

УДК 621.039.546.53:621.793

**ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОРРОЗИИ И
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОКИСЛЕНИЮ ЦИРКОНИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК
С ЗАЩИТНЫМ ХРОМОВЫМ ПОКРЫТИЕМ**

*И.А. Шелепов, А.Г. Мальгин, В.А. Маркелов, Е.Г. Буланцова, Н.С. Сабуров,
С.И. Лукашов, И.С. Ерёмин*

*АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт
неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва
IAShelepov@bochvar.ru*

Приведены результаты изучения влияния толщины, структуры и дефектности защитных хромовых покрытий, нанесенных с наружной поверхности оболочечных труб и на пластины из циркониевых сплавов, для повышения их сопротивления автоклавной коррозии и высокотемпературному окислению в перегретом водяном паре применительно к разработкам отечественного толерантного топлива для энергетических реакторов на тепловых нейтронах.

Ключевые слова: устойчивое к авариям топливо, цирконий, оболочечная труба, хромовое покрытие, испытания, коррозия, высокотемпературное окисление, наводороживание, дефекты.

**FACTORS DEFINING RESISTANCE TO CORROSION AND HIGH-
TEMPERATURE OXIDATION OF ZIRCONIUM CLADDINGS WITH
PROTECTIVE CHROMIUM COATING**

*I.A. Shelepov, A.G. Malgin, V.A. Markelov, E.G. Bulantsova, N.S. Saburov,
S.I. Lukashov, I.S. Eremin*

JSC A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow

The investigation results of the effect of thickness, structure and defects of chrome coatings deposition on zirconium alloy cladding and plate for increasing their resistance to autoclave corrosion and high-temperature steam oxidation are presented.

Keywords: accident tolerance fuel, zirconium, cladding, chromium coating, corrosion, high-temperature oxidation, hydrogenation, defects.

Введение

С целью выведения эксплуатационной безопасности АЭС на качественно новый уровень и повышения технико-экономических показателей энергетических реакторов на тепловых нейтронах одним из ключевых трендов в мировой атомной энергетике

является разработка и внедрение в топливный цикл устойчивого к авариям ядерного топлива (Accident Tolerance Fuel – ATF) [1-3]. В настоящее время наиболее распространённым направлением развития ATF является использование оболочек твэлов с нанесенным на наружную поверхность хромовым покрытием, применение которого позволяет обеспечить повышение стойкости циркониевых изделий к окислению и наводороживанию как в случае аварийных ситуаций, связанных с потерей теплоносителя, так и применительно к условиям нормальной эксплуатации [4, 5]. Предпочтительным методом нанесения хрома, выбранным рядом ведущих разработчиков ядерного ATF-топлива в качестве основного, является ионно-плазменное магнетронное напыление [6-8].

В настоящей работе в продолжение и развитие материала, опубликованного в [4, 5], представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие влияние толщины, структуры и дефектности хромовых покрытий на сопротивление автоклавной коррозии и высокотемпературному окислению в перегретом водяном паре образцов из циркониевых сплавов применительно к отечественным разработкам толерантного ядерного топлива.

Материал и методы исследований

Исследования выполнены на образцах пластин и оболочечных труб из циркониевых сплавов Э110 и Э110опт с различными вариантами хромового покрытия, нанесенными методом ионно-плазменного магнетронного напыления на установках в АО «ВНИИНМ», НИУ МЭИ, НИЯУ МИФИ и НИ ТПУ. Покрытия наносились на пластины и оболочечные трубы в состоянии поставки, изготовленные и принятые как годные в соответствии с требованиями технической документации. Хромовое покрытие наносилось на шлифованную поверхность изделий, коэффициент шероховатости Ra которой не превышал 0,4 мкм. Селективный отбор образцов для нанесения покрытия не производился, поэтому на их исходной поверхности возможно было присутствие дефектов, допустимых в техпроцессе заводского изготовления (риски, царапины, потертости и пр.). Подготовка поверхности образцов к процессу напыления хрома состояла из многостадийной чистки в спиртовых растворах, протирки неткаными материалами и ионной очистки. Пластинчатые образцы были покрыты хромом со всех сторон, на образцы оболочечных труб покрытие наносилось только на наружную поверхность. В процессе ионной очистки и осаждения хрома температура образцов не превышала 450 °С. Адгезионная прочность всех вариантов хромовых покрытий по данным скретч-тестирования составляла не менее 55 Н.

Для изучения сопротивления циркониевых образцов с защитным хромовым покрытием применительно к условиям проектной аварии с потерей теплоносителя – LOCA (Loss-of-Coolant Accident) и нормальным условиям эксплуатации выполнялись два типа испытаний соответственно:

- высокотемпературное окисление при 1200 °С в потоке перегретого водяного пара;
- коррозионные автоклавные испытания в воде при 360 °С и водяном паре при 400 °С.

Комплекс пост-тестовых исследований включал в себя: металлографические исследования с применением оптической и электронной микроскопии; механические испытания на диаметрально сжатие для образцов после высокотемпературного окисления; энергодисперсионный и рентгенофазовый анализ. Методики проведения испытаний и пост-тестовых исследований были аналогичны, подробно описанным ранее в работах [4, 5, 9].

Результаты испытаний и исследований

Влияние толщины хромового покрытия на сопротивление высокотемпературному окислению и коррозии

В процессе высокотемпературного окисления на поверхности образцов с покрытием формируется плотно сцепленная с матрицей оксидная пленка Cr_2O_3 и наблюдается диффузия хрома в циркониевую матрицу с образованием интерметаллидного слоя ZrCr_2 на границе раздела «покрытие-оболочка» и обратная диффузия циркония в хромовое покрытие. Образование и рост оксида хрома и слоя интерметаллида ZrCr_2 сопровождаются уменьшением исходной толщины нанесённого покрытия.

В открытой литературе в основном рассматриваются циркониевые изделия с хромовым покрытием толщиной от 4 до 15 мкм [10-12]. С точки зрения существенного повышения стойкости в условиях проектной аварии предпочтительным является диапазон толщины покрытия 8-15 мкм [10-18], который и был предметом исследования на первом этапе настоящей работы. Данный этап состоял из двух частей: первая часть была посвящена исследованию пластинчатых образцов, по всей поверхности покрытых хромом толщиной от 6 до 14 мкм; вторая часть – исследованию оболочечных труб с покрытием, нанесенным на наружную поверхность.

