

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ НАПЛАВКЕ ПОД ФЛЮСОМ ВЫСОКООЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ НА СТАЛЬ

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

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

Показано, что одним из эффективных методов получения биметаллических изделий сталь+высокооловянная бронза является электродуговая наплавка под флюсом с применением порошковых проволок. Проанализированы причины образования различных дефектов, которые возможны при наплавке бронзы на сталь. Рассмотрены технологические и металлургические меры устранения пористости как в наплавленном металле, так и по линии сплавления бронзы со сталью. Для обеспечения минимального проплавления стали и снижения железа в бронзе процесс выполняется «расщепленным» электродом (двухэлектродная наплавка) на оптимальных режимах. Особое внимание уделено изучению причин образования межкристаллитных проникновений бронзы в сталь и их влиянию на качество биметаллического соединения. Определено пороговое значение погонной энергии, при которой наблюдается тенденция к снижению образования межкристаллитных проникновений.

Ключевые слова: высокооловянная бронза, наплавка под флюсом, биметаллическое соединение, межкристаллитные проникновения. Библиогр. 10, табл. 2, рис. 4.

Благодаря высоким антифрикционным свойствам и повышенной твердости оловянно-фосфористая бронза типа Бр.О10Ф1 широко применяется для изготовления подшипников, шестерен и втулок ответственного назначения, работающих при высоких удельных давлениях [1]. С целью экономии дефицитных цветных металлов и повышения прочности подшипников целесообразно заменять литые бронзовые детали биметаллическими. Одним из эффективных способов получения биметаллических изделий, особенно крупногабаритных, с рабочим слоем из оловянной бронзы марки Бр.О10Ф1 может быть электродуговая наплавка под флюсом. Поэтому актуальной является задача разработки материала и технологии наплавки такого типа бронзы на сталь. Как показывает многолетний опыт ИЭС им. Е.О. Патона, при наплавке медных сплавов на сталь наблюдаются значительные металлургические и технологические трудности, а именно: повышенная склонность к образованию пор (как в наплавленном металле, так и по линии сплавления со сталью), межкристаллитные проникновения бронзы в сталь, а также возможность легирования наплавленного металла железом, высокое содержание которого снижает эксплуатационные свойства наплавленной бронзы.

Поскольку высокооловянная бронза не обрабатывается давлением и из нее из-за низкой пластичности нельзя изготовить сварочную проволоку малых диаметров, в качестве электродного материала может быть использована порошковая проволока. В качестве оболочки порошковой про-

волоки использовали медную ленту марки М1М (ГОСТ 1173–93). В состав сердечника входит олово в виде оловянного порошка марки ПО-1 (ГОСТ 9723–73) и фосфор — в виде порошка фосфористой меди марки МФ-9 (ГОСТ 2530–84). Для предупреждения пористости при наплавке в шихту порошковой проволоки вводится порошок мрамора (до 5%). Мрамор, измельчая капли электродного металла и уменьшая время их существования на торце электрода, снижает также перегрев наплавленного металла, благодаря чему снижается глубина проплавления стали [2].

Существенное влияние на качество биметаллического соединения оказывает флюс, который используется при наплавке. С целью выбора оптимальной марки флюса было исследовано влияние различных флюсов на устойчивость процесса наплавки, формирование наплавленного металла, отделимость шлаковой корки и наличие пор. На рис. 1 показан внешний вид наплавки, выполненных под флюсами марок АН-60, АН-348А, АН-26С, АН-60СМ и фторидно-основным флюсом UV 420 ТТ фирмы «Bohler Thyssen» (Германия).

Характерно, что при трехслойной наплавке под исследуемыми флюсами при визуальном осмотре трещин и пор в наплавленном металле не обнаружено, шлак отделяется хорошо, при этом наилучшие показатели по стабильности процесса наблюдались при использовании флюсов АН-60 и АН-60СМ. При наплавке под флюсами АН-348А и АН-26С при исследовании поперечных макрошлифов на третьем слое были обнаружены побитость и поры в верхней части валика.

