

ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛИ ЭП823 В ЖИДКОМ СВИНЦЕ ПУТЕМ ЕЕ ОБРАБОТКИ ПОТОКАМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ

В.Л. Якушин, Б.А. Калинин, П.С. Джумаев, М.Г. Исаенкова, Ю.А. Перлович,

В.М. Троянов¹, А.Е. Русанов¹, А.П. Демишонков¹

Московский инженерно-физический институт (Государственный университет);

¹ *ФГУП ГНЦ РФ ФЭИ им. А.И. Лейтунского, г. Обнинск, Россия*

Исследовано влияние предварительной импульсной плазменной обработки на коррозионную стойкость отрезков твэльных труб из хромистой ферритомартенситной стали ЭП823 (16X12СМВФБР) в жидком свинце в условиях статических и динамических испытаний. Установлено, что модифицирование структурно-фазового состояния приповерхностных слоев стали потоками плазмы приводит к снижению толщины коррозионного слоя (оксидной пленки) более чем в 2 раза. Пострадиационный отжиг образцов в вакууме перед коррозионными испытаниями дополнительно уменьшает толщину оксидного слоя, и повышение коррозионной стойкости достигает более 3 раз. При этом средняя скорость коррозии в потоке жидкого свинца при температуре 650 °С и длительности испытаний 1000 ч составляет 14,0 и 4,5 нм/ч для исходных и модифицированных трубок соответственно.

1. ВВЕДЕНИЕ

Работоспособность активных зон ядерных энергетических установок при заданных рабочих параметрах во многом определяется долговечностью оболочек тепловыделяющих элементов (твэлов). В связи с работами по созданию перспективного реактора на быстрых нейтронах, в частности, безопасного реактора БРЕСТ-ОД-300, для современного реакторного материаловедения актуальна проблема физико-химического взаимодействия жидкого свинца с материалами оболочек твэлов. Достижение высоких выгораний ядерного топлива, одним из препятствий которого является коррозия оболочки под действием расплавленного свинца, служит необходимым условием для экономически выгодной эксплуатации данного типа реактора. В связи с этим весьма актуальной задачей является разработка методов повышения коррозионной стойкости в жидком свинце перспективных оболочечных сталей.

В настоящее время рассматривается несколько возможных направлений повышения коррозионной стойкости оболочек твэлов. Одно из них – инженерное, связанное с поддержанием концентрации кислорода в расплаве свинца в узком интервале на определенном уровне $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ ат.%, при которой жидкометаллическая коррозия и окисление сталей минимальны [1]. Однако это направление сопряжено с большими техническими трудностями в его реализации применительно к крупногабаритным энергетическим установкам. Среди других возможных решений данной проблемы рассматривается разработка новых коррозионно-стойких сталей, нанесение защитных покрытий и модифицирование приповерхностных слоев сталей с использованием концентрированных потоков энергии (импульсные электрон-

ные пучки и потоки плазмы) [1–3] и ионной имплантации.

Воздействие потоков высокотемпературной импульсной плазмы (ВТИП) на твердое тело приводит к созданию приповерхностных слоев с модифицированным структурно-фазовым состоянием (в том числе и неравновесным), имеющих, как правило, высокие физико-механические и физико-химические свойства: микротвердость, износостойкость, прочностные характеристики, эрозионную и коррозионную стойкость и другие [3–10].

В данной работе исследовалось влияние предварительной импульсной плазменной обработки на физико-химическое взаимодействие жидкого свинца со сталью в условиях статических и динамических изотермических испытаний. В качестве исследованного материала была выбрана перспективная для оболочки твэлов реактора на быстрых нейтронах высоколегированная хромистая ферритомартенситная сталь ЭП823 (16X12СМВФБР).

Целью работы было выявление возможности использования обработки стали ЭП823 потоками высокотемпературной импульсной плазмы для повышения ее коррозионной стойкости в жидком свинце и поверхностного упрочнения.

