ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА Э-125 ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОКИСЛЕНИИ

В.Г. Асмолов[1], В.П. Смирнов[2], А.Ю. Лещенко[2], И.В. Кузьмин[2], А.С. Покровский[3], Г.П. Кобылянский[3], Д.В. Харьков[3]

[1]ОАО «Концерн "Росэнергоатом"», г. Москва
[2]ООО «НПФ "Сосны"», г. Димитровград
[3]ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград

Введение

Сплав Э-125 широко используется в ядерной энергетике. К наиболее известному его применению относятся технологические каналы и каналы СУЗ реактора РБМК и чехлы для ТВС реакторов ВВЭР. Учитывая такое значительное использование сплава данных по его свойствам в условиях аварийного перегрева явно недостаточно.

Специалистами ОАО «Концерн Росэнергоатом», ОАО «ГНЦ НИИАР» и ООО НПФ «Сосны» проведены работы по исследованию высокотемпературного окисления необлучённого сплава Э125 и сравнительный анализ с литературными данными по коррозионному поведению сплава Э110 и зарубежных сплавов состава Zr-2,5%Nb.

В докладе представлены:

– методология проведения исследований;

– экспериментальные кинетические и температурные зависимости привеса образцов, а также содержание водорода в образцах;

– результаты оптических исследований структуры образцов.

Экспериментальная установка и методика проведения испытаний

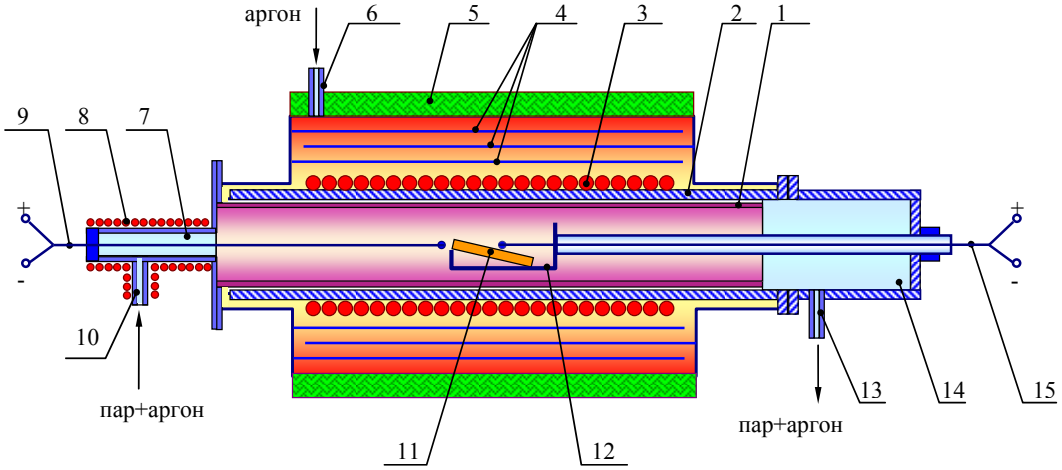
Для проведения коррозионных испытаний образцов материалов в пароаргоновой среде при температуре до 1100 °С в рамках выполнения работы создана установка высокотемпературного окисления.

Нагрев исследуемого образца до заданной температуры и выдержка в течение необходимого времени в паро-аргоновой среде осуществляется с помощью муфельной трубчатой печи (рисунок 1). Реакционный объем (канал) печи представляет собой керамическую трубу диаметром 22 мм и толщиной стенки 2 мм, размещенную в нагревателе.

Окисляемый образец размещается в реакционном канале печи в тигле, прикрепленном к подвижному штоку, позволяющему перемещать тигель с образцом из выходного узла в центральную часть канала и обратно. Для контроля температуры используются два термоэлектрических преобразователя (ТЭП) типа ХА, соответствующих ГОСТ Р 50431-92, в чехле из стали 12Х18Н10Т. Один опорный ТЭП постоянно находится вблизи центральной части канала, горячий спай второго ТЭП размещается непосредственно около поверхности образца, расположенного на тигле, и перемещается вместе со штоком.

При проведении экспериментов шток с образцами устанавливается так, чтобы центр образца находился в положении с нулевым аксиальным градиен-

том температуры в паро-аргоновой среде, при этом перепад температуры по длине образца не превышает 10 °С.

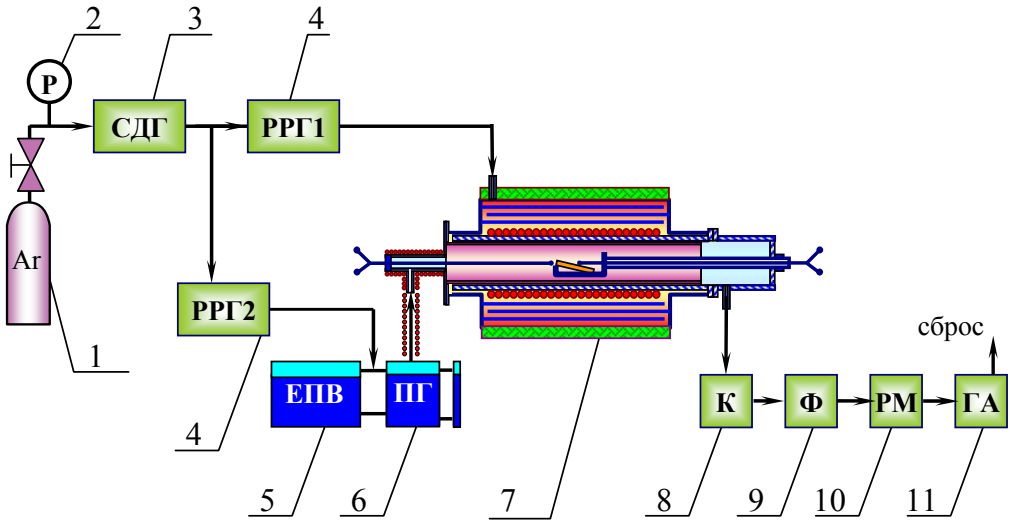


1 – керамический реакционный канал; 2 – труба нагревателя; 3 – нагреватель; 4 - тепловые экраны; 5 – теплоизоляция; 6 – патрубок подачи аргона; 7 – входной узел; 8 - пароперегреватель; 9 – опорный ТЭП; 10 – патрубок подачи паро-аргоновой смеси; 11 - образец; 12 - тигель на подвижном штоке; 13 – выходной патрубок газовой среды; 14 - выходной узел; 15 – ТЭП образца

Рисунок 1 – Схема печи для высокотемпературных коррозионных испытаний

Система газоподготовки (рисунок 2) предназначена для:

– подачи паро-аргоновой среды с заданными параметрами к образцу,
– осушения парогазовой смеси, выходящей из печи;
– определения концентрации водорода в осушенной газовой смеси.



1 – баллон с аргоном; 2 – манометр; 3 – стабилизатор давления газа; 4 – регуляторы расхода газа; 5 – емкость питательной воды; 6 – парогенератор; 7 – печь для окисления образцов; 8 – конденсатор паров воды; 9 - аэрозольный субмикрофильтр; 10 - измеритель массового расхода газа; 11 - газоанализатор Siemens Calomat 6E.

Рисунок 2 – Схема системы газоподготовки

Система сбора данных и управления экспериментом служит для измерения, отображения и регистрации параметров эксперимента, а также автоматического

управления оборудованием установки и поддержания заданных параметров эксперимента. Основу аппаратного обеспечения системы составляют нормализаторы сигналов ADAM-3014, 16-ти разрядные платы АЦП Advantech PCI-1716, ЦАП Advantech PCI-1723, персональный компьютер и тиристорный регулятор напряжения.

Система сбора данных и управления экспериментом обеспечивала контроль следующих параметров:

– измерение температуры образца и в центральной части реакционного канала в процессе испытаний с частотой 1 Гц;

– управление мощностью печи для нагрева до заданной температуры с заданной скоростью и поддержания заданной температуры при изотермическом окислении с точностью ± 10 °С в первые 30 с при выходе на заданный режим и ± 2 °С в течение последующей выдержки;

– расчет в режиме реального времени эквивалентного времени окисления образца на неизотермических участках.

– измерение расхода аргона;

– измерение температуры воды в парогенераторе и управление мощностью нагревателя парогенератора;

– измерение концентрации водорода в аргоне в выходной газовой линии.