На пластины размером 15×15 мм было нанесено покрытие толщиной 6, 8, 10 и 14 мкм. Предварительная ионная очистка и сам процесс нанесения хрома осуществлялись по идентичному режиму, отличались только длительности процесса осаждения. Как и ожидалось, увеличение толщины хромового покрытия благоприятно сказывается на стойкости изделия к высокотемпературному окислению при 1200 °С (рис. 1). Хром толщиной 6 мкм сохраняет защитные свойства в течение до ~1000 с взаимодействия с потоком водяного пара, после чего кислород и водород начинают активно проникать в циркониевую матрицу. Покрытие толщиной 8 мкм ограничивает диффузию кислорода в цирконий до ~1800 с, после достижения этой пороговой длительности наблюдаются вспучивания на поверхности, рост под покрытием стабилизированного кислородом $\alpha\text{-Zr(O)}$ -слоя и активное поглощение водорода (рис. 2а).

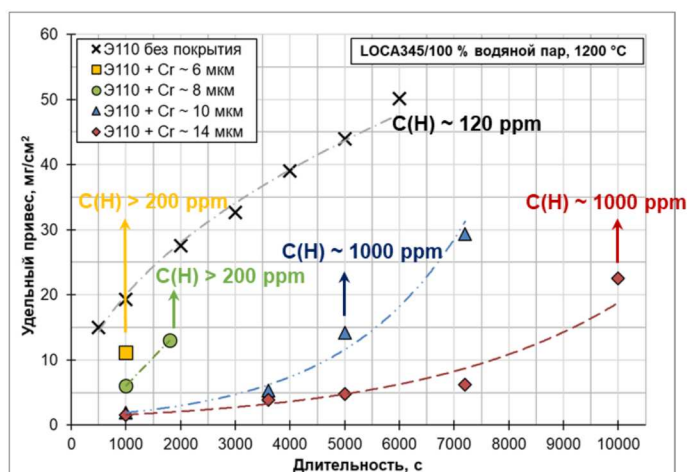


Рис. 1. Кинетика окисления и наводороживания образцов с различной толщиной Cr покрытия после окисления в потоке водяного пара при 1200 °C

Увеличение толщины хрома до 10 мкм привело к существенному повышению сопротивления высокотемпературному окислению и наводороживанию (рис. 2б) по сравнению с покрытиями толщиной 6 и 8 мкм. Нанесение покрытия толщиной ~14 мкм дополнительно обеспечивает повышение стойкости циркониевых образцов к высокотемпературному окислению и наводороживанию (рис. 2в, г).

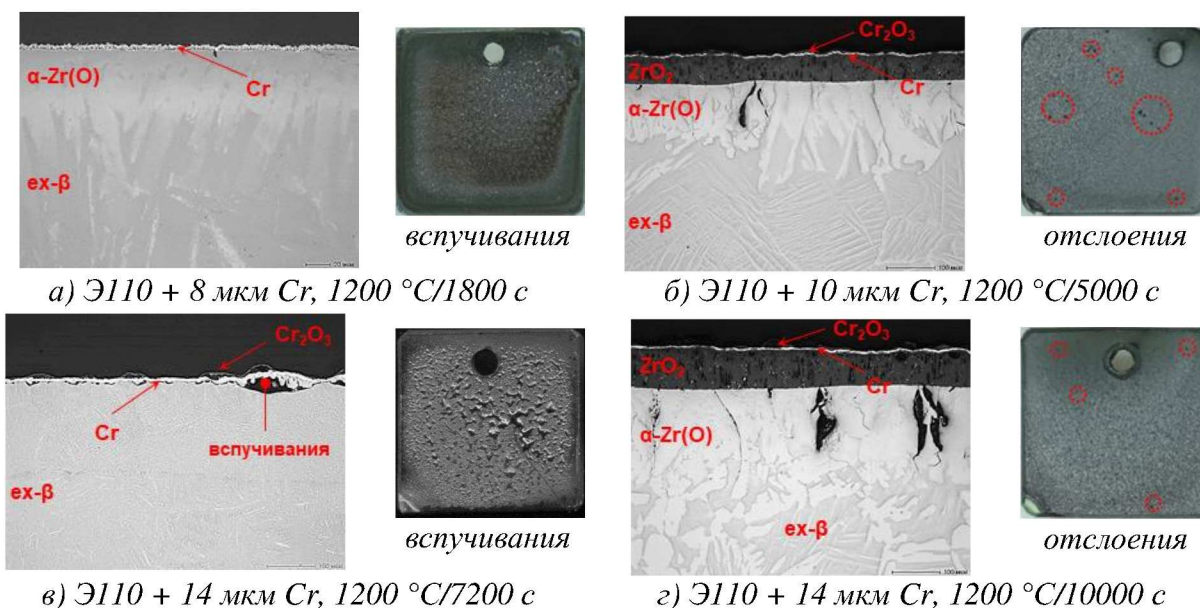


Рис. 2. Внешний вид и микроструктура образцов с различной толщиной Cr покрытия после окисления в потоке водяного пара при 1200 °C

Наблюдаемый положительный эффект увеличения толщины покрытия в условиях высокотемпературного окисления был проверен при длительных коррозионных автоклавных испытаниях в водяном паре при температуре 400 °C (рис. 3). Так же как и при окислении применительно к условиям LOCA, увеличение толщины покрытия

с 8 до 10 мкм вносит заметный вклад в повышение коррозионной стойкости. Дальнейшее увеличение толщины покрытия значимого эффекта при достигнутых длительностях коррозионного окисления не оказывает. Тем не менее стоит отметить в общем существенное снижение скорости коррозии образцов с хромовым покрытием. Так, после 330 суток испытания расчетная толщина оксидной пленки на образцах без покрытия превышает 30 мкм, в то время как на хромированных оболочках она составляет менее 6 мкм.