Для достижения указанной выше цели решались следующие задачи.

1. Отработка режимов обработки фрагментов серийных твэльных труб из стали ЭП823 потоками плазмы в лабораторном (опытном) образце импульсной плазменной установки типа Z-пинча [4].
2. Выявление закономерностей структурно-фазовых изменений, поверх-

ностного упрочнения и коррозионной стойкости образцов, модифицированных потоками импульсной плазмы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы для исследований были изготовлены из штатных твэльных труб диаметром 6,9 и 10,5 мм в виде фрагментов труб длиной 50 мм и обрабатывались потоками азотной и гелиевой ВТИП с длительностью импульса ~15 мкс. В качестве основных, ва-

рируемых при обработке, параметров были напряжение зарядки конденсаторов $U = 10 \dots 18,5$ кВ, которое определяет плотность энергии q потока плазмы, и количество импульсов облучения $N = 1 \dots 6$. Давление P рабочего газа в камере, определяющее плотность частиц в потоке, составляло 36 и 67 Па. Часть образцов в процессе обработки потоками ВТИП подвергалась дополнительному поверхностному легированию хромом или алюминием путем их осаждения при испарении соответствующих тонких проволок.

Основные режимы плазменной обработки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы облучения образцов потоками импульсной плазмы

| Марка образца | Номер обработки | Условия плазменной обработки | | | Примечания | |
|---------------|-----------------|------------------------------|----------|----------|------------|---------------------------|
| | | Тип плазмы | U , кВ | N , ед | | P , Па |
| He01 | 1 | гелиевая | 14,0 | 3 | 36 | |
| He02 | 1 | | 14,0 | 3 | 36 | Доп. отжиг* |
| He03 | 2 | | 14,0 + | 3+ | 36 | Соосаждение хрома |
| He04 | 2 | | 14,5 | 1 | 36 | Соосаждение хрома + отжиг |
| | | | 14,0 + | 3+ | 36 | |
| | | | 14,5 | 1 | 36 | |
| N05 | 3 | азотная | 15,5 | 3 | 36 | Доп. отжиг |
| N06 | 4 | | 18,5 | 3 | 67 | Доп. отжиг |
| N07 | 3 | | 15,5 | 3 | 36 | |
| N08 | 4 | | 18,5 | 3 | 67 | |
| N09 | 5 | | 15,2 + | 4 + | 36 | Соосаждение хрома + отжиг |
| N10 | 5 | | 15,5 | 2 | 36 | Соосаждение хрома |
| | | | 15,2 + | 4 + | 36 | |
| | | | 15,5 | 2 | 36 | |
| N11 | 6 | | 15,2 | 3 | 36 | |
| N12 | 6 | | 15,2 | 3 | 36 | Доп. отжиг |

*Пострадиационный отжиг в вакууме при $T=600$ °С, $\tau=3$ ч

Коррозионные испытания проводились в два этапа. На первом этапе выполнялись статические изотермические испытания с выдержкой образцов в жидком свинце в герметичном контейнере (в атмосфере аргона) при температурах 650 и 750 °С в течение 100 и 500 ч. Для выяснения роли растворенного в свинце кислорода в экспериментах варьировалась его концентрация: использовался свинец с предварительной очисткой от кислорода и, наоборот, дополнительно насыщенный избыточным кислородом путем введения оксида РbO.

На втором этапе в ГНЦ РФ ФЭИ проводились динамические коррозионные испытания в свинцовом циркуляционном стенде ЦУ-1 при повышенном $((5 \dots 8) \cdot 10^{-5}$ мас.%) контролируемом содержании кислорода при температуре 650 °С в течение 1000 ч. Скорость потока свинца составляла $(1,0 \pm 0,1)$ м/с. Были использованы образцы из трубок длиной 50 мм, имеющие с двух сторон негерметичные заглушки. Таким образом, внутри трубок также находился свинец, однако его взаимодействие с поверхностью здесь проходило практически в статическом (квазистатическом) режиме. Это позволило при металлографических исследованиях сравнивать образующиеся коррозионные слои на внешней и внутренней стороне трубок, испытанных в различных условиях (динамических и квазиста-

