

УДК 620.193

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ С ОБОЛОЧКОЙ ТВЭЛА ИЗ СТАЛИ ЭП823-Ш В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 420–650 °С

Р.Ш. Исаев*, П.С. Джумаев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Москва, Россия

**e-mail: RSIsayev@mephi.ru*

Поступила в редакцию: 30.06.2024

После доработки: 23.07.2024

Принята к публикации: 30.07.2024

Хромовое покрытие может увеличить коррозионную стойкость оболочки твэла из стали ЭП823-Ш в среде жидкого свинца при температуре до 650 °С. В свою очередь целесообразно блокировать диффузионное взаимодействие хромового покрытия и стали в течение всего периода эксплуатации твэла. Электронно-микроскопические исследования образцов после высокотемпературных испытаний показали наличие слоя взаимодействия «покрытие-сталь». При температуре 420 °С и времени выдержки 1000 ч хромовое покрытие сохранило адгезию, взаимодействия между покрытием и сталью не наблюдалось. Однако при испытании 540 и 650 °С и времени выдержки 1000 ч на границе «покрытие-сталь» появляется неравномерный по толщине слой взаимодействия в пределах 150–600 нм. Этот слой имеет сложный состав и блокирует дальнейшую взаимную диффузию компонентов стали и покрытия друг в друга. Сталь ЭП823-Ш содержит молибден и вольфрам около 1 мас.%, и эти элементы могут способствовать ускоренному образованию слоя взаимодействия. Анализ взаимодействия в системе «покрытие-сталь» показал перспективность использования хрома как защитного покрытия внутренней поверхности оболочки твэла из стали ЭП823-Ш.

Ключевые слова: коррозия, ферритно-мартенситная сталь, ЭП823-Ш, хромовое покрытие.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.354

EDN TPOLQW

ВВЕДЕНИЕ

Более эффективное использование отработанного ядерного топлива возможно посредством использования реакторов на быстрых нейтронах, которые разрабатываются в рамках реакторов четвертого поколения (Gen4) [1]. В России идет строительство демонстративного комплекса с реактором БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем, включающего заводы по переработке отработанного ядерного топлива, фабрики топлива в замкнутом топливном цикле [2, 3]. Успешная работа быстрых реакторов зависит в значительной степени от свойств конструктивных материалов активной зоны (оболочек твэлов, чехлов упругости тепловыделяющих сборок, направляющих каналов), которые работают в температурном диапазоне 400–650 °С и при высоком потоке быстрых нейтронов. Ферритно-мартенситные стали обладают высокой устойчивостью к радиационному набуханию и являются перспективными для быстрых реакторов [4].

Совместимость ферритно-мартенситных сталей со свинцом и эвтектикой свинец-висмут представляет собой значительную проблему при разработке быстрых реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Жидкометаллическая коррозия оказывает негативное влияние на хромистую сталь ЭП823-Ш (16Х12МВСФБР-Ш) [4] ферритно-мартенситного класса. Механизм жидкометаллической коррозии сталей отвечает физико-химическому растворению, если содержание кислорода в свинце превышает равновесное значение. Регистрируется селективное растворение компонентов стали с поверхности оболочек. В случае если концентрация кислорода меньше равновесного значения, продуктами коррозии является внешний оксидный слой магнетита, хромистая шпинель нестехиометрического состава типа $\text{Fe}(\text{Fe}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_4$, а также наблюдается развитие по границам зерен зоны внутреннего окисления. Пострадиационные испытания экспериментальных сборок с уран-плутониевым топливом, облученных в реакторах БН-600 и БОР-60, показали наличие коррозионного повреждения

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ С ОБОЛОЧКОЙ ТВЭЛА ИЗ СТАЛИ ЭП823-Ш В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 420–650 °С

внутренней стороны оболочек из ферритно-мартенситной стали ЭП823-Ш [5]. Чистый свинцовый теплопередающий подслоя между топливом и оболочкой вызывает растворение и отложения компонентов стали на внутренней поверхности оболочки [6]. Эффект растворения-осаждения наблюдается в высокотемпературной

части твэла. При увеличении длительности облучения происходит распространение и увеличение эффекта растворения-осаждения в нижнюю, относительно холодную часть твэла. При выгорании 5.5 % т.а. в высокотемпературной части твэла оболочки максимальная глубина растворения достигала 230 мкм (рис. 1).