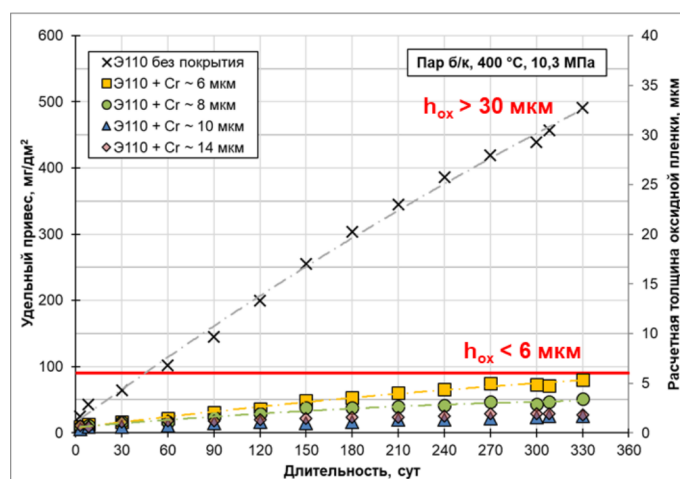
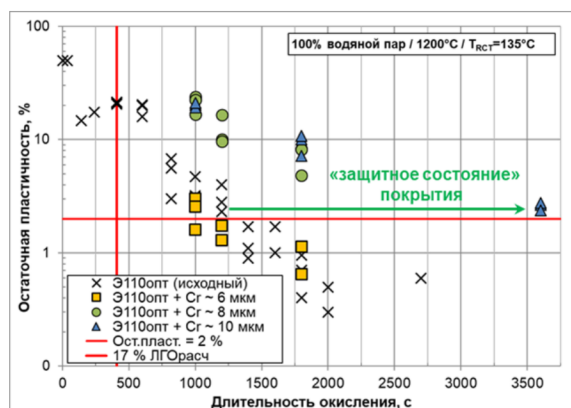
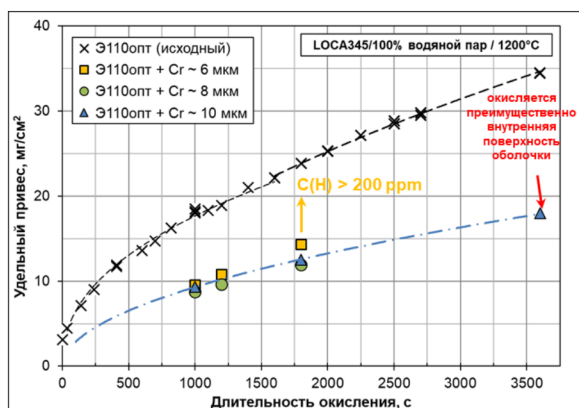


Рис. 3. Кинетика коррозии в деаэрированном паре при 400 °C пластинчатых образцов с различной толщиной Cr покрытия

Для подтверждения оптимальной толщины покрытия, обеспечивающей существенное повышение стойкости к высокотемпературному окислению в условиях характерных аварии LOCA, на наружную поверхность образцов оболочечных труб из сплава Э110опт были нанесены Cr-покрытия толщиной 6, 8 и 10 мкм. После окисления при 1200 °C (рис. 4а) и был выполнен комплекс исследований, включающий определение остаточной пластичности в испытаниях на диаметрально сжатие при 135 °C (рис. 4б) и микроструктурные исследования (рис. 5).



а) кинетика окисления при 1200 °C

б) остаточная пластичность при 135 °C

Рис. 4. Кинетика окисления и остаточная пластичность образцов оболочечных труб с различной толщиной Cr покрытия после окисления в потоке водяного пара при 1200 °C

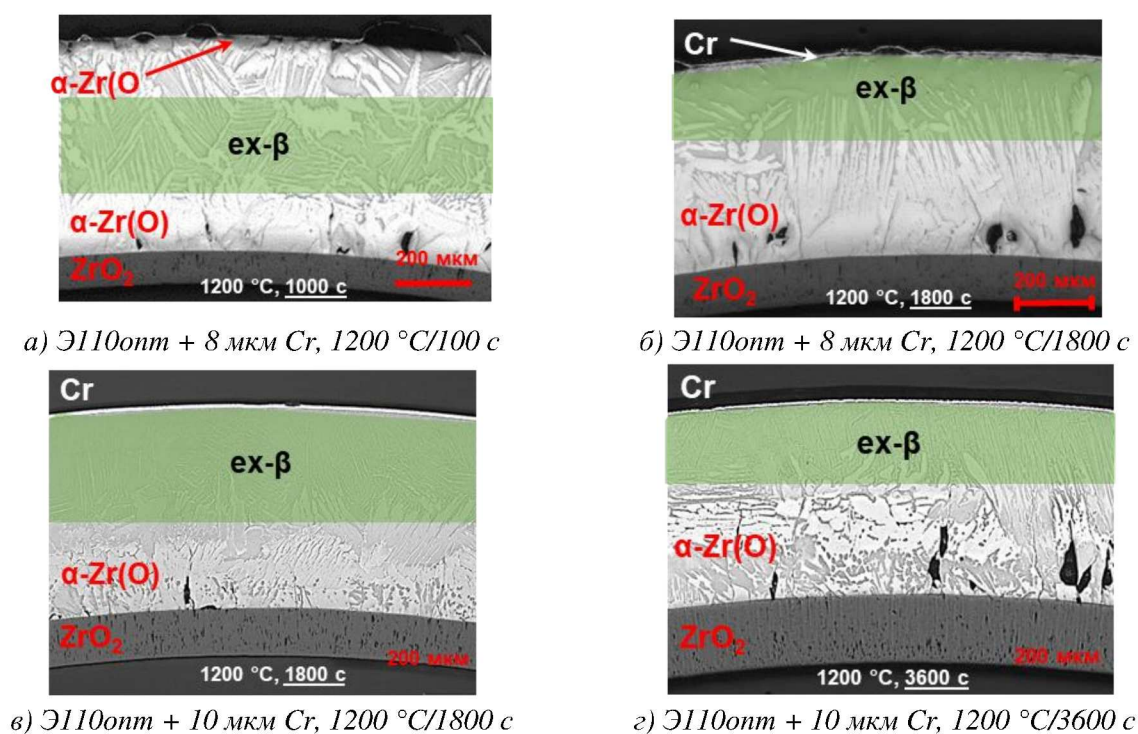


Рис. 5. Внешний вид и микроструктура образцов оболочечных труб с различной толщиной Cr покрытия после окисления в потоке водяного пара при 1200 °C

Тенденция, отмеченная в испытаниях пластин с покрытием (рис. 1-3), сохраняется и в испытаниях образцов труб с хромом только на наружной поверхности. С увеличением толщины покрытия повышается длительность окисления до потери защитных свойств, т.е. в течение более длительного времени покрытие ограничивает диффузию кислорода и водорода в циркониевую матрицу, тем самым способствуя сохранению минимально необходимого уровня остаточной пластичности (более 2% при 135 °C) (рис. 4б).