тических). Исходные, облученные потоками плазмы и выдержанные в расплаве свинца образцы изучались с целью выявления изменения микроструктуры, топографии, определения степени поверхностного упрочнения (изменения микротвердости) и коррозионной стойкости в жидком свинце. Кроме этого, также определялся фазовый состав материала после модифицирования потоками ВТИП и коррозионных испытаний. Исследования топографии поверхности облученных материалов проводились металлографическим методом на оптическом микроскопе Neophot-30. Для изучения окисных пленок после выдержки в жидком свинце фрагменты твэльных трубок разрезались на искровом станке и заливались эпоксидной смолой в отрезки алюминиевых или медных трубок большего диаметра. Приготовленные таким образом торцевые шлифы полировались на наждачной бумаге и алмазной пасте.

Рентгеноструктурные исследования и качественный рентгеновский фазовый анализ образцов проводились на дифрактометре ДРОН-3.0. Применялась схема фокусировки по Брэггу–Брентано. Использовалось характеристическое излучение (K_{α}) медного анода. Для повышения отношения сигнал/фон и для полного устранения мешающих анализу K_{β} линий

перед счетчиком был установлен монохроматор из пиролитического графита. Проводилось прецизионное определение параметров кристаллической решетки образующихся фаз с точностью не хуже $\pm 0,0005$ нм. Полученные данные с учетом химического состава образца и условий облучения сравнивались со спектрами базы данных JCPDS. Поиск возможных фаз проводился с использованием программы XRAYAN.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты первичных ($\tau=100$ ч) статических коррозионных испытаний образцов в свинце с различным содержанием кислорода показали, что сталь ЭП823 взаимодействует со свинцом с повышенным содержанием кислорода на глубины до 7 и 10 мкм при температурах 650 и 750°C соответственно. Понижение концентрации кислорода в свинце приводит к уменьшению глубины коррозии (при температуре 750°C до ~ 4 мкм). Предварительная обработка фрагментов твэльных трубок потоками импульсной азотной плазмы не оказала в пределах точности измерений влияния на их коррозионную стойкость в сравнении с исходной штатной обработкой. Однако при модифицировании стали потоками гелиевой плазмы наблюдалась тенденция к ослаблению интенсивности ее коррозионного взаимодействия с жидким свинцом, содержащим высокую концентрацию кислорода: после выдержки при температурах 650 и 750°C глубина коррозии не превышала 5 и 7 мкм в сравнении с 7 и 10 мкм соответственно для исходной стали. Поэтому были проведены более длительные ($\tau = 500$ ч) выдержки образцов в свинце при температуре 750°C.

На рис. 1 приведены типичные снимки поперечной микроструктуры стали ЭП823 после статических коррозионных испытаний в жидком свинце при температуре 750°C в течение 500 ч для различных условий предварительной плазменной обработки.

Анализ полученных результатов показал, что предварительная обработка трубок потоками ВТИП при определенных режимах уменьшает общую глубину коррозии стали в свинце, а также изменяет характер взаимодействия (рис. 1). При этом наибольшее (более чем в 2 раза) снижение степени коррозионного взаимодействия при температуре $T=750^\circ\text{C}$ ($\tau=500$ ч) было достигнуто при модифицировании стали потоками гелиевой плазмы ($q=78$

Дж/см², $N=3$) с дополнительным поверхностным легированием в процессе обработки небольшим количеством хрома: толщина оксидного слоя уменьшилась от $(20,0\pm 0,5)$ до $(9,0\pm 1,5)$ мкм соответственно. Следует отметить, что на некоторых образцах, поверхностно легированных хромом, наблюдалась большая неравномерность глубины окисления по толщине, что, по-видимому, обусловлено неоднородностью легирования поверхности хромом в процессе плазменной обработки.

