

УДК 621.039.534.6

САМООРГАНИЗУЮЩЕЕСЯ КАРБОНИТРИДНОЕ ПОКРЫТИЕ НА СТАЛИ ИЗ РАСПЛАВЛЕННОЙ ЭВТЕКТИКИ СВИНЕЦ-МАГНИЙ

**Е.А. Орлова, Ю.И. Орлов, Е.А. Крючков, В.Н. Комышний,
В.Г. Жмурин, С.А. Загребаев, Н.А. Котовский, В.Г. Дворцовой**
*ГНЦ-РФ ФЭИ им. А.И. Лейпунского,
г. Обнинск, 249033, Калужская область, пл. Бондаренко, 1*



На основании результатов расчетно-экспериментальных исследований насыщенный цирконием эвтектический сплав Pb-Mg рекомендован в качестве жидкометаллического подслоя в твэлах с нитридным топливом. Разработан и изготовлен рабочий участок для исследований по формированию нитридных и (или) карбидных защитных покрытий из эвтектического расплава Pb-Mg в узком зазоре между коаксиально расположенными трубками. Проведены пробные испытания.

Ключевые слова: свинец, магний, нитрид циркония, жидкометаллический подслоя, защита от коррозии.

ВВЕДЕНИЕ

Реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем и нитридным топливом построен на принципах «естественной безопасности» и экономичности [1]. В настоящее время твэлы с нитридным топливом и жидкометаллическим подслоем, позволяющим снизить температуру нитридного топлива до уровня, обеспечивающего надежную его работу при глубоком выгорании с низким распуханием и газовыделением, являются перспективными для РУ БРЕСТ-ОД-300. Результаты исследования твэлов с зазором (исходный 250 мкм), заполненным He и Pb, после облучения в РУ БОР-60 представлены в работе [2], где расчетная температура в центре топлива в твэле с газовым подслоем может достигать 2033 К (60% Pu), на поверхности оболочки – 861 К. Зазор между топливом и оболочкой (≈ 10 мкм) в холодном состоянии сохранился только в верхнем и нижнем сечениях твэла с топливом 45% PuN + 55% UN при выгорании 5,4% т.а. Средняя скорость увеличения диаметра таблеток топлива в сечениях с максимальным увеличением диаметра твэлов составляет $1,1 - 1,2 \pm 0,1$ на 1% выгорания для топлива $U_{0,55}Pu_{0,45}N$ и $U_{0,4}Pu_{0,6}N$ соответственно. Наблюдалась газовые поры, включения.

Контакт топлива с оболочками в твэлах происходит при локальном выгорании около 5% т.а. После наступления контакта средние значения окружных напряжений в оболочках, рассчитанные по вкладу радиационной ползучести в увеличение их диаметров, равны 100 и 220 МПа, соответственно.

© **Е.А. Орлова, Ю.И. Орлов, Е.А. Крючков, В.Н. Комышний,
В.Г. Жмурин, С.А. Загребаев, Н.А. Котовский, В.Г. Дворцовой, 2015**

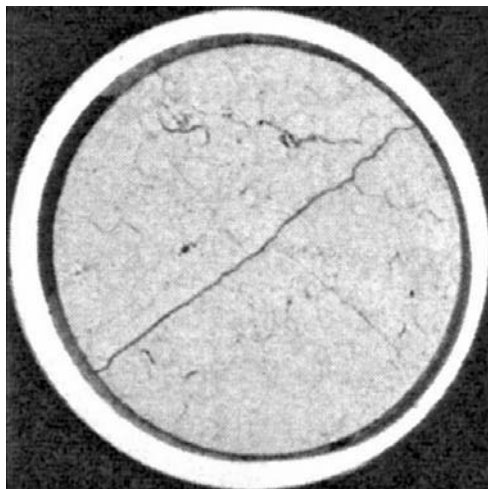


Рис. 1. Общий вид поперечного сечения твэла со свинцовым подслоем [2]

В то же время при наличии внутри твэла свинцового подслоя температура в центре топлива не превышает 1153 К, а на внутренней поверхности оболочки – 908 К. Отсутствуют газовые поры и выделения. Однако возникает проблема совместимости жидкометаллического внутритвэльного подслоя с оболочкой твэла в присутствии нитридного топлива. Результаты исследования твэлов после облучения (рис. 1) показали прогрессирующее взаимодействие оболочки со свинцовым подслоем, которое характеризуется ее растворением в одних частях и образованием слоя металлических отложений в других частях. Вследствие растворения оболочки ее толщина на отдельных участках уменьшилась примерно на 40% (при выгорании 5,5% т.а., 23 сна) [2].

