

## **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ОКИСЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СПЛАВА Э110 С ХРОМОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

*С.Е. Ручкин, магистрант гр.0ДМ01,  
А.В. Пирожков, магистрант гр. 0БМ01,  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30,  
тел.(3822)-701-777 доб. 5413  
E-mail: [ruchkin70@gmail.com](mailto:ruchkin70@gmail.com)*

В настоящее время активно ведутся разработки толерантного топлива, необходимого для повышения безопасности работы ядерных энергетических реакторов с водой под давлением [1]. Краткосрочная стратегия разработки такого топлива состоит в нанесении защитных покрытий на циркониевые оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов). В качестве защитного покрытия можно использовать хромовое покрытие, полученное методом магнетронного распыления [2]. ТВЭЛ состоит из Zr оболочки в виде трубы с двумя концевыми заглушками. Внутри оболочки находится топливо на основе урана. Для присоединения концевых заглушек к оболочечной трубе и обеспечения герметичности ТВЭЛа применяется сварка. Поэтому особое внимание при разработке толерантного топлива стоит уделить стойкости к окислению сварных соединений Zr сплавов в условиях, имитирующих потерю теплоносителя в активной зоне ядерного реактора. Известно, что сварные соединения имеют более низкую стойкость к окислению ввиду изменения микроструктуры шва и его элементного состава. В настоящее время применяются специальные методы пост-обработки, например, вакуумный отжиг при температуре 570-580 °С для снижения числа дефектов структуры и восстановления механических свойств сварных соединений. Однако стойкость сварных соединений из циркониевых сплавов остаётся недостаточной при высоких температурах ввиду того, что слой оксида циркония, образующийся на поверхность ТВЭЛа не является защитным при температурах >600 °С. Поэтому дополнительные технологические приёмы должны быть применены для повышения коррозионной стойкости сварных соединений, в том числе нанесение защитных покрытий. Цель настоящей работы состоит в определении влияния осаждения Cr покрытия на стойкость к окислению соединений контактной стыковой сварки, изготовленных из циркониевого сплава Э110.

Были подготовлены образцы сварных соединений без и с Cr (~10 мкм) покрытиями, исследовано их поведение при высокотемпературном окислении на воздухе (рис. 1). Хромовые покрытия были получены на вакуумной ионно-плазменной установке, процесс напыления выполнялся с использованием мультикаатодной магнетронной распылительной системы (плотность мощности – 39 Вт/см<sup>2</sup>) в среде Ar (22 см<sup>3</sup>/мин) в течение 192 мин.

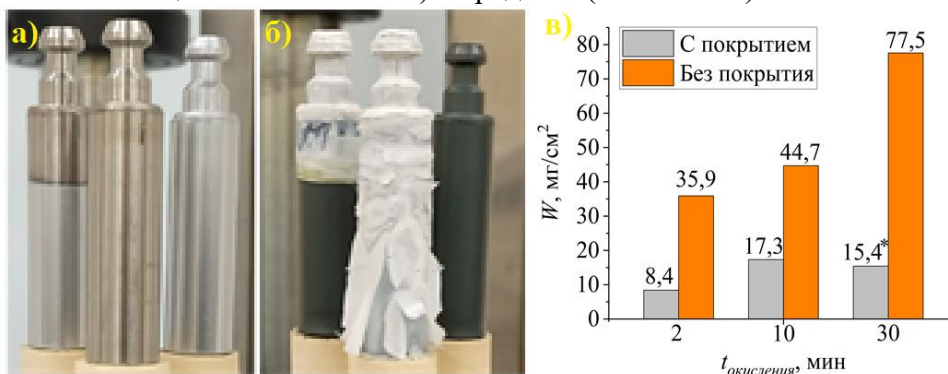


Рис. 1. Фотографии образцов (а) до и (б) после окисления при температуре 1100 °С на воздухе: образец слева – с частичным напылением; центральный образец – без покрытия; образец справа – с покрытием на всей внешней поверхности образца. Удельный привес образцов после окисления на воздухе (в).

