



## АВТОВАКУУМНАЯ ПАЙКА ПРИ РЕМОНТЕ МЕДНЫХ ПАНЕЛЕЙ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ

Г.М. ГРИГОРЕНКО, А.Л. ПУЗРИН, М.Г. АТРОШЕНКО, М.А. ПОЛЕЩУК,  
А.В. ШЕВЦОВ, И.А. МОССОКОВСКАЯ

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проверена на моделях возможность ремонта изношенных плоских панелей кристаллизаторов МНЛЗ путем автовакуумной пайки восстановительного медного слоя. Получен паяный шов между двумя медными пластинами без дефектов в виде пор и трещин. Исследован предел прочности медного паяного соединения на отрыв между слоями, а также проведены испытания на изгиб. Проведена оценка термического сопротивления паяного шва. Полученные результаты позволяют рекомендовать способ автовакуумной пайки для ремонта плоских панелей кристаллизаторов. Библиогр. 12, рис. 6.

*Ключевые слова:* кристаллизаторы МНЛЗ, восстановительный ремонт, автовакуумная пайка, паяные швы, металлография, механические свойства, термическое сопротивление

В настоящее время основное количество выплавляемой стали разливают на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Расплавленную сталь заливают в специальные устройства — водоохлаждаемые кристаллизаторы, внутренняя полость которых имеет сечение, соответствующее сечению будущей заготовки. Стенки кристаллизаторов, обращенные внутрь, изготавливают из меди. Благодаря интенсивному отводу тепла охлаждающей водой происходит затвердевание жидкого металла на внутренней стенке кристаллизатора. При этом по всему периметру его полости формируется стальная корочка, образующая наружную поверхность выплавляемой заготовки. В процессе вытягивания заготовки происходит перемещение твердой стальной корочки вдоль медной стенки кристаллизатора, что приводит к неравномерному истиранию последней и образованию на ней различных протяженных дефектов [1].

Особенно интенсивно эти дефекты образуются при выплавке заготовок прямоугольного сечения на МНЛЗ радиального типа. Кристаллизаторы для выплавки таких заготовок собирают из отдельных плоских панелей с рабочей стенкой из меди, легированной малым количеством серебра или хрома. Площадь некоторых из них может достигать одного квадратного метра [2].

Для ликвидации дефектов медные стенки панелей кристаллизаторов необходимо подвергать периодической механической обработке. Утонение стенок после многократных обработок вызывает опасность вскрытия каналов водяного охлаждения и выхода из строя всего кристаллизатора. Поэтому задача восстановления первоначальных размеров медных стенок плоских панелей является актуальной.

Электродуговая наплавка изношенных медных стенок с последующей механической обработкой не позволяет решить данную проблему, поскольку при локальном нагреве больших медных плит, обладающих высокой теплопроводностью, происходит недопустимое их коробление, неподдающееся исправлению [3].

Разработан способ нанесения восстановительного слоя меди на медные плиты методом сварки трением с перемешиванием [4]. Этот способ достаточно эффективен при ремонте отдельных участков медных стенок кристаллизаторов, но применение его на поверхностях большой площади также требует дополнительных мероприятий для снижения коробления ремонтируемых плит.

Избежать коробления стенок кристаллизаторов при восстановительном ремонте можно путем припайки к ним по всей поверхности медного листа необходимой толщины. В этом случае нагрев и охлаждение изделия проходит равномерно по всему объему не вызывая его деформации.

Для обеспечения эффективной работы кристаллизатора МНЛЗ с отремонтированными медными стенками необходимо в процессе пайки минимизировать дополнительное тепловое сопротивление, которое вносит слой припоя в коэффициент теплопередачи от расплавленной стали к охлаждающей воде через многослойную стенку. Этот коэффициент будет минимальным при соблюдении следующих условий: по всей поверхности соединяемых медных листов необходимо иметь бездефектный слой припоя минимальной толщины; коэффициент теплопроводности припоя должен быть близок к соответствующему коэффициенту меди.

Из всех известных видов пайки самое качественное соединение поверхностей большой пло-

щадя получается способом автономной вакуумной пайки (АВП). Технология АВП основана на самопроизвольной очистке от оксидных пленок металлических поверхностей, образующих герметичный зазор, и последующее заполнение его расплавленным припоем при нагреве изделия для пайки. Этот процесс происходит благодаря диффузии кислорода из герметичного зазора через оксидную пленку вглубь горячего металла. При этом в зазоре образуется автономный вакуум. Разрушение оксидных пленок в герметичном зазоре начинается после достижения вакуума определенной степени. Время очистки металлических поверхностей от оксидных пленок может быть значительно сокращено путем вакуумирования герметичного зазора перед нагревом [5].