Таким образом, результаты, приведенные в данном разделе, показывают, что:

- в процессе высокотемпературного окисления покрытие расходуется на формирование защитной пленки оксида хрома и на образование интерметаллидного слоя Zr-Cr на границе раздела «покрытие – подложка». При достижении минимальной остаточной толщины Cr (~4 мкм) начинается активная диффузия кислорода и водорода в матрицу, вызывающая существенное снижение пластичности изделия;

- оптимальная толщина хромового покрытия, обеспечивающая по сравнению с исходной циркониевой оболочкой более чем в 2 раза повышение стойкости к высокотемпературному окислению, автоклавной коррозии и наводороживанию, должна составлять не менее 10 мкм.

Влияние структуры хромового покрытия на сопротивление высокотемпературному окислению и коррозии

В процессе магнетронного напыления преимущественно формируются покрытия, имеющие столбчатую структуру с размером кристаллитов в направлении нормали к покрываемой поверхности, достигающих толщины покрытия. Такая структура обусловлена высокой скоростью осаждения (более 40 нм/с) и достаточно низкими значениями плотности тока и энергии на единицу осажденного атома. Однако путем применения, например, режима мультикатодного распыления при сочетании низкой скорости осаждения (на порядок ниже, чем при формировании столбчатой структуры), высокой энергии и высокой плотности тока на осажденный атом возможно добиться формирования плотной мелкозернистой структуры покрытия.

В рамках данного этапа работы был выполнен комплекс сопоставительных испытаний и исследований изделий из циркониевых сплавов (пластины и оболочки) с хромовыми покрытиями, имеющими условно крупностолбчатую (тип «С») и условно мелкозернистую столбчатую структуру (тип «М»).

В первой части данного этапа работы на пластины 15×15 мм были нанесены Cr-покрытия толщиной 6 мкм со структурой типа «С» и «М». Эти образцы были испытаны в автоклавах в деаэрированной воде при 360 °С (рис. 6).

Скорость коррозии в воде при 360 °С образцов с покрытием со структурой типа «С» выше, чем у образцов со структурой покрытия типа «М». Через 330 суток испытаний на образцах с покрытием типа «С» формируется оксидная пленка темного цвета, в то время как внешний вид образцов с покрытием типа «М» практически не изменился (рис. 6).

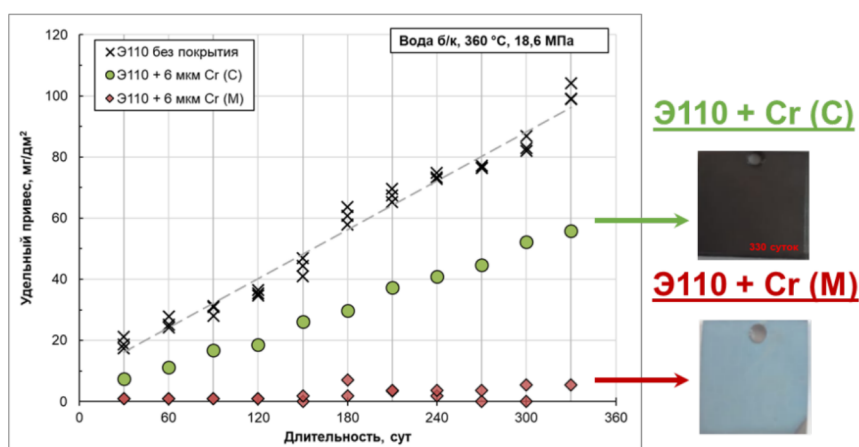


Рис. 6. Кинетика коррозии в деаэрированной воде при 360 °С пластинчатых образцов с различной толщиной и структурой Cr покрытия

Металлографические исследования показали, что для образцов с условно крупностолбчатой структурой покрытия (тип «С») установлена облегчённая диффузия кислорода через покрытие и формирование протяженных областей оксида циркония на

границе «покрытие – подложка» (рис. 7). Подобные формирования способствуют нарушению адгезионного сцепления и отслоению покрытия от подложки. Рост оксида под покрытием скорее всего свидетельствует о наличии дефектов в покрытии, образовавшихся в процессе его нанесения. На образцах с покрытием типа «М» формируется пленка оксида хрома, толщина которой не превышает 1 мкм, рост ZrO_2 под покрытием не выявлен. Таким образом, по данным испытаниям нельзя однозначно утверждать, что измельчение структуры покрытия (тип «М») в большей степени способствует повышению сопротивления коррозии применительно к нормальным условиям эксплуатации.



Рис. 7. Микроструктура образца Э110 + Cr (С) после испытаний в деаэрированной воде при 360 °С и давлении 18,6 МПа

Во второй части данного этапа работы, с учетом результатов по оптимальной толщине покрытия, обеспечивающей повышение стойкости к окислению в условиях аварии с потерей теплоносителя и автоклавной коррозии применительно к условиям нормальной эксплуатации, на оболочечные трубы из сплава Э110опт было нанесено хромовое покрытие толщиной ~ 10 мкм с условно крупностолбчатой (тип «С») и условно мелкозернистой структурой (тип «М»). Ширина кристаллитов в покрытии типа «С» составляет $d_{\text{зерна}} \sim 0,5$ мкм, высота достигает 8-10 мкм. В структуре покрытия с условно мелкозернистой структурой также наблюдаются столбчатые кристаллиты шириной $d_{\text{зерна}} \sim 0,1-0,5$ мкм и высотой не более 6 мкм.

Для сопоставления поведения оболочечных труб с различной структурой покрытия были выполнены эксперименты по высокотемпературному окислению при 1200 °С с различной выдержкой и автоклавные испытания в воде при 360 °С.

С точки зрения кинетики окисления при 1200 °С существенных различий в поведении оболочек с разной структурой защитного покрытия не отмечается (рис. 8а). Однако механические испытания (рис. 8б) и микроструктурные исследования (рис. 9) показали, что оболочки с условно мелкозернистым хромовым покрытием (тип «М»)

в течение более длительного времени сопротивляются диффузии кислорода в матрицу, тем самым сохраняя более высокий уровень остаточной пластичности (рис. 8б).

