

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ И БАРЬЕРНЫЕ СВОЙСТВА ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ Cr/Ta И Cr/Mo ДЛЯ ЦИРКОНИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ

А.В. Абдульменова, студентка гр. 0Б91,

Е.Б. Кашкаров, к.ф.-м.н., н.с.,

М.С. Сыртанов, к.т.н., доц.,

Д.В. Сиделёв, к.т.н., доц.

Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30,

E-mail: ava75@tpu.ru

В настоящее время циркониевые сплавы активно используются в ядерной энергетике при изготовлении тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) за счёт низкого сечения захвата тепловых нейтронов, высокой коррозионной и радиационной стойкости [1]. Тем не менее, возможные аварии с потерей теплоносителя (ЛОСА) могут привести к повышению температуры активной зоны, частичному или полному окислению циркониевых сплавов, и в последствии, к разрушению оболочек ТВЭЛов [2]. В данное время ведутся активные международные исследования, направленные на разработку оболочек ТВЭЛов, способных к эксплуатации как в нормальных условиях, так и обеспечивать безопасность при возможных аварийных условиях, например, ЛОСА [3]. Самым быстрореализуемым и простым путём считается применение технологий модифицирования поверхности циркониевых оболочек ТВЭЛов, позволяющих сформировать защитные покрытия, без изменения свойств циркониевых сплавов. На сегодняшний день наиболее перспективным материалом, рассматриваемым в качестве защитного покрытия для циркониевых оболочек ТВЭЛов, является хром. Однако, на границе раздела циркониевый сплав/хромовое покрытие при высоких температурах происходит формирование диффузионного слоя, который приводит к уменьшению толщины защитного хромового покрытия и может привести к ускоренной коррозии циркониевого сплава [4]. Одним из путей решения указанной проблемы является создание барьерного слоя между хромовым покрытием и циркониевым сплавом, способного предотвращать их взаимную диффузию. Целью настоящей работы является исследование барьерных свойств и коррозионной стойкости покрытий Cr/Mo и Cr/Ta, сформированных на поверхности циркониевого сплава Э110.

Покрытия наносились методом магнетронного распыления с использованием ионно-плазменной установки, разработанной в Томском политехническом университете [5]. Высокотемпературное окисление образцов проводилось в атмосферной печи ATS 3210 (Applied Test Systems Inc.) при нагреве на воздухе от 500 °С до 1100 °С со скоростью нагрева 20 °С/мин и последующей выдержкой в течение 1 ч. После окисления образцы охлаждались со скоростью ~20 °С/мин. Прирост массы образцов измеряли на аналитических весах CP 124S. Микроструктура нанесенных покрытий была проанализирована с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN VEGA3. Фазовый состав образцов исследовался методом рентгеновской дифракции с использованием рентгеновского дифрактометра XRD-7000S. Для идентификации фаз использовались база данных PDF4+ 2021 и программа «Search Match».

В ходе данной работы были исследованы барьерные свойства промежуточных слоёв Mo и Ta, сформированных между Cr покрытием и подложкой из сплава Э110, и защитной хромовой оболочкой по сравнению с однослойным хромовым покрытием. СЭМ изображения осаждённых покрытий показали формирование плотной столбчатой структуры покрытий для всех типов покрытий. Высокотемпературное окисление образцов показало, что однослойное хромовое покрытие имеет наименьший прирост веса по сравнению с двухслойными покрытиями (рисунок 1).

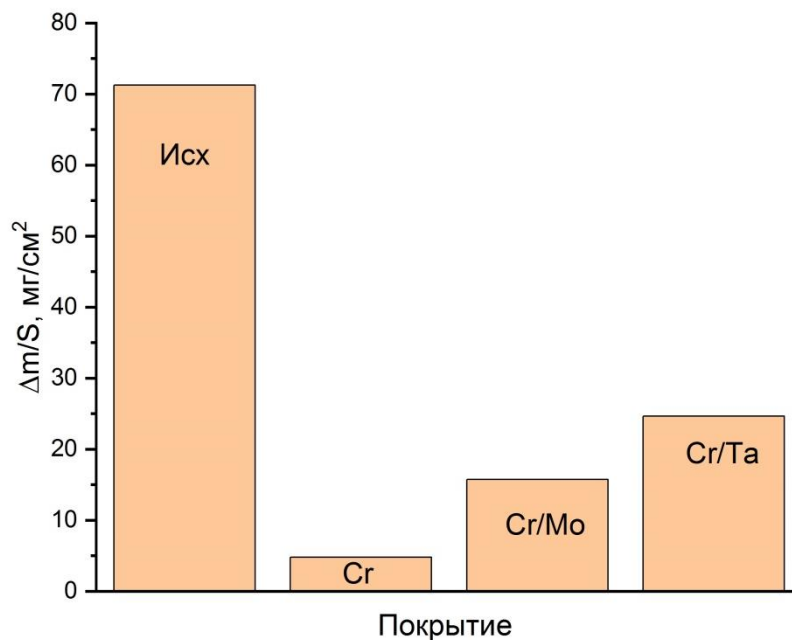


Рис. 1. Сравнительная диаграмма привесов окисленных образцов.

Анализ дифрактограмм в процессе линейного нагрева образцов с барьерным подслоем Мо, полученных с использованием источника синхротронного излучения ВЭПП-3, продемонстрировал образование фазы Mo_2Zr при достижении 1200°C . Образование этой фазы указывает на диффузию Мо в циркониевый сплав при высоких температурах также, как и хром в цирконий в однослойных хромовых покрытиях. В случае образца с промежуточным слоем из тантала, формирование интерметаллидных фаз в системе Zr-Ta-Cr не наблюдалось. Такое поведение может свидетельствовать об эффективном подавлении взаимной диффузии хрома и циркония. Однако результаты высокотемпературного окисления указывают на то, что окисление образца с танталовым слоем происходит наиболее активно. Возможно это связано с влиянием азота на динамику окисления покрытий. Для понимания механизма окисления циркониевого сплава на воздухе с защитным хромовым покрытием и барьерным танталовым слоем необходимо провести комплексное исследование изменения структурно-фазового состояния системы Zr-Ta-Cr после высокотемпературного окисления.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, проект № 21-79-00175.

Список литературы:

1. Allen T. R., Konings R. J. M., Motta, A. T. Corrosion of zirconium alloys // *Comprehensive nuclear materials*. – 2012. – Vol. 5. – P. 49-68.
2. Zinkle S. J., Terrani K. A., Gehin J. C., Ott L. J., Snead L. L. Accident tolerant fuels for LWRs: A perspective // *Journal of Nuclear Materials*. – 2014. – Vol. 448, No. 1-3. – P. 374-379.
3. Terrani K. A. Accident tolerant fuel cladding development: Promise, status, and challenges // *Journal of Nuclear Materials*. – 2018. – Vol. 501. – P. 13-30.
4. Brachet J. C., Rouesne E., Ribis J., Guilbert T., Urvoy S., Nony G., Toffolon-Masclat C., Le Saux, M., Chaabane N., Palancher H. High temperature steam oxidation of chromium-coated zirconium-based alloys: Kinetics and process // *Corrosion Science*. – 2020. – Vol. 167. – P. 108537.
5. Sidelev D. V., Kashkarov E. B., Syrtanov M. S., Krivobokov V. P. Nickel-chromium (Ni-Cr) coatings deposited by magnetron sputtering for accident tolerant nuclear fuel claddings // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 369. – P. 69-78.