная технология даст возможность восстанавливать и упрочнять изношенную поверхность кристаллизатора без механической обработки поверхности (рис. 11).

### Выводы

1. Анализ литературных данных позволил выявить причины выхода кристаллизатора из строя (износ,

трещины и коробление рабочей поверхности). Показано, что причиной возникающих дефектов являются низкие значения механических характеристик материала кристаллизатора – чистой меди при рабочих температурах 300...400 °С.

2. Показано, что основными недостатками сплавов, применяемых для изготовления кристаллизаторов (CuAg, CuAgP, CuCr, CuZrCr, CuNiBe, CuZrNiBe, CuBeZrTi) являются низкие значения теплопроводности и износостойкости, а недостатками покрытий (Ni, Co-Ni, Ni-Cr, Fe-Ni) – плохая адгезия с медью при увеличении толщины покрытия свыше 1 мм.

3. Предложено использовать технологию ПДРП для восстановления и легирования поверхностного слоя медных плит кристаллизаторов МНЛЗ. Выбраны сплавы на основе меди с высокими значениями теплопроводности, температуры разупрочнения и стойкости для упрочнения поверхностного слоя медных плит кристаллизаторов МНЛЗ (CuNi, CuNiB, CuHf, CuZr, CuTi, CuAg, CuCr, CuCrZr), что позволяет повысить их эксплуатационные ха-





рактеристики и сэкономить медь при незначительном изменении теплофизических характеристик.