Этим способом в промышленности в условиях завода «Азовмаш» успешно изготавливают стальные биметаллические заготовки площадью до 4 м<sup>2</sup> [6]. Однако в литературе отсутствуют сведения о применении АВП для соединения между собой медных листов.

Цель настоящей работы состояла в экспериментальной проверке возможности получения методом АВП качественного соединения медных листов и применения этого способа для восстановления размеров медных стенок кристаллизаторов МНЛЗ.

Для обеспечения качества пайки на любом участке соединения плоских изделий большой площади целесообразно использовать схему АВП с горизонтальным расположением паяемого изделия. При этом припой в виде фольги необходимо заранее разместить между медными листами по всей площади контакта. Опытные работы проводились пайкой пакетов размером 80×80 мм.

Подготовленные к пайке пакеты устанавливали в специальные кассеты, создающие замкну-

тый объем (рис. 1). Материалом для изготовления кассет служил тонкий стальной лист, который при температуре пайки обеспечивал сжатие пакета атмосферным давлением равномерно по всей поверхности. Пакеты набирали из трех слоев: основной металл, имитирующий стенку кристаллизатора, восстановительный слой и припой между ними. В качестве основного металла использовали медь марки М-1 толщиной 7 мм, а восстановительный слой из меди той же марки имел толщину 2 мм. Припоем служила фольга толщиной 0,2 мм, укладываемая в два слоя.

Заполненные кассеты заваривали по периметру аргонодуговой сваркой вакуумноплотным швом. Для вакуумирования в кассету вваривали патрубок. Подготовленные кассеты размещались на столе в муфельной печи, патрубок выводился наружу, к нему подключали форвакуумный насос, оборудованный мановакуумметром.

Перед пайкой внутри кассеты создавали разрежение  $5 \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст. и перекрывали вентиль. Печь нагревали до необходимой температуры пайки с изотермической выдержкой 30 минут. Кассеты охлаждались вместе с печью. Во время всего процесса пайки разрежение внутри кассеты контролировали мановакуумметром. Паяные пакеты разрезали на образцы для проведения металлографических исследований и механических испытаний.

Для выбора оптимального химического состава припоя, с учетом его температуры плавления и коэффициента теплопроводности, опыты проводились с использованием фольги двух различных марок: латуни Л63 (температура пайки 950...960 °С), часто применяемой для пайки меди, и бериллиевой бронзы БрБ2 (температура пайки 1030...1040 °С), имеющей коэффициент теплопроводности близкий к таковому у меди.

При металлографических исследованиях нетравленных паяных соединений на образце с припоем из латуни Л63 по всей длине паяного шва [7] наблюдаются продолговатые поры длиной от 100 до 330 и шириной от 20 до 50 мкм, расположенные близко к середине шва. Между некоторыми порами имеются трещины (рис. 2, а). Образование пор в паяном соединении с использованием припоя из латуни Л63 объясняется испарением цинка во время пайки [8]. Испарение цинка подтверждается увеличением показаний мановакуумметра при повышении температуры печи выше 500 °С. В то же время на нетравленном шлифе с припоем БрБ2 (рис. 2, б) место соединения основного металла и восстановительного слоя практически не заметно, поры и трещины отсутствуют.

На рис. 2 показаны структуры паяных соединений, выявленные травлением в 50%-ом растворе

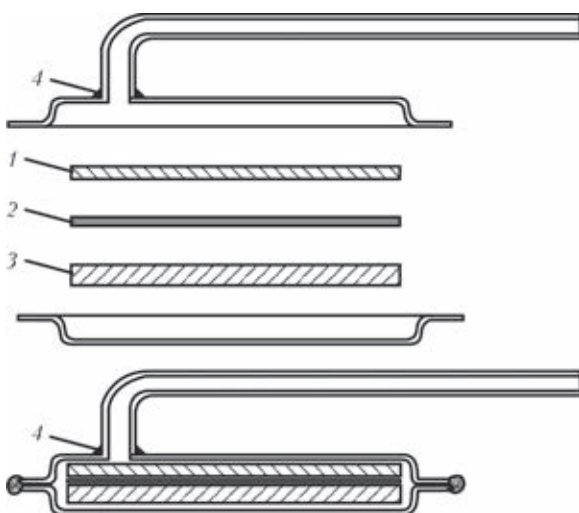


Рис. 1. Сборка кассеты для АВП образцов: 1 — восстановительный слой; 2 — припой; 3 — основной металл; 4 — технологические сварные швы

