

УДК 621.791.18

Особенности ликвации железа при диффузионной сварке биметалла сталь-бронза

Еремин Евгений Николаевич^(*)eremin.46@mail.ru
SPIN-код: 2894-2461

Тибяев Максим Сергеевич

max-slim@mail.ru

ОмГТУ, Омск, Россия

Аннотация. Изучен процесс образования сварного соединения сталь-бронза полученного диффузионной сваркой. Установлена значительная ликвация железа в твердо-жидком состоянии соединяемых металлов. Это обусловило образование в зоне сплавления слоя зерен твердого раствора, который и определяет свойства сварного соединения.

Ключевые слова: диффузионная сварка, биметалл сталь-бронза, ликвация железа, структура, химический состав

Введение. В узлах различных изделий все большее распространение получает использование биметаллов. Так, в частности, в гидравлических агрегатах используются подшипники скольжения, в стальном корпусе которых устанавливается бронзовая втулка [1]. Наиболее рациональным способом соединения таких деталей является диффузионная сварка [2].

При этом способе соединяемые детали приводятся в тесный контакт и нагреваются до температуры твердо-жидкого состояния легкоплавкой бронзы. Жидкая фаза смачивает сталь и далее, при изотермической выдержке, за счет физико-химических процессов на границе раздела твердого и твердо-жидкого металлов формируется биметаллическое соединение [3]. При этом, в структуре соединения развиваются ликвационные явления [4]. На конечную структуру и свойства таких соединений оказывает, в первую очередь, ликвация железа.

Методы и материалы; результаты. В работе изучена ликвация железа при диффузионной сварке соединения — высокоуглеродистая легированная сталь 7ХГ2ВМФ-оловянистая бронза БрО10С2НЗ.

Диффузионную сварку проводили в установке СГВ-2-4 при вакууме $6,67 \times 10^{-5}$ Па, температуре 850 °С и выдержке 60 мин. Металлографию осуществляли на оптическом микроскопе Olympus (Carl Zeiss). Ликвацию железа определяли точечным энергодисперсионным анализом (ЭДА) с использованием растрового электронного микроскопа JCM-5700 JEOL со спектрометром JED-2300.

Микроструктура полученного сварного соединения показана на рисунке.

В сварном стыке отчетливо видны структуры диффузионных зон. Существующий у поверхности стали на стадии смачивания сплошной фронт жидкой фазы (светлое поле) нарушается растущими зернами новой фазы.



Микроструктура полученного сварного соединения (x1000) с точками ЭДА

Наблюдается сильное растворение стали вследствие проникновения расплава по границам зерен. В некоторых участках соединения отчетливо видно вымывание мелких зерен стали и переход их в пограничный слой бронзы, где происходит кристаллизация и образуется слой зерен твердого раствора глубиной 15–20 мкм.

Результаты точечного сканирования (см. рисунок) химического состава сварного соединения стыка по железу приведена в таблице.

Результаты точечного сканирования химического состава сварного соединения стыка по железу

Точка...	1	2	3	4	5	6	7	8
Fe, % ...	89,2	89,8	88,1	84,2	55,8	0,9	0,5	0,3

Анализируя полученные данные можно отметить, что процесс кристаллизации (намораживания) твердого раствора у поверхности стали контролируется диффузией атомов железа в объем жидкого расплава через пограничный слой. Формирование соединения завершается образованием переходной зоны из диффузионных слоев, узкого со стороны стали (до 20 мкм) и широкого со стороны бронзы (до 50 мкм), представляющих собой соответственно твердые растворы на основе железа и меди.

После образования на поверхности стали зерен «новой фазы», атомы железа поступают в жидкую фазу бронзы путем диффузии через образовавшийся слой твердой фазы, где параметры диффузии на несколько порядков ниже, чем в жидком сплаве [5]. В связи с этим, имеет место значительная ликвация

железа в зоне соединения. Так, концентрация железа в твердой стали составляет 89,2 %, в жидкости возле фронта изотермической кристаллизации составляет 55,8 %, а в бронзе она доходит до 0,3 %. При этом следы железа в бронзе обнаруживаются даже на расстоянии от границы соединения со сталью, равном 50 мкм.

Заключение. Решающим фактором в формировании биметаллического соединения сталь-бронза при диффузионной сварке является ликвация железа в твердо-жидком состоянии соединяемых металлов. Вследствие перехода относительно большого количества частиц стали в пограничный объем жидкой фазы бронзы в зоне сплавления образуется слой зерен твердого раствора, который и определяет прочностные свойства сварного соединения. Полученные значения ликвации железа использованы при отработке режимов диффузионной сварки стали с бронзой.

Список источников

- [1] Лепешкин А.В., Михайлин А.А., Шейпак А.А. *Гидравлика и гидропневмопривод*. Москва, ИНФРА-М, 2025, 446 с.
- [2] Joshi G.R., Badheka V.J., Darji R.S. The joining of copper to stainless steel by solid-state welding processes: a review. *Materials*, 2022, vol. 15, art. no. 7234. <https://doi.org/10.3390/ma15207234>
- [3] Люшинский А.В. *Диффузионная сварка разнородных материалов*. Москва, ИЦ «Академия», 2006, 208 с.
- [4] Новиков И.И., Золотаревский В.С. *Дендритная ликвация в сплавах*. Москва, Наука, 1966, 156 с.
- [5] Никитин В.И. *Физико-химические явления при взаимодействии жидких металлов с твердыми*. Москва, Атомиздат, 1967, 441 с.