

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ НА МЕЖЗЕРЕННОЕ ПРОНИКНОВЕНИЕ ВЫСОКООЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ В СТАЛЬ

Т. Б. МАЙДАНЧУК, В. М. ИЛЮШЕНКО, А. Н. БОНДАРЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены результаты исследований влияния параметров процесса дуговой наплавки на сталь порошковой проволокой марки ППБрОФ10-1 под флюсом и покрытыми электродами АНБО-2, обеспечивающих получение наплавленного металла, по составу соответствующего литейной бронзы марки БрО10Ф1Л, на образование межкристаллитных проникновений бронзы в сталь. Показано, что на образование межкристаллитных проникновений наиболее существенное влияние оказывают значение тока и скорость наплавки. На основании металлографических исследований установлено, что отсутствие межкристаллитных проникновений бронзы в сталь достигается при ограничении эффективной погонной энергии дугового процесса наплавки как порошковой проволокой, так и покрытыми электродами значением 450 кДж/м. Библиогр. 8, табл. 2, рис. 2.

Ключевые слова: высокооловянная бронза, покрытые электроды, порошковая проволока, дуговая наплавка, межкристаллитные проникновения

Высокооловянные бронзы находят широкое применение в узлах трения, работающих в особо тяжелых условиях при высоких нагрузках [1, 2]. Так, например, оловянно-фосфористая бронза БрО10Ф1Л используется в энергомашиностроении для изготовления подшипниковых втулок и поршней ответственного назначения. Этому в значительной степени способствует благоприятное сочетание ее механических и антифрикционных свойств, что обусловлено специфической структурой, состоящей из α -твердого раствора, эвтектоида ($\alpha+\delta$) и фосфидов меди [1, 2]. С целью экономии дефицитной и дорогой бронзы, а также повышения конструктивной прочности деталей перспективным является использование биметалла сталь-бронза. Эта задача во многих случаях может быть решена с помощью применения дуговых способов. Сдерживающим фактором для дуговой наплавки высокооловянных бронз является отсутствие электродных материалов (проволоки, ленты), обеспечивающих необходимый химический состав наплавленного металла. В связи с необходимостью получения биметалла сталь + высокооловянная бронза в ИЭС им. Е. О. Патона разработаны порошковая проволока марки ППБрОФ10-1 (рекомендуется для автоматизированной наплавки) и покрытые электроды марки АНБО-2 [3, 4]. Эти материалы разрабатывались с учетом требования обеспечить получение наплавленного металла, по составу соответствующего литейной бронзы марки БрО10Ф1Л.

Как известно, оловянные бронзы наиболее склонны из всех медных сплавов к образованию

межкристаллитных проникновений (МКП) бронзы в сталь (при наплавке на сталь и сварке бронзы со сталью), которые приводят к снижению ударной вязкости, пластичности, прочности биметаллических соединений бронзы со сталями при динамических и циклических нагрузках [5–7]. На рис. 1 приведен характерный вид данного дефекта при наплавке высокооловянных фосфористых бронз на сталь.

В результате металлографических исследований установлено, что МКП высокооловянной бронзы в сталь по всей протяженности имеют литую структуру и образуют со сталью плотное ме-



Рис. 1. Микроструктура ($\times 50$) металла зоны сплавления высокооловянной бронзы и стали с МКП бронзы в сталь

Таблица 1. Влияние режимов наплавки порошковой проволокой ППБрОФ10-1 под флюсом и эффективной погонной энергии на склонность к образованию МКП высокооловянной бронзы в сталь

Номер образца	Режимы наплавки	Эффективная погонная энергия, кДж/м	Размеры валика (мм)			МКП	
			Ширина	Высота	Глубина проплавления	Разрез I	Разрез II
Ток, А							
1	200...220	447,2	14,5...15,5	4,5...5,0	≤ 0,2	Отсутствуют	Отсутствуют
2	300...320	602,4	20...20,5	5,0...5,5	1,5...2,5	2	Отсутствуют
3	380...400	777,6	24...25	5,3...5,5	1,5...2,5	1	2
Напряжение, В							
4	25...26	430,9	14,5...15	5,5...6,0	1,0 ; 1,5	Отсутствуют	Отсутствуют
5	30...31	518,4	16,5...17	5,0...5,5	0,5 ; 1,0	-"-	2
6	35...36	602,6	19,5...20	5,0...5,2	2,5 ; 1,5	2	Отсутствуют
v_n , м/ч							
7	10	842,4	20...21	5,0...5,5	≤ 0,5	3	2
8	14	602,4	19,5...20	5,0...5,2	2,5...1,5	2	Отсутствуют
9	18	369,4	18...18,5	4,0...4,5	≤ 0,5	Отсутствуют	-"-

таллическое соединение. Проникновения начинаются на границе сплавления медный сплав–сталь и проникают в сталь по границам зерен. Они проходят по нескольким границам зерен, имеют разную ширину и длину. Одно и то же проникновение по своей длине может иметь участки с одинаковой или переменной шириной; границы одного и того же проникновения на отдельных участках могут быть параллельными, а могут идти под углом друг к другу.