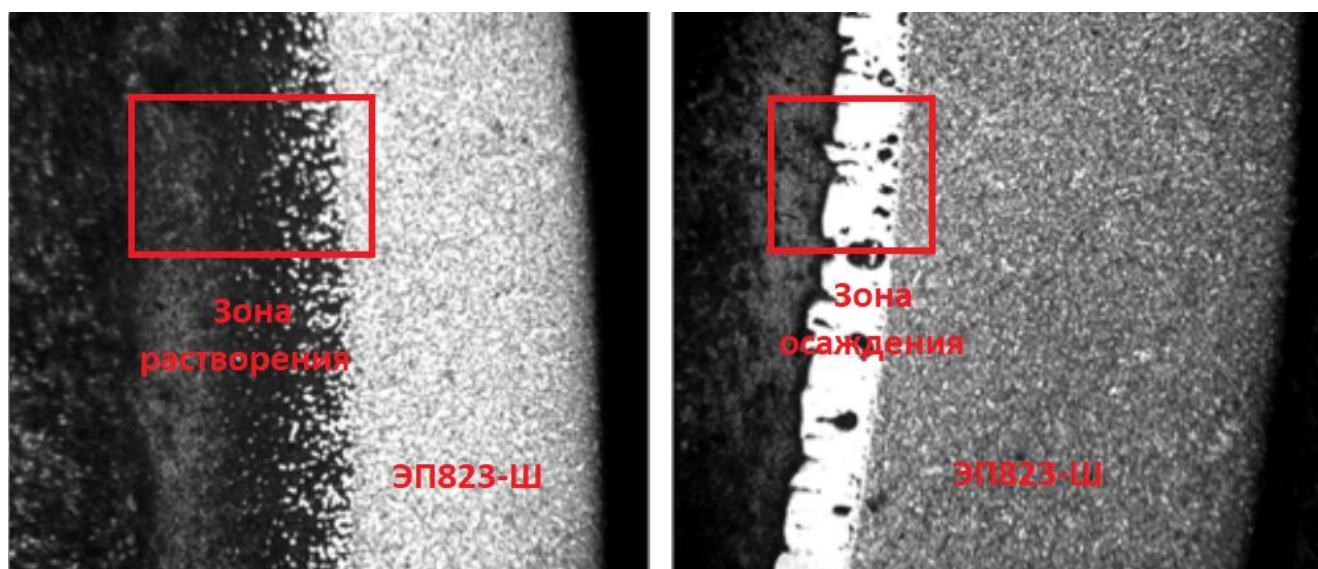


Рис. 1. Эффект растворения и осаждения оболочки твэла из стали ЭП823-Ш при выгорании 5.5 % т.а. [6]

Одним из вариантов решения этой проблемы может быть применение хромового покрытия. Для обеспечения работоспособности хромового покрытия на оболочках твэлов из стали ЭП823-Ш до температур 650 °С целесообразно блокировать диффузионное взаимодействие хромового покрытия и стали в течение всего периода эксплуатации твэла. Взаимная диффузия хрома и железа в объемном материале изучены, однако диффузионные свойства материала при толщинах покрытия (10–15 мкм) отличаются от свойств объемного материала, так как дефектность структуры, макронапряжения и другие параметры покрытия имеют значительное влияние. На диаграмме состояния хром-железо имеется интерметаллидная σ -фаза, которая стабильна в температурном диапазоне 440–820 °С (рис. 2). При 600 °С область стабильности σ -фазы простирается от 43 до 49 % (ат.) Cr, σ -фаза – хрупкая и обладает сложной тетрагональной структурой с тридцатью атомами в элементарной ячейке [7].

Обычно интерметаллиды отличаются высокой твердостью, повышенной хрупкостью и, соответственно, менее пластичны, чем исходные металлы. Это обстоятельство может привести к растрескиванию слоя взаимодействия покрытие-сталь и отслоению покрытия. Однако предполагается, что слой взаимодействия на границе покрытие-сталь из сложного интерметаллида может выступить как диффузионный барьер и предотвратит негативное взаимодействие между сталью и хромом при температуре до 650 °С. Целью данного исследования является выявление взаимодействия хромового покрытия с оболочкой твэла из стали ЭП823-Ш в диапазоне температур 420–650 °С. Данный температурный диапазон выбран исходя из рабочих параметров реактора БРЕСТ-ОД-300. Теплоноситель из жидкого свинца на входе в реактор будет иметь 420 °С, а на выходе – 540 °С. Однако у наиболее энергонапряженных твэлов температура оболочки может достигнуть 650 °С [4].

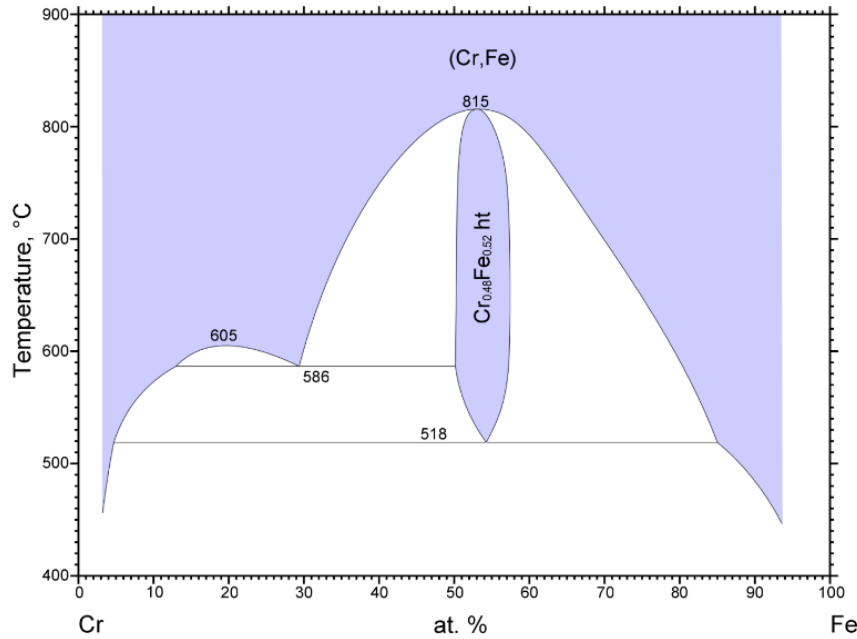


Рис. 2. Диаграмма состояния хром-железо в температурном диапазоне 400–900 °С [8]

1. МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ, ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ И АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ОБРАЗЦОВ

1.1. Электролитическое осаждение покрытий

В качестве образцов для исследования использованы фрагменты оболочки твэла длиной 50 мм, диаметром 9.7 мм (толщина стенки 0.5 мм), изготовленные из хромистой стали ЭП823-Ш (16Х12МВСБФР). Хромовые покрытия получали гальваническим способом, используя постоянный ток с различной продолжительностью. В качестве электролита использовали водный раствор хромовой (250 г/л) и серной (2.5 г/л) кислот. Во время процесса осаждения электролит поддерживался в изотермических равновесии при различных температурах. В качестве анода использовали проволоку из свинца, которая проходила через центр оболочки твэла и дополнительно натягивалась пружиной. оснащенный анодом, фрагмент оболочки твэла погружался в ванну с электролитом. Толщина хромового слоя линейно увеличивалась с увеличением времени процесса электролиза. Температурный диапазон для электролита был 25–35 °С, скорость электроосаждения ~0.35 мкм/мин. На рис. 3 показаны фрагменты оболочки твэла с хромовым покрытием на внутренней поверхности длиной 50 мм.



Рис. 3. Фрагменты оболочки твэла с хромовым покрытием на внутренней поверхности

1.2. Методика электронно-микроскопических исследований

Исследование топографии и микроструктуры поверхности и поперечных шлифов образцов проводили с помощью аналитического растрового электронного микроскопа EVO 50 XVP производства фирмы Carl Zeiss (Германия). Изображение в РЭМ получали в отраженных и обратнорассеянных электронах при изучении

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ С ОБОЛОЧКОЙ ТВЭЛА ИЗ СТАЛИ ЭП823-Ш В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 420–650 °С

топографии поверхности и микроструктуры, соответственно.

Анализ элементного состава образцов проводили методом рентгеноспектрального микроанализа с использованием энергодисперсионного ((INCA 350x-Act) и волнового (INCA Wave 500) спектрометров производства Oxford Instruments, совмещенных с растровым электронным микроскопом EVO 50. Спектрометр INCA 350x-Act оснащен кремний-дрейфовым детектором. Измерения проводили при ускоряющем напряжении 10–20 кВ и токе зонда 5–50 нА.

1.3. Высокотемпературные испытания в инертной среде и жидком свинце

Для высокотемпературных испытаний в свинце и аргоне оболочки твэла с хромовым покрытием отмывались в ультразвуковой ванне в ацетоне, затем в дистиллированной воде, высушивались и помещались в аргонный бокс. Для испытаний в свинце в отмытые образцы загружался свинец марки С0 ($Pb > 99.992\%$) и ниобиевая стружка в качестве геттера в соотношении 25:1, соответственно. По нашим оценкам концентрация кислорода в расплавленном свинце составляла $\sim 10^{-5}$ мас.%, при исходной концентрации кислорода $\sim 10^{-4}$ мас.% в свинце марки С0. Для испытаний в инертной среде в отмытые образцы загружался кислородный геттер и происходила герметизация в среде аргонного бокса. Далее образцы перемещались в муфельную печь и происходила выдержка при температурах 420, 540 и 650 °С в течение 1000 ч. После окончания высокотемпературных испытаний оболочки твэлов разрезались на фрагменты. После очистки от коррозионно-

активных компонентов (Pb, геттер) фрагменты образцов были переданы на металлографические анализы.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Электронно-микроскопические исследования образцов

На рис. 4 представлены РЭМ-снимки поверхности хромового покрытия и участка поперечного сечения границы покрытие-сталь после электроосаждения. Толщина хромового покрытия полученных образцов составила ~ 10 мкм, структура представлена мелкими равноосными зернами с размером 0.8–1.2 мкм. Размер зерна не изменяется по мере отдаления от границы сталь-покрытие. Покрытие обладает хорошей адгезией к поверхности основного материала, несплошностей, и трещин не наблюдается. Распределение хрома по толщине покрытия – однородное, в пределах чувствительности энергодисперсионного детектора примесей в хромовом покрытии не обнаружено.

Для первоначальной оценки взаимодействия хромового покрытия со сталью ЭП823-Ш были проведены кратковременные высокотемпературные испытания при 650 °С. На рис. 5 приведены снимки микроструктуры поперечного сечения внутренней поверхности оболочки твэла после 650 °С и времени выдержки 100 ч. Было выявлено, что на границе покрытие-сталь образуется интерметаллидный слой взаимодействия, имеющий состав преимущественно железо-хром. Толщина слоя взаимодействия составляет 150–250 нм.