Объекты исследований

Образцы сплава Э125 изготовлены из трубы канала СУЗ РБМК производства ОАО «ЧМЗ» (г. Глазов) в состоянии поставки. Из трубы с наружным диаметром $88^{+0,7}_{-0,1}$ мм и толщиной стенки $3,0^{\pm 0,3}$ мм вырезаны образцы шириной 13 мм и длиной 35 мм (рисунок 3). Для методических экспериментов использовались образцы сплава Э110. Образцы представляют собой отрезки оболочки твэла реактора ВВЭР-1000 в состоянии поставки с наружным диаметром 9,15±0,05 мм и толщиной стенки $0,69^{+0,07}_{-0,06}$ мм. Длина отрезков 20 мм.

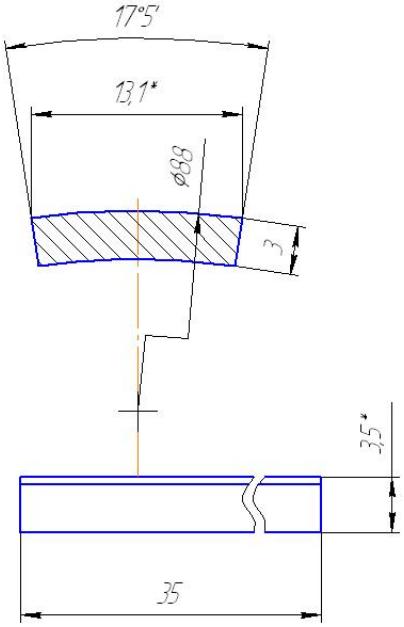


Рисунок 3 – Образец сплава Э125 для коррозионных испытаний

Порядок проведения экспериментов и методы посттестовых исследований

Перед экспериментом образцы промывали в этиловом спирте и дистиллированной воде, высушивали и фотографировали. Взвешивание образцов проводили на лабораторных аналитических весах SARTORIUS ANALITYC с погрешностью не более 0,2 мг. Измерение размеров образцов проводили с помощью штангенциркуля с погрешностью 0,05 мм.

В начале эксперимента образец помещали в тигель, установленный в холодной зоне рабочего канала печи. Затем проводилась герметизация печи, продувка аргоном и разогрев печи до достижения заданной температуры эксперимента в центральной части канала. В реакционный канал подавали пар после достижения 200°С в его центральной части. В течение нагрева печи образец находился в паро-аргоновой среде при температуре не выше 250°С. Последующее перемещение образца в центральную часть печи, нагретую до заданной температуры, обеспечивало высокую скорость нагрева образца – до 20 °С/с на начальном участке с последующим ее снижением до 0,8–1 °С/с при приближении к заданной температуре.

Охлаждение образца проводилось путем его извлечения в холодную часть канала с температурой не выше 250 °С. По окончании эксперимента определяли массу конденсата, собравшегося в приемной емкости конденсатора водяных паров.

После остывания образец извлекали из установки, взвешивали, фотографировали и передавали на металлографические исследования. Взвешивание окисленного образца проводилось на лотке известной массы во избежание потери рыхлых оксидных пленок.

Металлографическое исследование образцов после испытаний проведено для оценки степени и характера окисления наружной поверхности образцов. Образцы были залиты в обоймы сплавом Вуда или эпоксидной смолой. Далее образец разрезался алмазным кругом так, чтобы исследуемое поперечное сечение находилось в центре образца.

На оцифрованных изображениях микроструктур были измерены толщины оксида и слоя α-Zr(O) на поверхности. Измерения проведены на четырех участках каждого исследованного сечения. На изображении микроструктуры выделялись границы идентифицированных слоев и измерялась площадь каждого выделенного слоя. Усредненная толщина слоя вычислялась как отношение его площади к длине отрезка поверхности измеряемого участка. При вычислении площадей слоев α-Zr(O) за внешнюю границу слоя принималась граница его раздела с оксидом. Внутренняя граница проводилась по краю области с преобладанием в структуре зерен α-Zr(O).

Содержание водорода в образцах после испытаний определяли методом высокотемпературной экстракции в токе инертного газа (ВТЭИГ) на установке газового анализа [1]. Для измерений использовали модель газоанализатора «ELTRA» OH 900, оснащенного отдельным блоком с печью, где происходит плавление исследуемого образца и процесс газовыделения.

Для учета неизотермического окисления образцов при их нагреве и охлаждении, а также отклонений температуры от заданной в течение изотермической выдержки образца в пароаргоновой среде для каждого эксперимента

определяли эквивалентное время окисления, которое рассчитывается по соотношению, полученному из закона Аррениуса для скорости реакции:

$$t = \tau \cdot \frac{\sum_i \exp\left(-Q/\left(R \cdot T_i\right)\right)}{\exp\left(-Q/\left(R \cdot T\right)\right)}, \qquad (1)$$

где Q – энергия активации реакции окисления, кДж/моль;

R – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 кДж/(моль·К);

T – температура изотермического режима эксперимента, °С;

T_i – средняя температура на i-том шаге квантования, °С;

τ – шаг квантования, с.

Для цирконий-ниобиевого сплава Э125 энергия активации окисления принималась равной 86,5 кДж/моль – такой же, как для сплава Э110 [2].

Удельный привес испытанных образцов

С образцами сплава Э125 проведена серия экспериментов по окислению в паро-аргоновой среде при температурах 700, 800, 900, 1000 и 1100 °С. Для возможности проведения дальнейшего сравнительного анализа поведения разных сплавов при высокотемпературном окислении проведены методические эксперименты с образцами необлученных оболочек твэлов ВВЭР-1000 из сплава Э110.

На рисунках 4–8 приведены зависимости удельного привеса окисленных фрагментов РК СУЗ РБМК-1000 из сплава Э125. Там же для сравнения приведены опубликованные данные по кинетикам окисления зарубежного сплава Zr-2,5%Nb и Э110.

При температуре 700 °С кинетика окисления сплава Э125 (рисунок 4) имеет параболический характер (коэффициент степенной аппроксимации близок к 0,5) и в области малых времен выдержки хорошо совпадает с приведенными в работе [2] экспериментальными данными по окислению фрагментов необлученных оболочек твэлов реактора ВВЭР-1000 из сплава Э110.

В работе [2] также приведена консервативная кинетика окисления сплава Э110, описываемая параболическим законом

$$W^2 = K \cdot t, \qquad (2)$$

где W – удельный привес, мг/см^2;

K – параметр скорости реакции, мг^2/см^{4}с^2;

t – время, с;

Параметр скорости реакции описывается уравнением

$$K^{0,5} = 920 \cdot \exp\left(-\frac{10410}{T}\right), \qquad (3)$$

где T – температура изотермической выдержки образца, К.

В температурном диапазоне от 700 до 850 °С начальный этап кинетики окисления, описываемый параболическим законом, сменяется на линейный закон. Время до начала перелома в кинетике описывается уравнением

$$\tau = 7{,}867 \cdot 10^7 / T - 44856 . \quad (4)$$

Линейный закон окисления описывается уравнением

$$W = 18{,}4 \cdot \exp\left(-\frac{11706}{T}\right) \cdot \tau . \quad (5)$$

Как показано на рисунке 4, полученные данные по привесу образцов сплава Э125 при температуре изотермической выдержки 700 °С лежат значительно ниже консервативной зависимости для сплава Э110.

В работе [3] исследовалась кинетика окисления в паре при температуре 700 °С фрагментов напорных труб реактора CANDU, изготовленных из зарубежного сплава Zr-2,5%Nb. Нужно отметить, что в этих исследования перелома в кинетике окисления к линейной зависимости не наблюдалась. Полученные привесы для образцов сплава Э125 РК СУЗ РБМК-1000 находятся немного ниже данных для зарубежного сплава Zr-2,5%Nb, но в целом согласуются с ними.