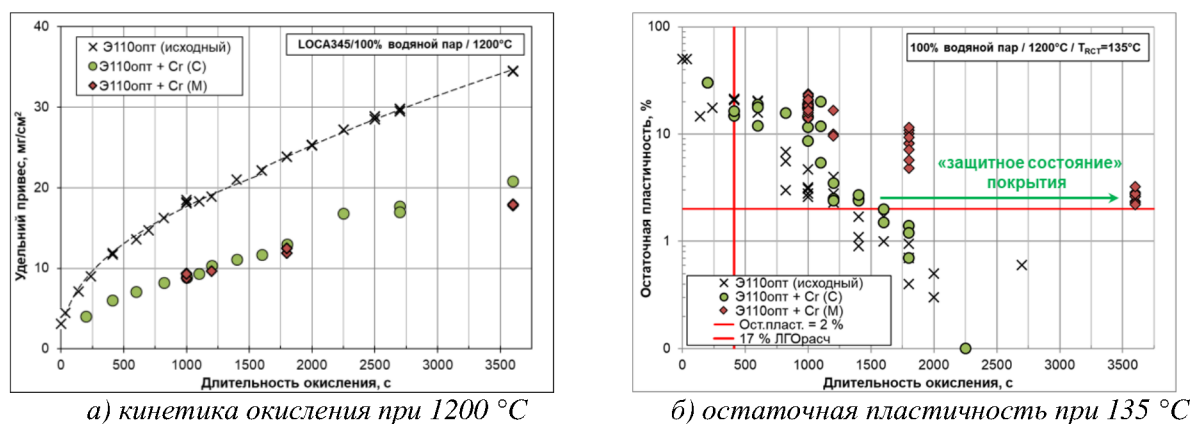


Рис. 8. Кинетика окисления и остаточная пластичность после испытаний в потоке водяного пара при 1200 °C образцов с различной структурой Cr покрытия

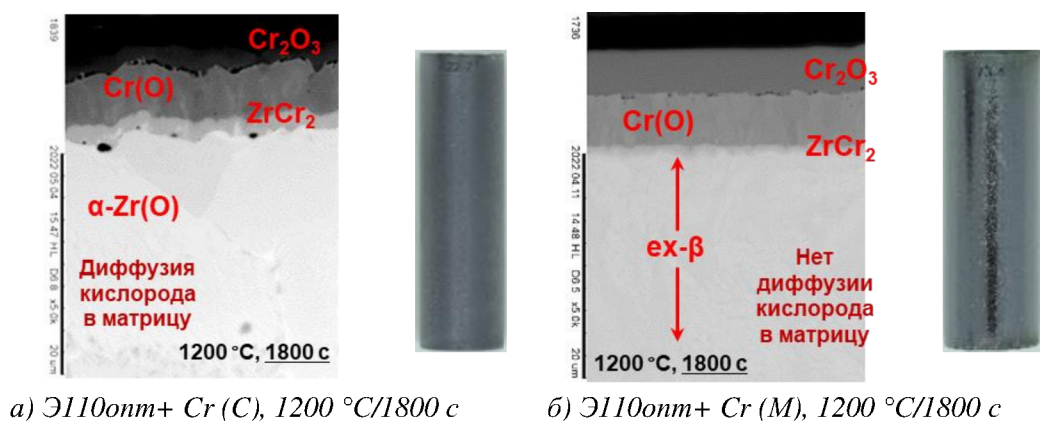


Рис. 9. Внешний вид и микроструктура образцов с различной структурой Cr покрытия после испытаний в потоке водяного пара при 1200 °C

При отсутствии радиальных трещин или других дефектов в покрытии основными путями для диффузии кислорода и водорода в циркониевую матрицу являются границы зерен покрытия. В образцах с условно мелкозернистой структурой в покрытии имеется большее количество межзеренных границ с достаточно высокой разоориентацией и, следовательно, диффузия кислорода по границам зерен протекает менее активно.

Также в ходе проведенных испытаний подтверждено, что любое покрытие имеет свой ресурс, так как в процессе окисления изменяется его исходная толщина за счет диффузии хрома в матрицу и образования оксидной пленки.

Коррозия в деаэрированной воде при 360 °C образцов с различной структурой покрытия в целом протекает одинаково, существенного отличия во внешнем виде или кинетике окисления не выявлено. Покрытие сохраняет свою целостность: отслоений, трещин или осыпаний не обнаружено, на поверхности сформирована оксидная пленка цветов побежалости (рис. 10).

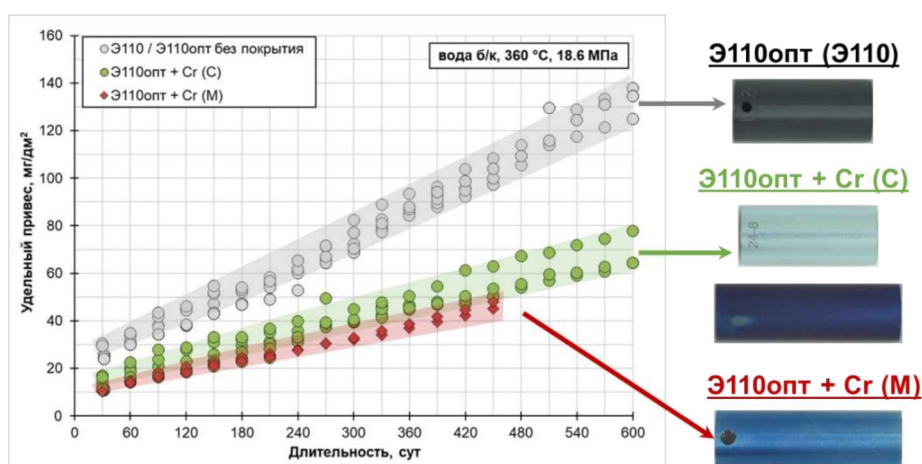


Рис.10. Кинетика коррозии в деаэрированной воде при 360 °С и внешний вид образцов с различной структурой Cr покрытия

Из полученных данных видно, что после автоклавных испытаний в воде удельные привесы образцов с хромовыми покрытиями в 2 раза ниже удельных привесов образцов без покрытий. После 600 суток коррозионного воздействия воды концентрация водорода в образцах оболочек с Cr покрытием и в исходных (без покрытия) образцах составляет порядка 150 ppm и 250 ppm соответственно. Следует отметить, что основной вклад в удельный привес образцов с хромом вносит окисление внутренней поверхности трубы, которая не защищена покрытием.

Рентгенофазовый анализ состава поверхностных слоев образцов после автоклавных испытаний показал, что для исходных образцов труб без покрытия наблюдаются рентгеновские линии как моноклинной, так и тетрагональной модификации ZrO_2 (рис. 11а). В образцах с Cr покрытием регистрируются линии Cr сильной интенсивности и дифракционные линии Cr_2O_3 слабой интенсивности (рис. 11б), что свидетельствует о формировании очень тонкой пленки оксида хрома на поверхности оболочек.

