

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ДЛЯ РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ МЕДНЫХ ПЛИТ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ

Г.М. ГРИГОРЕНКО¹, Л.И. АДЕЕВА¹, А.Ю. ТУНИК¹, М.А. ПОЛЕЩУК¹, Е.В. ЗЕЛЕНИН¹, В.И. ЗЕЛЕНИН¹, Ю.Н. НИКИТЮК², В.А. ЛУКАШ³

¹ ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

² ООО «Научно-производственная фирма «ВИСП». 04655, г. Киев, пр. Московский, 23

³ Институт сверхтвердых материалов им. В.М. Бакуля НАН Украины. 04074, г. Киев, ул. Автозаводская, 2

Достоинства метода сварки трением с перемешиванием (СТП) хорошо известны из многочисленных публикаций. В работе предложено использовать СТП при восстановлении размеров медных плит кристаллизаторов МНЛЗ и последующего поверхностного упрочнения никелем или никелевыми сплавами. При этом была изучена микроструктура характерных зон соединений. Применение метода СТП обеспечивает получение качественных соединений с достаточно высокими механическими свойствами нанесенного слоя. Изучена структура соединений медь–медь и медь–никель. Установлено, что ведущую роль в образовании соединений играет механическое перемешивание металлов, в значительно меньшей мере — их взаимодиффузия. Экспериментальные исследования легли в основу разработки технологии восстановления медных плит с никелевым покрытием. Библиогр. 15, рис. 10.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, восстановление медных плит, нанесение слоя, медь, никель, структура соединений, рабочий инструмент

Сварка трением с перемешиванием (СТП), разработанная Британским институтом сварки (ТWИ) как процесс соединения в твердой фазе, характеризуется преимуществами, не присущими традиционным способам [1–3].

От других видов сварки давлением он отличается способом нагрева, точнее, способом введения тепла в свариваемые детали. При СТП кинетическая энергия непосредственно преобразуется в тепловую, причем генерирование тепла происходит строго локализованно в тонких приповерхностных слоях металла.

На рис. 1 приведены установка и схема соединения нахлесточного типа методом СТП разнородных металлов.

Исследователи указывают на преимущества этого процесса по сравнению с другими способами получения неразъемных соединений [4, 5]: сохранение в значительной степени свойств основного металла в зоне соединения; отсутствие вредных испарений и ультрафиолетового излучения в процессе сварки; возможность получения бездефек-

тных швов на сплавах, которые при сварке плавлением склонны к образованию горячих трещин и пористости в металле швов; отсутствие необходимости в применении присадочного материала, удалении поверхностных оксидов на кромках перед сваркой, а также шлака и брызг после сварки; отсутствие потерь легирующих элементов в металле шва.

Большой интерес представляет возможность применения способа СТП для соединений однородных и разнородных металлов. В работах [6–13] продемонстрированы успехи в соединении по методу СТП разнородных металлов. Как показано в этих работах, решающее влияние на свариваемость металлов оказывает металлургическая совместимость, определяемая взаим-

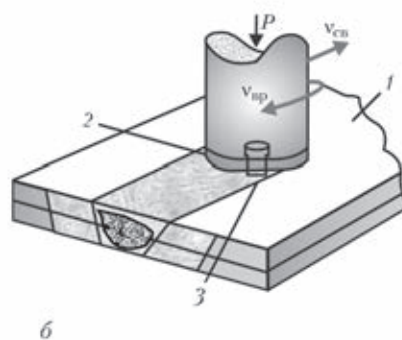
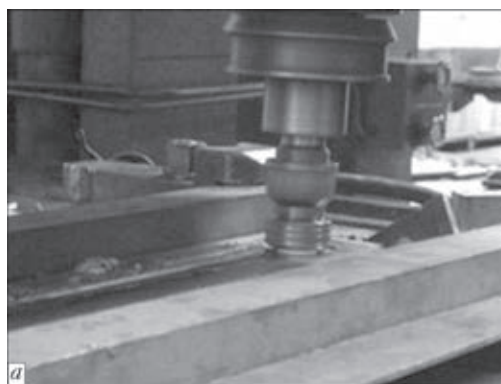


Рис. 1. Установка (а) и схема процесса СТП (б): 1 — изделие; 2 — заплечник; 3 — пин-инструмент со специальным профилем