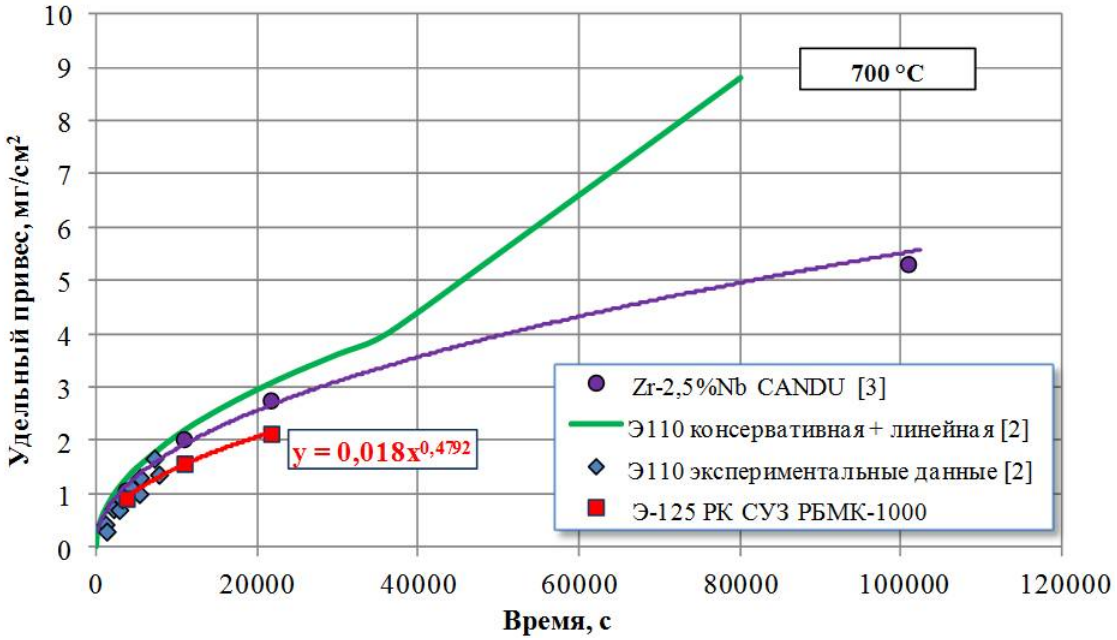


Рисунок 4 – Зависимость удельного привеса образцов от эквивалентного времени окисления при температуре изотермической выдержки 700 °С

При температуре 800 °С кинетика окисления сплава Э125 (рисунок 5) близка к линейной (коэффициент степенной аппроксимации равен 0,8). На рисунке 5 приведены для сравнения консервативная кинетика окисления и экспериментальные данные для сплава Э110 из работы [2], а также кинетика окисления сплава Э110 из работы [4].

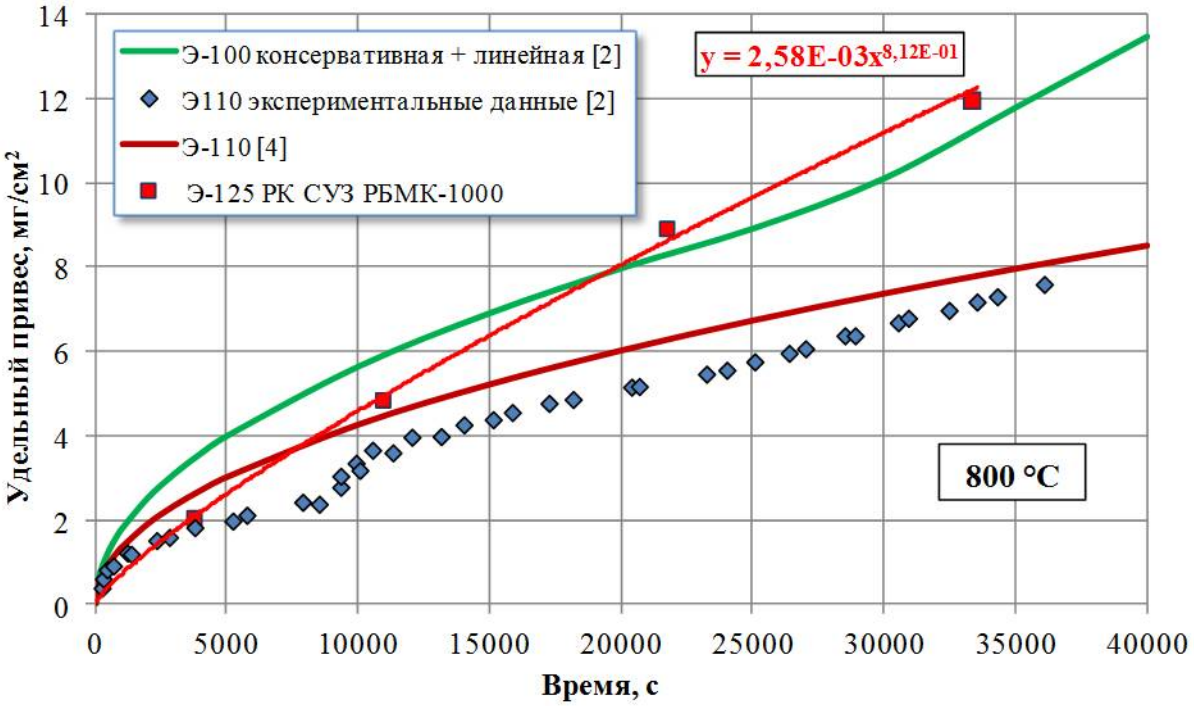


Рисунок 5 – Зависимость удельного привеса образцов
от эквивалентного времени окисления при температуре изотермической выдержки 800 °С

При окислении в течение менее 3 часов привесы образцов разных сплавов примерно совпадают, однако при увеличении времени скорость окисления сплава Э125 значительно возрастает. Как будет показано ниже при анализе внешних видов и фотографий микроструктуры образцов из сплава Э-125, это связано с тем, что при большем времени окисления плотная черная оксидная пленка превращается в белую расслаивающуюся.

При температуре 900 °С кинетика окисления сплава Э125 (рисунок 6) плохо описывается линейной и степенной зависимостью, но хорошо аппроксимируется логарифмической зависимостью. С увеличением времени окисления скорость реакции падает, однако удельные привесы образцов сплава Э125 в несколько раз выше, чем для сплава Э110. На диаграмму добавлена реалистическая зависимость для сплава Э110 из работы [5].

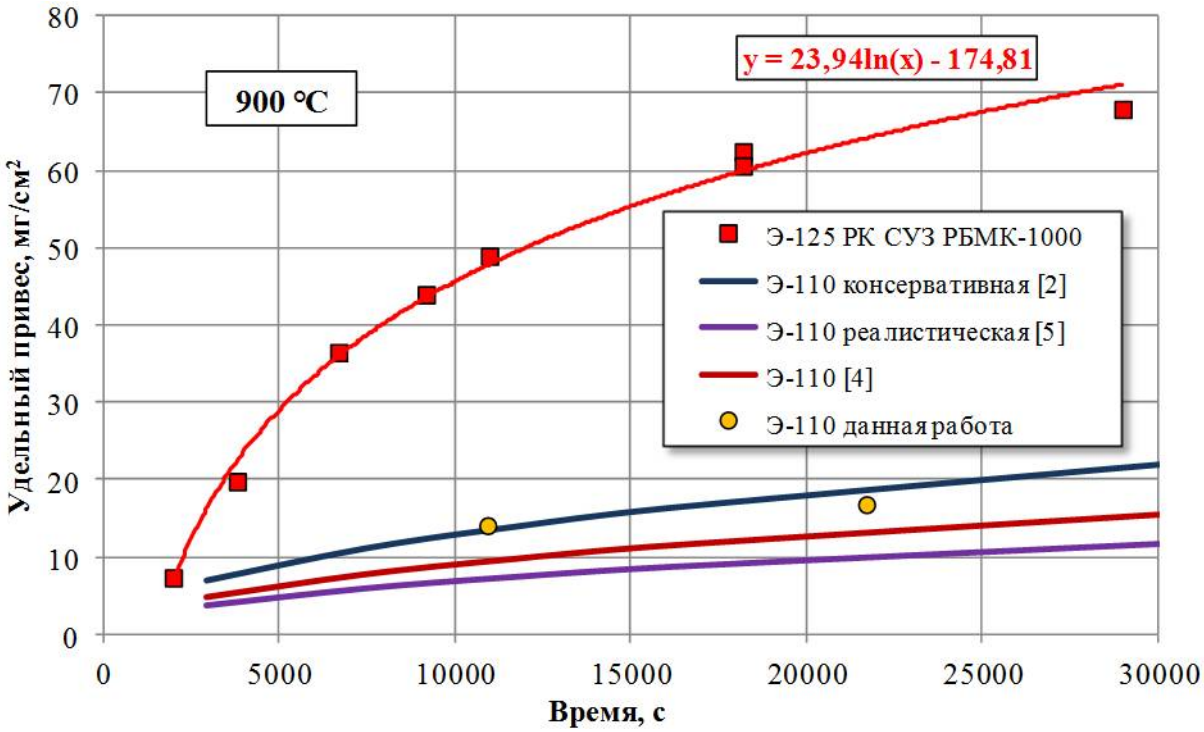


Рисунок 6 – Зависимость удельного привеса образцов
от эквивалентного времени окисления при температуре изотермической выдержки 900 °С.

