

НАНЕСЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕДНЫЕ ПАНЕЛИ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ СПОСОБОМ АВТОВАКУУМНОЙ ПАЙКИ

М. А. ПОЛЕЩУК, М. Г. АТРОШЕНКО, А. В. ШЕВЦОВ, А. Л. ПУЗРИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проверена на моделях возможность нанесения защитного слоя в виде тонкого металлического листа на плоские медные панели кристаллизаторов МНЛЗ путем автовакуумной пайки. В качестве защитных листов использовали сталь 08X18N10 и никель. Исследован предел прочности биметаллических паяных соединений на отрыв между слоями, а также проведены испытания на изгиб. Получен качественный паяный шов без дефектов в виде пор и трещин между медной плитой и листом из стали 08X18N10 толщиной 2 мм. Предел прочности на отрыв стального защитного слоя составил в среднем 300 МПа. Полученные результаты позволяют рекомендовать способ автовакуумной пайки для нанесения защитных покрытий из стали 08X18N10 на плоские панели кристаллизаторов. Библиогр. 9, рис. 6.

Ключевые слова: кристаллизаторы МНЛЗ, защитные покрытия, автовакуумная пайка, паяные швы, металлография, механика

Основное количество выплавляемой в мире стали в настоящее время разливают в водоохлаждаемые медные кристаллизаторы, которые являются сменными узлами машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Внутренняя поверхность кристаллизаторов в процессе работы МНЛЗ испытывает абразивный износ из-за трения затвердевающей стальной корочки разливаемой заготовки о медную охлаждаемую стенку. Особенно интенсивное и неравномерное изнашивание наблюдается на стенках кристаллизаторов, предназначенных для выплавки заготовок прямоугольного или квадратного сечения на МНЛЗ радиального типа. Такие кристаллизаторы обычно изготавливают составными из отдельных плоских панелей с индивидуальным охлаждением. Рабочая поверхность некоторых из них может достигать одного квадратного метра. Срок службы такого кристаллизатора определяется допустимым износом рабочей поверхности и может достигать ста плавков [1].

Увеличить срок службы кристаллизаторов МНЛЗ можно двумя путями: восстановительным ремонтом изношенных панелей или нанесением на их рабочую поверхность защитного металлического либо металлокерамического покрытия, износостойкость которого выше, чем у меди.

Панели кристаллизаторов МНЛЗ по мере необходимости подвергают текущему ремонту. При этом с рабочих поверхностей охлаждаемых медных плит механической обработкой равномерно по всей плоскости удаляют слой меди, толщина которого больше глубины образовавшихся дефектов. За время эксплуатации панелей подобный ремонт повторяют несколько раз, пока толщина

медной плиты не уменьшится до предельно допустимых размеров. Такие медные плиты могут быть подвергнуты восстановительному ремонту, в ходе которого на их рабочую поверхность способами сварки плавлением либо сварки трением с перемешиванием наносят слой меди до достижения первоначальной толщины [2, 3].

В работе [4] показано, что для восстановительного ремонта медных плит панелей кристаллизаторов МНЛЗ эффективно использовать способ автономной вакуумной пайки (АВП). Этим способом относительно просто наносить восстановительный медный слой на рабочую поверхность медных плит большой площади без коробления и поводов последних, присущих другим способам. Паяный шов между слоями меди (основным и восстановительным) по прочности не уступает самой меди, а его термическое сопротивление практически не оказывает влияния на процесс теплопередачи через медную плиту [4].

В настоящей работе применили способ АВП для нанесения на толстые медные охлаждаемые плиты кристаллизаторов защитных покрытий из металлов, более износостойких, чем медь. Целью исследования являлась оценка принципиальной возможности получения такого типа паяного соединения и определение его механических свойств.

Исходя из представлений о механизме работы водоохлаждаемых кристаллизаторов МНЛЗ, сформулируем основные требования к свойствам защитных покрытий. Они должны быть плотными и износостойкими; иметь хорошую адгезию к меди по всей поверхности стенки; обладать минимальным термическим сопротивлением тепло-

вому потоку от расплавленной стали к охлаждающей воде.

