



СВАРКА И НАПЛАВКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

Чл.-кор. НАН Украины **М. Л. ЖАДКЕВИЧ**, **Н. Г. ТРЕТЯК**, канд. техн. наук, **П. М. КАВУНЕНКО**, инж.,
В. И. ЗЕЛЕНИН, **В. А. МОХОРТ**, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Е. В. ЗЕЛЕНИН, инж. (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Изучены особенности структуры сварных и наплавленных соединений латуни Л60 и меди М1, полученных сваркой трением с перемешиванием. Отмечено высокое качество швов, отсутствие дефектов и неоднородностей в зоне сварки. Разработана технология наплавки меди трением с перемешиванием путем выполнения прорезных швов с перекрытием.

Ключевые слова: сварка и наплавка трением с перемешиванием, латунь, медь, фазовый состав, медный кристаллизатор

Процесс сварки трением с перемешиванием (СТП), разработанный в 1991 г. в Британском институте сварки [1], позволяет выполнять стыковые, угловые и нахлесточные соединения листовых заготовок. Основными параметрами режима процесса СТП являются скорость сварки (скорость перемещения инструмента), частота вращения инструмента, усилие прижатия и усилие перемещения инструмента, угол наклона инструмента и его размеры [2]. Кроме того, учитываются условия трения, зависящие от используемого материала инструмента и свариваемого материала, и напряжение течения материала заготовок при температуре деформации.

Наиболее широко этот способ сварки применяется для соединения алюминия и его сплавов в судостроении, железнодорожном транспорте, автомобилестроении, строительстве [2–4], а также для соединения медных сплавов, например, медных контейнеров для хранения ядерных отходов [5, 6] или медных подкладок (разновидность теплоотводов) в оборудовании для напыления.

На основе СТП авторами разработана технология наплавки трением с перемешиванием (НТП) меди и ее сплавов. Схема этого процесса приведена на рис. 1. Наплавляемая деталь и присадочный материал в виде пластины закрепляются с помощью прижимов. Вращающийся рабочий инструмент вводится в соприкосновение с присадочной пластиной и постепенно погружается в нее до упора в заплечик инструмента. От трения инструмента о поверхность присадочной пластины и наплавляемой заготовки выделяется тепло, необходимое для перехода в пластичное состояние присадочного материала и части металла детали. Посредством перемещения инструмента

обеспечивается получение прорезного шва. Последовательное наложение таких швов с перекрытием позволяет наплавлять на деталь присадочный материал.

Эксперименты по сварке и наплавке проводили с использованием пластин из меди М1 (ГОСТ 859–78) толщиной 5 и 20 мм и латуни Л60 (ГОСТ 15527–70) толщиной 6 мм. Сварку и наплавку выполняли на специально оборудованном фрезерном станке с мощностью привода 10 кВт (рис. 2).

Процессы СТП и НТП осуществляли при скорости вращения шпинделя 900...1250 об/мин и скорости перемещения инструмента 50...70 мм/мин. Рабочий инструмент, изготовленный из жаропрочного материала на основе вольфрама, имел относительно простую конструктивную форму (диаметр заплечика 25 мм). Угол наклона инструмента к поверхности свариваемой или наплавляемой заготовки составлял 2...3°. При наплавке на заготовку толщиной 20 мм плита толщиной 5 мм использовалась как присадочный материал.

Макро- и микроструктуры металла поперечного сечения образца первоначально исследовали

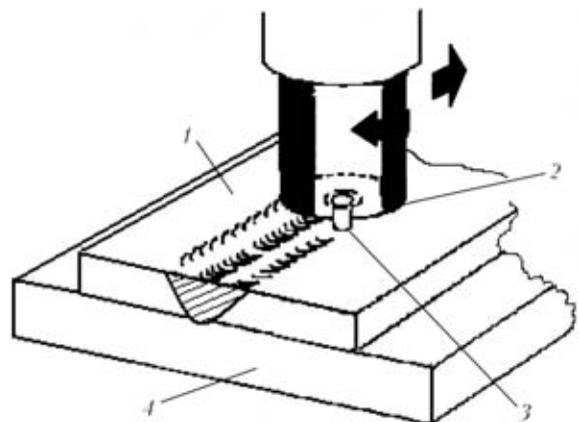


Рис. 1. Схема процесса НТП: 1 — присадка; 2 — заплечик; 3 — штырь со специальным профилем; 4 — медная заготовка



с помощью микроскопа МБС-10. Образцы шлифовали, полировали, а затем в течение 60 с подвергали травлению в специальном растворе, состоящем из 10 г ортофосфорной кислоты, 0,3...0,4 г хромового ангидрида и двух капель перекиси водорода. Микроструктуру и химический состав металла исследовали с помощью растрового электронного микроскопа-микроанализатора РЕММА-101А. Твердость *HRB* определяли по стандартной методике, а фазовый состав — рентгеновским дифрактометрическим методом.