Для проверки методики проведения экспериментов и подтверждения надежности получаемых результатов было решено провести методические эксперименты с использованием в качестве образцов фрагментов необлученных оболочек твэлов реактора ВВЭР-1000 из сплава Э110. Результаты хорошо совпали с консервативной зависимостью из работы [2] (см. рисунок 6) и подтвердили корректность получаемых результатов. Такая же проверка проведена для испытаний по высокотемпературному окислению при температурах 1000 и 1100 °С.

При температуре 1000 °С кинетика окисления сплава Э125 (рисунок 7) близка к линейной (коэффициент степенной аппроксимации равен 0,87). На рисунке 7 приведены для сравнения кинетика окисления цилиндрических образцов зарубежного сплава Zr-2,5%Nb из работы [6]. Удельные привесы образцов сплава Э125 оказались в несколько раз выше, чем для сплава Э110, но по порядку величин совпадали с данными для зарубежного сплава Zr-2,5%Nb. Однако кинетика окисления сплава Zr-2,5%Nb подчиняется параболическому закону в отличие от полученной практически линейной кинетики окисления сплава Э125.

Также был проведен методический эксперимент с использованием в качестве образца фрагмента необлученной оболочки твэла реактора ВВЭР-1000 из сплава Э110. Результаты эксперимента хорошо совпали с зависимостью из работы [4] и подтвердили корректность полученных результатов.

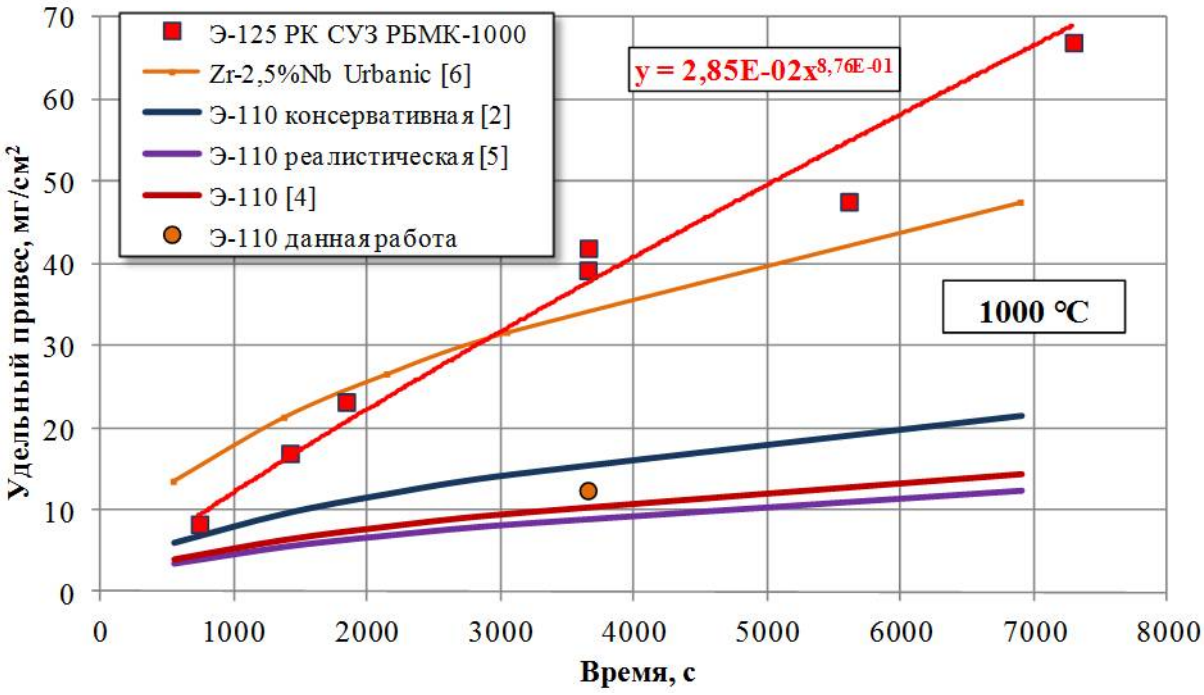


Рисунок 7 – Зависимость удельного привеса образцов
от эквивалентного времени окисления при температуре изотермической выдержки 1000 °С

При температуре 1100 °С кинетика окисления сплава Э125 (рисунок 8) имеет параболический характер (коэффициент степенной аппроксимации близок к 0,5) и почти полностью совпадает с кинетикой окисления для сплава Э110, показанной в работах [4,5]. Необходимо отметь полное несовпадение с кинетикой окисления зарубежного сплава Zr-2,5%Nb из работы [6] - полученные нами данные для сплава Э125 в несколько раз ниже. Существенное расхождения в кинетике окисления цирконий-ниобиевых сплавов одного состава и разной технологии изготовления наблюдались и ранее, например, для сплавов Э110 на основе электролитического и губчатого циркония [7].

Также были проведены два методических эксперимента с использованием в качестве образцов фрагментов необлученной оболочки твэла реактора ВВЭР-1000 из сплава Э110. Результаты эксперимента полностью совпали с зависимостями из работ [4,5], кинетикой окисления сплава Э125 и подтвердили корректность получаемых результатов.

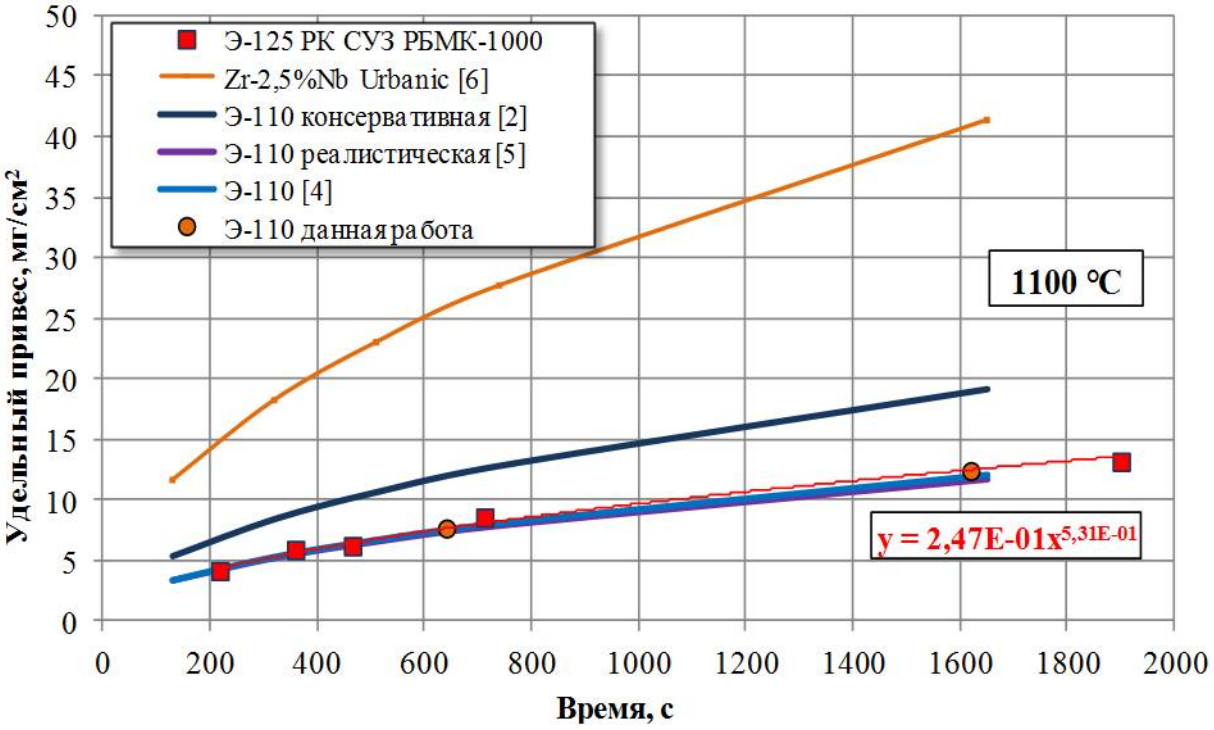


Рисунок 8 – Зависимость привеса образцов от эквивалентного времени окисления при температуре изотермической выдержки 1100 °С

