

Радиационная стойкость электролитического хромового покрытия на внутренней поверхности оболочки твэла из стали марки ЭП823-Ш

Р. Ш. Исаев^{1,2}, П. С. Джумаев¹, М. С. Стальцов¹

¹ФГАОУ ВО «НИЯУ "МИФИ"», г. Москва, Россия

²ОИЯИ, г. Дубна, Россия

Коррозионное повреждение внутренней поверхности оболочек твэлов из ферритно-мартенситной стали ЭП823-Ш может рассматриваться как один из факторов, потенциально ограничивающих работоспособность твэлов с нитридным топливом при высоких выгораниях. Для снижения коррозионного взаимодействия внутренней среды твэла с оболочкой, необходимо предпринять дополнительные меры по увеличению коррозионной стойкости сталей оболочек твэлов. Одним из вариантов решения этой проблемы может быть применение радиационно- и коррозионностойких покрытий. Покрытия могут предотвращать

коррозионное повреждение ферритно-мартенситных сталей в жидком металле, но защитные свойства сильно зависят от содержания кислорода. Помимо поведения материалов в коррозионной среде, важно оценить свойства покрытий после облучения. Необходимо изучение эволюции микроструктуры под облучением и ее влияния на деградацию физико-механических свойств защитного покрытия.

В данной работе изучено влияние облучения высокоэнергетическими ионами гелия на структуру и механические свойства хромовых покрытий. Покрытие осаждено методом электролиза на внутреннюю поверхность оболочек твэла из ферритно-мартенситной стали ЭП823-Ш при постоянном токе. Для имитации радиационного повреждения нейтронами, образцы с хромовым покрытием на стали ЭП823-Ш были облучены ионами He^+ с энергией 2,4 МэВ. Облучение проводилось на электростатическом ускорителе ЭГ-5 Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ. Для определения флюенса соответствующего требуемому радиационному повреждению, был проведен расчет радиационной повреждаемости в системе «налетающая частица-мишень» с использованием программы SRIM-2013. Повреждения, нанесенные материалу, рассчитывались с использованием режима *Detailed Calculation with full Damage Cascades*. Энергия смещения хрома (спецификация Столлера) была установлена равной 37 эВ. Поглощенная доза облучения составил $1,2 \cdot 10^{18}$ ионов/см². Расчетная доза радиационного повреждения составила 8 сна на границе раздела покрытие-сталь. Температура образца во время облучения не превышало 100 °С и специального нагрева не производилось. Толщина хромового покрытия составило $3,1 \pm 0,2$ мкм. Расчетный пробег ионов He^+ с энергией 2,4 МэВ в системе покрытие-сталь составил 3,94 мкм (пик Брэгга). Радиационную стойкость покрытия из хрома оценивали путем оценки охрупчивания и распухания после облучения ионами гелия.

Образцы для ПЭМ-исследований (ламель) были подготовлены на двухпучковой установке VERSA 3D HighVac (FEI) с использованием ионного пучка Ga. Исследования микроструктуры образцов проводились с помощью ПЭМ Tecnai G2 F20 (FEI, Голландия). Оценка распухания покрытия проводилась в области, где было исключено влияние поверхности покрытия с одной стороны и имплантированных ионов гелия (начало пика Брэгга) с другой стороны (0,5-2,5 мкм). Облучение вызывает распухание покрытия за счет накопления вакансионных дефектов и атомов гелия в газовых пузырьках. В зернах покрытия формируются сферические газовые пузырьки, распределенные относительно равномерно по телу зерна. Главной задачей данного исследования было изучение границы раздела покрытие-сталь. При температуре облучения, не превышающей 100 °С на границе покрытие-сталь, имеется газовая пористость. Газовые пузырьки расположены вдоль границы раздела, отслоения и растрескивания покрытия не было обнаружено, покрытие сохранило хорошую адгезию с поверхностью стали.

Radiation resistance of electrolytic chrome coating on the inner surface of EP823-SH steel cladding

R. Sh. Isayev^{1,2}, P. S. Dzhumayev¹, M. S. Staltsov¹

Corrosive damage to the inner surface of cladding made of ferritic-martensitic steel EP823-Sh can be considered as one of the factors potentially limiting the performance of fuel rods with nitride fuel at high burnup. To reduce the corrosive interaction of the internal environment of the fuel element with the cladding, it is necessary to take additional measures to increase the corrosion resistance of cladding steels. One of the options for solving this problem may be the use of radiation- and corrosion-resistant coatings. Coatings can prevent corrosion damage to ferritic-martensitic steels in liquid metal, but the protective properties are highly dependent on the oxygen content. In addition to the behavior of materials in a corrosive environment, it is important to evaluate the properties of coatings after irradiation. It is necessary to study the evolution of the microstructure under irradiation and its effect on the degradation of the physical and mechanical properties of the protective coating.

In this work, the effect of irradiation with high-energy helium ions on the structure and mechanical properties of chromium coatings was studied. The coating is deposited by electrolysis on the inner surface of the cladding made of ferritic-martensitic steel EP823-Sh at direct current. To simulate radiation damage by neutrons, chromium-coated samples on EP823-Sh steel were irradiated with He⁺ ions with an energy of 2.4 MeV. The irradiation was carried out at the EG-5 electrostatic accelerator of the Laboratory of Neutron Physics of the JINR. To determine the fluence corresponding to the required radiation damage, a calculation of radiation damage in the “impinging particle-target” system was carried out using the SRIM-2013 program. Damage to the material was calculated using the mode “*Detailed Calculation with full Damage Cascades*”. The chromium displacement energy (Stoller specification) was set to 37 eV. The absorbed radiation dose was $1.2 \cdot 10^{18}$ ion/sm². The calculated dose of radiation damage was 8 dpa at the coating-steel interface. The sample temperature during irradiation did not exceed 100 °C and no special heating was performed. The thickness of the chrome coating was 3.1 ± 0.2 μm. The calculated range of He⁺ ions with an energy of 2.4 MeV in the coating-steel system was 3.94 μm (Bragg peak). The radiation resistance of the chromium coating was assessed by assessing embrittlement and swelling after irradiation with helium ions.

Samples for TEM studies (lamella) were prepared on a VERSA 3D HighVac (FEI) dual-beam setup using a Ga ion beam. The microstructure of the samples was studied using a Tecnai G2 F20 TEM (FEI, Holland). The swelling of the coating was assessed in the area where the influence of the coating surface on one side and implanted helium ions (the beginning of the Bragg peak) on the other side (0.5-2.5 μm) was excluded. Irradiation causes swelling of the coating due to the accumulation of vacancy defects and helium atoms in gas bubbles. Spherical gas bubbles are formed in the coating grains, distributed relatively evenly throughout the body of the grain. The main objective of this study was to study the coating-steel interface. At an irradiation temperature not exceeding 100 °C, there is gas porosity at the coating-steel interface. Gas bubbles are located along the interface; no peeling or cracking of the coating was detected; the coating maintained good adhesion to the steel surface.