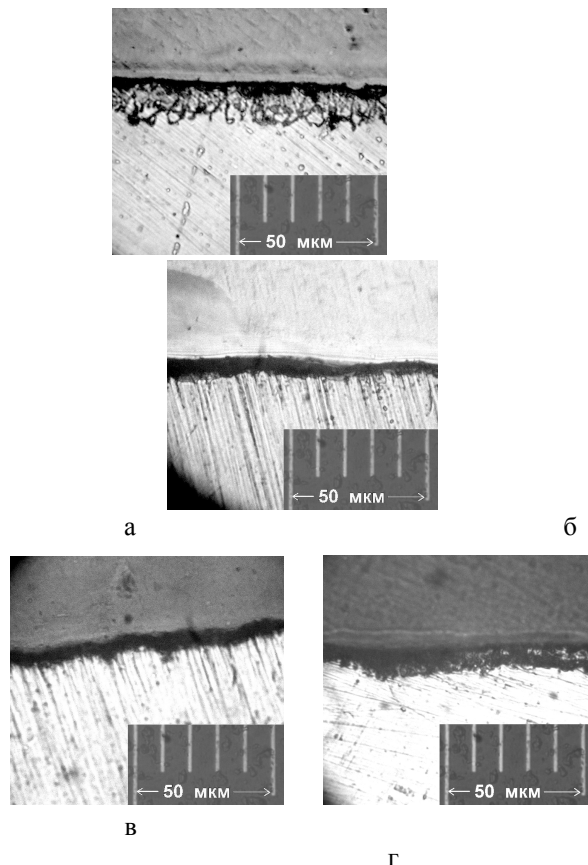
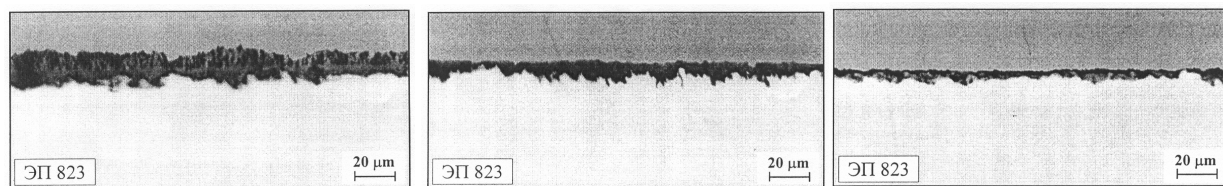


Рис. 1. Поперечная микроструктура стали ЭП823 после статических испытаний в жидком свинце ($T=750^\circ\text{C}$, $\tau=500$ ч): а – исходное состояние; б – He^+ , $U=14$ кВ, $N=3$; в – N^+ , $U=14$ кВ, $N=3$; г – N^+ , $U=15$ кВ, $N=3$ (б – и в – дополнительное соосаждение хрома)

Типичные снимки торцевых микроструктур образцов стали ЭП823 после динамических коррозионных испытаний приведены на рис. 2.



а

б

в

Рис. 2. Оксидные пленки на стали ЭП823 после выдержки в потоке свинца при температуре 650 °С в течение 1000 ч: а – исходный образец; б – обработанный потоками гелиевой плазмы; в – после пострадиационного отжига облученных потоками ВТИП образцов

Как видно из рис. 2, формирующаяся оксидная пленка имеет значительную неоднородность по толщине как на исходных трубках, так и на предварительно обработанных потоками плазмы. При этом на исходных образцах толщина оксидной пленки может изменяться в интервале от ~7 до 19 мкм.