Исследование микроструктуры образцов

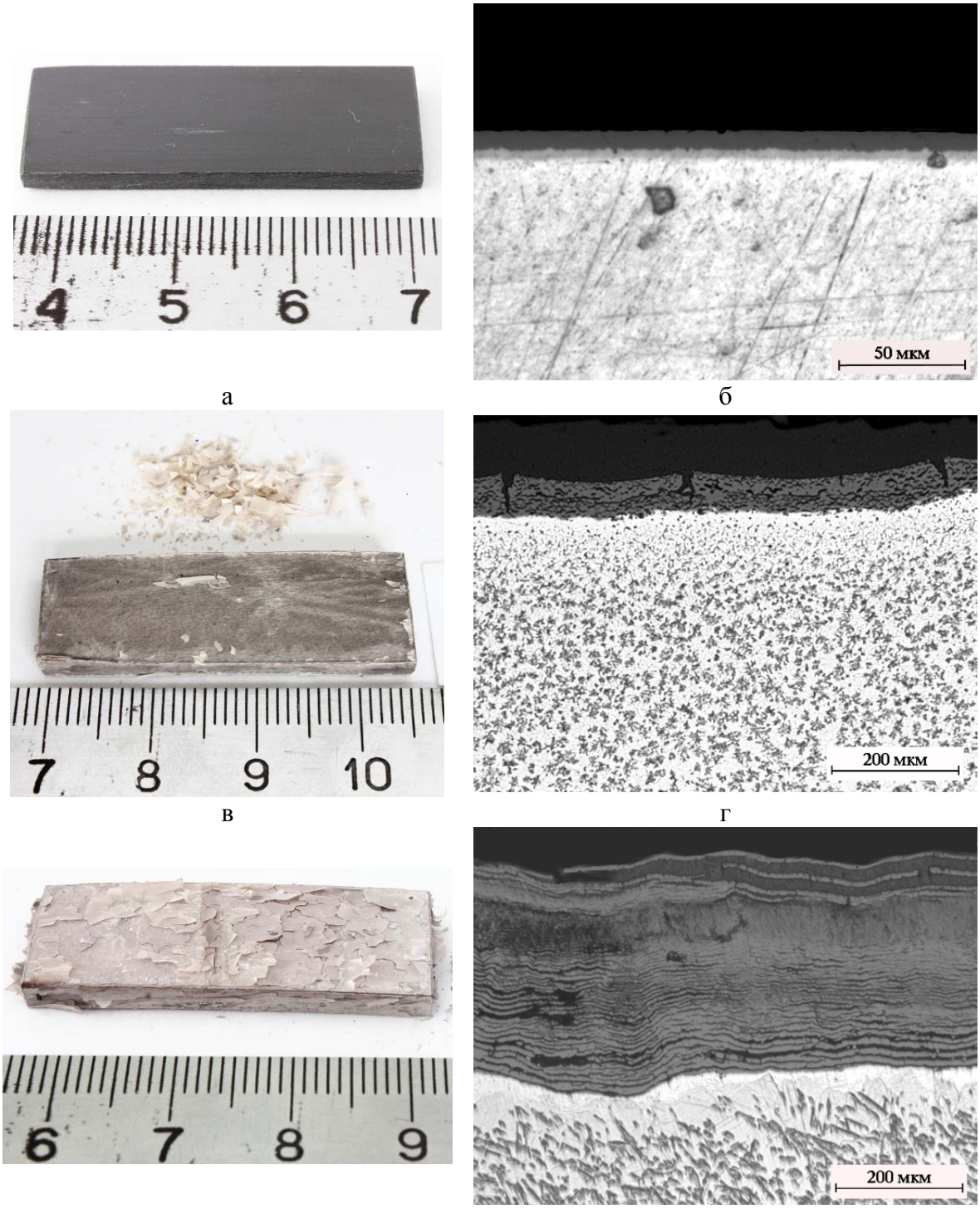
Результаты металлографических исследований показали, что оксидная пленка на поверхности образцов, испытанных при температуре 700 °С, является плотной (рисунок 9б), а внешний вид образцов после испытаний свидетельствует об отсутствии расслоений (рисунок 9а).

При увеличении времени окисления образцов при температуре 800 °С плотная черная оксидная пленка превращается в белую расслаивающуюся С (рисунок 9в,г). В текстуре слоев оксида наблюдаются мелкие вытянутые вдоль поверхности образца поры, оксидная пленка прерывается крупными трещинами, перпендикулярными к поверхности образца. В толще металла наблюдаются гидриды в виде пластинок, расположенных преимущественно параллельно поверхности образца. Увеличения зерна в основном металле не наблюдается.

Внешний вид и фотографии микроструктуры образцов после испытаний при 900 и 1000 °С (рисунки 9д,е и 10а,б) показывают расслоение рыхлой розовато-белой оксидной пленки на множество очень тонких слоев при общей большой толщине оксида циркония.

После испытаний при 1000 и 1100 °С наблюдается увеличение зерна в основном металле.

Образцы, испытанные при температуре 1100 °С (рисунки 10в,г) при малых временах окисления имеют черный цвет, при увеличении времени окисления появляются локальные отслоения белого цвета. На фотографиях микроструктуры образцов после испытаний (рисунок 10г) наблюдается плотная оксидная пленки на поверхности образцов.



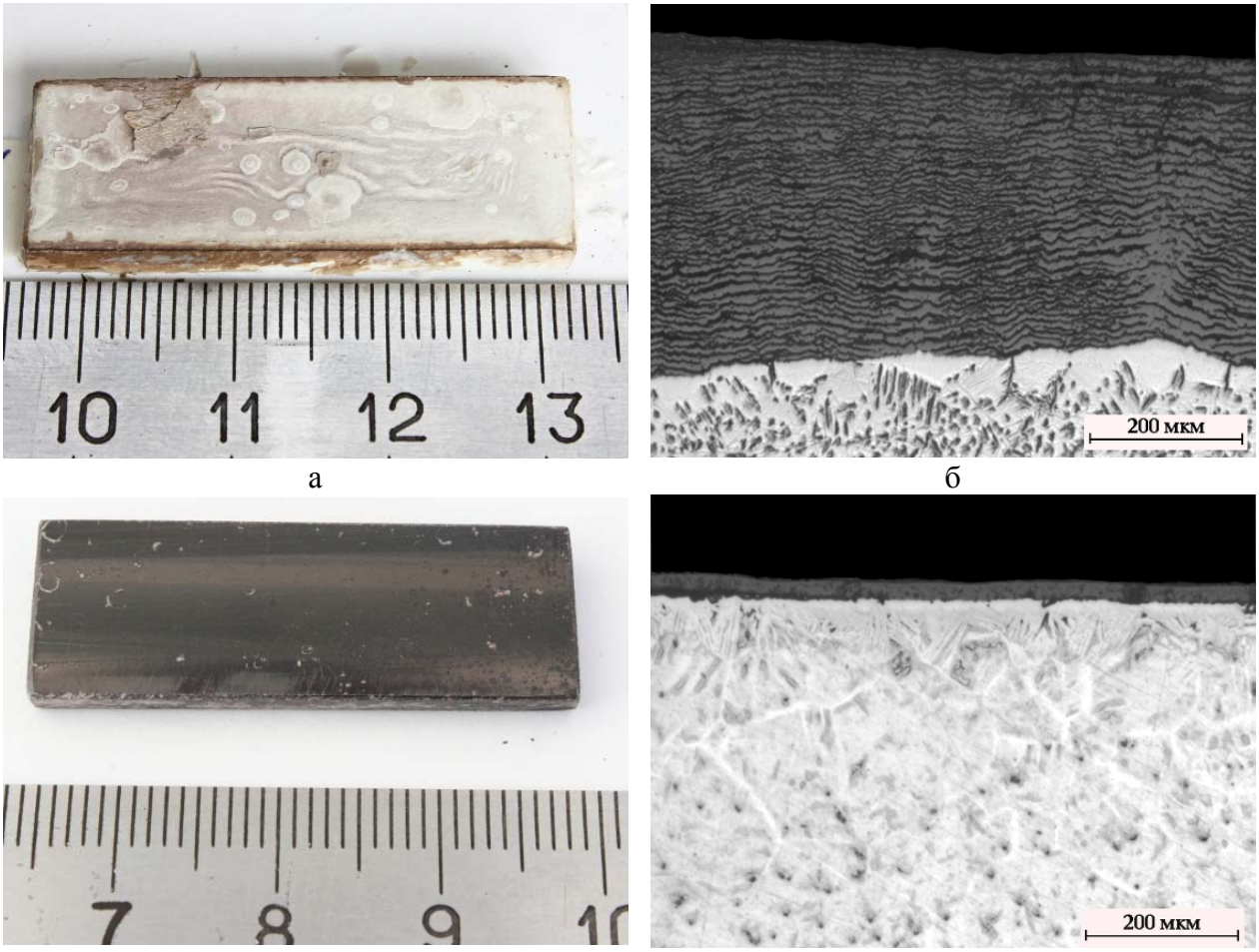
а б

в г

д е

а, б - 700 °С, 3 ч
в, г - 800 °С, 9 ч 15 мин
д, е - 900 °С, 2 ч 30 мин

Рисунок 9 - Внешний вид и микроструктура образцов после испытаний



а б

в г

а, б - 1000 °С, 2 ч
в, г - 1100 °С, 7 мин 30 с

Рисунок 10 - Внешний вид и микроструктура образцов после испытаний

На рисунках 11–15 приведены зависимости толщины оксидной пленки от эквивалентного времени окисления для температуры в диапазоне 700 – 1100 °С. Рост толщины пленки от времени окисления подчиняется тем же закономерностям, что наблюдаются для временных зависимостей удельного привеса образцов - для температуры 700 и 1100 °С подчиняется параболическому закону, для температуры 800 и 1000 °С наилучшим образом аппроксимируется линейным приближением, а при температуре 900 °С – логарифмической зависимостью от времени.