В статье предлагается решение проблемы совместимости оболочки твэла с нитридным топливом и подслоем на основе свинца.

СОВМЕСТИМОСТЬ СВИНЦОВО-МАГНИЕВОЙ ЭВТЕКТИКИ СО СТАЛЬЮ

Для изучения коррозии стали в сплаве на основе свинца были проведены ампульные, петлевые испытания образцов, а также испытания укороченных макетов твэла с сердечником из нитрида урана. В качестве сплавов были предложены свинец, насыщенный цирконием, сплавы свинца с магнием, очищенные от примесей и насыщенные цирконием. Использование сплавов привело к снижению коррозионного взаимодействия с конструкционными материалами по сравнению с очищенным свинцом [3].

Наилучшим образом решение проблемы совместимости жидкометаллического подслоя с оболочкой твэла в присутствии нитридного топлива обеспечивается путем самопроизвольного формирования на поверхности стали защитного покрытия нитрида циркония из эвтектики на основе свинца с содержанием 2,25% массовых (0,164 атомной доли) магния и до 0,2% массовых циркония в присутствии азота в газовой полости. При этом обеспечивается самозалечивание случайных повреждений покрытия. Коррозионные повреждения и изменения массы образцов сталей 16Х12ВМСФБР и Х13М2С2 отсутствовали при их ампульных и петлевых испытаниях при температуре 813 – 1023 К в эвтектике 2,25% Mg, 0,2% Zr, остальное – Pb, а также после испытаний при 973 К в течение 5700 ч укороченного макета твэла с сердечником из нитрида урана, теплопередающим подслоем указанного состава и оболочкой из стали 16Х12ВМСФБР с предварительно сформированным на ней покрытием из нитрида циркония [4].

АМПУЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТАЛЕЙ В СВИНЦОВО-МАГНИЕВОЙ ЭВТЕКТИКЕ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 873 – 1023 К

Формирование на поверхности стали защитного покрытия нитрида циркония проводили в эвтектике на основе свинца с содержанием 2,25% масс. магния и до 0,2% масс. циркония в интервале температуры 873 – 1023 К длительностью до 500 ч. Для доказательства формирования защитного покрытия проводили анализ изменения массы, рентгеноструктурный фазовый и поэлементный анализ образцов стали.

Таблица 1

Элементный состав (% ат.) поверхности и поперечного шлифа (в точках 1 – 4 рис. 2) стали 16Х12ВМСФБР (INCA) с покрытием ZrN, сформированным при 993 К в течение 50 ч в сплаве Pb-Mg-Zr под давлением азота

| Элемент | Поверхность стали | | Поверхность поперечного шлифа | | | |
|---------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------|------|------|
| | Среднее значение по трем точкам | Средне-квадратичное отклонение | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Fe | 54,6 | 6,4 | 78,9 | 77,4 | 79,9 | 85,2 |
| Cr | 9,1 | 1,1 | 10,3 | 10,3 | 9,7 | 9,8 |
| V | 0,4 | 0,1 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,2 |
| Pb | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Mo | 0,3 | 0,04 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| Zr | 6,4 | 0,8 | 3,3 | 1,5 | 2,4 | 0,2 |
| Si | 1,3 | 0,2 | 1,3 | 1,5 | 1,2 | 1,5 |
| Mg | 0,7 | 0,08 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,0 |
| O | 10,8 | 1,3 | 4,4 | 7,5 | 5,3 | 2,0 |
| N | 15,8 | 2,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Ni | 0,5 | 0,06 | 0,8 | 0,9 | 0,7 | 0,8 |