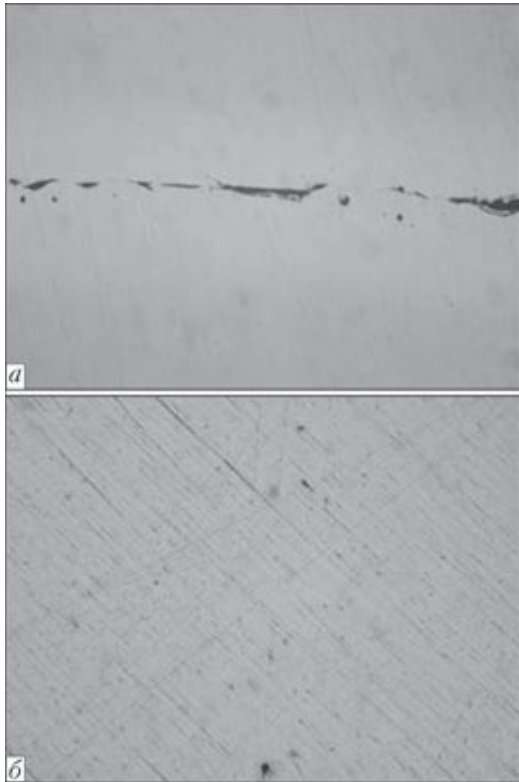


Рис. 2. Структура нетравленных образцов после АВП меди  $\times 200$ : а — припой Л63; б — припой БрБ2

азотной кислоты. На образце с припоем Л63 (рис. 3, а) имеются общие зерна шва с основным металлом и восстановительным слоем. Толщина слоя припоя составляет примерно 250 мкм, микротвердость 740...800 МПа. На образце, паяном припо-

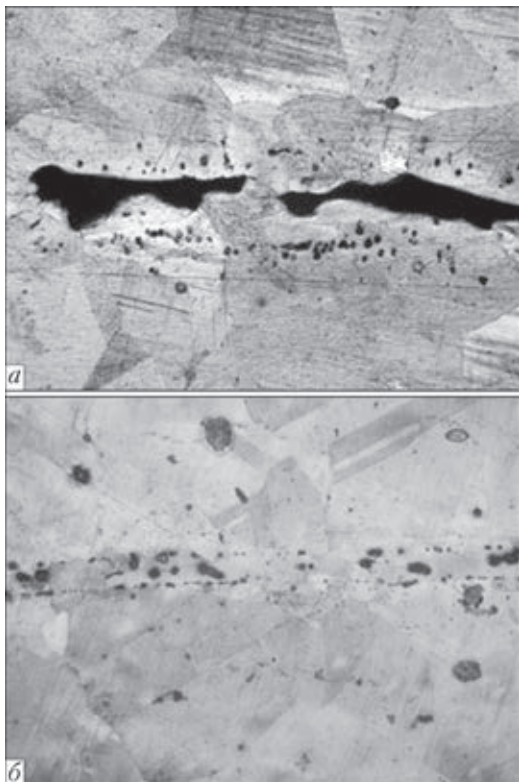


Рис. 3. Структуры соединений меди, полученных методом АВП  $\times 200$ : а — припой Л63; б — припой БрБ2

ем БрБ2 (рис. 3, б), наблюдали слой припоя толщиной 90 мкм, имеющий на отдельных участках общие зерна с основным металлом. С обеих сторон шва, а также в самом шве наблюдаются неметаллические включения округлой формы размерами 5...60 мкм. Микротвердость слоя припоя составляет 1080 МПа, а основного металла и восстановительного слоя 740 МПа. Плавное изменение микротвердости наблюдается на расстоянии до 350 мкм по обе стороны шва. Такое изменение микротвердости можно объяснить диффузией бериллия из припоя вглубь меди. Основной металл и восстановительный слой всех образцов имеют структуру характерную для отожженной меди.