Было выполнено окисление образцов на воздухе при температуре 1100 °С с изотермической выдержкой 2, 10 и 30 минут. До и после окисления проводились гравиметрические измерения образцов на аналитических весах с точностью  $10^{-4}$  г. На рис. 1, в показан удельный привес ( $W$ ) образцов после окисления. Наибольший привес наблюдается в случае образца, не имеющегося защитного покрытия. С увеличением длительности изотермической выдержки привес образцов заметно повышается. Образец с Cr покрытием имеет меньший привес после 30 мин ( $15,4 \text{ мг/см}^2$ ) чем после 10 мин ( $17,3 \text{ мг/см}^2$ ). Такой результат может быть вызван отслаиванием плёнки оксида циркония с внутренней (незащищённой) области образца в процессе проведения теста на окисление. Тем не менее полученные результаты показывают снижение окисления в 2-5 раз при нанесении защитного покрытия на внешнюю поверхность контактных стыковых соединений из циркониевого сплава Э110.

Образец с Cr покрытием имеет защищённую поверхность, она формируется за счёт образования плотного  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  слоя, который замедляет проникновение кислорода и азот в циркониевый сплав. Исключение составляет область грата сварного шва, где было обнаружено локальное окисление образца, как показано на рис. 2. По всей видимости при контактной стыковой сварке происходит выдавливание излишка расплавленного металла на поверхность оболочки. При охлаждении места сварки приводит к формированию неоднородной морфологии поверхности, шероховатость которой недопустимо большая для осаждения защитных покрытий микронных толщин с применением метода магнетронного распыления.

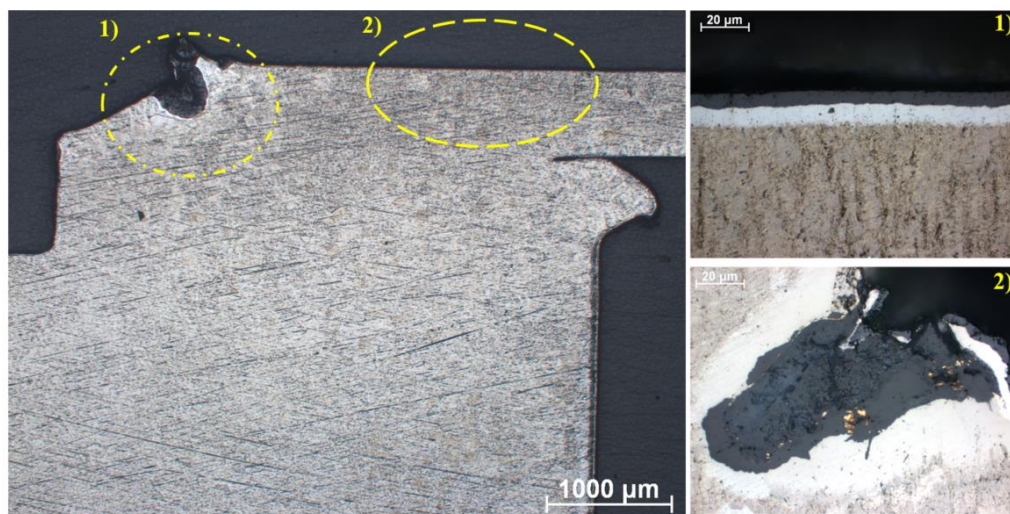


Рис. 2. Микроструктура образца с Cr покрытием: 1 – защищённая область; 2 - незащищённая область в области грата сварного соединения.

Результаты, полученные в рамках данной работы, указывают на необходимость нанесения защитных покрытий на всю внешнюю поверхность ТВЭЛа, а не только на оболочечную трубу. Они могут быть использованы для разработки технологии вакуумного осаждения защитных покрытий на циркониевые оболочки ТВЭЛов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-79-10116.

#### **Список литературы:**

1. Tang, C.; Stueber, M.; Seifert, H.J.; Steinbrueck, M. Protective coatings on zirconium-based alloys as accident-tolerant fuel (ATF) claddings. *Corros. Rev.* 2017, 35, 141–165
2. Brachet, J.C.; Rouesne, E.; Guilbert, et all. High temperature steam oxidation of chromium-coated zirconium-based alloys: kinetics and process. *Corros. Sci.*, 2020, 167, 108537.