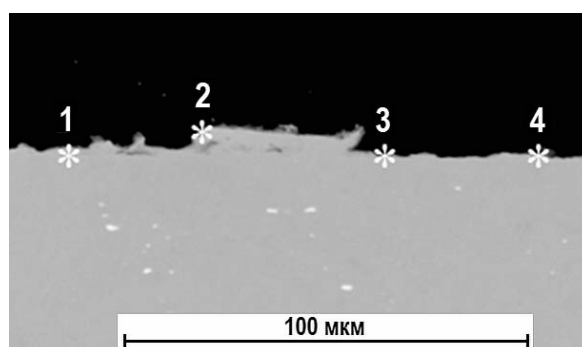


Рис. 2. Поверхность поперечного шлифа стали 16Х12ВМСФБР после формирования нитридных и (или) карбидных покрытий при 973 К в течение 50 ч в сплаве 2,25% Mg, 0,2% Zr, остальное – Pb под давлением N₂ (INCA), $\times 500$ (цифры – места съемок на поперечном шлифе, соответствующие табл. 1)

Состав и структуру покрытия, сформированного на поверхности стали 16Х12ВМСФБР, при 993 К в течение 50 ч в сплаве 2,25% Mg, 0,2% Zr, остальное – Pb под давлением N₂ исследовали путем рентгеноструктурного анализа на установке ДРОН-1 (идентифицирована структура, характерная для ZrN и ZrC) на растровом электронном микроскопе (РЭМ) с применением волнового рентгеноспектрального микроанализа INCA, а также

методами ядерного микроанализа [3, 4]. Результаты исследований на РЭМ представлены в табл. 1. На поверхности образца обнаружены цирконий $6,7 \pm 0,2\%$ ат. и азот $15,6 \pm 0,2\%$ ат. В точках, обозначенных звездочками вблизи поверхности поперечного шлифа на рис. 2, цирконий обнаружен в существенно меньшем количестве ($0,2 - 3,3\%$ ат.), а азот не обнаружен [4]. По более тонким данным ядерного микроанализа азот обнаружен на небольшой глубине (глубина проникновения азота составила $90 - 130 \pm 15$ нм). Проникновения свинца в сталь не обнаружено. Присутствие железа на поверхности образца (около 50% ат.) можно объяснить либо тем, что глубина проникновения рентгеновского пучка больше толщины слоя нитрида циркония, либо избирательностью внедрения циркония в сталь в области дефектной структуры. В последнем случае отсутствие потери массы образцов стали 16Х12ВМСФБР свидетельствует о заживлении дефектов, способствующих коррозионному повреждению стали в расплаве свинца.

Результаты комплексного анализа покрытий на поверхности стали 16Х12ВМСФБР, сформированных при $923 - 993$ К в течение $50 - 500$ ч в ампульных испытаниях в сплаве Pb-2,25% по массе магния с добавкой циркония под давлением азота, показали, что цирконий и азот на поверхности стали присутствуют, причем, согласно данным рентгеноструктурного анализа, в стехиометрическом составе соединения ZrN (ZrC). Толщину слоя нитрида циркония в силу его малости можно определить лишь с помощью пучка дейтронов при условии, что стехиометрия соединения известна.

На основании данных химико-спектрального анализа проб сплава на основе свинца с добавкой магния и циркония после испытаний образцов показано, что растворимость циркония зависит от содержания магния и температуры следующим образом [5]:

$$C_{Zr} = aC_{Mg}^{0,7} \cdot \exp(-2895/T),$$

где C_{Zr} , C_{Mg} – концентрация атомов циркония и магния в сплаве на основе свинца, атомные доли; a – эмпирический коэффициент, изменяющийся от 0,0002 до 0,044 при изменении концентрации атомов магния от 0,08 до 0,25; T – температура сплава на основе свинца, К.

Таблица 2

Содержание элементов (% масс.) по сечению образца стали 16Х12ВМСФБР, испытанного при $T = 973$ К в течение 140 ч в свинце и 200 ч в сплаве Pb-Mg 0,1% масс.