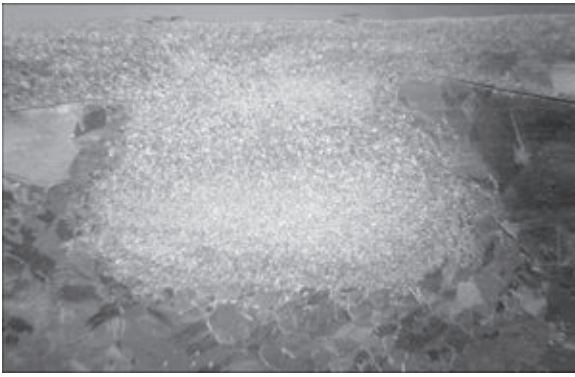


Рис. 2. Макроструктура ($\times 5$) соединения медного слоя с модельным объектом из меди марки М1 методом СТП

ной растворимостью соединяемых металлов как в жидком, так и в твердом состояниях, а также образованием хрупких химических соединений — интерметаллидов.

В данной работе авторами с использованием метода СТП получены и исследованы соединения Cu–Cu и Ni–Cu, элементы которых отличаются неограниченной растворимостью с целью использования их для восстановления размеров медных плит кристаллизаторов МНЛЗ и последующего их поверхностного упрочнения никелем или никелевыми сплавами.

Для плит кристаллизаторов МНЛЗ используют особо чистую медь М1 (ГОСТ 859–78). Она имеет высокую теплопроводность, что обеспечивает быстрое образование корочки металла на поверхности отливки. При движении слитка через кристаллизатор идет значительный, неравномерный на разных участках, абразивный износ меди. Обычными методами плавлением восстановить кристаллизаторы МНЛЗ затруднительно, поскольку высокая теплопроводность меди приводит к сильному короблению, а взаимодействие с кислородом в ней, в результате образования оксидов, ухудшает теплопроводные свойства кристаллизатора.

Получены и изучены основные зоны соединения металлов. Макроструктура соединения основы с нанесенным слоем приведена на рис. 2. Как видно из рис. 2, получен качественный слой металла с отсутствием дефектов в виде пор, трещин, несплошностей. В зоне динамической рекристаллизации наблюдается значительное измельчение зерен. При нанесении меди на образец медного

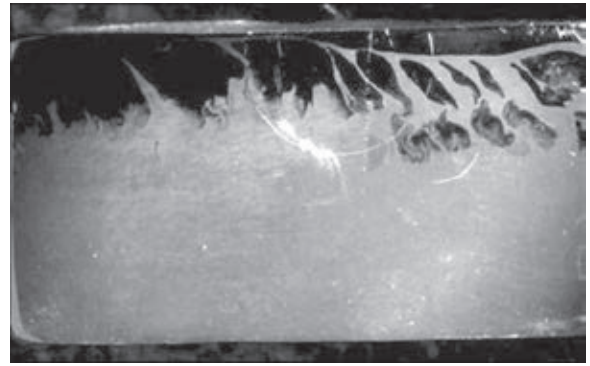


Рис. 4. Микрошлиф образца меди с никелевым покрытием, нанесенным методом СТП (оптический микроскоп, поперечное сечение образца)

кристаллизатора МНЛЗ параллельными швами сформировалось соединение несколько иного характера, макроструктура его приведена на рис. 3.

Общий вид микрошлифа образца меди с нанесенным слоем никеля приведен на рис. 4 (поперечный разрез). Наблюдается механическое перемешивание слоев никеля и меди без активного взаимодействия.

В зоне соединения никеля и меди происходит взаимное проникновение этих металлов на глубину до 3 мм. Массоперенос металлов отмечен в виде взаимопроникающих чередующихся полос, направленных в сторону движения пин-инструмента (рис. 4). Полосы из меди и никеля имеют разную толщину (соответственно, 0,3...0,6 и 0,03...0,30 мм). Вследствие перекристаллизации в этих полосах происходит измельчение структуры. В меди размер зерна колеблется от 5 до 20, а в никеле — от 5 до 40 мкм. Микротвердость полос никеля составляет 1270 ± 40 , а меди — 1140 ± 50 МПа.

Методом РСМА установлено, что по границам зерен происходит незначительная диффузия меди в никель. В результате исследования соединений никеля с медью установлено, что ведущую роль в процессе СТП играет массоперенос металлов, в значительно меньшей степени — их взаимодиффузия.

Полученные результаты дали возможность разработать технологию восстановления медных кристаллизаторов непрерывной разливки стали с нанесением на них поверхностного слоя из никелевых и никель-хромовых покрытий с использованием метода СТП.