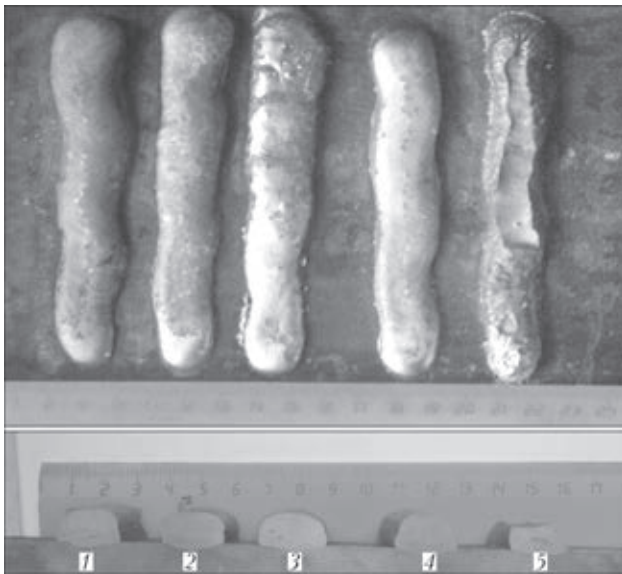


Рис. 1. Внешний вид наплавки под различными флюсами: 1 — АН-60; 2 — АН-348А; 3 — АН-26С; 4 — АН-60СМ; 5 — UV 420 ТТ

Формирование валиков при наплавке под флюсом UV 420 ТТ (см. рис. 1) было неудовлетворительным, что может быть связано с высокой основностью флюса (2,5 по Бонишевскому). Поэтому в дальнейшем для наплавки использовали флюс АН-60.

При наплавке медных сплавов на сталь очень часто образуются поры по линии сплавления медного сплава со сталью. Это связано с относительно незначительным количеством тепловой энергии, которая вводится при наплавке на минимально возможных режимах, с целью обеспечения минимизации расплавления стали, что, с одной стороны, приводит к увеличению длительности остановки фронта кристаллизации и способствует образованию пор [3], а с другой — к объемному пересыщению металла сварочной ванны газами, вызванном уменьшением растворимости из-за снижения температуры металла. В этом случае рост пор идет в основном в результате конвективной диффузии газа из окружающих объемов металла [4, 5]. Поэтому режим наплавки необходимо незначительно «завышать» с целью устра-

нения данного типа дефектов. В то же время увеличение режимов наплавки приводит к большому количеству железа, перешедшего в наплавленный металл. В ряде работ [2, 6, 7] показано, что для уменьшения проплавления основного металла рекомендуется способ наплавки расщепленным электродом. Главным фактором, определяющим глубину проплавления, является расстояние между электродами, т. е. величина расщепления. С целью определения оптимальной величины расщепления проводилась однослойная наплавка с различным межэлектродным расстоянием на низкоуглеродистую сталь порошковой проволокой ППБр.ОФ10-1(рис. 2).

Размеры и форма валиков свидетельствует о следующем: при расщеплении меньше 6 мм вследствие электродинамических сил во время наплавки образуется общая капля расплавленного металла, что приводит к значительному проплавлению основного металла. При расщеплении более 8 мм электродинамические силы малы, пространство между электродами заполняется шлаком и дуги начинают гореть раздельно, что приводит к получению наплавленного металла седловидной формы (см. рис. 2) и при этом происходит «всплывание» железосодержащих частиц в верхнюю часть валика. Производительность процесса при наплавке расщепленным электродом увеличивается в 1,7...2,3 раза по сравнению с одноэлектродной наплавкой, обеспечивая при этом уменьшение глубины проплавления стали. Снижение скорости наплавки с 18 до 10 м/ч при неизменных других сварочных параметрах приводит к снижению содержания железа в наплавленном металле до 5...7%. Это связано с увеличением слоя жидкого металла, который подтекает под столбом дуги и тем самым экранирует его.