| Элемент | Расстояние от поверхности, мкм | | | | | | | |
|---------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1,9 | 2,3 | 6,5 | 8,7 | 12,9 | 16,1 | 17,7 | 29,0 |
| Fe | 13,6 | 8,8 | 35,6 | 92,3 | 22,6 | 31,1 | 92,7 | 87,5 |
| Cr | 34,4 | 41,4 | 7,9 | 3,8 | 36,3 | 36,2 | 3,8 | 8 |
| V | 0 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1 |
| Pb | 0,1 | 0 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mo | 21,1 | 14,7 | 7,3 | 1,4 | 4,7 | 2,8 | 1 | 0,9 |
| Zr | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Si | 0,7 | 0,2 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 1 | 1,3 |
| Mg | 3 | 4,2 | 0,2 | 0 | 0,1 | 0,3 | 0 | 0 |
| O | 24,7 | 28,9 | 9,1 | 0 | 33,3 | 26,9 | 0 | 0 |
| C* | 2,4 | 1,4 | 6,1 | 1,6 | 1,6 | 2,1 | 2,5 | 2,3 |

При содержании магния в сплаве на основе свинца, равном 0,1% по массе, на поверхности стали 16Х12ВМСФБР (предварительно испытанной при температуре 973 К в течение 140 ч в свинце) после испытаний в течение 200 ч не обнаружено циркония, т.е. защитное покрытие отсутствует. На поверхности шлифа заметны оксидная пленка, внут-

ренное окисление, перераспределение компонентов стали, характерное для образцов с оксидной защитой (табл. 2). Повышенное содержание молибдена в пленке связано с его переносом со стенок молибденовой ампулы.

Существенное содержание углерода в пленке следует отнести либо к его участию в образовании соединений, либо к результату массопереноса. При этом следует учитывать, что при микроанализе концентрация углерода может быть завышенной в пределах 1% вследствие взаимодействия луча электронов с образцом в камере электронного микроскопа.

ПЕТЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРИ ПЕРЕПАДЕ ТЕМПЕРАТУРЫ 813 – 923 К

Образцы сталей 16X12ВМСФБР и X13M2C2 были испытаны в течение 1000 ч в условиях естественной конвекции теплоносителя (эвтектика Pb-Mg, насыщенная цирконием) со скоростью 0,16 см/с при перепаде температуры 813 – 923 К в петле из стали X13M2C2 под избыточным давлением азота 0,05 МПа. Потери массы образцов, испытанных при 873 и 923 К, не обнаружено. Образцы стали после испытаний при 813 К имели незначительную потерю массы (в среднем $3,4 \cdot 10^{-3}$ кг/м²) [4]. Рентгеноструктурный анализ показал наличие структуры, характерной для $Me_{23}C_6$, NbC, ZrC (ZrN), основы стали α -Fe и Pb. Отражения от основы стали наблюдаются в связи с небольшой толщиной поверхностного покрытия. После испытаний микроструктура сталей 16X12ВМСФБР и X13M2C2 не изменилась.