Рис. 3. Макроструктура ($\times 10$) нанесенного слоя из меди марки М1 на кристаллизатор МНЛЗ методом СТП

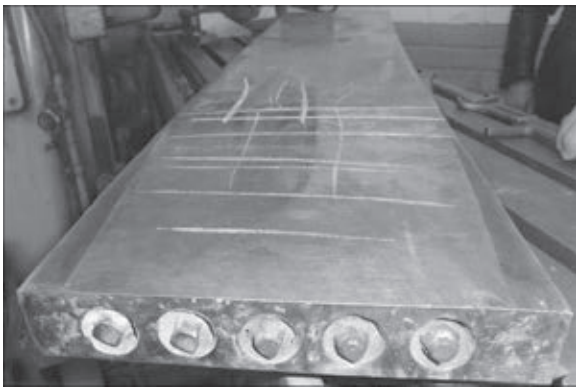


Рис. 5. Кристаллизатор МНЛЗ после эксплуатации

В СНГ, начиная с 2003 г., на ОАО «Северсталь» проводятся работы по использованию слябовых кристаллизаторов со щелевыми охлаждающими каналами [14], в том числе с никелевыми покрытиями. Они показали свою принципиальную пригодность и преимущества перед кристаллизаторами со сверленными каналами.

Несмотря на значительные успехи в продлении срока службы медных плит кристаллизаторов МНЛЗ с покрытиями, вопросы их ремонта остаются актуальными и на сегодня. Выяснено, что часто встречающимися дефектами, по причине которых кристаллизаторы снимаются с эксплуатации, является износ боковин нижней части охлаждающих плит глубиной более чем на 2,7 мм. На рис. 5 представлена фотография такой плиты.

На рис. 6 приведена схема распределения износа на рабочей поверхности узких стенок кристаллизаторов, где каждая линия показывает увеличение износа на 0,5 мм [15]. Наличие таких дефектов делает недопустимым их дальнейшую эксплуатацию и требует замены. Разрабатывалась технология ремонта медных плит, имеющих указанные дефекты методом СТП. Восстановление геометрии плит выполняли торцом вращающегося инструмента, имеющего выступающий штырь, который, проникая сквозь наплавляемый (присадочный) металл, перемещаясь, смешивал наплавляемый металл с металлом основы [15].

Материал инструмента для СТП подбирался жаростойкий и жаропрочный, что позволило ра-

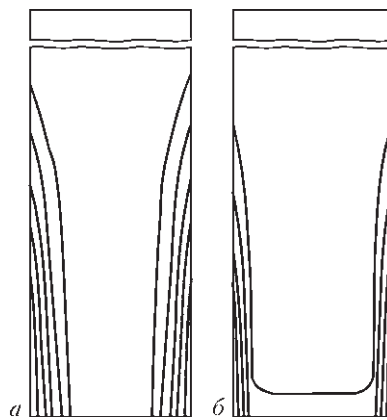


Рис. 6. Распределение износа на рабочей поверхности узких стенок опытного (а) и типового (б) кристаллизаторов (каждая линия — увеличение износа на 0,5 мм) [14]

ботать при температурах до 1000 °С, при которых происходит пластификация меди.

Проведение технологии восстановления осуществлялось достаточно просто. На отремонтированный участок сегмента медной плиты, предварительно отфрезерованный до определенного уровня, накладывается медная пластина требуемого состава и формы, и надежно закрепляется с помощью струбцины. Затем вращающийся цилиндрический инструмент из твердых сплавов с выступающим штырем внедрялся в пластину, создавая перемешивание металла пластины с металлом основы.

На рис. 7 приведены этапы нанесения медного слоя на медную плиту. Видно, что структура нанесенного слоя металла плотная, трещины, непровары и поры отсутствуют. Металлографические исследования подтверждают этот вывод. Замеры микротвердости нанесенного слоя меди показали идентичность его твердости восстанавливаемой плиты. Растворения кислорода в наплавочном слое не наблюдалось. Подобным образом при необходимости наносили медь на всю поверхность плиты (рис. 8). Заключительным этапом восстановления медных плит кристаллизаторов является нанесение слоя никеля Ni (3 мм) методом СТП.