В настоящее время защитные покрытия из никеля, хрома, сталей, или керамики наносят электролитическим [1, 5], детонационным [5, 6], взрывным [7] или другими способами. К сожалению, ни один из этих способов не обеспечивает получения защитного покрытия, свойства которого полностью отвечают всем указанным выше требованиям. Так, например, при электролитическом или детонационном способах невозможно получить плотное покрытие с хорошей адгезией к меди. Это может приводить к эрозионному разрушению покрытия и его скалыванию. При плакировании поверхности медной стенки кристаллизатора стальным листом способом сварки взрывом происходит захлопывание воздуха на отдельных участках соединения. Такие воздушные полости в этом месте существенным образом увеличивают термическое сопротивление тепловому потоку от расплавленного металла к охлаждающей воде через стенку, что недопустимо при работе кристаллизатора.

По нашему мнению, всем указанным выше требованиям к защитному покрытию стенки панели наиболее полно будет отвечать катанный тонкий лист из износостойкого металла, например определенных марок стали или никеля, припаянный по всей поверхности к медной плите. Такое покрытие может наноситься на панель кристаллизатора в процессе ее изготовления или при ремонте. Сложность задачи обусловлена необходимостью иметь качественный паяный шов по всей площади соединения толстой меди с тонким износостойким листом.

Для опытов в качестве защитного покрытия была выбрана сталь 08X18H10 и никель как коррозионностойкие материалы, имеющие большую, чем медь износостойкость. При этом сталь 08X18H10 имеет близкий к меди коэффициент теплового расширения. Этот фактор имеет значение для получения необходимой прочности и работоспособности паяного соединения. В случае применения в качестве защитного покрытия более дешевого листа из углеродистых сталей, в результате существенного различия в тепловом расширении таких сталей и меди, в паяном шве неизбежно возникновение напряжений, которые могут привести к его разрушению.

Разработка основ технологии АВП защитных покрытий проводилась экспериментально путем пайки опытных пакетов размером 100×100 мм по методике, описанной в работе [4]. Пакеты набирали из трех слоев: основной металл, имитирующий панель кристаллизатора, защитный слой и припой между ними. В качестве основного метал-

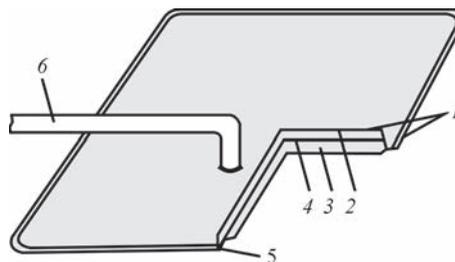


Рис. 1. Сборка для пайки: 1 — полуформы кассеты; 2 — защитное покрытие; 3 — основной металл, имитирующий панель кристаллизатора; 4 — припой; 5 — герметизирующий сварной шов; 6 — патрубок для вакуумирования

ла использовали медь марки М-1 толщиной 7 мм, а защитные слои изготавливали из нержавеющей стали 08X18H10 толщиной 2 мм, и листового никеля толщиной 4 мм. Припоем служила фольга бериллиевой бронзы БрБ2, хорошо зарекомендовавшая себя при пайке многослойных медных пакетов. Фольга толщиной 0,2 мм, укладывалась в два слоя.

Предварительно собранные для пайки пакеты устанавливали в специальные кассеты, создающие замкнутый объем. Кассеты состояли из двух одинаковых штампованных частей. Материалом для изготовления кассет служил лист из стали 08X18H9 толщиной 1 мм, который при температуре пайки обеспечивал сжатие пакета атмосферным давлением равномерно по всей поверхности. Заполненные кассеты заваривали по периметру аргонодуговой сваркой вакуумплотным швом.

Для вакуумирования в кассету вваривали патрубок. Общий вид кассеты представлен на рис. 1.

Подготовленные кассеты размещались горизонтально на столе в термической печи, патрубок-вакуумпровод выводился наружу через отверстие в дверце, к нему подключали мановакуумметр и через вентиль форвакуумный насос. Перед пайкой внутри кассеты создавали разрежение 10^{-1} , а затем перекрывали вентиль. Термическую печь нагревали до температуры пайки 1040 °С с изотермической выдержкой 30 мин. Кассеты охлаждались вместе с печью.

После проведения пайки, кассеты разрезали, и из извлеченных пакетов изготавливали образцы для исследований.

В первую очередь для оценки качества паяного соединения провели испытания образцов на изгиб. Испытывали образцы размером 80×10 мм, вырезанные по всей толщине паяного соединения, образцы загибали на угол 90° защитным слоем вовнутрь и наружу (рис. 2).