Большой разброс точек в диапазоне температуры 800–1000 °С объясняется значительной неравномерностью толщины оксида циркония на поверхности образцов, изменением плотности оксида из-за неравномерной структуры его слоев вдоль поверхности образцов, а также может быть связан с частичной потерей наружных слоев оксида при подготовке образца для металлографических исследований.

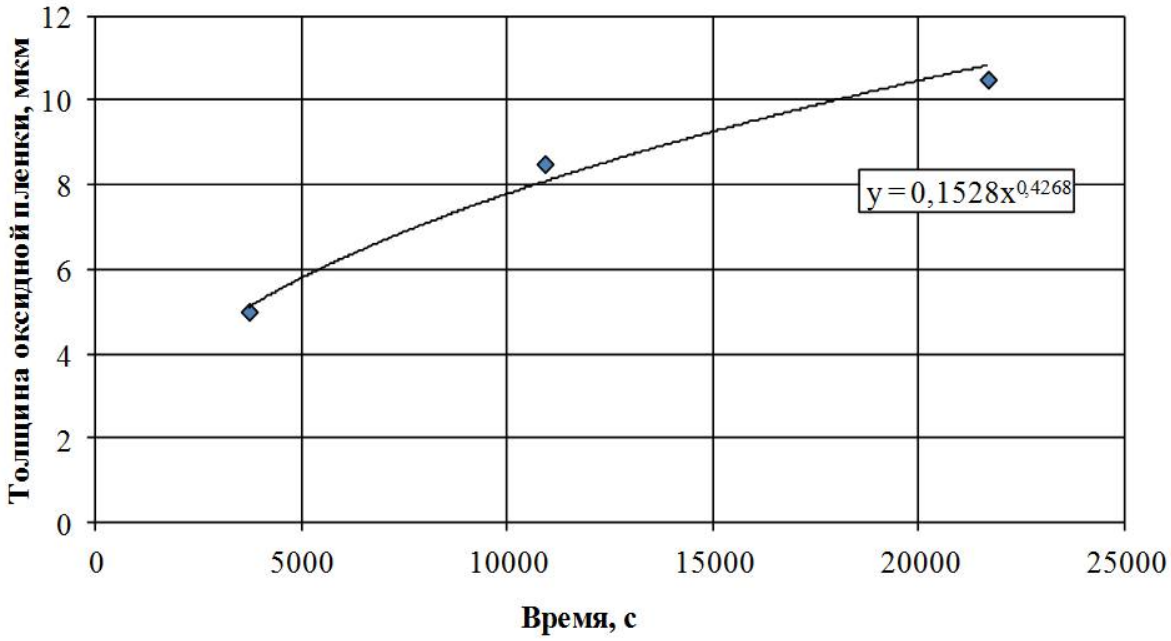


Рисунок 11 – Зависимость средней толщины оксидной пленки
от эквивалентного времени окисления
при температуре изотермической выдержки 700 °С

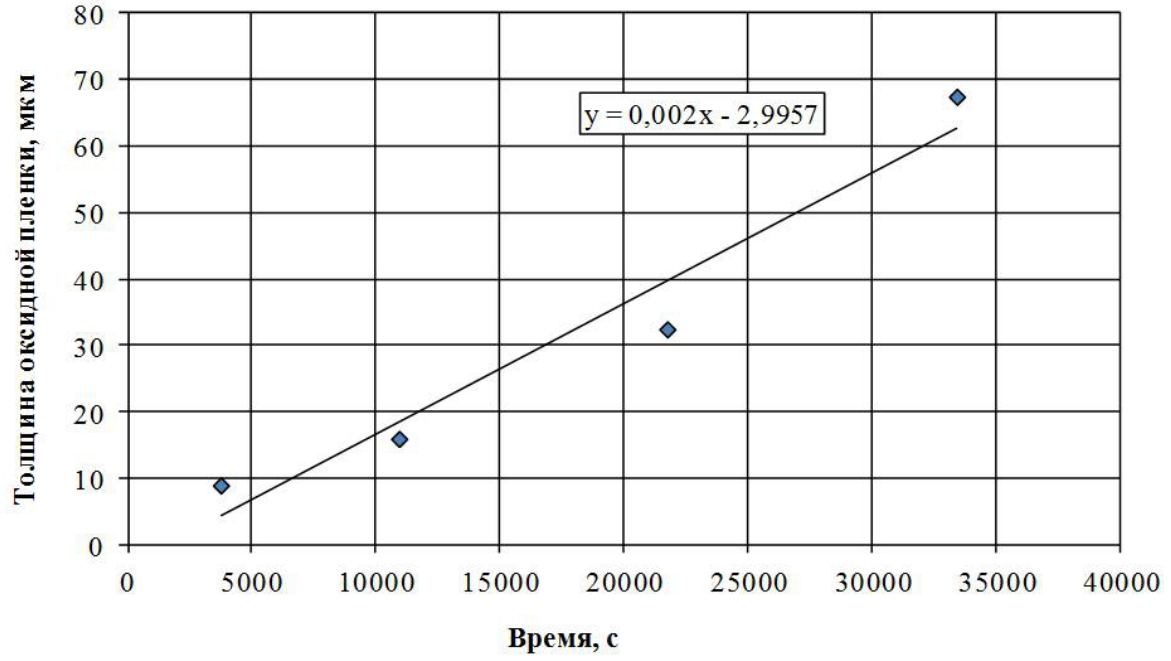


Рисунок 12 – Зависимость средней толщины оксидной пленки
от эквивалентного времени окисления
при температуре изотермической выдержки 800 °С

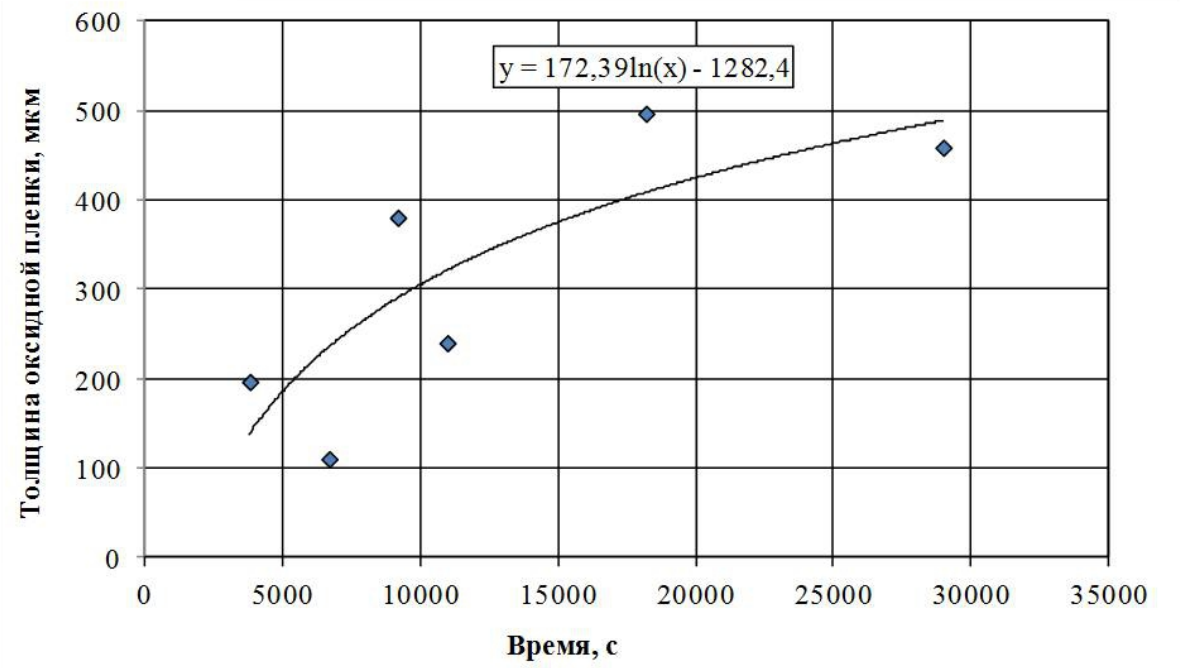


Рисунок 13 – Зависимость средней толщины оксидной пленки
от эквивалентного времени окисления
при температуре изотермической выдержки 900 °С