Внешний вид полученного соединения приведен на рис. 3. На рисунке видно, что лицевая поверхность шва гладкая со следами от заплечика. Анализ макрошлифов соединений показал отсутствие дефектов в виде пор, трещин, несплошностей.

На рис. 4 представлено распределение различных структурных зон в сечении сварного шва [7].

Металлографический анализ показал, что основные изменения структуры происходят в зонах *C* и *D*, где в основном и имеет место перемешивание металла при сварке. Размер зерна в центре сварного (в зоне ядра) шва значительно отличается от размера зерна основного металла. На рис. 5, *a* приведена микроструктура основного металла, состоящая из двух фаз $\alpha + \beta_{II}$ со средним размером зерна 50...60 мкм, а на рис. 5, *б* — микроструктура металла зоны рекристаллизации сварного образца из латуни, зерна в которой измельчились до 5...7 мкм. При этом в зоне ядра изменения химического состава не происходят, что подтверждает микрорентгеноспектральный анализ.

Изменение твердости в зависимости от расстояния от центра шва в его поперечном сечении приведено на рис. 6. Твердость металла зоны перемешивания на *HRB* 10...12 выше, чем у основного металла.

Результаты химического и микрорентгеноспектрального анализа основного металла и металла шва, представленные на рис. 7, свидетельствуют о наличии одних и тех же структурных зон, состоящих из фаз $\alpha + \beta_{II}$, и отсутствии изменений в химическом составе металла сварного шва по сравнению с основным металлом.

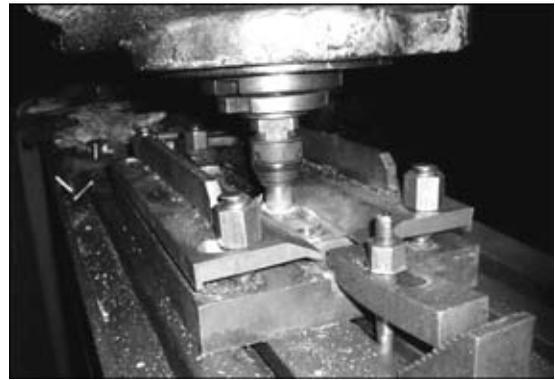


Рис. 2. Лабораторная установка для СТП и НТП



Рис. 3. Лицевая поверхность соединения латуни Л60, полученного СТП

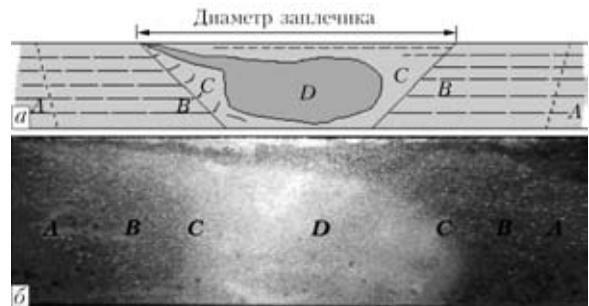


Рис. 4. Схема расположения структурных зон при СТП (*a*) [8] и макроструктура (X5) соединения латуни (*б*): *A* — основной металл; *B* — зона термического влияния; *C* — зона термомеханического влияния; *D* — динамическая рекристаллизация (ядро)

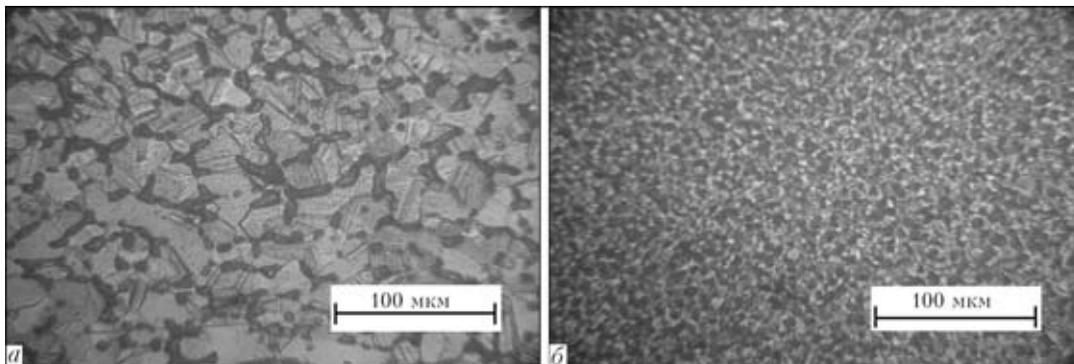


Рис. 5. Микроструктура основного металла (латунь Л60) (*a*) и металла в зоне ядра шва (*б*)