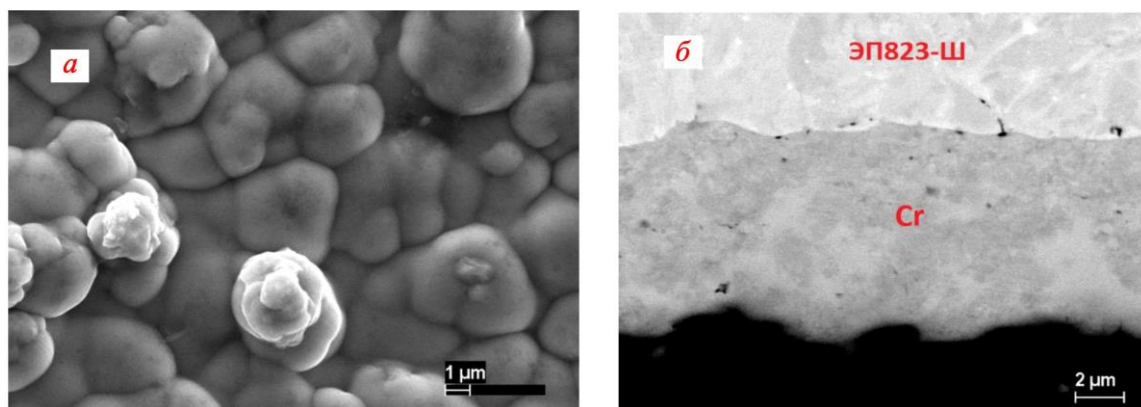


Рис. 4. РЭМ-снимки поверхности хромового покрытия (а) и поперечное сечения границы покрытие-сталь (б) после электроосаждения

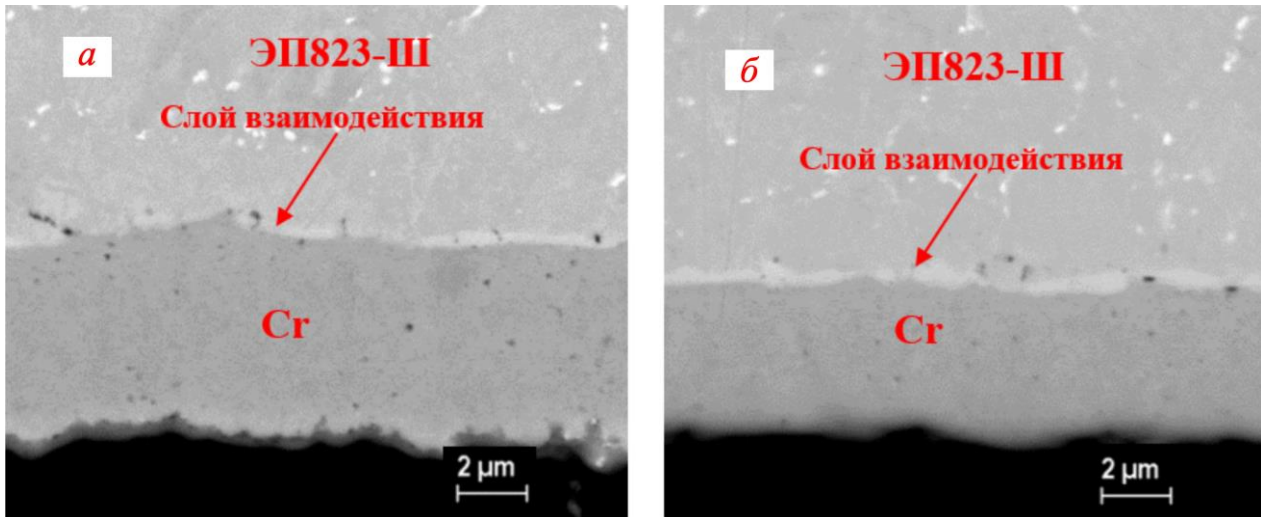


Рис. 5. РЭМ-снимки границы покрытие-сталь в аргоне (а) и жидком свинце (б) после 650 °С в течение 100 ч

Далее образцы с хромовым покрытием были испытаны в диапазоне 420–650 °С и времени выдержки 1000 ч. На рис. 6–8 приведены фотографии микроструктуры поперечного сечения внутренней поверхности оболочки твэла после высокотемпературных испытаний. При температуре 420 °С хромовое покрытие сохранило адгезию к поверхности стали, взаимодействия между покрытием и сталью не наблюдается (см. рис. 6). Как показано на диаграмме состояния хром-железо (см. рис. 2), температура появления σ -фазы составляет 440 °С, и она стабильна до температуры 820 °С. По этой причине при 420 °С взаимодействие покрытие-сталь не происходит. Однако у образцов при испытании 540 °С и 650 °С (см. рис. 7 и 8) на границе покрытие-сталь появляется слой взаимодействия.

У образцов с хромовым покрытием при испытании в диапазоне температур 420–650 °С и времени выдержки 1000 ч в жидком свинце эффекта растворения и осаждения на поверхностном слое не выявлено. Электронно-микроскопические исследования этих образцов показали отсутствие значительных признаков коррозионного повреждения как при испытаниях в среде аргона, так и в жидком свинце.

Для выявления состава слоя взаимодействия было проведено рентгеновское картирование. На рис. 9–11 приведены снимки элементного картирования участка поперечного сечения границы покрытие-сталь после высокотемпературных испытаний в аргоне.