На образцах медь–сталь 08X18H10 ни в первом, ни во втором случае в зоне соединения расслоений, трещин и надрывов не обнаружено. Результаты испытаний свидетельствуют о хорошем качестве паяного соединения медь–сталь

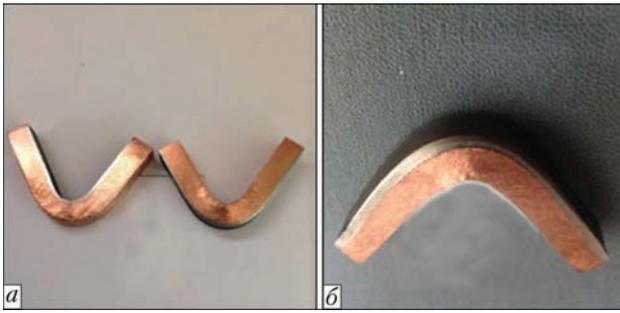


Рис. 2. Образцы после испытания на изгиб: *а* — медь–сталь (слева — защитным слоем вовнутрь, справа — наружу); *б* — медь–никель

08X18H10, полученного с применением припоя БрБ2.

После испытания образца медь–никель защитным слоем наружу (рис. 2, *б*) имело место расслоение в зоне изгиба. В связи с неудовлетворительным результатом этого испытания изгиб образца защитным слоем вовнутрь не проводился.

Испытания паяных биметаллических образцов на отрыв проводились по методике и на образцах, описанных в работе [4]. Эта методика не является стандартной и в нормативных документах отсутствуют значения величин, определяющих минимально допустимый предел прочности на отрыв для биметаллов или слоистых монометаллов на основе меди. Вместе с тем этот показатель является важным и определяет качество паяного соединения и работоспособность всего изделия. Поэтому полученные при испытаниях значения величин предела прочности на отрыв биметаллов сравнивались с пределом прочности на разрыв цельных медных монокристаллических образцов таких же размеров, изготовленных из медного листа, аналогичного основному металлу до пайки. Предел прочности на разрыв монокристаллических образцов составил 450 МПа, биметалла медь–сталь 08X18H10 — 301,5 МПа, биметалла медь–никель — 108 МПа. Все эти данные являются усредненными по результатам испытания трех образцов каждого типа.

По нашему мнению, прочность соединения биметалла медь–сталь 08X18H10, полученного с



Рис. 3. Микроструктура ($\times 500$) паяного соединения медь–сталь 08X18H10 (нетравленое состояние)

помощью припоя БрБ2, является достаточно высокой, чтобы обеспечить работоспособность биметаллического изделия. Для выяснения причин неудовлетворительных результатов механических испытаний паяного соединения медь–никель проведен сравнительный металлографический анализ образцов медь–никель и медь–сталь 08X18H10. Для этого на микроскопе НЕОФОТ 32 изучали нетравленные и травленные шлифованные образцы при различных увеличениях. Травление образцов проводили в два этапа. На первом этапе для выявления структуры меди образец травил в водном растворе серной кислоты, хромового ангидрида и поваренной соли. На втором этапе для выявления структуры нержавеющей стали и никеля проводили электрохимическое травление в хромовом ангидриде.

На нетравленном шлифе медь–сталь 08X18H10 ($\times 500$) четко выраженного паяного шва не наблюдается (рис. 3). По всей длине шлифа видна зона контакта припоя и нержавеющей стали с размером выступов и впадин 2...15 мкм. В зоне контакта отсутствуют дефекты в виде пор и трещин. Все это свидетельствует о хорошем качестве паяного соединения по всей длине исследуемого шлифа.

Ширина диффузионной зоны на стали 08X18H10 составляет 10...50 мкм.

После травления наблюдается четко выраженный паяный шов шириной 60...80 мкм (рис. 4). Он имеет более мелкое зерно, чем основная медь.



Рис. 4. Микроструктура паяного соединения медь–сталь 08X18H10 после травления при разном увеличении: *а* — $\times 100$; *б* — $\times 1000$

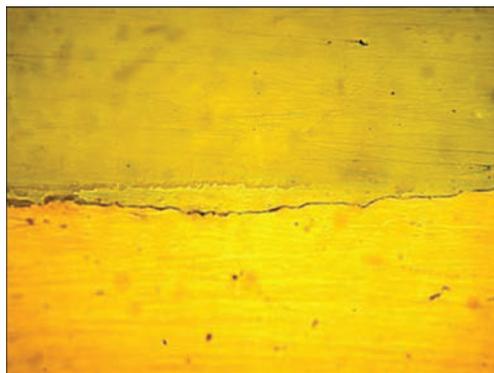


Рис. 5. Микроструктура ($\times 500$) паяного соединения медь–никель (нетравленое состояние)

Измерение микротвердости в зоне паяного шва показало, что ее величина составляет 990...1480 МПа, а основного металла меди 602...713 МПа.