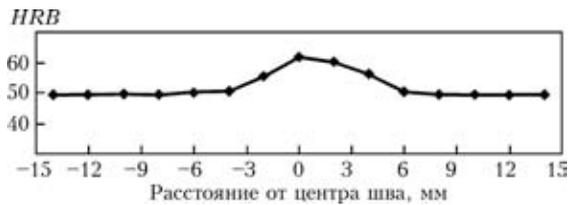


Рис. 6. Распределение твердости в соединении, полученном СТП, латуни Л60 толщиной 6 мм

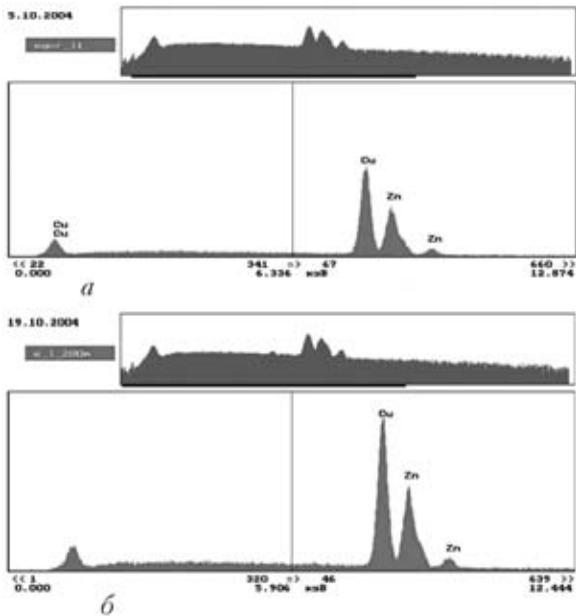


Рис. 7. Энергетический спектр элементов в основном металле — латуни Л60 (а) и в зоне ядра (б)



Рис. 8. Макроструктура (X5) металла наплавленного слоя меди М1

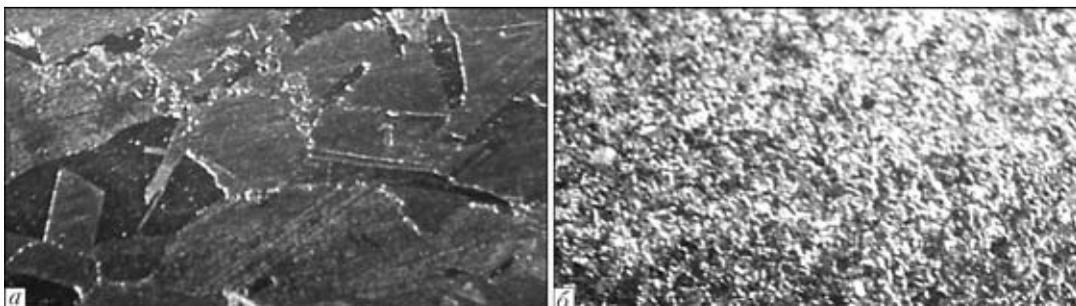


Рис. 9. Микроструктура (X25) основного металла (а) и наплавленного слоя меди М1 (б)

Последнее подтверждает перспективность использования способа СТП для соединения сплавов меди, содержащих легкоиспаряющиеся элементы. Так, в работе [8] отмечается, что при сварке латуни плавлением происходит испарение цинка, которое не только существенно изменяет химический состав металла шва и его механические свойства, но и может привести к образованию большого количества пор, что отрицательно влияет на прочностные характеристики шва. Это ограничивает применение сварных изделий при больших градиентах температур и механических нагрузках.

В ходе экспериментов по НТП меди и ее сплавов установлена возможность получения поверхностного слоя высокого качества без наличия дефектов и неоднородностей в зоне перемешивания (рис. 8), где металл в результате динамической рекристаллизации имеет зерно более мелкого размера по сравнению с основным металлом, что в свою очередь приводит к повышению служебных характеристик наплавленного материала.

Металлографический анализ образцов, вырезанных из наплавленных медных заготовок, показал, что размер зерна в зоне перемешивания существенно отличается от размера зерна основного металла. Установлено, что при перемешивании происходит значительное (в 5...10 раз) измельчение зерна при наличии одних и тех же структурных зон (рис. 9).

При выполнении НТП на медных образцах существенного изменения в твердости наплавленного металла не произошло. Твердость металла зоны перемешивания на 10 % больше, чем основного металла. Деформации, вызванные сварочными напряжениями, отсутствовали. Результаты химического анализа металла наплавленного слоя и основного металла подтвердили идентичность их химического состава и отсутствие оксидных включений в зоне наплавки.

