Разработка технологий изготовления опорной структуры Центральной Сборки Дивертора (ЦСД) ИТЭР

С.М. Акимов\*, А.В. Лапин, С.Н. Мазаев, Г.В. Маринин\*, А.Н. Маханьков, В.А. Миргородский

РФ, Санкт-Петербург, ОАО «НИИЭФА», [mazaev@sintez.niiefa.spb.su](mailto:mazaev@sintez.niiefa.spb.su)  
\*РФ, Санкт-Петербург, ООО «Русские технологии», [rtechster@gmail.com](mailto:rtechster@gmail.com)

Опорная структура Центральной Сборки Дивертора (ЦСД) состоит из стальной опорной конструкции (СОК) и контактирующими с плазмой куполом, внутренней отражающей мишенью (ВОМ) и наружной отражающей мишенью (НОМ). СОК ЦСД включает в себя коллектор купола, коллектор НОМ и коллектор ВОМ, соединенные между собой толстостенными трубами и тонкостенные трубки охлаждения. Тонкостенные трубки охлаждения соединяют контактирующие с плазмой 12 элементов купола, 10 элементов ВОМ и 12 элементов НОМ с соответствующими коллекторами.

Контактирующие с плазмой элементы купола, НОМ и ВОМ представляют собой коробчатые структуры, состоящие из оснований (сталь 316L(N)-IG) и биметаллических CuCrZr/316L(N)-IG (бронза/сталь) крышек. Для соединения оснований с крышками разработана технология лазерной сварки стыковых соединений со 100 % проплавлением, качеством швов соответствующим EN ISO 13919-1 Level B и минимальным брызгообразованием. Лазерная сварка выполняется в технологической ячейке FlexLase оснащенной волоконным лазером ЛС-15 мощностью 15 кВт и роботом Motoman HP50.

Сварка СОК ЦСД включает в себя орбитальную сварку толстостенных труб с коллекторами купола, НОМ и ВОМ, лазерную сварку заглушек коллекторов купола, НОМ и ВОМ и орбитальную сварку коллектора ВОМ с входными и выходными тройниками.

Многопроходная орбитальная аргонодуговую сварка труб из стали 316L диаметром 114,3 мм с толщиной стенки 8,56 мм и диаметром 141,3 мм с толщиной стенки 9,53 мм с коллекторами купола из стали 316L(N)-IG, НОМ и ВОМ из стали ХМ-19 является одной из сложнейших и основных операций по сварке СОК ЦСД. Сложность данной орбитальной сварки связана с большим количеством проходов и, как результат, большим объемом расплавленного металла, который при кристаллизации дает усадку и вызывает сильные сварочные напряжения и деформации. Т.к. конструкция СОК представляет собой два параллельных треугольника (которые сами по себе являются жесткими конструкциями) жестко связанных между собой, то поводки вызванные сваркой могут привести к разрушению или искажению геометрии СОК, что не позволит получить заданные размеры конструкции с точностью до 0,1 мм. Для уменьшения и контроля сварочных деформаций разработана оснастка для сборки и сварки СОК, которая позволяет жестко фиксировать коллекторы перед сваркой, и дает возможность свободной усадки после сварки каждого прохода. Для уменьшения деформаций при сварке была смоделирована последовательность выполнения сварки двумя орбитальными головками одновременно. Дополнительно положения коллекторов между проходами контролировались измерительной системой на базе лазерного трекера APIRadian 20 с точностью не хуже 10 мкм, что позволяло изменением последовательности проходов компенсировать возникающие деформации.

Разработанные технологии орбитальной и ручной аргонодуговой сварки позволяют получать качество швов удовлетворяющих EN ISO 5817 Level B.

Для всех технологий сварки ЦСД был разработан, принят российским агентством ИТЭР и утвержден международной организацией ИТЭР предварительный пакет документов по сварке (Preliminary Welding Data Package). Все технологии, разработанные для выполнения сварки стальной опорной конструкции, и персонал выполняющий сварку аттестованы международной независимой организацией Бюро Веритас.