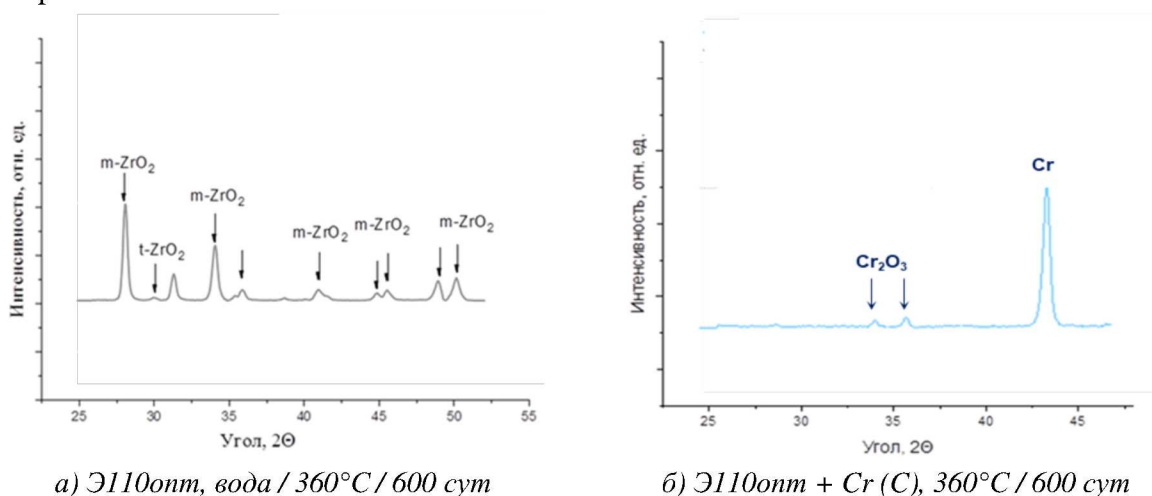
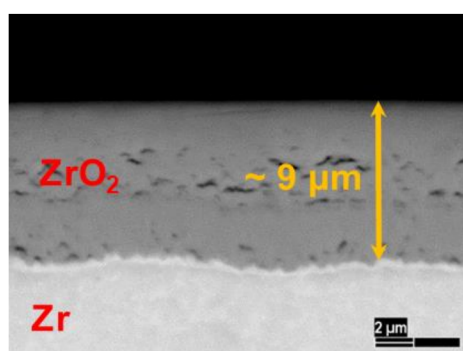
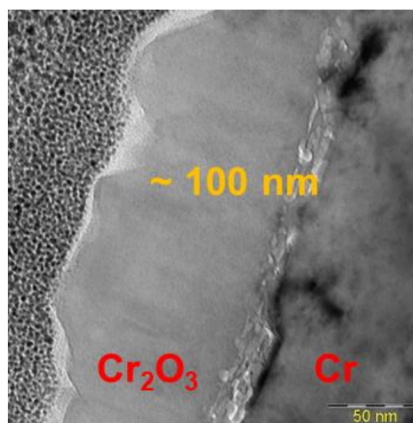


Рис. 11. Дифракционные спектры образцов из сплава Э110опт после автоклавных испытаний в деаэрированной воде при 360 °С

Микроструктурные исследования образцов показали, что в процессе коррозии на оболочке без покрытия формируется слоистая структура оксидной пленки, общая толщина которой составляет ~ 9 мкм (рис 12а). На образцах с хромовым покрытием формируется тонкая пленка оксида хрома толщиной ~ 100 нм (рис. 12б). За 600 суток коррозионного воздействия воды практически не происходит изменение исходной толщины хрома: хром «расходуется» на образование оксидной пленки и интерметаллидного слоя Zr-Cr на границе раздела «покрытие-подложка», толщина которого не превышает ~ 50 нм.



а) Э1110опт, вода / 360°C / 600 сут



б) Э1110опт + Cr (С), 360°C / 600 сут

Рис. 12. Микроструктура оксидной пленки и Cr-покрытия после коррозионных автоклавных испытаний

Таким образом, результаты, приведенные в данном разделе, показывают:

- при высокотемпературном окислении, имитирующем аварию с потерей теплоносителя, при отсутствии радиальных трещин или других дефектов покрытия основными путями для диффузии кислорода и водорода в циркониевую матрицу являются границы зерен. По сравнению с образцами с условно крупно столбчатой структурой покрытия (тип «С») на образцах с условно мелкозернистой структурой покрытия (тип «М») имеется большее количество межзеренных границ с достаточно высокой разориентацией, что затрудняет диффузию кислорода в матрицу;
- при коррозии в условиях, приближенных к нормальной эксплуатации (вода, 360 °С, 18,6 МПа), существенного различия в поведении циркониевых изделий с различной структурой покрытия не отмечается.

Влияние дефектов в покрытиях на сопротивление коррозии и высокотемпературному окислению

В процессе нанесения Cr-покрытия могут образовываться дефекты. При определенных размерах и концентрациях дефектов под покрытие может проникать кислород и формироваться оксидная пленка как в нормальных условиях эксплуатации, так и в случае аварий.

В рамках данного этапа работы было рассмотрено влияние на сопротивление высокотемпературному окислению и автоклавной коррозии дефектов хромового покрытия, возникающих в процессе их нанесения. В ходе исследования различных вариантов хромового покрытия (от разных изготовителей) были определены типичные дефекты покрытий: межстолбчатые пустоты (рис. 13а), радиальные трещины (рис. 13б), каплевидные образования (рис. 13в), а также достаточно часто выявляемые дефекты, классифицируемые как «несплошности» (рис. 13г). Предположительно «несплошности» возникают либо из-за наличия загрязнений в камере нанесения покрытий, либо от дефектов на поверхности исходной трубы или по причине недостаточно качественной предварительной очистки этой поверхности. Подобные дефекты локально снижают адгезионное сцепление покрытия с подложкой. Предположительно, остальные классифицированные дефекты возникают в процессе нанесения покрытия и связаны с не оптимально подобранными параметрами техпроцесса.