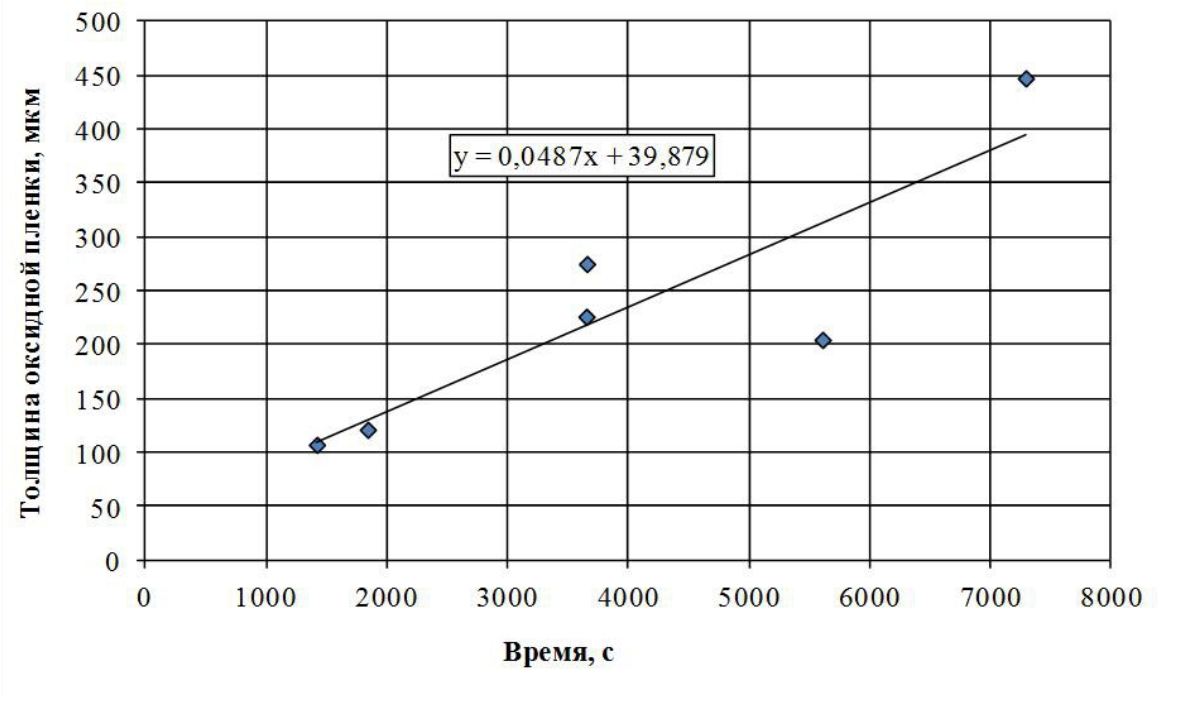


Рисунок 14 – Зависимость средней толщины оксидной пленки
от эквивалентного времени окисления
при температуре изотермической выдержки 1000 °С

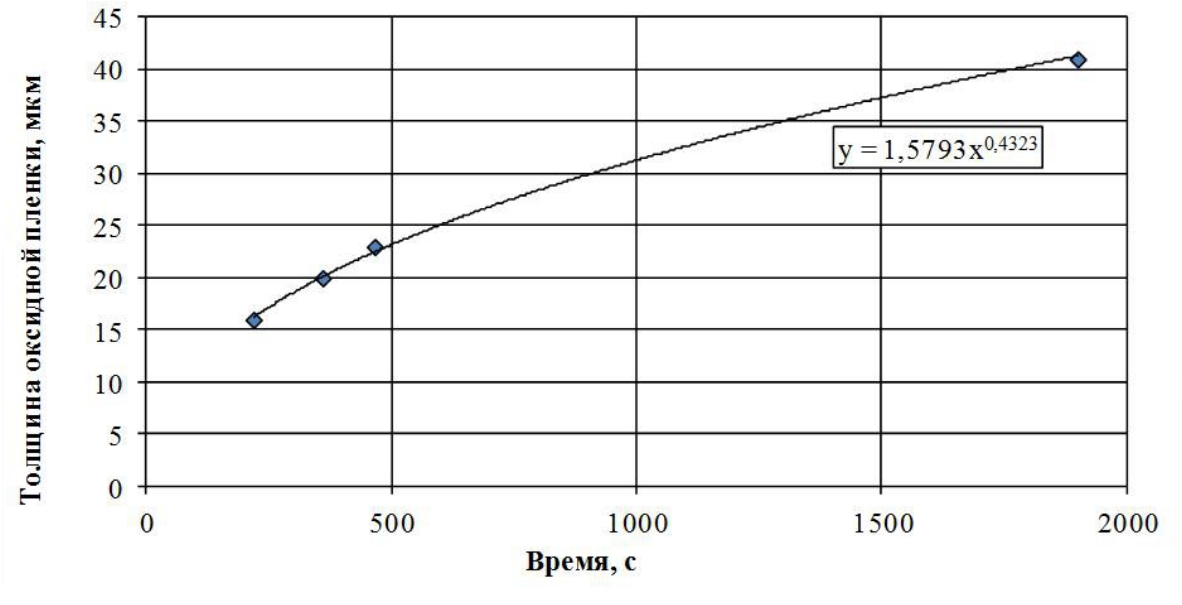


Рисунок 15 – Зависимость средней толщины оксидной пленки
от эквивалентного времени окисления
при температуре изотермической выдержки 1100 °С

Содержание водорода в образцах

В ходе большинства экспериментов с образцами из сплава Э125 на каждом шаге квантования измерялась также концентрация водорода и расход газа в выходной линии установки. По результатам изменения концентрации водорода в ходе эксперимента определяли скорость выход водорода при окислении образцов по выражению

$$\upsilon_i = \frac{C_i \cdot Q_i \cdot M_{H_2}^{\text{іїёй}}}{100 \cdot V_m}, \qquad (6)$$

где υ_i – скорость выхода водорода на i - ом шаге квантования, мг/с;

C_i – концентрация водорода, %;

Q_i – расход газа, мл/с,

$M_{H_2}^{\text{іїёй}}$ – молярная масса водорода, г/моль;

V_m – молярный объем газа, 22,4 л/моль.

Интегральный выход водорода (в мг) рассчитывался по выражению

$$M_{H_2} = \tau \cdot \sum_{i=1}^{N} \frac{\upsilon_i + \upsilon_{i+1}}{2}, \qquad (7)$$

где N – число измерений.

Оценка количества водорода, поглощенного в образце, осуществлялась на основе данных по интегральному выходу водорода и привесу образца. На каждый моль молекулярного кислорода, пошедшего на формирование оксида циркония, приходится два моля молекулярного водорода, поэтому масса водорода, образующегося при окислении в паре, в восемь раз меньше привеса образца. Таким образом, оценка массовой доли водорода в образце (в wppm) определяется выражением

$$\omega_{H_2} = 1000 \cdot \frac{\Delta M_{обр} / 8 - M_{H_2}}{M_{обр}}, \quad (8)$$

где $\Delta M_{обр}$ – привес образца, мг;

$M_{обр}$ – масса образца, г.

Концентрация водорода в зависимости от удельного привеса в образцах сплавов Э125 и Э110, рассчитанная по этой методике, приведена на рисунке 16. Вне зависимости от температуры окисления концентрация водорода увеличивается с ростом удельного привеса образцов, выходя на насыщение при привесах более 50 мг/см^2. В двух экспериментах при температуре 1000 °С для сплава Э125 и в одном эксперименте при температуре 900 °С для сплава Э110 наблюдаются заниженные расчетные концентрации водорода по сравнению с общим массивом результатов.