1. Смирнов А. Н., Ухин В. Е., Подкорытов А. Л. Исследование особенностей износа гильз кристаллизаторов высокоскоростных сортовых МНЛЗ // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Металлургия. — 2010. — Вып. 12. — С. 157–164.
2. Особенности разрушения покрытий гильз кристаллизаторов высокоскоростных сортовых МНЛЗ / И. В. Лейрих, А. Н. Смирнов, Е. Ю. Жибоедов, Е. Н. Любименко // Там же. — 2005. — С. 155–161.
3. Пат. 2174900 РФ, В23Р6/00, В22D11/04, В23К9/04 Способ ремонта кристаллизатора / М.-Э. Х. Исакаев. — Огубл. 20.10.2001, Бюл. № 1.
4. Лейрих И. В., Жибоедов Е. Ю. Влияние условий эксплуатации на разрушение гильз кристаллизаторов сортовых МНЛЗ // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Металлургия. — 2007. — Вып. 9. — С. 104–112.
5. <http://mlu.com.ua/pub/32-proizvodstvo-mednykh-stenok-kristalizatorov-dlya.html>.
6. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Л. В. Буланов, Л. Г. Корзунин, Е. П. Парфенов и др. — Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2003. — 320 с.
7. <http://uas.su/conferences/2010/50let/52/00052.php>.
8. Радюк А. Г., Горбатюк С. М., Герасимова А. А. Использование метода электродуговой металлизации для восстановления рабочих поверхностей узких стенок толстостенных слябовых кристаллизаторов // Металлургия. — 2011. — № 6. — С. 54–57.
9. Опыт внедрения передовых японских разработок непрерывной разливки стали в ОАО «ЕВРАЗ НТМК» / А. А. Вопнерук, Р. Ф. Исаков, А. Б. Котельников и др. // Сталь. — 2013. — № 9. — С. 37–41.
10. Осинцев О. Е., Федоров В. Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник. — М.: Машиностроение, 2004. — 336 с.
11. [http://k\\_svarka.com/content/vliianie-lieghiruiushchikh-eliementov-na-svoistva-miednykh-splavov-ispol-zuiemykh-dl](http://k_svarka.com/content/vliianie-lieghiruiushchikh-eliementov-na-svoistva-miednykh-splavov-ispol-zuiemykh-dl).
12. Li M., Zinkle S. J. Physical and mechanical properties of copper and copper alloys // Comprehensive Nuclear Materials. — 2012. — Vol. 4. — P. 667–690.
13. <http://www.metaprom-spb.com/ru/article10.html>.
14. Позин А. Е. Совершенствование конструкции узких стенок кристаллизаторов слябовых МНЛЗ на основе математического моделирования усадки непрерывно-литой заготовки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Магнитогорск, 2011. — 20 с.
15. Jeffrey K. Brower, Keith D. Rapp, Michael J. Power advanced alternative coatings for mold copper liners // Iron&SteelTechnology. — Pittsburgh, 2005. — P. 145–157.
16. [http://www.kme-osnastka.com/uploads/all/file/amt\\_russisch.pdf](http://www.kme-osnastka.com/uploads/all/file/amt_russisch.pdf).
17. Зайцев А. А. Совершенствование тепловой работы кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок с защитными покрытиями рабочих стенок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Череповец, 2005. — 22 с.
18. Ильичев М. В. Формирование структуры и свойств при плазменной наплавке износостойких покрытий на медь и высокоуглеродистую, марганцовистую стали: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2007. — 22 с.
19. [http://www.kv-spb.ru/production/bronze/lists.jaw?printable\\_version](http://www.kv-spb.ru/production/bronze/lists.jaw?printable_version).
20. [http://xn--m1adakd.xn--p1ai/press/photo.php?ELEMENT\\_ID=1567](http://xn--m1adakd.xn--p1ai/press/photo.php?ELEMENT_ID=1567).
21. Сидоров А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. — М.: Машиностроение; 1987. — 192 с.
22. [http://www.autowelding.ru/publ/professionalno\\_o\\_pajke/naplavka\\_sposoby\\_naplavki/termicheskie\\_sposoby\\_naplavki/31-1-0-480](http://www.autowelding.ru/publ/professionalno_o_pajke/naplavka_sposoby_naplavki/termicheskie_sposoby_naplavki/31-1-0-480).
23. Иноземец А. В., Власова А. М., Толмачев Т. П. Разработка альтернативной технологии получения слоистых композиционных материалов на основе металлов без взаимной растворимости. — Екатеринбург, 2012. — С. 12–13.
24. Технология восстановительного ремонта слябовых кристаллизаторов МНЛЗ способом наплавки трением с перемешиванием / Ю. Н. Никитюк, Г. М. Григоренко, В. И. Зеленин и др. // Современ. электрометаллургия. — 2013. — № 3. — С. 51–55.
25. Применение газотермических покрытий для ремонта толстостенных слябовых кристаллизаторов МНЛЗ / А. Г. Радюк, С. М. Горбатюк, А. А. Герасимова и др. // Металлургические процессы и оборудование. — 2012. — № 1. — С. 32–35.
26. <http://msd.com.ua/addition/krechmer/>.
27. <http://www.plasmacentre.ru/technology/7.php>.
28. Плазменно-дуговой переплав поверхностного слоя медных слитков // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1989. — № 4. — С. 88–93.

Mechanisms of initiation of defects, main types of fractures and causes of coming out of order of copper moulds of machines for continuous casting of billets (MCCB) were considered. Drawbacks and criteria of rejection of narrow and wide walls of the MCCB moulds were determined. Some methods were considered for improvement of fracture resistance of walls (metal hardening and application of wear-resistant coatings). The characteristic was given to material used for the mould walls. Studied are the alloying elements serving for hardening and increase in temperature of recrystallization of copper alloys at almost unchanged heat conductivity. Drawbacks of existing methods of hardening of copper plates of MCCB moulds were revealed. Analysis of alloys on copper base for manufacture of MCCB moulds was made. The most widely spread coatings are shown. The main drawbacks of used coatings are revealed. The main methods of restoration and hardening of surface layer of mould plates were considered. Technology of plasma-arc refining of surface for restoration and alloying of surface layer of copper plates of MCCB moulds was offered. 30 Ref., 2 Tables, 11 Figures.

**Key words:** MCCB mould; defects; wear; main types of fracture; methods of wear resistance increase; metal hardening; wear-resistant coatings; heat conductivity

Поступила 16.09.2014