Анализ результатов металлографического исследования коррозионных слоев показал (табл. 2), что, в целом, усредненные значения толщины оксидной пленки на трубках, предварительно обработанных потоками плазмы, уменьшаются в ~2 раза в сравне-

нии с исходными образцами. При этом пострадиационный отжиг модифицированных гелиевой плазмой образцов перед коррозионными испытаниями приводит к дополнительному снижению толщины коррозионного слоя, и повышение коррозионной стойкости достигает 3 раз, а скорость коррозии модифицированных образцов уменьшается до 4,5 нм/ч в сравнении с величиной ~14 нм/ч для штатных твэльных труб. Дополнительное осаждение хрома в процессе воздействия потоков ВТИП при увеличении количества импульсов облучения практически не влияет на степень уменьшения коррозии.

Таблица 2

Влияние предварительной плазменной обработки* на толщины (в мкм) коррозионных слоев стали, испытанной в потоке свинца ($T = 650^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1000$ ч)

| Исх. сталь | Гелиевая плазма | | | | | | |
|----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|-------------------------|
| | 14,0 3 | 14,0 3 ¹⁾ | 14+14,5 3+1 ²⁾ | 14+14,5 3+1 ²⁺¹⁾ | | | |
| 14,0 | 7,1 | 4,5 | 7,7 | 5,9 | | | |
| Азотная плазма | | | | | | | |
| 15,5 3 | 15,5 3 ¹⁾ | 18,5 3 ³⁾ | 18,5 3 ³⁺¹⁾ | 15+15,5 4+2 ²⁾ | 15+15,5 4+2 ²⁺¹⁾ | 15,2 3 | 15,2 3 ¹⁾ |
| 7,0 | 7,0 | 12,5 | 8,3 | 9,0 | 6,0 | 6,2 | 7,7 |

*В числителе – напряжение зарядки конденсаторов, в знаменателе – количество импульсов облучения;

¹⁾ – пострадиационный отжиг; ²⁾ – соосаждение хрома; ³⁾ – давление рабочего газа $P=67$ Па

Проведенные металлографические и рентгеновские исследования показали, что влияние предварительной плазменной обработки на коррозию стали обусловлено созданием модифицированного микрокристаллического слоя с измененным структурно-фазовым состоянием, являющегося барьером для проникновения кислорода в глубь материала.

Результаты изучения топографии поверхности облученных образцов показали, что практически для всех исследованных режимов плазменной обработки воздействие потоков ВТИП вызывало оплавление приповерхностных слоев и образование на поверхности при охлаждении микрорельефа в виде застывших волн расплава. При увеличении «жесткости» воздействия (q и N) поверхность становится более рельефной, при этом можно обнаружить наслоения волн расплава. Необходимо отметить, что образования микротрещин, которые могут оказать значительное влияние на эксплуатационные характеристики материалов, на поверхности облученных сталей не обнаружено.

Проведенные рентгеноструктурные исследования показали, что после плазменной обработки межплоскостные расстояния в кристаллической решетке облученных образцов вдоль нормали к поверхности, совпадающей с направлением потока плазмы, значительно уменьшаются. При этом максимальные изменения межплоскостных расстояний наблюдаются в зернах, для которых облучение проходило вдоль

кристаллографического направления $\langle 001 \rangle$. Результаты, полученные при наклоне образца по методу $\sin^2\psi$, свидетельствуют, что межплоскостные расстояния вдоль направлений, перпендикулярных радиальной оси трубы, после плазменной обработки, как правило, увеличиваются и, во всяком случае, существенно превышают соответствующие значения вдоль радиального направления. Пострадиационный отжиг ($T=600$ °С, $\tau=3$ ч) устраняет анизотропию в состоянии кристаллической решетки образцов, что эквивалентно снятию созданных в приповерхностном слое макронапряжений (рис. 3). Полуширины рентгеновских линий, обработанных потоками плазмы образцов, увеличиваются, что свидетельствует или о дроблении блоков кристаллической решетки и об ее искажении, или о повышении разброса величин межплоскостного расстояния. В результате отжига облученных образцов полуширины уменьшаются, однако для линии (200) для всех использованных режимов обработки, а для линий (110) и (211) для потоков гелиевой плазмы ($q \sim 80$ Дж/см², $N=3$) они не достигают первоначальных значений, характерных для необработанного материала.