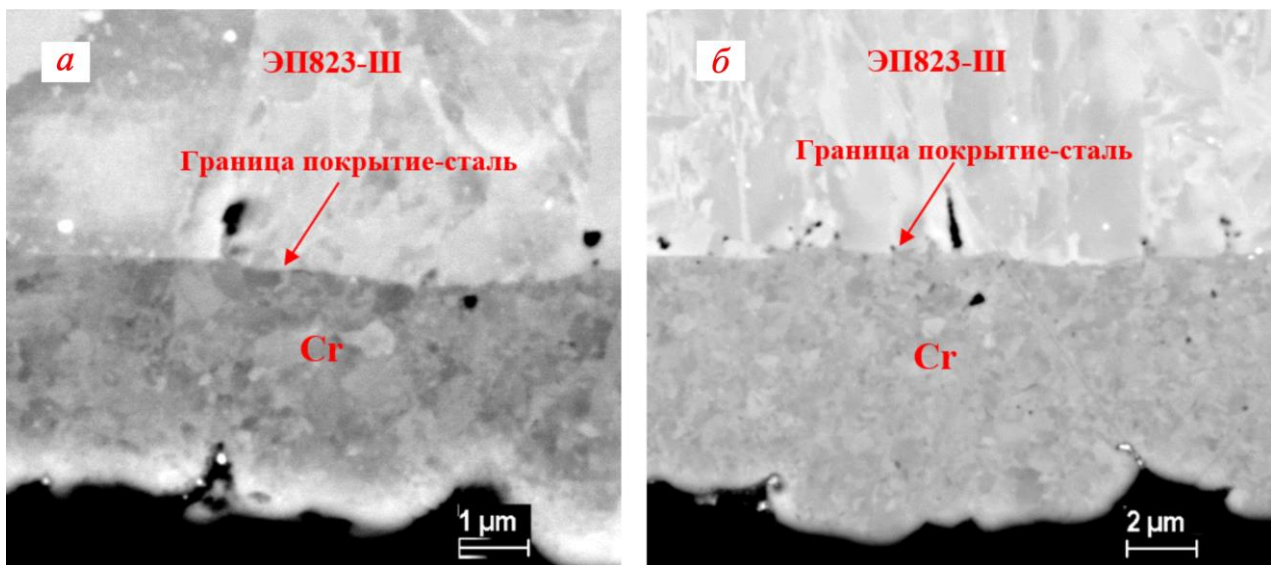


Рис. 6. РЭМ-снимки границы покрытие-сталь в аргоне (а) и жидком свинце (б) после 420 °С в течение 1000 ч

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ С ОБОЛОЧКОЙ ТВЭЛА
ИЗ СТАЛИ ЭП823-Ш В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 420–650 °С

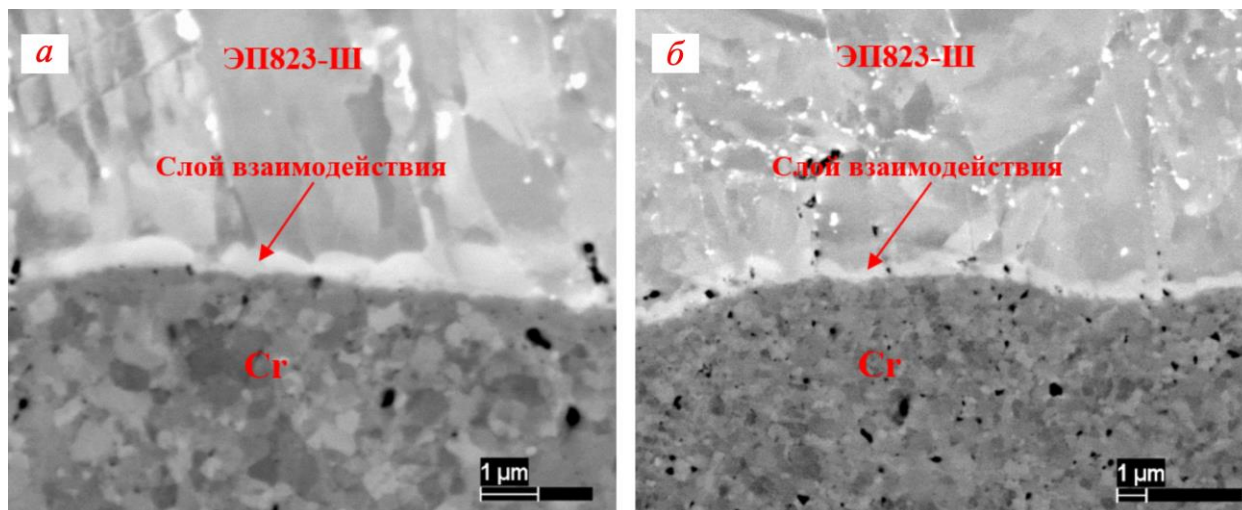


Рис. 7. РЭМ-снимки границы покрытие-сталь в аргоне (а) и жидком свинце (б) после 540 °С в течение 1000 ч