Механизм МКП медного сплава в сталь при дуговой наплавке достаточно хорошо изучен в работах [5–8]. В тоже время работ, посвященных изучению технологических мер предотвращения МКП, сравнительно мало. Чаще всего для этих целей рекомендуется применять нанесение подслоя из материалов, не склонных к образованию МКП (сплавы с высоким содержанием никеля типа монель и др.).

Приведенные в литературе данные о влиянии режимов наплавки и погонной энергии на образование и развитие МКП носят рекомендательный характер, и в большинстве случаев относятся к процессам наплавки в защитных газах.

Данные о влиянии на МКП режимов наплавки под флюсом и покрытыми электродами любых медных сплавов отсутствуют. Поэтому для оценки влияния на МКП режимов наплавки под флюсом разработанной порошковой проволокой ППБрОФ10-1 и покрытыми электродами марки АНБО-2 выполняли комплекс исследований. В каждом эксперименте один параметр процесса менялся, а другие оставались постоянными. Использовались порошковая проволока диаметром 3 мм, флюс марки АН-60, покрытые электроды диаметром 3 и 4 мм.

Эффективная погонная энергия определялась по формуле:

$$Q_{эф} = 0,24 \frac{U_d I_{св} \eta_{п}}{v_n},$$

где U_d — напряжение, В; $I_{св}$ — ток, А; $\eta_{п}$ — эффективный коэффициент полезного действия процесса нагрева изделия сварочной дугой (для сварки под флюсом $\eta_{п} = 0,8...0,95$, для покрытого электрода $\eta_{п} = 0,65...0,8$); v_n — скорость наплавки, м/ч.

Наличие и характер МКП изучали на протравленных шлифах образцов, взятых из поперечного сечения валика (не менее двух сечений). Фиксировались также размеры поперечного сечения валиков и глубина проплавления основного металла. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Из представленных в табл. 1 результатов видно, что на появления МКП влияют все параметры процесса наплавки, однако значение тока и скорость наплавки в большей степени, чем напряжение на дуге. Какого-либо влияния на МКП глубины проплавления не обнаружено. МКП равновероятны и при проплавлении (до 2,5 мм) и почти при полном его отсутствии (≤ 0,5 мм) — наплавленные образцы 3 и 7. Погонная энергия в данных случаях примерно одинакова. Из табл. 1 также видно, что существует определенное пороговое значение эффективной погонной энергии, ниже которого образования МКП маловероятны. Для процесса наплавки под флюсом порошковой проволокой ППБрОФ10-1 это значение составляет 450 кДж/м.

При наплавке на сталь покрытыми электродами значение эффективной погонной энергии зависит, в основном, от значения тока и скорости наплавки. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 2.

Приведенные в табл. 2 данные свидетельствуют, что значение эффективной погонной энергии 450 кДж/м является критической величиной, при превышении которой в наплавленном металле

Таблица 2. Влияние режимов наплавки покрытыми электродами АНБО-2 и эффективной погонной энергии на склонность к образованию МКП высокооловянной бронзы в сталь

Номер образца	Ток наплавки, А	Эффективная погонная энергия, кДж/м	Размеры валика, мм			МКП	
			Ширина	Высота	Глубина проплавления	Разрез I	Разрез II
$U_d = 23 \dots 25 \text{ В}; v_n = 3 \text{ м/ч}$							
1	60	331	5...7	1,5...2,5	$\leq 0,1$	Отсутствуют	Отсутствуют
2	80	442	7...9	2,5...2,8	$\leq 0,2$	-"-	-"-
3	100	553	10...12	2,8...3,2	$\leq 0,25$	-"-	1
4	120	663	11...14	3,2...3,5	0,5	2	1
5	160	885	15...18	3,4...3,7	1,0	2	3
$U_d = 23 \dots 25 \text{ В}; v_n = 4 \text{ м/ч}$							
6	60	248	5...6	1,5...2	$\leq 0,1$	Отсутствуют	Отсутствуют
7	80	332	6...8	2...2,5	$\leq 0,15$	-"-	-"-
8	100	415	8...10	2,5...2,7	0,5	-"-	-"-
9	120	498	11...13	2,8...3,1	0,8	-"-	1
10	160	664	14...15	3...3,2	1,5	1	2
$U_d = 23 \dots 25 \text{ В}; v_n = 5 \text{ м/ч}$							
11	60	200	4...5	1...2	$\leq 0,1$	Отсутствуют	Отсутствуют
12	80	265	5...6	2...2,2	$\leq 0,2$	-"-	-"-
13	100	331	7...8,5	2,2...2,5	0,5	-"-	-"-
14	120	398	9...11	2,5...2,8	1,5	-"-	-"-
15	160	531	10...13	2,8...3	2,0	2	-"-