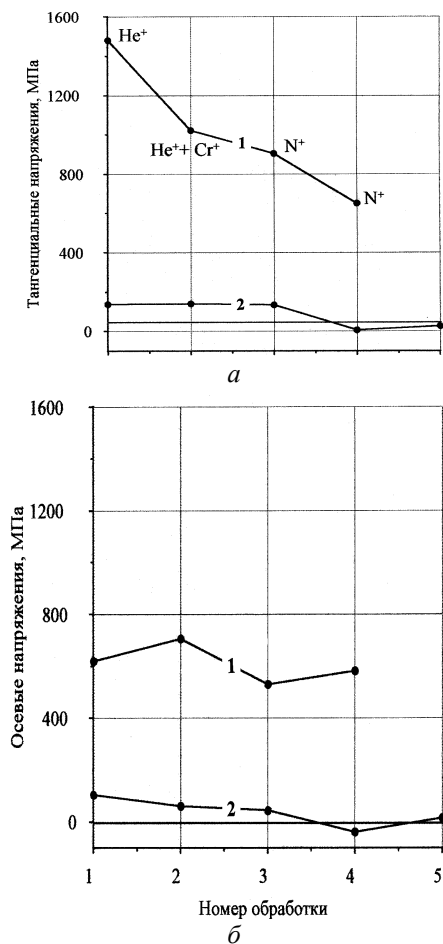


Рис. 3. Влияние режимов импульсной плазменной обработки на тангенциальные и осевые макронапряжения в трубе (горизонтальная линия – исходный образец): 1 – после обработки потоками ВТИП; 2 – после пострadiaционного отжига обработанных плазмой образцов (режимы обработки приведены в табл. 1)

Интегральная интенсивность рентгеновских отражений, за исключением отражения (200), в результате плазменной обработки падает, а при последующем отжиге растет. Это может быть обусловлено изменением концентрации точечных дефектов и кристаллографической текстуры материала. Последнее, по-видимому, связано с оплавлением и последующей кристаллизацией поверхностного слоя, а также с воздействием волн напряжений.

Установлено, что эффекты влияния плазменной обработки различны при разных режимах облучения и варьируются по выявленным изменениям межплоскостных расстояний, полуширин рентгеновских линий, соотношения их интегральных интенсивностей.

Результаты качественного рентгеновского фазового анализа показали, что, если исходные образцы являются однофазными и состоят из ферритной фазы (α -Fe), то после плазменной обработки во всех образцах зафиксировано по 2 фазы – мартенсит закалки (α' -Fe), имеющий тетрагональную решетку, и остаточный аустенит (ГЦК-решетка). Пострадиационный отжиг приводил к возврату стали в исходное,

фазовое состояние: основной фазой во всех образцах опять становилась фаза α -Fe. Кроме этого, в спектре образцов, обработанных азотной плазмой с повышенной плотностью частиц ($P=67$ Па), после отжига под небольшими углами обнаружены дифракционные линии, отвечающие орторомбической фазе Fe_2N .

После выдержки образцов в потоке свинца основными фазами во всех образцах являются ферритная фаза и оксид Fe_3O_4 со структурой типа шпинели. Однако с учетом химического состава исследованной стали, данный оксид соответствует, скорее всего, соединению типа $(Me,Fe)Fe_2O_4$. Параметр решетки этой фазы равен $a = 0,837$ нм. Кроме этого, на некоторых образцах был обнаружен оксид Fe_2O_3 .

Основные отличия в спектрах разных образцов проявляются, прежде всего, в различных соотношениях между интенсивностями дифракционных линий, образовавшихся на поверхности оксидов и α -Fe, являющегося основой материала. Это также позволяет утверждать, что на образцах с различной предварительной обработкой образовались оксидные пленки разной толщины.

