

В.О. КИРИЛЛОВА^{1*}, Д.М. БАЧУРИНА¹, Ю.А. ГУРОВА¹, Н.С. ПОПОВ¹,
Ш. ТАН², А.Н. СУЧКОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия

²Hefei University of Technology, Kumaй

*vok11012002@gmail.com

МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ SMART СПЛАВОВ ВОЛЬФРАМА И МАЛОАКТИВИРУЕМЫХ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ

Разработка демонстрационного термоядерного реактора ДЕМО является необходимым шагом для освоения термоядерной энергетики. В качестве материалов, обращенных к плазме, предполагается использование вольфрама или его сплавов, а в качестве конструкционного материала — малоактивируемых ферритно-мартенситных сталей. Особый интерес представляют так называемые SMART сплавы вольфрама [1-2], которые разработаны для того, чтобы предотвратить окисление вольфрама в случае возникновения аварии. В то же время, существует целый ряд различных марок малоактивируемых ферритно-мартенситных сталей, каждая из которых требует своего режима термообработки. Целью данной работы являлось изучить микроструктуру и свойства паяных соединений оценить SMART-сплавов WCrY и WCrZr с ферритно-мартенситными сталями Eurofer и CLAM.

Предложен способ соединения SMART сплавов и ферритно-мартенситных сталей методом высокотемпературной пайки с использованием аморфного припоя 48Ti-48Zr-4Be мас.% (TiZr4Be[4]). Температурно-временные режимы пайки выбраны таким образом, чтобы обеспечить термообработку стали. В работе исследованы следующие соединения:

- WCrY/TiZr4Be/Eurofer, режим 980°C/30 мин (скорость охлаждения 20°C/мин) + 750°C/90 мин [5];
- WCrY/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/Eurofer, 980°C/30 мин (скорость охлаждения 20°C/мин) + 750°C/90 мин;
- WCrZr/TiZr4Be/CLAM, 1050°C/30 мин (скорость охлаждения 20°C/мин) + 750°C/90 мин
- WCrZr/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/CLAM: 1050°C/30 мин (скорость охлаждения 20°C/мин) + 750°C/90 мин.

Установлено, что паяные соединения WCrY/TiZr4Be/Eurofer, WCrZr/TiZr4Be/CLAM чувствительны к любым механическим нагрузкам из-за остаточных напряжений и образования хрупких фаз твердостью

1300 HV_{0,1}. Использование Ta в качестве промежуточного слоя позволяет избежать разрушения соединения [3], и в случае WCrY/TiZr4Be/Eurofer предотвращает появление трещин и пор.

Для паяных соединений с промежуточным слоем из Ta характерно образование игольчатых фаз Ta₂Be на границе раздела Ta и стали, чем обусловлен пик на графике микротвердости, отвечающий значениям порядка 600 HV_{0,1}. Второй пик расположен на границе вольфрамового сплава и Ta в диффузной области (значения порядка 600 HV_{0,1} для WCrY/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/Eurofer). Для паяного шва WCrZr/TiZr4Be/Ta наблюдается образование сдвоенного пика со средним значением порядка 500 HV_{0,1} из-за наличия каверн на границе W-Ta фазы.

Проведены термоциклические испытания паяных соединений WCrY/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/Eurofer и WCrZr/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/CLAM в интервале температур 300-600°C. Установлено, что данные паяные соединения выдерживают 100 циклов без разрушения. Проведены механические испытания на срез паяных соединений WCrY/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/Eurofer и WCrZr/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/CLAM. В соответствии с результатами механических испытаний на срез установлено, что разрушение происходит по шву W/TiZr4Be/Ta. Предел прочности на срез равен 187 ± 62 МПа и 104 ± 24 МПа для WCrY/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/Eurofer и WCrZr/TiZr4Be/Ta/TiZr4Be/CLAM соответственно.

Работа выполнена при поддержке Эндаумент Фонда НИЯУ МИФИ.

Литература

- [1] Sal E. et al. Microstructure, oxidation behaviour and thermal shock resistance of self-passivating W-Cr-Y-Zr alloys // Nuclear Materials and Energy. – 2020. – Т. 24. – С. 100770
- [2] Litnovsky A. et al. New oxidation-resistant tungsten alloys for use in the nuclear fusion reactors // Physica Scripta. – 2017. – Т. 2017. – №. T170. – С. 014012
- [3] Bachurina, D.; Suchkov, A.; Kalin, B.; Sevriukov, O.; Fedotov, I.; Dzhumaev, P.; Ivannikov, A.; Leont'eva-Smirnova, M.; Mozhanov, E. Joining of Tungsten with Low-Activation Ferritic–Martensitic Steel and Vanadium Alloys for Demo Reactor. Nucl. Mater. Energy 2018, 15, 135–142
- [4] Bachurina, D.; Suchkov, A.; Gurova, J.; Kliucharev, V.; Vorkel, V.; Savelyev, M.; Somov, P.; Sevryukov, O. Brazing Tungsten/Tantalum/RAFM Steel Joint for DEMO by Fully Reduced Activation Brazing Alloy 48Ti-48Zr-4Be. Metals 2021, 11, 1417
- [5] Pilloni L. et al. Development of innovative materials and thermal treatments for DEMO water cooled blanket // Nucl. Mater. Energy. Elsevier, 2019. Vol. 19, № November 2017. P. 79–86