Одним из основных дефектов при наплавке оловянных бронз являются межкристаллитные проникновения цветного металла в сталь. Авторами работ [8, 9] показано, что оловянные бронзы имеют повышенную склонность к межкристаллитным проникновениям по сравнению

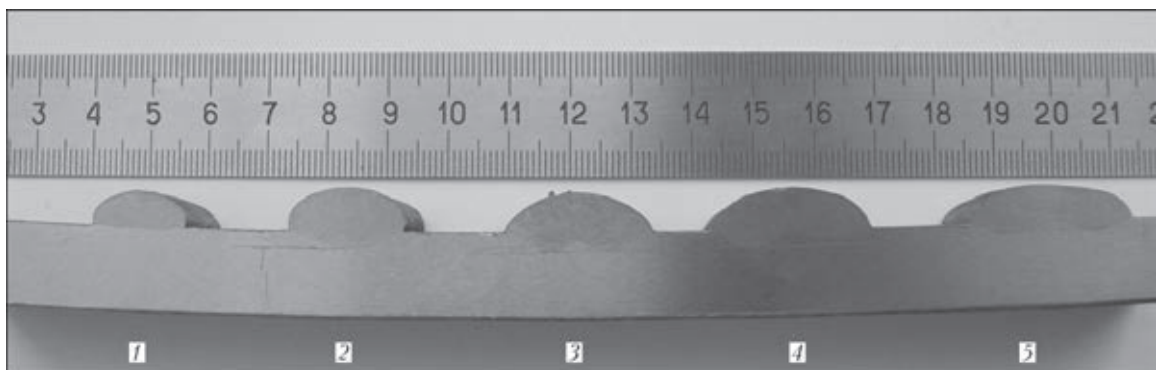


Рис. 2. Макрошлиф наплавки под флюсом АН-60 с различным межэлектродным расстоянием: 1 — 1; 2 — 6; 3 — 8; 4 — 10,5; 5 — 12 мм

Таблица 1. Влияние режимов наплавки на склонность к межкристаллитным проникновениям бронзы в сталь ($U_d = 35 \text{ В}$)

| Номер наплавки | Режим наплавки | | Погонная энергия, кДж/м | Размеры валика, мм | | | Проникновения | |
|----------------|------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|-----------|-----------------------|---------------|------------|
| | $I_n, \text{ А}$ | $v_n, \text{ м/ч}$ | | Ширина | Высота | Глубина проплавления* | Сечение I | Сечение II |
| 1 | 210 | 14 | 496,8 | 14,5...15,5 | 4,5...5,0 | $\leq 0,2$ | Нет | Нет |
| 2 | 310 | 14 | 669,6 | 20,0...20,5 | 5,0...5,5 | 1,5...2,5 | 2 | Нет |
| 3 | 390 | 14 | 864,0 | 24...25 | 5,3...5,5 | 1,5...2,5 | 1 | 2 |
| 4 | 310 | 14 | 478,8 | 14,5...15,0 | 5,5...6,0 | 1,0...2,5 | Нет | Нет |
| 5 | 310 | 14 | 576,0 | 16,5...17,0 | 5,0...5,5 | 0,5...1,0 | Нет | 2 |
| 6 | 310 | 14 | 669,6 | 19,5...20,0 | 5,0...5,2 | 2,5...1,5 | 2 | Нет |
| 7 | 310 | 10 | 936,0 | 20...21 | 5,0...5,5 | $\leq 0,5$ | 3 | 2 |
| 8 | 310 | 14 | 669,6 | 19,5...20,0 | 5,0...5,2 | 2,5...1,5 | 2 | Нет |
| 9 | 310 | 14 | 410,4 | 18,0...18,5 | 4,0...4,5 | $\leq 0,5$ | Нет | Нет |

* Глубина проплавления определялась также на двух сечениях.

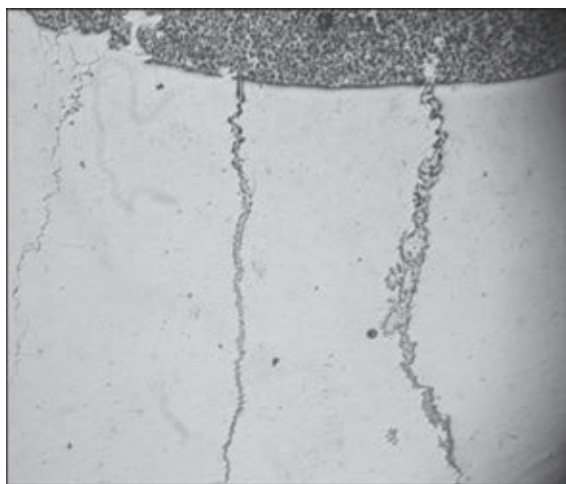


Рис. 3. Внешний вид межкристаллитного проникновения бронзы в сталь ($\times 25$)

с другими медными сплавами. При этом данные дефекты снижают прочность соединения, также они отрицательно влияют на работу изделия при знакопеременных термических и динамических нагрузках.