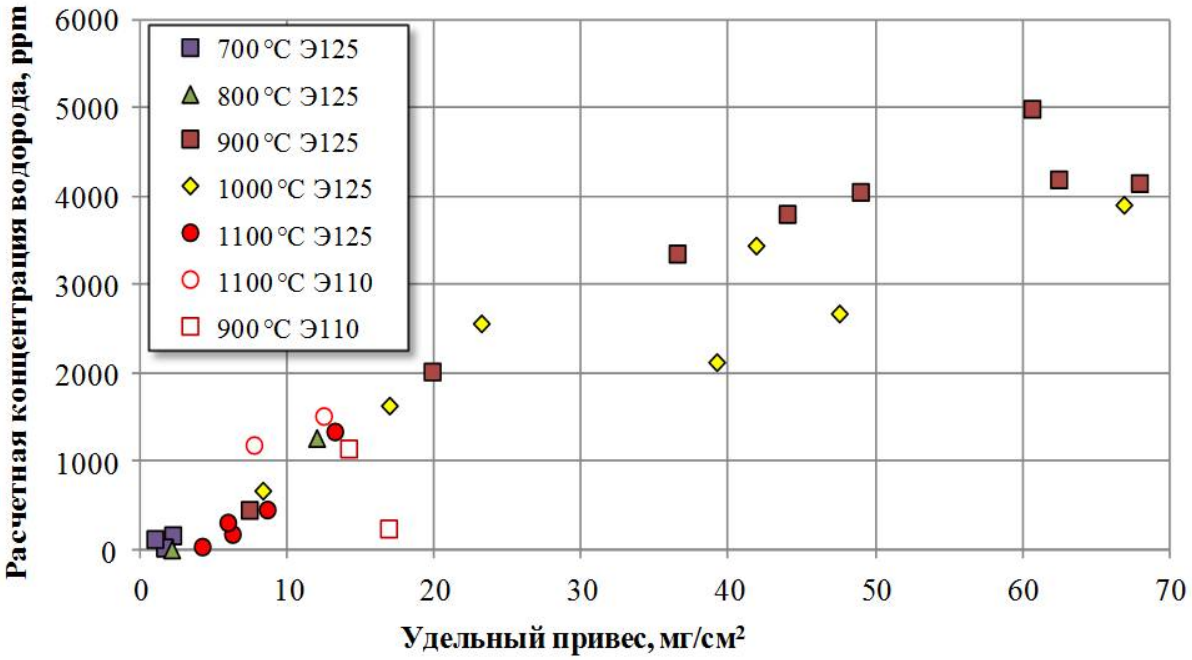


Рисунок 16 – Зависимость расчетной концентрации водорода в образцах от удельного привеса для разных температурных режимов эксперимента.

В таблице 1 приведено сравнение результатов измерения массовой доли водорода в образцах методом термоэкстракции и расчетной концентрации. Отмечается удовлетворительное совпадение результатов для низких концентраций и значительное расхождение для высоких расчетных концентраций.

Таблица 1 – Сравнение расчетной и измеренной концентраций водорода в образцах

Температура, °С	Эквивалентное время, с	Массовая доля водорода, wppm:	
		Измеренная	Расчетная
800	33386	470	1269
1000	7292	1430	3907
1000	739	630	673
1100	712	360	459

Заключение

Проведена серия испытаний на высокотемпературное окисление в паре в диапазоне температур 700 – 1100 °С с шагом 100 °С образцов из сплава Э125 в виде фрагментов необлученного канала СУЗ реактора РБМК-1000. Определены зависимости удельного привеса образцов и толщины оксидной пленки от времени окисления, исследована микроструктура образцов, определено содержание водорода в образцах.

При температуре 700 и 1100 °С кинетика окисления сплава Э125 имеет параболический характер, оксидные пленки имеют плотную структуру. При температурах 800 и 1000 °С кинетика окисления сплава Э125 близка к линейной. В текстуре слоев оксида после окисления при температуре 800 °С наблюдаются мелкие вытянутые вдоль поверхности образца поры, оксидная пленка прерывается крупными перпендикулярными к поверхности образца трещинами. При температуре 900 °С кинетика окисления аппроксимируется логарифмической зависимостью. После окисления при температурах 900 и 1000 °С наблюдается расслоение рыхлой белой оксидной пленки на множество очень тонких слоев при общей большой толщине оксида циркония.

При температурах 900 и 1000 °С скорость окисления сплава Э125 в несколько раз выше скорости окисления сплава Э110.

Полученные данные могут быть использованы при анализе нештатных и аварийных ситуаций, связанных с перегревом изделий из сплава Э-125.

Список литературы

1. Шишалова Г.В., Заморский Д.В., Повстянко А.В., Маершина Г.И. Определение содержания водорода в облученных циркониевых сплавах./ Физика и химия обработки материалов. №1, 2009. С.19-22.
2. Yu.K. Bibilashvili, N.B. Sokolov, L.N. Andreeva-Andrievskaya, A.V.Salatov, A.M. Morozov, High-temperature Interaction of Fuel Rod Cladding Material (Zr1%Nb alloy) with Oxygen-containing Mediums. // Proceedings of IAEA Technical Committee on Behavior of LWR Core Materials under Accident Conditions, held in Dimitrovgrad, Russia, 9-13 October 1995. IAEA TECDOC 921, Vienna, 1996, pp. 117-128.
3. Maria Mihalache, Vasile Radu, Dumitru Ohai, Mărgărit Pavelescu. Study on the microstructural changes in Zr-2.5Nb due to the LOCA thermal transients. University POLITEHNICA of Bucharest Scientific Bulletin, Series B, Vol. 72, Iss. 4, 2010, pp. 185-196.
4. L. Yegorova, K. Lioutov, N. Jouravkova, A. Konobeev, V. Smirnov, V. Chesanov, A. Goryachev. Experimental study of embrittlement of Zr-1%Nb VVER cladding under LOCA-relevant conditions. NUREG/IA-0211, IRSN 2005-194, NSI RRC KI 3188, March 2005.
5. Yu.K.Bibilashvili, N.B.Sokolov, A.V.Salatov, L.N.Andreyeva-Andrievskaya, O.A.Nechaeva, F.Yu.Vlasov RAPTA-5 code: modelling behaviour of VVER-type fuel rods in design basis accidents verification calculations. Proceedings of IAEA Technical Committee on Behaviour of LWR Core Materials under Accident Conditions, held in Dimitrovgrad, Russia, on 9-13 October 1995. IAEA-TEC-DOC-921, Vienna, 1996, pp.139-152.

6. Urbanic V.F. Oxidation of zirconium alloys in steam at 1000 to 1850 °C. Zirconium in the Nuclear Industry. ASTM STP 633. A. L. Lowe, Jr. and G. W. Parry, Eds., American Society for Testing and Materials, 1977, pp. 168-181.
7. А. В. Горячев, Ю. Ю. Косвинцев, А. Ю. Лещенко. Особенности кинетики высокотемпературного окисления облученных оболочек ВВЭР, Физика и химия обработки материалов. - 2009. - № 2. - С. 14-23. - ISSN 0015-3214.

ПРОВЕДЕНИЕ РЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТУГОПЛАВКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ЯЭДУ МЕГАВАТТНОГО КЛАССА

В.Е. Алексеев, С.А. Ильенко, Н.Ю. Марихин, С.В. Серёдкин

ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград

Введение

Работа по реакторным испытаниям тугоплавких конструкционных материалов выполнялась в рамках проекта по исследованию топливных и конструкционных материалов вновь создаваемой по решению Комиссии при Президенте РФ по модернизации и технологическому развитию экономики России от 28.10.2009 № 5 инновационной ядерной энергодвигательной установки (ЯЭДУ) для космического транспортно-энергетического модуля (ТЭМ). Установка предполагает использование в своей конструкции новых видов топлива и жаропрочных материалов. В качестве основного конструкционного материала активной зоны ЯЭДУ планируется использование тугоплавкого сплава на основе молибдена ТСМ-7. Свойства и работоспособность ТСМ-7 при параметрах работы ЯЭДУ в настоящее время экспериментально практически не изучены.

Целью работы являлось проведение реакторных испытаний образцов ТСМ-7 при температурах (1000-1250)°С и плотности потока нейтронов (Е >0,1 МэВ) - $(1,5\pm0,5)\cdot10^{15}$ н/(см^2·с), до флюенса нейтронов (Е >0,1 МэВ) - $5\cdot10^{22}$ н/см^2. В результате проведения испытаний, при послереакторных исследованиях будут впервые получены данные по работоспособности конструкционных материалов из тугоплавкого сплава на основе молибдена ТСМ-7 в условиях, максимально приближенных к проектным.

Схема загрузки и конструкция облучательного устройства.

Для удовлетворения технических требований по плотности потока нейтронов, облучение образцов ТСМ-7 проводилось в активной зоне реактора СМ-3. Для этого в ячейку реактора №66 загружена ТВС типа 184.10.000, со-