Полученные при металлографических исследованиях сведения о структуре и размерах слоя припоя и диффузионных зон можно использовать для определения их термического сопротивления и оценить его вклад в коэффициент теплопередачи от расплавленного металла к охлаждающей воде через многослойную стенку кристаллизатора. Термическое сопротивление такой стенки  $R_{\Sigma}$  состоит из суммы сопротивлений входящих в нее слоев, каждое из которых определяется частным от деления толщины слоя  $d$  (м) на коэффициент теплопроводности его материала  $\lambda$  (Вт/(м $\cdot$ °С)). Применительно к медной стенке кристаллизатора, восстановленной пайкой, величина термического сопротивления определяется следующим выражением:

$$R_{\Sigma} = R_{\text{м}} + R_{\text{ш}} + R_3 = d_{\text{м}}/\lambda_{\text{м}} + d_{\text{ш}}/\lambda_{\text{ш}} + d_3/\lambda_3 \text{ (}^{\circ}\text{С}\cdot\text{м}^2/\text{Вт)},$$

где  $R_{\text{м}}$ ,  $R_{\text{ш}}$ ,  $R_3$  — соответственно суммарное термическое сопротивление всех слоев;  $\lambda_{\text{м}} = 393$  Вт/(м $\cdot$ °С); коэффициент теплопроводности слоя припоя равен для Л63  $\lambda = 105$ , для БрБ2  $\lambda = 352$  Вт/(м $\cdot$ °С);  $R_3$  — суммарное термическое сопротивление диффузионных зон, коэффициент теплопроводности которых может быть принят средним между такими меди и припоя [9].

Коэффициенты теплопроводности материалов, использованных нами в качестве припоев, являются величинами одного порядка с коэффициентом теплопроводности меди. В то же время толщины слоя припоя и диффузионных зон, измеряемые в десятках или сотнях микрон, на два-три порядка меньше суммарной толщины медных слоев, измеряемых в десятках миллиметров. Таким образом, термические сопротивления прослойки припоя и диффузионных зон будут на те же два-три порядка меньше, чем сопротивление медных слоев. Поэтому при расчете термического сопротивления восстановленной медной стенки кристаллизатора можно не учитывать дополнительное сопротивление, создаваемое бездефектным паяным соединением, полученным методом АВП.

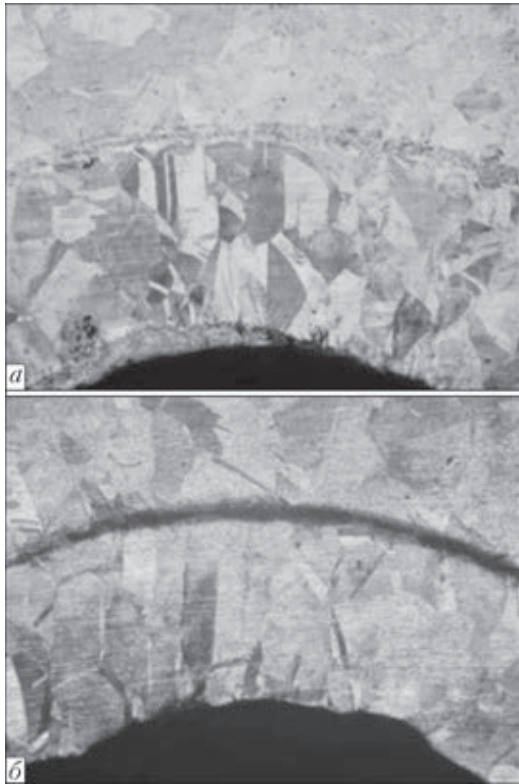


Рис. 4. Микрошлифы местгиба паяных образцов  $\times 25$ : а — припой Л63; б — припой БрБ2

В то же время дефекты в прослойке припоя в виде пор, трещин и особенно непропаев, могут создавать определенные помехи тепловому потоку через многослойную стенку. При концентрации подобных дефектов на локальном участке паяного соединения может произойти заметное снижение теплоотвода от восстановительного слоя и, как следствие, повышение его температуры в этом месте. При определенной величине теплового потока от расплавленного металла к многослойной стенке кристаллизатора рост температуры восстановительного слоя может привести к его деформации в этом месте и даже отрыву от основного металла. Таким образом, при восстановительном ремонте медных стенок кристаллизаторов необходимо технологически обеспечивать бездефектную пайку.