После травления стали 08X18H10 видно, что размер ее зерен уменьшается к границе с паяным швом от 40 (в основной части защитного покрытия) до 5...12 мкм. Микротвердость стали 08X18H10 у границы составляет 2480...2540 МПа, а остальной части — 2200...2280 МПа. Ширина шва составляет 60...80 мкм, диффузионная зона со стороны стали 08X18H10 составляет 10...50 мкм, таким образом, общая ширина переходной зоны этого паяного соединения находится в пределах 70...130 мкм.

При исследовании биметаллического соединения медь–никель на нетравленном шлифе при увеличении 500 поры и трещины не наблюдались. В зоне контакта никель — БрБ2 произошло взаимное растворение металлов (никеля и меди) с образованием области твердого раствора шириной 5...15 мкм (рис. 5).

На границе никеля со швом видна разрушившаяся, но не растворившаяся оксидная пленка никеля в виде прослоек, включений. После травления меди наблюдается паяный шов (БрБ2) шириной от 25 до 50 мкм (рис. 6). Микротвердость шва составляет 89 ± 20 МПа.

После электролитического травления в слое никеля наблюдаются зерна размером 100×80 мкм

с микротвердостью 1390 ± 200 МПа. Участок никеля, прилегающий к паяному шву, имеет зону перекристаллизации шириной до 25 мкм и размером зерна 7...15 мкм. Микротвердость этой зоны 2290 ± 150 МПа, что в 1,6 раза выше твердости никеля (рис. 6, б). Такое увеличение микротвердости связано с измельчением зерна в этой области.

Ширина паяного шва составляет 25...50 мкм, зона перекристаллизации со стороны никеля примерно 25 мкм. Таким образом, общая ширина переходной зоны этого паяного соединения находится в пределах 25...75 мкм. Более низкие показатели прочности на отрыв в образцах с покрытием из никеля по сравнению с образцами, покрытыми сталью 08X18H10, можно объяснить наличием на поверхности никеля и в шве частиц нерастворившейся оксидной пленки.

Оценивая в целом результаты приведенных выше экспериментальных исследований, можно констатировать, что качественное соединение медной пластины с защитным слоем способом АВП пока получено только для тонкого листа из стали 08X18H10. В этом соединении отсутствуют поры, трещины и надрывы, а предел прочности на отрыв листа стали 08X18H10 от меди в среднем достигает величины 300 МПа. Такое значение прочности практически в два раза превышает требования ГОСТа 10885–85, в котором регламентируются прочностные характеристики стальных биметаллов [8].

Кристаллизаторы МНЛЗ во время работы являются одними из наиболее теплонагруженных промышленных агрегатов, охлаждаемых водой. Величина удельного теплового потока, передаваемого от расплавленной стали к воде, в верхней части кристаллизатора в районе мениска жидкого металла может достигать $1,8$ МВт/м². По мере удаления от зеркала металла эта величина уменьшается и в нижней части кристаллизатора не превышает $0,46$ МВт/м².

Такое изменение величины удельного теплового потока обусловлено возникновением на его пути ниже жидкометаллического мениска дополнительного термического сопротивления, которое

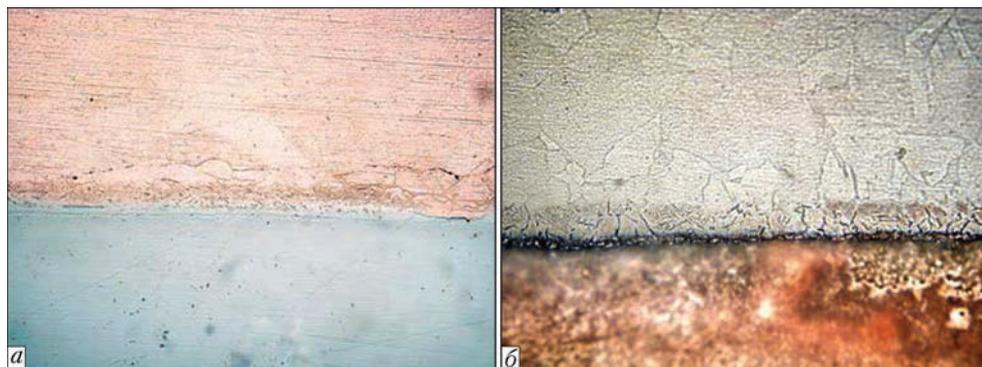


Рис. 6. Микроструктура паяного соединения медь–никель после травления: а — $\times 1000$; б — $\times 200$

образует затвердевающая корочка будущей заготовки. Кроме того, между этой корочкой и стенкой кристаллизатора возникает газовый зазор. Толщина этой корочки непрерывно возрастает и на выходе из кристаллизатора составляет 15...18 мм [9].

