

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СВАРНОГО ШВА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Юсуфбеков А.А.<sup>1</sup>, Колесникова К.А.<sup>2</sup>, Гальченко Н.К.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИ ТПУ, ОМШ, 4АМ2К

<sup>2</sup>НИ ТПУ, ОМШ, к.т.н., доцент,

E-mail: kak30@tpu.ru

<sup>3</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, с.н.с., к.т.н

Большое количество публикаций, посвященных исследованию процесса сварки, убедительно показывают, что высокое качество и работоспособность соединений зависят в значительной степени от метода и технологии сварки [1]. Наиболее перспективной технологией является электронно-лучевая сварка (ЭЛС), обладающая широкими технологическими возможностями.

В работе были запланированы и частично проведены эксперименты по изучению различных схем легирования сварного шва при ЭЛС.

Выбор составов порошковых материалов был обусловлен следующим: механическая смесь медного порошка М1 (60 %вес.) и железного (40 %вес.) при сварке обеспечивает получение шва, по составу и физическим свойствам близкого к основному металлу. Из данных работы [2] следует, что для получения наиболее работоспособных соединений необходимо, чтобы металл шва содержал 5–45 % Fe. Порошки из бронзы Бр Х0,8 и никельхромового сплава ПР-НХ15СР2 имеют в своих составах в микроколичествах легирующие элементы, являющиеся сильными раскислителями, которые после сварки не остаются в составе твердых растворов, а образуют соединения, повышающие механические свойства сварного шва.

По результатам исследований, первичной структуры сварного шва, выполненного с присадочным материалом из Бр Х0,8, установили наличие нескольких характерных зон микроструктуры по высоте шва, отличающихся различным направлением и формой первичных кристаллитов, указывающих на структурную неоднородность (рис. 1, а, б).

В верхней части сварного шва (рис. 1, а) на границе раздела сварной шов-медь прилегающая область структуры шва представляет собой зернистую структуру. Нижняя зона в поперечном сечении состоит из столбчатых кристаллитов, срастающихся между собой (рис. 1, б). Их оси направлены параллельно между собой и перпендикулярны линии сплавления. Изменение морфологии структурных составляющих по глубине шва свидетельствует об изменении характера процесса кристаллизации.

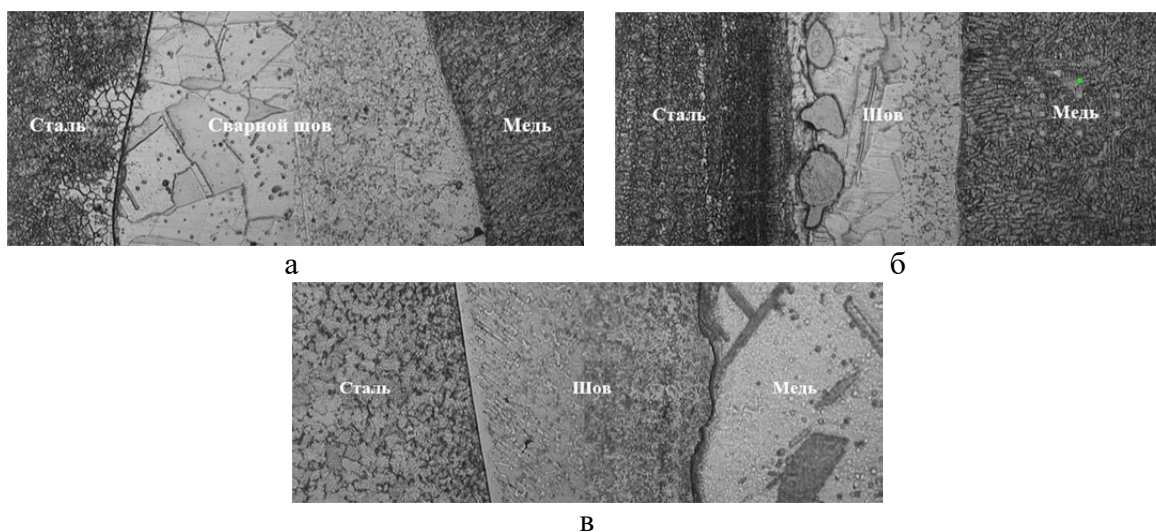


Рис. 1. Микроструктура верхней части сварного шва на границе раздела сталь-шов-медь (а); нижней части сварного шва на границе раздела сталь-шов-медь (б) (материал шва Бр Х0,8); на границе раздела сталь-шов-медь (в) (материал шва ПР-НХ15СР2)  $\times 500$

Уменьшение размеров структурных составляющих и их срастание в нижней части шва говорит о повышении скорости охлаждения и кристаллизации в этой области в связи с уменьшением сечения канала проплавления, изменением интенсивности теплоотвода и градиентом температур на фронте кристаллизации. Несмотря на то, что трещин и дефектов в структуре сварного шва нами не обнаружено, практика анализа разрушений показывает, что горячие трещины, как правило, возникают именно в таких структурах по линиям стыка кристаллитов, по границам ячеек и дендритов, образуя зоны слабины по оси шва. Следует отметить так же наличие в нижней и корневой частях сварного шва проникающих областей бронзы в медь (рис. 1, б).

Твердость сварного шва, выполненного с присадочным материалом из бронзы, составляет: основной металл (Ст. 3) – 150–300 HV; металл шва (бронза) 250–350 HV; основной металл (медь) в зоне сплавления 200–300 V.

Микроструктура сварного шва, выполненного с использованием присадочного материала из никельхромового сплава ПР-НХ15СР2 представлена на рис. 1, в. Из рисунка видно, что границы раздела свободны от дефектов и пор. При сварке формируется дендритообразная структура  $\gamma$ -твердого раствора на основе Ni. Структура сварного шва меняется по его глубине. По мере увеличения температуры и времени существования сварочной ванны расплава размер эвтектических колоний, формирующихся при их охлаждении, увеличивается верхней области шва.

Так же в структуре, по данным РФА, содержится тригональный карбоборид  $Me_7(CB)_3$  в виде скелетообразных дендритов. Твердость сварного шва, выполненного с использованием присадочного материала ПР-НХ15СР2 находится в пределах 450–700 HV.

Во всех случаях металлографический анализ сварных соединений показал, что на оптимальных режимах сварки обеспечивается хорошее формирование швов при отсутствии в них макро и микроскопических дефектов, т. е. исследуемые присадочные материалы позволяют получить при ЭЛС сварные соединения с достаточной стойкостью против образования горячих трещин. Но использование высоколегированных присадочных материалов, способных в процессе сварки создавать твердые и хрупкие химические соединения, являющиеся при определенных условиях ведения сварки концентраторами напряжений, может привести к растрескиванию и разрушению сварного шва в процессе эксплуатации.

Применение многопроходной электронно-лучевой сварки плавлением с подачей в сварочную ванну присадочного порошкового материала позволило постепенно заполнять «разделку», обеспечить «мягкий» термический цикл и избежать возникновения существенных напряжений в зонах термического влияния. Это, в конечном счете, способствовало повышению качества сварных соединений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0009.

### **Список литературы**

1. Патон Б.Е., Бондарев А.А.. Современное состояние и новые технологии электронно-лучевой сварки конструкций // Автомат. сварка – 2004. – № 11. – С. 23–31.
2. Шутов Б.А., Ерохин А.А. Об оптимальном составе шва при сварке плавлением меди с низкоуглеродистой сталью // Автоматическая сварка – № 11. – 1970. – С. 71–73.