Как показали металлографические исследования шлифов с наплавкой оловянной бронзы на сталь, изменение концентрации в наплавленном металле Sn и P в пределах, регламентируемых ГОСТ 613–79 для бронзы марки Бр010Ф1 (9,0...11,0 % Sn; 0,4...1,1 % P) несущественно влияет на количество и протяженность межкристаллитных проникновений. Более значительное влияние на наличие или отсутствие проникновений имеют режимы наплавки.

Для оценки влияния на межкристаллитные проникновения режимов наплавки выполняли комплекс исследований, в каждом из которых один параметр изменялся, а остальные оставались постоянными. Наплавку выполняли расщепленным электродом при межэлектродном расстоянии 6 мм проволокой ППБр.ОФ10-1 диаметром 3 мм на стальную пластину марки Ст20 толщиной 12 мм. Из каждого валика вырезали темплеты и на шлифах поперечного сечения (не менее двух сечений)

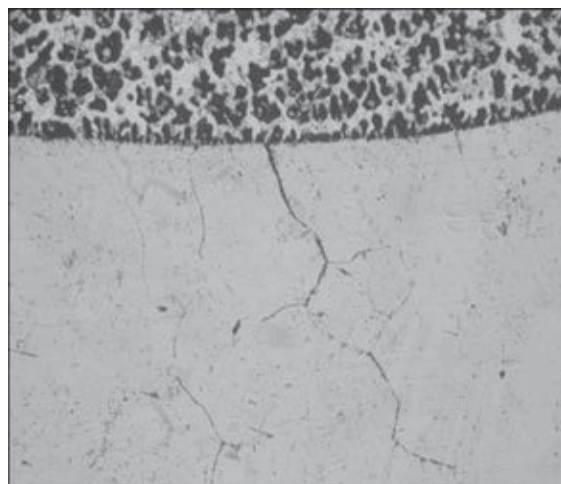


Рис. 4. Растрескивание стали без заполнения бронзой ($\times 156$)

определяли наличие и характер межкристаллитных проникновений. Фиксировали также размеры поперечного сечения валика и глубину проплавления основного металла. Результаты опытов приведены в табл. 1.

Из представленных в табл. 1 результатов видно, что на вероятность появления межкристаллитных проникновений оказывают влияние все параметры сварки, но ток и скорость наплавки в большей степени, чем напряжение дуги. Причем существует некоторое пороговое значение погонной энергии, ниже которого межкристаллитные проникновения маловероятны. Для приведенного способа наплавки это приблизительно 500 кДж/м.

Какого-либо влияния на межкристаллитные проникновения глубины проплавления не обнаружено. Межкристаллитные проникновения равновероятны и при проплавлении (до 2,5 мм) и почти при полном его отсутствии ($\leq 0,5$) — образцы наплавки № 3 и № 7. Погонная энергия в этом случае приблизительно одинакова. Характерный вид межкристаллитных проникновений показан на рис. 3.

По-видимому, образование межкристаллитного проникновения происходит в несколько этапов.

Таблица 2. Химический состав и механические свойства литой и наплавленной бронзы

| Материал | Sn | P | Mn | Fe | Твердость <i>HV</i> | Износ | |
|----------------------------------------------|------------|------|-----|------|---------------------|----------------------------|-----------------|
| | | | | | | бронзы, мм ³ /м | контртела, г/м* |
| Литая бронза марки Бр.010Ф1 | 9,0...11,0 | 0,5 | – | – | 130...140 | 0,00585 | 0,0013 |
| Наплавка ПБр.0Ф10–1 под флюсом АН60 (2 слой) | 9,3 | 0,47 | 0,5 | 2,92 | 150...160 | 0,0016 | 0,00135 |

* Контртело Ст45 (отжиг — закалка) *HV* 200...210.