Проведенные измерения микротвердости выявили, что обработка потоками ВТИП повышает микротвердость поверхности фрагментов труб на 25...50% в зависимости от условий облучения. В частности, при использовании потоков азотной плазмы ($q = 21$ Дж/см², $N=3$) микротвердость возрастает от 2920 до 4380 МПа. Это обусловлено, как показано выше, структурно-фазовыми превращениями, происходящими в результате высокоскоростной закалки стали, и хорошо согласуется с ранее полученными результатами по поверхностному упрочнению сталей [10].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали, что взаимодействие жидкого свинца с хромистой сталью ЭП823 приводит к ее значительной коррозии, степень которой определяется условиями испытаний (температурой, содержанием кислорода в свинце, временем выдержки и др.).

Анализ результатов (см. табл. 2) позволяет сделать некоторые предварительные выводы.

1. Модифицирование структурно-фазового состояния твэльных труб из стали марки ЭП823 потоками импульсной гелиевой плазмы оказывает следующее влияние на ее коррозию в жидком свинце:

- снижается толщина коррозионного слоя в ~2 раза по сравнению с необработанными потоками плазмы штатными трубками;
- пострadiaционный отжиг образцов перед коррозионными испытаниями приводит к дополнительному уменьшению толщины оксидного слоя и общее повышение коррозионной стойкости достигает более 3 раз. При этом скорость коррозии в потоке ($V=1,0$ м/с) жидкого свинца при темпе-

ратуре 650°C составляет 14,0 и 4,5 нм/ч для исходных и модифицированных трубок соответственно.

2. В случае предварительной обработки стальных трубок потоками азотной плазмы наблюдаются следующие эффекты:

- уменьшение толщины коррозионного слоя в пределах погрешности измерений соответствует обработке гелиевой плазмой при том же давлении рабочего газа ($P=36$ Па). При этом пострадиационный отжиг практически не влияет на положительный эффект плазменной обработки;
- увеличение плотности частиц азотной плазмы путем повышения давления рабочего газа (до $P=67$ Па) при сохранении плотности энергии падающего потока, а также увеличение количества импульсов облучения снижает влияние плазменной обработки на уменьшение толщины оксидной пленки. При этом пострадиационный отжиг повышает коррозионную стойкость стали.

Таким образом, полученные первые экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности и перспективности использования метода импульсной плазменной обработки для повышения коррозионной стойкости твэльных труб, изготовленных из хромистой стали, в потоке свинца при температуре испытания, соответствующей рабочей температуре оболочек твэлов в реакторах на быстрых нейтронах.

Авторы выражают благодарность В.И. Польскому и В.И. Скрытному за помощь в проведении экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.G. Müller, G. Schumacher, F. Zimmermann. Investigation on oxygen controlled liquid corrosion of surface treated steels // *J. of Nucl. Mater.* 2000, v. 278, p. 85 – 89.
- 2.G. Müller, A. Heinzl, J. Konys et al. Results of steel corrosion tests in flowing liquid Pb/Bi at 420 – 600 °C after 2000 h // *J. of Nucl. Mater.* 2002, v. 301, p. 40 – 46.