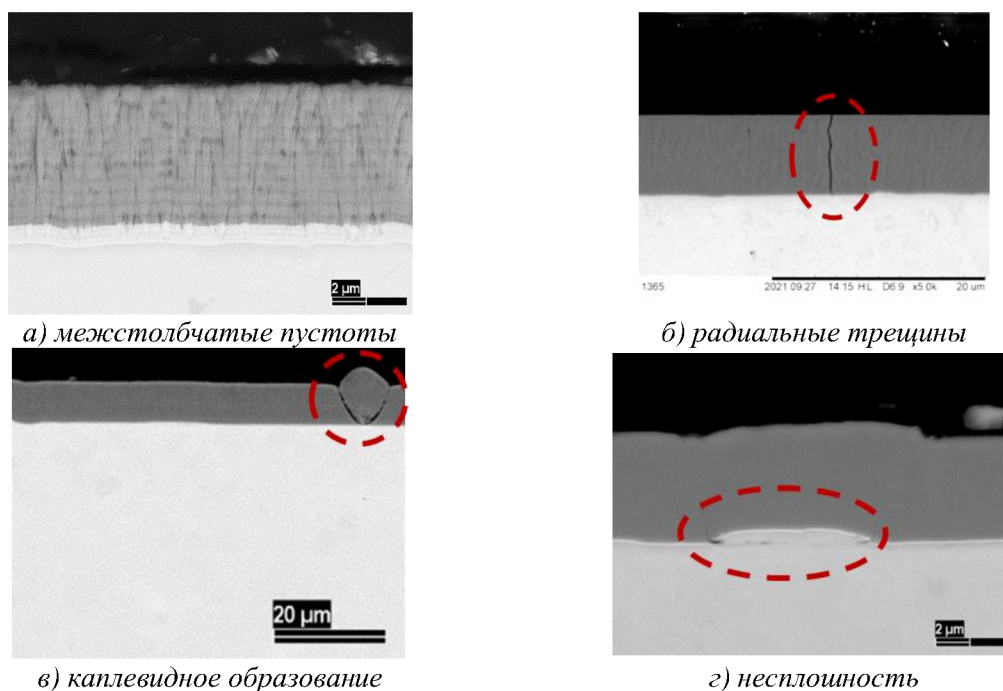


Рис. 13. Типичные дефекты Cr-покрытий, возникающие в процессе их нанесения

О наличии дефектов в покрытии, как правило, невозможно сказать по результатам измерения удельных привесов образцов или кинетике их окисления. Дефекты выявляются только при проведении металлографических исследований. Микроструктурные исследования образцов с хромовыми покрытиями после коррозионных испытаний в различных средах показали, что наличие выявленных дефектов (рис. 13) не позволяет формировать сплошную защитную оксидную пленку и открывает путь для диффузии кислорода и водорода в циркониевую матрицу (рис. 14).

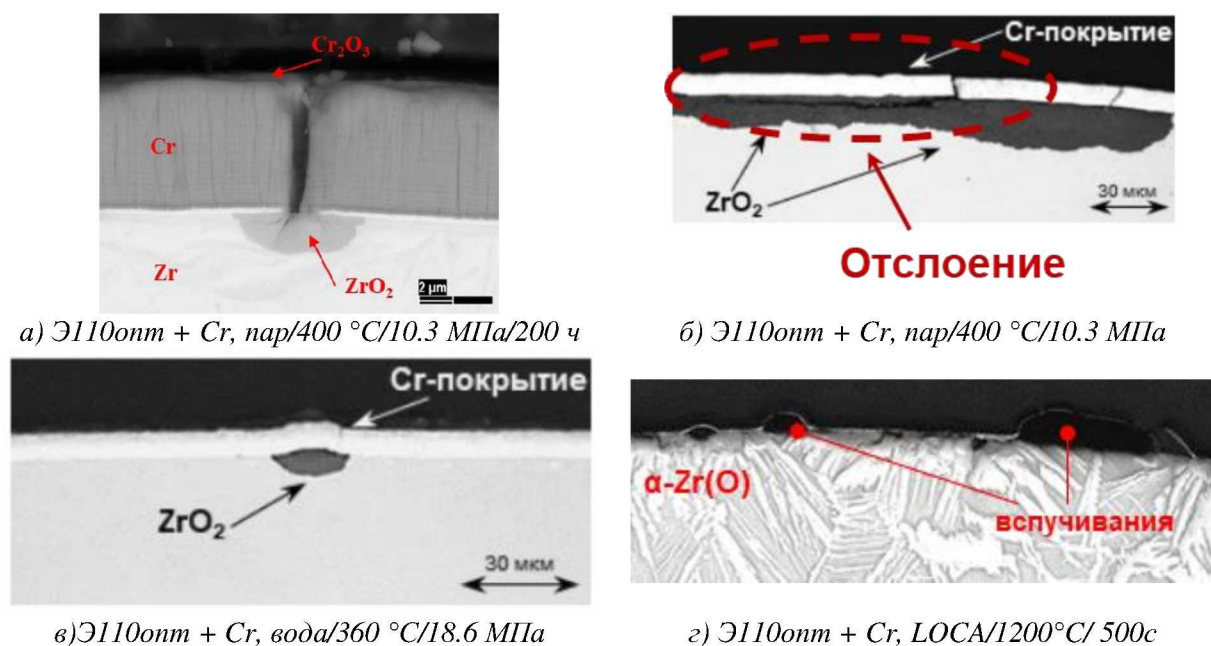


Рис. 14. Микроструктура образцов с Cr-покрытием после коррозионных автоклавных испытаний и тестов на высокотемпературное окисление на участках с исходными дефектами в покрытиях

Межстолбчатые пустоты, радиальные трещины и каплевидные образования приводят к росту оксидной пленки под покрытием (рис. 14а-в), локальному наводороживанию, нарушают адгезионное сцепление покрытия с подложкой, вызывают отслоение покрытия (рис. 14б) и его вспучивание (рис. 14г).

Отрицательного влияния наличия дефекта типа «несплошность» на коррозионную стойкость применительно к нормальным условиям эксплуатации не наблюдалось. Однако при высокотемпературном окислении присутствие подобных дефектов, возможно, приводит к формированию протяжённых участков отслоения покрытия от оболочки (рис. 14г), а также к локальному уменьшению живого сечения изделия за счет активной диффузии кислорода в Zr и интенсивного наводороживания, ведущих к снижению пластичности изделия.

Таким образом, результаты, приведенные в данном разделе, показывают:

- типичными дефектами, возникающими при нанесении хромовых покрытий, являются: межстолбчатые пустоты, радиальные трещины, каплевидные образования и несплошности;

- при воздействии окислительной среды наличие подобных дефектов не позволяет формировать сплошную защитную оксидную пленку, в результате открывается путь для диффузии кислорода и водорода в цирконий и нарушается адгезионное сцепление покрытия с подложкой;

- выявленные дефекты следует классифицировать как недопустимые.

Выводы

В отсутствие дефектов структура и толщина хромового покрытия определяют интенсивность диффузионного проникновения кислорода к границе раздела хром/цирконий и обеспечивают рабочий ресурс оболочки в условиях нормальной эксплуатации и в случае аварии с потерей теплоносителя.