На первом этапе вследствие эффекта снижения прочности и пластичности стали, которая контактирует с расплавленной бронзой, происходит разрушение по границе кристаллитов стали (левая часть рис. 3). Наличие зародышевых образований трещин в стали подтверждается рис. 4, где заполнения бронзой нет, но четко видно расслоение между кристаллитами в стали.

На следующем этапе в образовавшуюся трещину проникает жидкая бронза, которая создает дополнительное давление на «стенки» трещины, что приводит к ее раскрытию. При этом трещина раскрывается со скоростью поступления к ее вершине медного сплава, поскольку даже в конце трещины нет никаких дефектов типа несплавлений или пустот [10].

Исследования химического состава показали, что наплавленный металл по составу отвечает литой оловянной бронзе марки Бр.010Ф1 (табл. 2). Приведенные в табл. 2 механические свойства свидетельствуют о том, что твердость наплавленного металла по сравнению с литым несколько выше. При этом износостойкость слоя бронзы наплавленного под флюсом в 3,0...3,5 раза выше литой бронзы. Следует отметить, что износ контртела при этом практически одинаков, из чего можно сделать вывод об одинаковой прирабатываемости пар трения бронза–сталь.

Вывод

1. Для наплавки высокооловянной бронзы на сталь разработана специальная порошковая проволока, обеспечивающая получение качественного наплавленного металла требуемого состава.

2. Для снижения содержания железа в наплавленном металле наиболее эффективно применение расщепленного электрода с использованием оптимальных режимов наплавки.

3. Снижение тенденции к образованию межкристаллитных проникновений достигается за счет уменьшения погонной энергии.

1. *Осинцев О.Е., Федоров В.Н.* Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с.
2. *Илюшенко В.М., Лукьянченко Е.П.* Сварка и наплавка меди и медных сплавов. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 396 с.
3. *Григоренко Г.М.* К вопросу об образовании пор в сварных швах // Автомат.сварка. – 1970. – № 10. – С. 220–229.
4. *Походня И.К.* Газы в сварных швах. – М.: Машиностроение, 1972. – 256 с.
5. *Походня И.К., Махненко В.И.* О кинетике образования пор в сварных швах // Автомат. сварка. – 1971. – № 7. – С. 20–23.
6. *Илюшенко В.М., Белов А.С., Кинович А.П.* Эффективность наплавки медных сплавов на сталь расщепленным электродом // Наплавка. Опыт и эффективность применения. – Киев: ИЭС. им. Е.О. Патона, 1985. – С. 82–86.
7. *Илюшенко В.М.* Прогрессивные методы электродуговой наплавки медных сплавов на сталь // Сварка и наплавка тяжелых цветных металлов: Мат. I Всесоюз. семинара. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР, 1978. – С. 30–32.
8. *Новые сварочные материалы и технологические особенности сварки и наплавки изделий из медных сплавов и разнородных металлов / А.Е. Вайнерман, С.А. Пичужкин, С.П. Чернобаев и др. // Междунар. науч.-техн. конф. «Сварочные материалы – 2012». – С. 141–147.*
9. *Исследование особенностей и разработка технологий сварки медных сплавов со сталями и наплавки медных сплавов на сталь / В.В. Рыбин, А.Е. Вайнерман, А.В. Баранов и др. // Вопр. материаловедения. – 2006. – № 1. – С. 220–229.*
10. *Вайнерман А.Е.* Механизм межкристаллитного проникновения при наплавке медных сплавов на сталь // Там же. – 1981. – № 6. – С. 22–26.

Поступила в редакцию 03.04.2015

■ СФЕРИЧЕСКИЙ КАРБИД ВОЛЬФРАМА

В ИЭС разработана технология производства порошковых тугоплавких материалов, в частности, литых карбидов вольфрама WC+W₂C, с гранулами сферической формы методом термометророботного распыления. Создано специализированное оборудование, позволяющее получать гранулы размером от 50 до 850 мкм с производительностью 15–20 кг материала в час.