На основании проведенных экспериментов с целью восстановления исходных размеров наплавлены образцы из плиты медного кристаллизатора машин непрерывной разливки стали (рис. 10). Для реализации указанной технологии наплавки в промышленном масштабе разработана



Рис. 10. Вид наплавленного фрагмента плиты медного кристаллизатора машины непрерывной разливки стали

конструкция головки для СТП и НТП, которая может быть применена в составе серийных порталных металлообрабатывающих станков. При этом толщина свариваемых заготовок или наплавленного слоя может достигать 20...30 мм.

Выводы

1. При СТП латуни Л60 получены качественные швы без наличия дефектов и изменения химического состава в зоне перемешивания. При этом твердость металла шва возростала на 15...20 % по сравнению с основным металлом.

2. Разработана принципиально новая технология НТП меди путем выполнения прорезных швов с перекрытием.

Features of structure of welded and surfaced joints of brass L60 and copper M1 produced by friction stir welding have been studied. A high quality of the welds, absence of defects and inhomogeneities in the welding zone are noted. A technology has been developed of copper surfacing by friction stir welding by making through-thickness welds with an overlap.

3. Наплавлены фрагменты плиты медного кристаллизатора машины непрерывной разливки стали и разработана конструкция головки для реализации промышленной технологии НТП.

1. *Eur. Pat. Spec 0615480B1*. Improvements relating to friction welding / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham et al. — Publ. 1995.
2. *Process optimisation of friction stir welding in fabrication of aluminium ship panel* / O. T. Midling, M. Hval, H. G. Johansen, L. D. Oosterkamp // Proc. Third intern. forum aluminium ships. — Haugesund, May 27–28, 1998. — Haugesund, 1998. — P. 2–10.
3. *Application of friction stir welding to the manufacturing of the next generation «A-train» type rolling stock* / T. Kawasaki, T. Makino, S. Todori et al. // 2nd Intern. symp. on FSW, Gothenburg, Sweden, June, 2000. — Gothenburg, 2000. — P. 26–28.
4. *Johnsen M. R.* Friction stir welding takes off at Boeing // *Welding J.* — 1999. — Feb. — P. 35–39.
5. *Cederqvist L.* A weld that lasts for 100,000 years // *Svetsaren.* — 2005. — 60, № 2. — P. 31–33.
6. *Fabrication of backing plate of copper alloy by friction stir welding* / Okamoto Kazutaka, Hirano Satoshi, Doi Masayuki et al. // *Jap. Weld. Soc.* — 2002. — 70. — P. 192–193.
7. *Threadgill P.* Friction stir welds in aluminium alloys — preliminary microstructural assessment // *TWI Bulletin.* — 1997. — March/Apr. — P. 30–33.
8. *Абрамович В. П., Деменцевич В. П., Ефимов Л. А.* Сварка плавлением меди и сплавов на медной основе. — Л.: Машиностроение, 1988. — 215 с.

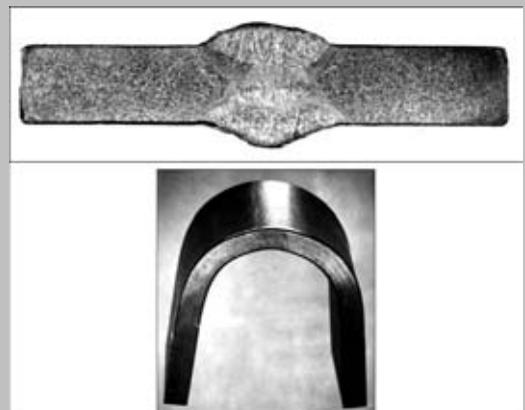
Поступила в редакцию 25.12.2006

ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА ППС-АН2 ДЛЯ ПОДВОДНОЙ СВАРКИ

Предназначена для сварки под водой на глубине до 20 м металлоконструкций из малоуглеродистых и низколегированных сталей с пределом текучести до 350 МПа. Обеспечивает получение механических свойств на уровне (не менее): $\sigma_T = 350$ МПа, $\sigma_B = 430$ МПа, $\delta = 16\%$, $KCV_{-20} = 30$ Дж/см².

Соответствует требованиям класса В+. Классификации по подводной сварке ANSI/AWS D3.6.

Область применения. Ремонт судов на плаву, трубопроводов, портовых сооружений и т.п.



Макрошлиф сварного соединения и образец после испытания на изгиб

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 18
Тел./факс: (38044) 287 31 84. E-mail: maksimov@paton.kiev.ua