В процессе работы кристаллизатора с отремонтированными методом АВП медными стенками паяный шов, соединяющий основной металл и восстановительный слой, должен иметь прочность, предотвращающую отслоение последнего при воздействии усилий сдвига и изгиба. Кроме того, для уменьшения истирания поверхность восстановительного слоя должна иметь твердость близкую к твердости медной поверхности до ремонта. Образцы испытывали на отрыв восстановительного слоя и изгиб паяного соединения, а также измеряли микротвердость поверхности восстановительного слоя после пайки.

Для испытания на изгиб по всей толщине паяного соединения вырезали специальные образцы размером  $80 \times 10$  мм, которые загибали на угол  $90^\circ$  восстановительным слоем вовнутрь. Отслоений восстановительного слоя от основного металла на образцах с использованием припоев Л63 и БрБ2 не обнаружено (рис. 4).

Механические свойства полученных паяных соединений оценивали по пределу прочности на отрыв между слоями. Подобные испытания не регламентированы ГОСТами, поэтому их проводили по схеме, представленной на рис. 5, а, на образцах, размеры которых указаны на рис. 5, б [10].

Для проверки и сравнения результатов, полученных по указанной схеме, были испытаны монолитные образцы таких же размеров, изготовленные из того же листа меди, который был использован для пайки. Предел прочности на разрыв монолитного образца составил 450 МПа, что соответствует пределу прочности при растяжении деформированной меди М1 [11]. Таким образом, принятую нами схему испытаний можно считать приемлемой.

Среднее значение предела прочности на отрыв образцов паяных латунью Л63 составило 240 МПа, а образцов паяных бронзой БрБ2 — 530 МПа. Более низкое значение предела прочности на отрыв образцов паяных латунью Л63 по сравнению с монолитными образцами объясняются наличием пор в паяном шве. В то же вре-

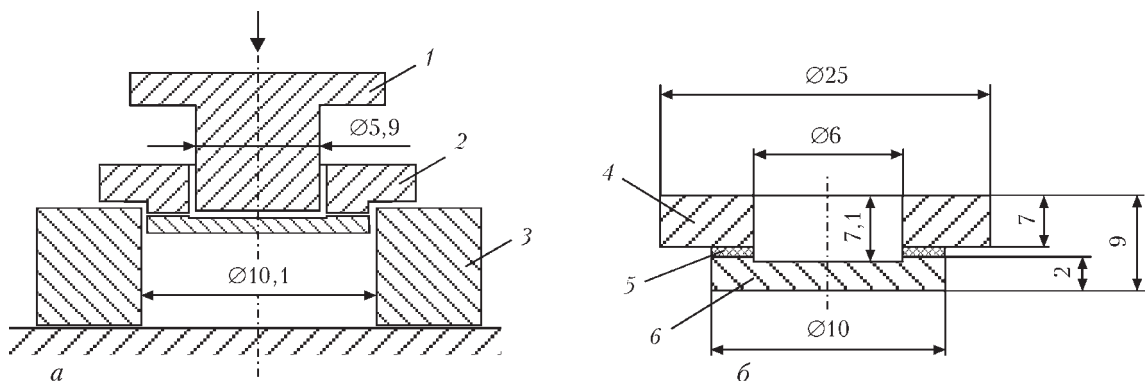


Рис. 5. Схема испытаний (а) образца паяного соединения (б) на отрыв: 1 — пуансон; 2 — образец; 3 — матрица; 4 — основной металл; 5 — паяный шов; 6 — восстановительный слой

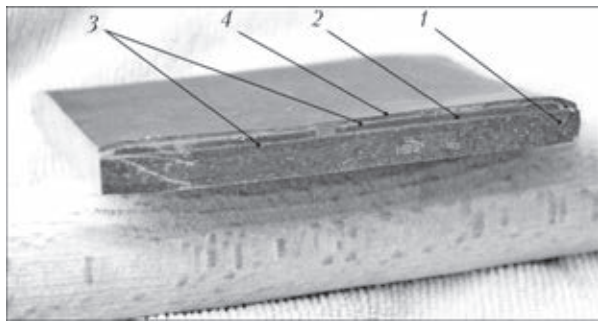


Рис. 6. Многослойное соединение, полученное за один нагрев методом АВП: 1 — основной слой; 2 — восстановительный слой; 3 — паяные швы; 4 — износостойкое покрытие

мя более высокие значения предела прочности на отрыв, полученные при пайке меди бронзой БрБ2 могут быть объяснены отсутствием дефектов в паяном соединении, имеющем общие зерна с медью, а также наличием в меди диффузионной зоны, упрочненной бериллием.