- 3.В.Л. Якушин, Б.А. Калинин, С.А. Кохтев, Д.В. Кравцов. Влияние обработки потоками высокотемпературной импульсной плазмы на коррозионную стойкость фрагментов твэлов ЯЭУ // *Proceedings 6th Intern. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (Tomsk, Russia, 23-28 Sept. 2002)*. Томск: Издат. дом «Курсив», 2002, с. 405-408.
- 4.В.А. Грибков, Ф.И. Григорьев, Б.А. Калинин, В.Л. Якушин. *Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов*. М.: «Круглый год», 2001, 528 с.
5. *Взаимодействие излучения, плазменных и электронных потоков с веществом: Тез. докл., Фрунзе, 4-7 сентября 1990 г.* /Под ред. Д.М. Дыхне и др. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1990, 164 с.
- 6.Б.А. Калинин, В.Л. Якушин, В.И. Польский. Модификация металлических материалов при обработке потоками высокотемпературной импульсной плазмы // *Известия вузов: Физика*. 1994, № 5, с. 109–125.
- 7.Н.Д. Томашов, И.Б. Скворцова, В.А. Алексеев и др. Использование импульсных потоков плазмы для антикоррозионной обработки поверхности металлов // *Защита металлов*. 1988, т. 24, № 5, с. 395–400.
- 8.В.А. Kalin, V.L. Yakushin, N.V. Volkov. Modification of the fuel cladding materials surface by pulsed plasma fluxes and ion mixing // *Annual Meeting on Nuclear Technology' 98 (May 26-28, 1998, Munich)*, INFORUM Verlags. 1998, p. 753–754.
9. Б.А. Калинин, В.Л. Якушин, Н.В. Волков. Перспективы радиационно-пучковой обработки материалов атомной техники // *Сборник докладов VI Российской конф. по реакторному материаловедению (г. Димитровград, 11-15 сентября 2000 г.)*. В 3-х томах. Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР. 2001, т. 1, с. 146–165.
- 10.V.L. Yakushin, B.A. Kalin, V.I. Skrytnyi, I.A. Bulanov. Modification of Carbon- and Low-Alloyed Steels by High Temperature Pulsed Plasma Fluxes // *Proceed. 1st Intern. Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials (Tomsk, Russia, 24-29 Sept. 2000)*. 2000, v. 3, p. 295–298.

ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ СТАЛІ ЕП823 В РІДКОМУ СВИНЦІ ШЛЯХОМ ЇЇ ОБРОБКИ ПОТОКАМИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ІМПУЛЬСНОЇ ПЛАЗМИ

В.Л. Якушин, Б.О. Калін, П.С. Джумасєв, М.Г. Ісаєнкова, Ю.О. Перлович, В.М. Троянов, О.Є. Русанов, А.П. Демішонков

Досліджено вплив попередньої імпульсної плазмової обробки на корозійну стійкість відрізків твельних труб із хромістої феритно-мартенситної сталі ЕП823 (16Х12СМВФБР) у рідкому свинцю в умовах статистичних та динамічних випробувань. Встановлено, що модифікація структурно-фазового стану біляповерхневих шарів сталі потоками плазми призводить до зниження товщини корозійного шару (оксидної плівки) більше, ніж у 2 рази. Післярадіаційний відпал зразків

у вакуумі перед корозійними випробуваннями додатково зменшує товщину оксидного шару, а підвищення корозійної стійкості досягає більше, ніж 3 разів. При цьому середня швидкість корозії у потоці рідкого свинцю при температурі 650°C та тривалості випробувань 1000 годин складає 14.0 та 4.5 нм/г для вихідних та модифікованих трубок відповідно.

INCREASE OF THE CORROSION RESISTANCE OF EP823 STEEL IN LIQUID LEAD BY HIGH TEMPERATURE PULSED PLASMA FLUXES TREATMENT

*V.L. Yakushin, B.A. Kalin, P.S. Dzhumaev, M.G. Isaenkova, Yu.A. Perlovich,
V.M. Troyanov, A.E. Rusanov¹, A.P. Demishonkov*

The influence of a preliminary pulsed plasma treatment on the corrosion resistance of fuel claddings of EP823 (16Cr12MoWSiNbVB) ferritic-martensitic steel in liquid lead in conditions of static and dynamic tests has been investigated. It has been obtained that modifying the structure-phase state of the surface layers by pulsed plasma decreases the corrosion layer thickness (i.e., the oxide film thickness) more than twice. The postradiation annealing of samples before the corrosion tests results in an additional decrease of the oxide film thickness and an increase of the corrosion resistance more than three times, at that the averaged corrosion velocity of modified samples in liquid lead at temperature 650 °C for 1000 h decreases up to 4.5 compared to ~14 nm/h for standard fuel tubes.