Межстолбчатые пустоты, радиальные трещины, каплевидные образования и несплошности являются основными дефектами, которые могут возникать при магнетронном нанесении хромовых покрытий. При воздействии окислительной среды присутствие подобных дефектов не позволяет формировать сплошную защитную оксидную пленку, в результате чего открывается путь для диффузии кислорода и водорода в цирконий. Подобные дефекты недопустимы в промышленной технологии нанесения хромовых покрытий.

При отсутствии дефектов в покрытии основными путями диффузии кислорода и водорода в цирконий являются границы зерен, поэтому мелкозернистая, плотная структура, в которой по сравнению с крупно-столбчатой структурой больше межзеренных границ с достаточно высокой разориентацией, является предпочтительной для замедления окисления в аварийных ситуациях. При коррозионном воздействии, применительно к нормальным условиям эксплуатации, различия в структуре хромового покрытия не проявляются.

Экспериментально обосновано, что для существенного повышения стойкости к высокотемпературному окислению, длительной коррозии и наводороживанию толщина хромового покрытия на оболочках ТВЭЛов для промышленной эксплуатации должна составлять не менее 10 мкм.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Краснобаеву Н.Н. (АО «ВНИИНМ»), Джумаеву П.С. (НИЯУ МИФИ), Качалину Г.В. (НИУ МЭИ), Сиделеву Д.В. (НИ ТПУ) за подготовку циркониевых образцов с защитным хромовым покрытием, консультации по технологии их нанесения и оказанную помощь в проведении некоторых исследований.

Список литературы

1. 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. – Т. 448. – №.1-3. – С. 374-379.
2. Terrani K.A. Accident tolerant fuel cladding development: Promise, status, and challenges // *Journal of Nuclear Materials*. – 2018. – Т. 501. – С. 13-30.
3. Carmack W.J. The US DOE Accident Tolerant Fuel Development Program // *Nuclear Plant Journal*. – 2014. – Т. 32. – №. INL/JOU-14-31012.
4. Шелепов И.А., Мальгин А.Г., Маркелов В.А., Воробьев Е.Е., Шевяков А.Ю., Новиков В.В., Карпюк Л.А. Поведение циркониевых оболочек с хромсодержащим покрытием для ATF топлива в испытаниях на коррозию и высокотемпературное окисление // *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы*. – 2020. – №.4(105). – С. 4-16.

5. Шелепов И.А., Мальгин А.Г., Маркелов В.А., Шевяков А.Ю., Новиков В.В., Карпюк Л.А., Донников В.Е., Латунин В.И., Костенко Г.И. Стойкость к высокотемпературному окислению в проектной аварии LOCA циркониевых оболочек с хромовым покрытием для твэлов толерантного топлива // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы. – 2020. – №4(105). – С. 17-27.
6. Bischoff J., Delafoy C., Vauglin C., Barberis P., Roubeyrie C., Perch, D., Nimishakavi K. AREVA NP's enhanced accident-tolerant fuel developments: Focus on Cr-coated M5 cladding // Nuclear Engineering and Technology. – 2018. – Т. 50. – №.2. – С. 223-228.
7. Wiltz C., Bardel D., Cachat S., Sohn K. Overview of Framatome Activities Supporting Additive Manufacturing of Nuclear Fuel Components–2023 // Workshop on Advanced Manufacturing Technologies (ATM) for Nuclear Applications –October 24 -26, 2023.
8. Ko J., Kim J.W., Min H.W., Kim Y., Yoon Y.S. Review of manufacturing technologies for coated accident tolerant fuel cladding //Journal of Nuclear Materials. – 2022. – Т. 561. – С. 153562.
9. Мальгин А.Г., Федотов П.В., Шелепов И.А., Буланцова Е.Г., Маркелов В.А., Кузнецов В.И., Новиков В.В. Поведение оболочечных труб из сплава Э110опт на основе губки циркония производства АО ЧМЗ в условиях, моделирующих аварию с потерей теплоносителя // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы. – 2024. – №1(122). – С. 36-47.
10. Brachet J.-C., Idarraga-Trujillo I., Le Flem M., Le Saux M., Vandenberghe V., Urvoy S., Rouesne E., Guilbert T., Toffolon-Masclat C., Tupin M. Early studies on Cr-Coated Zircaloy-4 as enhanced accident tolerant nuclear fuel claddings for light water reactors // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Т. 517. – С. 268-285.
11. Kashkarov E., Sidelev D., Syrtanov M., Tang C., Steinbrück M. Oxidation kinetics of Cr-coated zirconium alloy: Effect of coating thickness and microstructure // Corrosion Science. – 2020. – Т. 175. – С. 108883.
12. Kashkarov E.; Sidelev D.; Rombaeva M.; Syrtanov M.; Bleykher G. Chromium coatings deposited by cooled and hot target magnetron sputtering for accident tolerant nuclear fuel claddings // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 389. – С. 125618.
13. Tang C., Stueber M., Seifert H. J., Steinbrueck M. Protective coatings on zirconium-based alloys as accident-tolerant fuel (ATF) claddings // Corrosion reviews. – 2017. – Т. 35. – №.3. – С. 141-165.
14. Yang J., Steinbrück M., Tang C., Große M., Liu J., Zhang J., Wang S. Review on chromium coated zirconium alloy accident tolerant fuel cladding //Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Т. 895. – С. 162450
15. Nuclear Energy Agency. State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels. – OECD Publishing, 2018.
16. Geelhood K. G., Luscher W. G. Degradation and Failure Phenomena of Accident Tolerant Fuel Concepts: Chromium Coated Zirconium Alloy Cladding // Pacific Northwest National Laboratory. – 2019. – С. 96.
17. Krejčí J., Ševeček M., Cvrček L., Kabátová J., Manoch, F. Chromium and chromium nitride coated cladding for nuclear reactor fuel // Proceedings of the 20th International Corrosion Congress, EUROCORR 2017. – 2017.
18. Hózer Z., Novotny T., Perez-Feró E., Horváth M., Csordás A. P., Szabó P., Ševeček M. Development of new cladding types for nuclear fuel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 903. – №.1. – С. 012004.
19. Brachet J.-C., Guilbert, T., Lesaux M., Rousselot J., Nony G., Toffolon-Masclat C., Pouillier E. Behavior of Cr-coated M5 claddings during and after high temperature steam oxidation from 800C up to 1500C // Topfuel 2018. – Topfuel 2018, 2018.