Анализируя результаты металлографических исследований, механических испытаний и оценивания величин термической прослойки припоев можно рекомендовать для восстановительного ремонта методом АВП плоских панелей кристаллизаторов МНЛЗ припой из бериллиевой бронзы БрБ2 в виде фольги.

В связи с изменением структуры меди при нагреве для пайки определяли твердость основного металла и восстановительного слоя до и после АВП. Первоначальные значения твердости меди находились в пределах 579...606 МПа, что соответствует твердости деформированной и отожженной меди [11]. После АВП твердость меди снизилась незначительно до 530...550 МПа.

Стойкость кристаллизаторов МНЛЗ, состоящих из плоских медных панелей, зачастую не превышает 100 плавок [2], а стойкость кристаллизаторов с защитным покрытием — тонким слоем из материала, имеющего более высокую твердость, увеличивается в 10 раз [12]. В связи с этим желательно нанесение защитного покрытия на поверхность меди, обращенной внутрь кристаллизатора. Таким покрытием может служить тонкий нержавеющий лист, припаянный к восстановительному слою меди. Предварительный опыт (рис. 6) показывает возможность получения за один нагрев такого многослойного паяного соединения, включающего восстановительный слой из меди и

износостойкое покрытие из тонкого нержавеющей листа.

### Выводы

Экспериментально показано, что метод АВП может быть применен для получения качественного соединения медных листов большой площади по плоскости и имеет перспективу при ремонте панелей кристаллизаторов МНЛЗ. Бездефектные паяные соединения с высокими механическими характеристиками получены путем АВП с использованием в качестве припоя фольги бронзы БрБ2. В связи с малой толщиной прослойки и высокой теплопроводностью припоя, при тепловом расчете кристаллизатора его термическим сопротивлением можно пренебречь. Экспериментально показана возможность нанесения защитного покрытия одновременно с нанесением восстановительного слоя при ремонте кристаллизатора.

1. Евтеев Д.П., Колыбалов И.Н. Непрерывное литье стали. — М.: Металлургия, 1984. — 198 с.
2. Радиальный слябовый кристаллизатор со щелевыми каналами и никелевым покрытием стенок / А.А. Маркушин, А.В. Куклев, Ю.М. Айзин и др. // М.: Металлург, 2005. — С. 38–41.
3. Абрамович В.Р. Сварка плавлением меди и сплавов на медной основе. — М.: Машиностроение, 1988. — 121 с.
4. Технология восстановительного ремонта слябовых кристаллизаторов МНЛЗ способом наплавки трением с перемешиванием / Ю.Н. Никитюк, Г.М. Григоренко, В.И. Зеленый и др. // Современ. электрометаллургия. — 2013. — № 3. — С. 51–55.
5. Пузрин Л.Г., Бойко Г.А., Атрошенко М.Г. Автовакуумная высокотемпературная пайка. — Киев: Об-во «Знание» УССР, 1975. — С. 18.
6. Автовакуумная пайка особо толстостенных сосудов мас-сой до ста тонн / Л.Г. Пузрин, М.Г. Атрошенко, И.Г. Пещерин и др. // Проблемы сварки и специальной электрометаллургии. — Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1984. — С. 76–77.
7. ГОСТ 17325–79. Пайка и лужение. Основные термины.
8. Справочник по пайке / Под ред. С.Н. Лоцманова, И.Е. Петрунина, В.П. Фролова. — М.: Машиностроение, 1975. — 407 с.
9. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. — М.: Атомиздат, 1979. — С. 212.
10. Мардян М.Г., Рябчиков Е.А., Эпштейн Г.Н. Методика определения прочности сцепления слоев биметалла // Заводская лаборатория. — 1979. — № 8. — С. 757–759.
11. Келоглу Ю.П., Захаревич К.М., Карташевская М.А. Металлы и сплавы. Справочник. — Кишинев, 1977. — 264 с.
12. Масато Т. Кристаллизаторы установок непрерывной разливки стали от «Mashima Kosan» // Междунар. науч.-практ. семинар: Электроплакирование и термическое напыление. — Екатеринбург, 2009. — С. 1–19.

Поступила в редакцию 16.04.2015