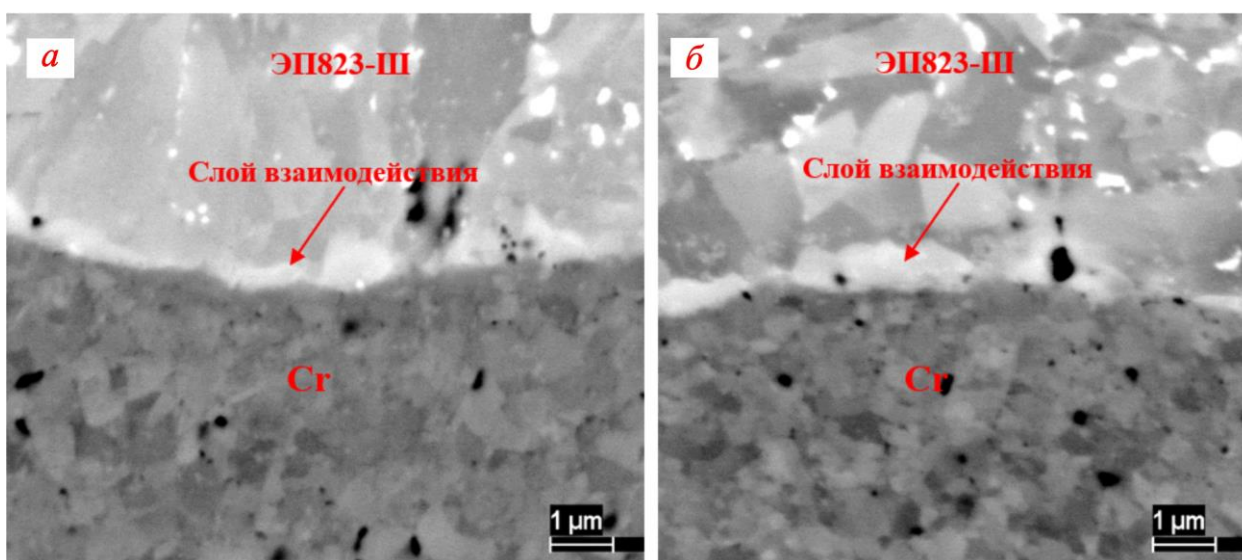


Рис. 8. РЭМ-снимки границы покрытие-сталь в аргоне (а) и жидком свинце (б) после 650 °С в течение 1000 ч

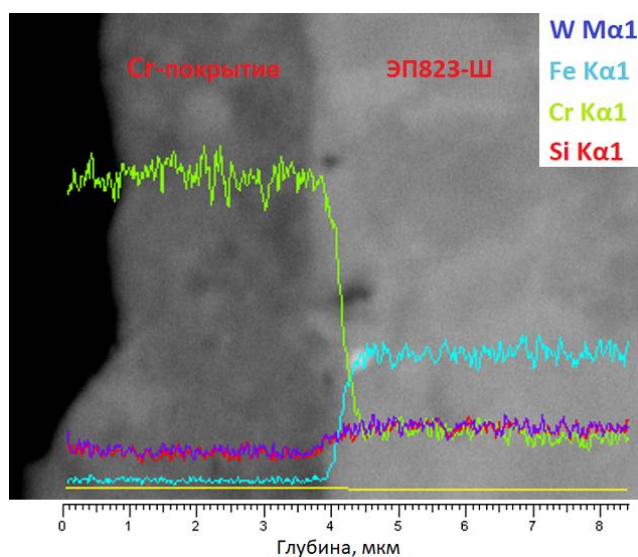


Рис. 9. Элементное картирование участка поперечного сечения границы покрытие-сталь в аргоне после 420 °С в течение 1000 ч

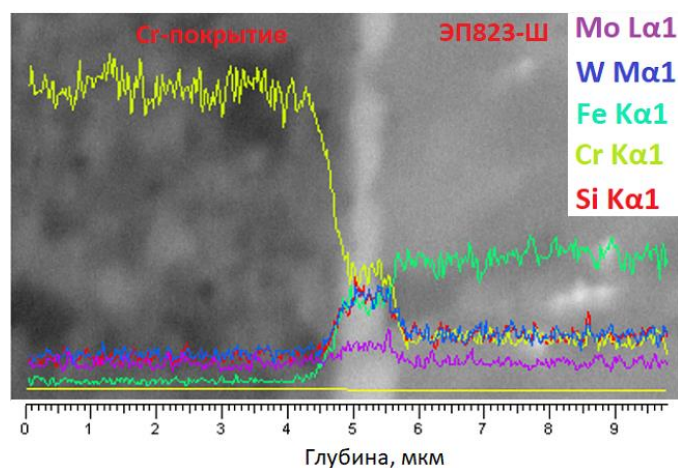


Рис. 10. Элементное картирование участка поперечного сечения границы покрытие-сталь в аргоне после 540 °С в течение 1000 ч

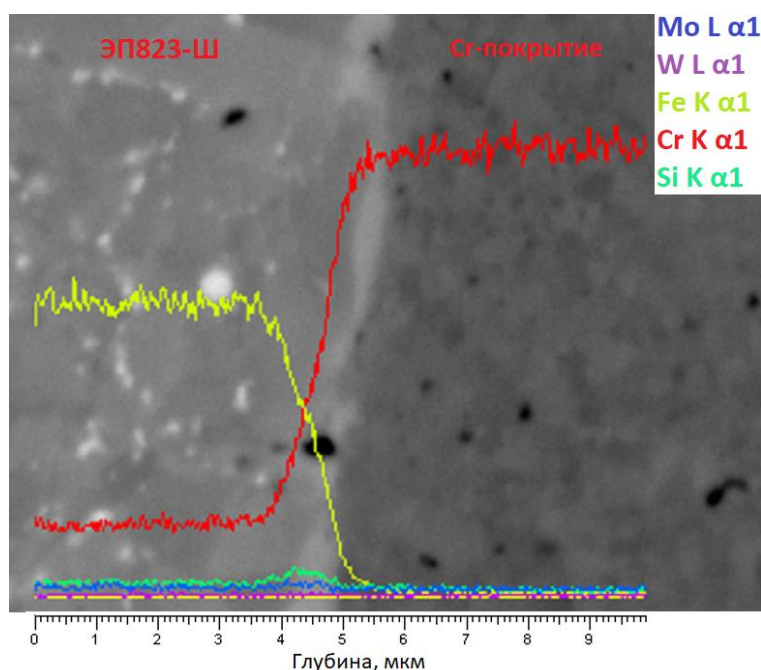


Рис. 11. Элементное картирование участка поперечного сечения границы покрытие-сталь в аргоне после 650 °С в течение 1000 ч