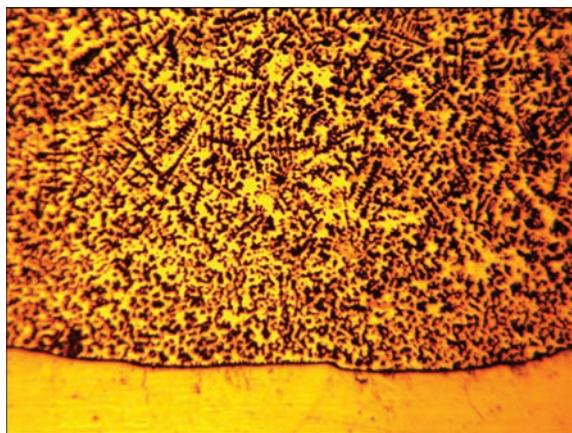


Рис. 2. Микроструктура ($\times 50$) металла зоны сплавления сталь + высокооловянная бронза

присутствуют МКП бронзы в сталь. Поэтому при наплавке на сталь (особенно первого слоя) рационально использовать покрытые электроды диаметром 3 мм. В этом случае обеспечивается более стабильный процесс, без обрывов дуги и закорачивания электрода на стальной пластине.

Микроструктура металла зоны сплавления высокооловянной бронзы со сталью, наплавленного на режимах $U_d = 23 \dots 25 \text{ В}; v_n = 4 \text{ м/ч}; I_{св} = 80 \dots 100 \text{ А}$ электродом марки АНБО-2 диаметром 3 мм приведена на рис. 2.

Металлографическими исследованиями не выявлено дефектов, в том числе МКП бронзы в сталь в зоне сплавления.

В результате проведенных экспериментальных работ установлено, что за счет ограничения эффективной погонной энергии дуговых способов наплавки высокооловянной бронзы на сталь ниже

450 кДж/м возможно минимизировать вероятность образования и значительного развития МКП при использовании в качестве электродных материалов как порошковой проволоки ППБрОФ10-1, так и покрытых электродов АНБО-2.

Список литературы

- Осинцев О. Е., Федоров В. Н. (2004) *Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник*. Москва, Машиностроение.
- Davis J. R. (2001) *Copper and Copper Alloys*. ASM International.
- Ілюшенко В. М., Майданчук Т. Б., Бондаренко А. М., Аношин В. О., Вавілов О. В., Кантор О. Г. *Порошковий дріт для зварювання та наплавлення високоолов'яних бронз*. Україна, а. с. 109622. В23К 35/16 (2006.01).
- Ілюшенко В. М., Майданчук Т. Б., Аношин В. О., Скорина М. В. *Склад електродного покриття для зварювання та наплавлення олов'яних бронз*. Україна, а. с.106954, В23К 35/365(2006.01).
- Рыбин В. В., Вайнерман А. Е., Баранов А. В. и др. (2006) Исследование особенностей и разработка прогрессивных технологий сварки медных сплавов со сталями и наплавки медных сплавов на стали. *Вопросы материаловедения*, 1(45), 220–229.
- Ардентов В. В., Вайнерман А. Е., Захаров В. Ф. и др. (1979) Влияние проникновения медного сплава в сталь на свойства биметалла. *Автоматическая сварка*, 5, 36–38.
- Вайнерман А. Е., Пичужкин С. А., Чернобаев С. П. и др. (2006) Новые сварочные материалы и технологические особенности сварки и наплавки изделий из медных сплавов и разнородных металлов. *Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Сварочные материалы – 2012»*, сс. 141–147.
- Вайнерман А. Е. (1981) Механизм межкристаллитного проникновения при наплавке медных сплавов на сталь. *Автоматическая сварка*, 6, 22–25, 29.