Для нанесения на медную плиту никеля, имеющего более высокую температуру плавления по сравнению с медью, понадобилось использовать не только другие материалы для инструмента, но



Рис. 7. Этапы нанесения медного слоя на медную плиту: а — плита с тонким медным листом; б — процесс наплавки; в — внешний вид восстановленной плиты после шлифовки



Рис. 8. Нанесенный на плите МНЛЗ слой меди (5 мм) методом СТП без водяного охлаждения



Рис. 9. Процесс нанесения слоя никеля (3 мм) на медную плиту МНЛЗ методом СТП

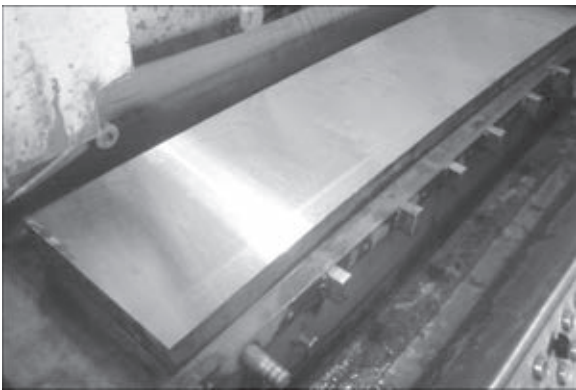


Рис. 10. Общий вид медной плиты с нанесенным никелевым покрытием после шлифовки

и изменить его конструкцию. Лучшие результаты показывают твердые сплавы типа ВК, ТК и кубического нитрида бора.

Такие инструменты имеют повышенную прочность и жаропрочность, что позволяет их использовать до температур 1000...1200 °С. Нанесение проводили на установке для восстановления медных плит. Для уменьшения окисления инструмента в процессе работы использовали охлаждающий обдув его инертным газом (рис. 9).

После нанесения никеля поверхность плиты МНЛЗ шлифуется (рис. 10).

Выводы

1. Показана возможность нанесения слоя меди и никеля на медные плиты, что может быть использовано при их восстановлении и упрочнении для повышения ресурса работы.

2. Разработана технология локального и общего ремонта медных плит МНЛЗ с использованием метода СТП.

3. Доработаны чертежи, форма и состав материалов для инструмента применительно к методу СТП.

4. Данная технология позволила отремонтировать дефекты медных плит и нанести слои меди и никеля.

1. *Pat. 9125978.8 J.B., МПКСТ GB92. Friction stir butt welding / W.M. Thomas. – Publ. 01.12.91.*
2. *Виль В.И. Сварка трением металлов. – Л.: Машиностроение, 1970. – 176с.*
3. *Сварка трением: Справочник / В.К. Лебедев, И.А. Черненко, Р. Михальски и др. – Л.: Машиностроение, 1987. – 236 с.*
4. *Okamura H., Aota K., Ezumi M. Friction stir welding of aluminum alloy and application to structure // J. of Jap. Institute of Light Metals. – 2000. – 50, № 4. – P. 166–172.*
5. *Arbegast W.J. Friction stir welding. After a decade of development // Welding J. – 2006. – 85, № 3. – P. 28–35.*
6. *Watanabe H., Takayama H., Yanagisawa A. Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding // J. of materials proc. technology. – 2006. – 178. – P. 342–349.*
7. *Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy / T. Hirata, T. Oguri, H. Hagino et al. // Materials Sci. and Eng. – 2007. – A456. – P. 344–349.*
8. *Interfacial reaction in steel-aluminum joints made by friction stir welding / W.-B. Lee, M. Schmuecker, U.A. Mercardo et al. // Scripta Mater. – 2006. – 55. – P. 355–358.*
9. *Microstructure of friction stir welding of aluminium alloy to magnesium alloy / A. Kosta, R.S. Coelho, J. dos Santosb, A.R. Pyzallac // Ibid. – 2000. – 66. – P. 953–956.*
10. *Kwon Y.J., Shigematsu I., Saito N. Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminium alloys // Materials Letters. – 2008. – 62. – P. 3827–3829.*
11. *Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al–Cu joints / P. Xue, D.R. Ni, D. Wang et al. // Materials Sci. and Eng. A. – 2011. – 528. – P. 4683–4689.*
12. *Saeida T., Abdollah-Zadehb A., Saqzarib B. Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by friction stir welding // J. of Alloys and Compounds. – 2010. – 490. – P. 652–655.*
13. *Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al–Cu joints / P. Xue, D.R. Ni, D. Wang et al. // Materials Sci. and Eng. A. – 2011. – 528. – P. 4683–4689.*
14. *Радиальный слябовый кристаллизатор с щелевыми каналами и никелевым покрытием стенок / А.А. Макрушин, А.В. Куклев, Ю.М. Айзин и др. – М: Metallurgizdat, 2005. – С. 38–41.*
15. *К вопросу об упрочнении медных стенок кристаллизаторов МНЛЗ / Г.М. Григоренко, В.И. Зеленник, П.М. Кавуненко, М.А. Полещук и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения. Вып.15. – Киев: Логос, 2012. – С. 548–552.*

Поступила в редакцию 10.04.2015