Так же, как и у образцов с кратковременным высокотемпературным испытанием при 650 °С, интерметаллидный слой взаимодействия имеет сложный состав, преимущественно состоит из железа и хрома. Толщина этого слоя как при испытании 540 °С, так и при 650 °С в течение 1000 ч неравномерна по толщине и колеблется в пределах 150–600 нм, в то время как у образцов с временем выдержки 100 ч при 650 °С толщина интерметаллида составляет 150–250 нм. Зерна стали, граничащие с интерметаллидным слоем, имеют такой же процентный состав по хрому (~13 мас.%), как и у тех зерен, которые не граничат со слоем взаимодействия покрытие-сталь. Авторы патента [9] обнаружили, что σ -фаза об-

разуется при добавке 2 мас.% Мо при 580 °С уже через 273 ч и 2 мас.% W при 560 °С через 838 ч. Учитывая, что сталь ЭП823-Ш (16X12МВСФБР-Ш) [4] содержит Мо, W, Nb, V, Si около 1 мас.% и эти элементы могут способствовать быстрому образования интерметаллидного слоя взаимодействия, который в свою очередь выступает в роли диффузионного барьера, предотвращающего дальнейшее взаимодействие хрома с железом. Как видно из рис. 7 и 8, трещин в покрытии, а также трещин и отслоений по границе покрытие-сталь не образовывается. Это говорит о том, что при таких условиях испытаний покрытие сохраняет целостность и коррозионно-стойкие свойства.

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты экспериментального исследования взаимодействия электролитического хромового покрытия, осажденного на внутреннюю поверхность оболочки ТВЭЛ из ферритно-мартенситной коррозионно-стойкой стали ЭП823-Ш. Образцы с хромовым покрытием были испытаны в диапазоне температур 420–650 °С и времени выдержки 1000 ч в среде аргона и жидкого свинца. Анализ взаимодействия в системе Cr/ЭП823-Ш позволяет сделать следующие выводы.

1. Кратковременные высокотемпературные испытания при 650 °С и времени выдержки 100 ч выявили на границе покрытие-сталь интерметаллидный слой взаимодействия по составу преимущественно из железа и хрома. Толщина слоя взаимодействия составляет 150–250 нм.

2. Испытания при 420 °С и времени выдержки 1000 ч показали, что хромовое покрытие сохранило адгезию, взаимодействия между покрытием и сталью не наблюдается.

3. Испытания при 540 и 650 °С и времени выдержки 1000 ч показали, что на границе покрытие-сталь появляется слой взаимодействия. Интерметаллидный слой взаимодействия имеет сложный состав и преимущественно состоит из железа и хрома. Этот слой неравномерен по толщине, и колеблется в пределах 150–600 нм.

4. Легирующие элементы стали ЭП823-Ш (16Х12МВСФБР-Ш) могут способствовать быстрому образованию интерметаллидного слоя взаимодействия.

5. Интерметаллидный слой взаимодействия сложного состава выступает в роли диффузионного барьера, предотвращающего глубокое взаимодействие хромового покрытия со сталью. Трещин в покрытии, а также трещин и отслоений по границе покрытие-сталь не образуются. Это говорит о том, что при таких условиях испытаний покрытие сохраняет целостность и коррозионно-стойкие свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Piolo I. (ed.). Handbook of Generation IV Nuclear Reactors: A Guidebook. Woodhead Publishing, 2022. 1098 с. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-01219-8>.*
2. *Tolstoukhov D., Panov S., Presnyakov I. Economic aspects of nuclear fuel cycle closure on the basis of fast neutron reactors in the framework of «Proryv» project direction implementation // Nuclear Engineering and Design, 2021. V. 384, Article ID 111471. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111471>.*
3. *Zabudko L. M., Grachev A.F., Zherebtsov A.A., Lachkanov E.V. et al. Status on performance study of mixed nitride fuel pins of BREST reactor type // Nuclear Engineering and Design, 2021. V. 384. Article ID 111430. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111430>*
4. *Бозин С.Н., Родченков Б.С., Каушанов А.Д., Марков В.Г. и др. Исследования конструкционных материалов для реактора со свинцовым теплоносителем // Атомная энергия, 2012. Т. 113. №. 5. С. 257–263.*
5. *Гринь П.И., Никитин О.Н., Беляева А.В. Основные результаты исследований ТВЭЛов экспериментальных сборок ЭТВС-9 и ЭТВС-10 после облучения в реакторе БН-600 // Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» (отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2019 г.), 2020. С. 110–112.*
6. *Гильмутдинов И.Ф., Крюков Ф.Н., Никитин О.Н., Жемков И.Ю., Скупов М.В. Иванов Ю.А. Результаты исследований коррозии оболочек из стали марки ЭП823-Ш в ТВЭЛх со свинцовым и гелиевым подслоем // Тезисы докладов XI конференции по реакторному материаловедению, посвященной 55-летию отделения реакторного материаловедения АО «ГНЦ НИИАР», 2019. С. 196–197.*
7. *Лякишев Н.П. (ред.). Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. Т. 3. М. Машиностроение, 1996. С. 872.*
8. *Villars P., Okamoto H. Cr-Fe Binary Phase Diagram 0-100 at.% Fe.: Datasheet from «PAULING FILE Multinaries Edition – 2022» in SpringerMaterials. https://materials.springer.com/isp/phase-diagram/docs/c_0903645.*
9. *Хаттендорф Х. и др. Жаростойкий железо-хром-алюминиевый сплав с низкой скоростью испарения хрома и повышенной жаропрочностью. Патент РФ, № 2014101607/02А, 2015.*