Защитное покрытие, наносимое на медную стенку в виде тонкого металлического листа, и паяный шов также являются дополнительным термическим сопротивлением на пути теплового потока. Однако защитный слой, наносимый на медную стенку кристаллизатора, оказывает влияние на процесс теплопередачи только в верхней части кристаллизатора в районе жидко-металлического мениска там, где практически отсутствует сплошная затвердевшая корочка будущей заготовки. Расчеты показывают, что защитное покрытие из стали 08X18H10Т толщиной 1 мм снижает удельный тепловой поток в районе мениска не более, чем на семь процентов [9]. Так как площадь этой зоны значительно меньше площади стенок всего кристаллизатора, можно считать, что защитное покрытие, наносимое на медную стенку кристаллизатора способом АВП, практически не оказывает влияния на процесс теплопередачи всего агрегата.

Выводы

1. Экспериментально доказано, что способ АВП может быть применен для получения качественного соединения толстых медных плит с тонким листом стали 08X18H10.

2. Бездефектные паяные швы биметалла медь-сталь 08X18H10 с высокими механическими характеристиками получены с помощью фольги бронзы БрБ2, использованной в качестве припоя.

3. Способ АВП позволил получить предел прочности на отрыв тонкого листа стали

08X18H10 от медной плиты величиной 300 МПа, что выше требований ГОСТа для коррозионно-стойких стальных биметаллов.

4. Полученные результаты позволяют рекомендовать пайку в автономном вакууме для нанесения защитных покрытий на рабочие поверхности панелей кристаллизаторов МНЛЗ.

5. Защитное покрытие, наносимое способом АВП на медные стенки кристаллизатора, практически не оказывает влияния на процесс теплопередачи во всем агрегате.

1. Маркушин А. А. Радиальный слябовый кристаллизатор со щелевыми каналами и никелевым покрытием стенок / А. А. Маркушин, А. В. Куклев, М. Ю. Айзин. – М.: Металлургияизд, 2005. – 41 с.
2. Абрамович В. Р. Сварка плавлением меди и сплавов на медной основе / В. Р. Абрамович. – М.: Машиностроение, 1988. – 356 с.
3. Технология восстановительного ремонта слябовых кристаллизаторов МНЛЗ способом наплавки трением с перемешиванием / Ю. Н. Никитюк, Г. М. Григоренко, В. И. Зеленин [и др.] // Современная электрометаллургия. – 2013. – № 3. – С. 51–55.
4. Автовакуумная пайка как новый способ ремонта медных панелей кристаллизаторов МНЛЗ / Г. М. Григоренко, А. Л. Пузрин, М. Г. Атрошенко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 9. – С. 48–53.
5. Масато Т. Кристаллизаторы установок непрерывной разливки стали от «Mashima kosan» / Т. Масато // Международный научно-практический семинар: Электроплакирование и термическое напыление. – Екатеринбург, 2009. – С. 20–24.
6. Коробов Ю. С. Повышение ресурсности металлургического оборудования с применением газотермического напыления / Ю. С. Коробов // Международный научно-практический семинар: Электроплакирование и термическое напыление. – Екатеринбург, 2009. – С. 56–71.
7. Кудинов В. М. Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев; под ред. Э. С. Каракозова. – М.: Металлургия, 1978. – 168 с.
8. Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая(ОКП 09 950): ГОСТ 10885–85 [введен 01.07.86]: Минчермет СССР, 1986. – (Государственный комитет СССР по стандартизации).
9. Евтеев Д. П. Непрерывное литье стали / Д. П. Евтеев, И. Н. Колыбалов. – М.: Металлургия, 1984. – 197 с.

Поступила в редакцию 19.04.2016



VIII Международная конференция «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»

11–15 сентября 2017 г., Одесса, отель «Курортный»
www.pwi-scientists.com/rus/ltwmp2017

Архив трудов конференции: www.patonpublishinghouse.com/eng/proceedings/ltwmp