References

- Osintsev, O.E., Fedorov, V.N. (2004) *Copper and copper alloys. National and foreign trades: Handbook*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

2. Davis, J.R. (2001) *Copper and copper alloys*. ASM Intern.
3. Ilyushenko, V.M., Majdanchuk, T.B., Bondarenko, A.M. et al. *Flux-cored wire for welding and surfacing of high tin bronze*. In: Author's cert. 109622 UA, Int. Cl. B23K 35/16 (2006.01) [in Ukrainian].
4. Ilyushenko, V.M., Majdanchuk, T.B., Anoshin, V.O., Skoryna, M.V. *Composition of electrode coating for welding and surfacing of tin bronze*. In: Author's cert. 106954 UA, Int. Cl. B23K 35/365 (2006.01) [in Ukrainian].
5. Rybin, V.V., Vajnerman, A.E., Baranov, A.V. et al. (2006) Investigation of peculiarities and development of advanced technologies of welding of copper alloys with steels and surfacing of copper alloys on steel. *Voprosy Materialovedeniya*, 1(45), 220-229 [in Russian].
6. Ardentov, V.V., Vajnerman, A.E., Zakharov, V.F. et al. (1979) Influence of penetration of copper alloy in steel on properties of bimetal. *Avtomatich. Svarka*, 5, 36-38 [in Russian].
7. Vajnerman, A.E., Pichuzhkin, S.A., Chernobaev, S.P. et al. (2006) *New welding consumables and technological peculiarities of welding and surfacing of products from copper alloys and dissimilar metals*. In: Proc. of Int. Sci.-Techn. Conf. on Welding Consumables – 2012, 141-147 [in Russian].
8. Vajnerman, A.E. (1981) Mechanism of intercrystalline penetration in surfacing of copper alloys on steel. *Avtomatich. Svarka*, 6, 22-25, 29 [in Russian].

Т. Б. Майданчук, В. М. Ілюшенко, А. М. Бондаренко

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВПЛИВ РЕЖИМІВ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА УТВОРЕННЯ МІЖЗЕРЕННИХ ПРОНИКНЕНЬ ВИСОКООЛОВ'ЯНОЇ БРОНЗИ В СТАЛЬ

Наведено результати досліджень впливу параметрів процесу дугового наплавлення на сталь порошковим дротом марки ППБрОФ10-1 під флюсом і покритими електродами АНБО-2, які забезпечують отримання наплавленого металу, за складом відповідного ливарній бронзи марки БрО10Ф1Л, на утворення міжкристалічних проникнень бронзи в сталь. Показано, що

на утворення міжкристалічних проникнень найбільш істотно впливають значення струму і швидкість наплавлення. На підставі металографічних досліджень встановлено, що відсутність міжкристалічних проникнень бронзи в сталь досягається при обмеженні ефективної погонної енергії дугового процесу наплавлення як порошковим дротом, так і покритими електродами значенням 450 кДж/м. Бібліогр. 8, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: високоолов'яна бронза, покриті електроди, порошковий дріт, дугове наплавлення, міжкристалічне проникнення

T.B. Maidanchuk, V.M. Ilyushenko, A.N. Bondarenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

INFLUENCE OF ARC SURFACING MODES ON INTERGRANULAR PENETRATION OF HIGH TIN BRONZE INTO STEEL

The paper gives the results of studying the influence of the parameters of the process of submerged-arc surfacing of steel with flux-cored wire of PPBrOF10-1 grade and with coated electrodes ANBO-2, providing deposited metal of the composition, corresponding to cast bronze of BrO10FIL grade, on formation of intercrystalline penetrations of bronze into steel. It is shown that formation of intercrystalline penetrations is the most significantly influenced by values of current and deposition rate. Based on metallographic studies, it is found that absence of intercrystalline penetrations of bronze into steel is achieved at limitation of effective heat input of the process of arc surfacing both with flux-cored wire and with coated electrodes to the value of 450 kJ/m. 8 Ref., 2 Tabl., 2 Fig.

Keywords: high tin bronze, coated electrodes, flux-cored wire, arc surfacing, intercrystalline penetration

Поступила в редакцію 10.02.2018

Издательский Дом «Патон»

Предлагаем отпечатать Вашу статью, опубликованную в журнале «Автоматическая сварка» и на английском языке в журнале «The Paton Welding Journal», отдельным оттиском определенного тиража. Оттиск статьи может быть оформлен в соответствии с пожеланиями. Размещение рекламы в нем также возможно.

Для получения дополнительной информации просьба обращаться в редакцию журнала: 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича 11, тел./факс: (38044) 200-82-77.
journal@paton.kiev.ua, www.patonpublishinghouse.com