INTERACTION OF CHROME COATING WITH CLADDING MADE OF EP823-Sh STEEL IN THE TEMPERATURE RANGE 420–650 °C

R.Sh. Isayev*, P.S. Dzumaev

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

**e-mail: RSIsayev@mephi.ru*

Received June 30, 2024; revised July 23, 2024; accepted July 30, 2024

Chromium coating can increase the corrosion resistance of a fuel rod cladding made of EP823-Sh steel in a liquid lead environment at temperatures up to 650 °C. It is advisable to block the diffusion interaction of the chromium coating and steel during the entire period of operation of the fuel rod. Studies of samples after high-temperature tests showed the presence of a coating-steel interaction layer. At a temperature of 420 °C and a holding time of 1000 hours, the coating retained adhesion, and no interaction between the coating and steel was observed. When tested at 540 °C and 650 °C and a holding time of 1000 hours, an interaction layer of uneven thickness within the range of 150–600 nm appears at the coating-steel interface. This layer has a complex composition and blocks further mutual diffusion of the steel components and coating into each other. EP823-Sh steel contains molybdenum and tungsten about 1 wt.% and they accelerate coating-steel interactions. An analysis of the interaction in the coating-steel system revealed the promise of using chromium as a protective coating for the inner surface of the fuel rod cladding made of EP823-Sh steel.

Keywords: corrosion, ferritic-martensitic steel, EP823-Sh, chromium coating.

REFERENCES

1. *Piolo I. (ed.). Handbook of Generation IV Nuclear Reactors: A Guidebook. Woodhead Publishing, 2022. 1098 c. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-01219-8>.*
2. *Tolstoukhov D., Panov S., Presnyakov I. Economic aspects of nuclear fuel cycle closure on the basis of fast neutron reactors in the framework of «Proryv» project direction implementation. Nuclear Engineering and Design, 2021. Vol. 384. Article ID 111471. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111471>.*
3. *Zabudko L.M., Grachev A.F., Zhrebtsov A.A., Lachkanov E.V., et al. Status on performance study of mixed nitride fuel pins of BREST reactor type. Nuclear Engineering and Design, 2021. Vol. 384. Article ID 111430. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111430>*
4. *Bozin S.N., Rodchenkov B.S., Kashtanov A.D., Markov V.G. et al. Issledovaniya konstruktsionnykh materialov dlya reaktora so svincovym teplonositelem [Research on structural materials for a lead-cooled reactor]. Atomnaya energiya, 2012. Vol. 113. No. 5. Pp. 257–263 (in Russian).*
5. *Grin' P.I., Nikitin O.N., Belyaeva A.V. Osnovnye rezul'taty issledovaniy tvelov eksperimental'nykh sborok ETVS-9 i ETVS-10 posle oblucheniya v reaktore BN-600 [The main results of studies of fuel rods of experimental assemblies ETVS-9 and ETVS-10 after irradiation in the BN-600 reactor]. Nauchnyy godovoy otchet AO «GNC NIIAR» (otchet ob osnovnykh issledovatel'skikh rabotah, vypolnennykh v 2019 g.) [Scientific annual report of JSC «SSC RIAR» (report on the main research work carried out in 2019)], 2020. Pp. 110–112 (in Russian).*
6. *Gil'mutdinov I.F., Kryukov F.N., Nikitin O.N., Zhemkov I.YU., Skupov M.V. Ivanov Yu.A. Rezul'taty issledovaniy korrozii obolochek iz stali marki EP823-SH v TVELah so svincovym i gelievym podsloem [Results of studies of corrosion of EP823-Sh steel shells in fuel rods with a lead and helium sublayer]. Tezisy dokladov XI konferencii po reaktornomu materialovedeniyu, posvyashchyonnaya 55-letiyu otdeleniya reaktornogo materialovedeniya AO «GNC NIIAR» [Abstracts of the XI Conference on Reactor Materials Science, dedicated to the 55th anniversary of the Department of Reactor Materials Science of JSC «SSC RIAR»], 2019. Pp. 196–197 (in Russian).*
7. *Lyakishev N.P. (ed.). Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem: spravochnik. T.3 [State diagrams of binary metal systems: a reference book. Vol. 3]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1996. 872 p.*
8. *Villars P., Okamoto H. Cr-Fe Binary Phase Diagram 0–100 at.% Fe.: Datasheet from «PAULING FILE Multinaries Edition – 2022» in SpringerMaterials. https://materials.springer.com/isp/phase-diagram/docs/c_0903645.*
9. *Hattendorf H. et al. Zharostojkij zhelezo-hrom-aluminievyy splav s nizkoj skorost'yu ispareniya hroma i povyshennoj zharoprochnost'yu [Heat-resistant iron-chrome-aluminum alloy with low chromium evaporation rate and increased heat resistance]. Patent RF. No. 2014101607/02A, 2015.*