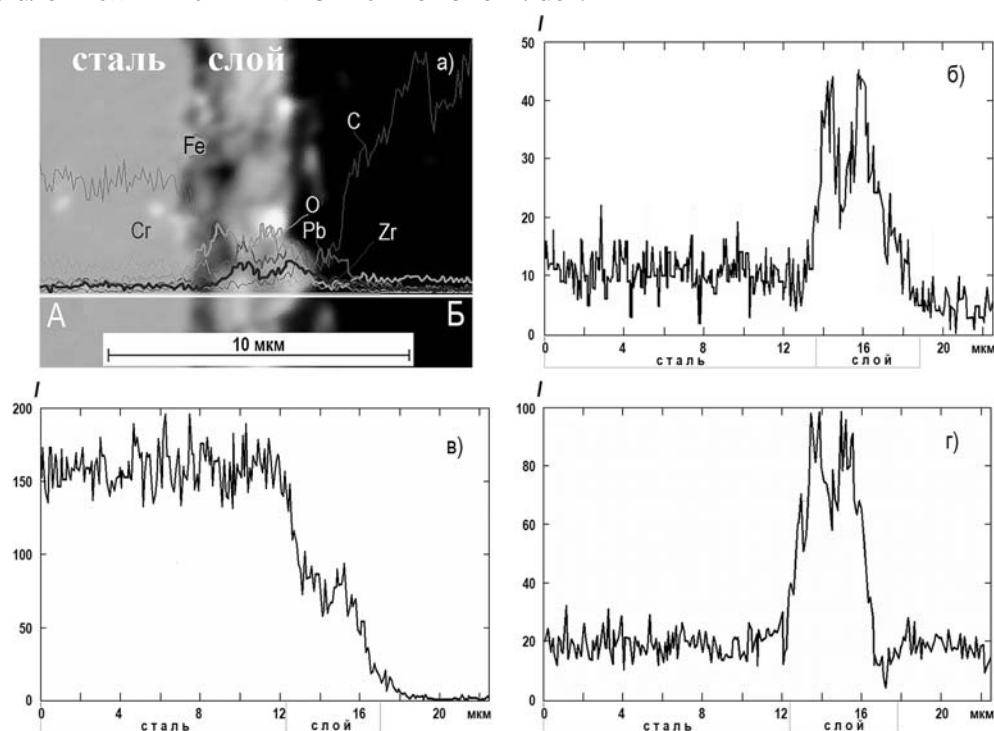


Рис. 3. Распределение интенсивностей рентгеновских линий (I) элементов при сканировании по направлению А-В сечения образца стали 16X12ВМСФБР после механических испытаний, предварительно испытанного при температуре 923 К в течение 1000 ч в сплаве Pb-Mg: а) – поперечное сечение образца; б) – интенсивность линии циркония; в) – интенсивность линии железа; г) – интенсивность линии кислорода

На поверхности образцов стали 16X12ВМСФБР, испытанных при температуре 923 К в течение 1000 ч в сплаве Pb-Mg и прошедших механические испытания, обнаружена пленка, содержащая помимо основных компонентов стали магний, цирконий, свинец, кислород и углерод (рис. 3) [6, 7]. Наличие азота на поверхности об-

разцов стали не обнаружено. Толщина поверхностной пленки на стали 16Х12ВМСФБР составила около 3 мкм (поверхность стали растянута в результате механических испытаний, т.е. реальная толщина покрытия может быть несколько больше).

Изменения состава стали в приповерхностных слоях, прилегающих к покрытию, не обнаружено, что наряду с отсутствием потери массы свидетельствует о хороших защитных свойствах и низкой диффузионной проницаемости покрытия, сформированного естественным путем при контакте стали со сплавом на основе свинца с содержанием 2,25% масс. магния, насыщенным цирконием.

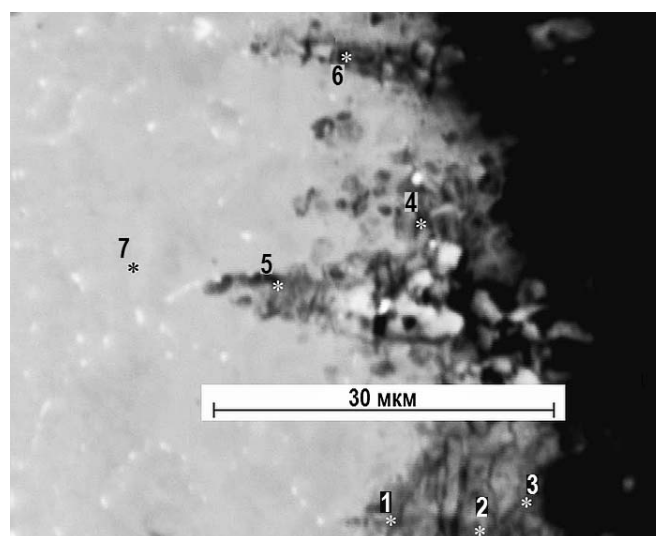


Рис. 4. Внешний вид оксидной пленки, сформированной при температуре 923 К в течение 1000 ч в сплаве Pb-Mg на образце из стали 16Х12ВМСФБР после механических испытаний (в центре виден белый свинец)

Поперечное сечение образца стали 16Х12ВМСФБР после испытаний при 923 К в течение 1000 ч в условиях естественной конвекции эвтектики Pb-Mg на участках с микронадрывами, образовавшимися в результате механических испытаний, представлено на рис. 4, а количественный анализ состава пленки в точках, обозначенных на рис. 4 цифрами, приведен в табл. 3.

Внешний вид поверхности поперечного шлифа стали 16Х12ВМСФБР после испытаний при 813 К в течение 1000 ч в условиях естественной конвекции теплоносителя (эвтектика Pb-Mg) и механических испытаний представлен на рис. 5, а результаты количественного анализа состава пленки, образовавшейся на образце после испытаний, даны в табл. 4.

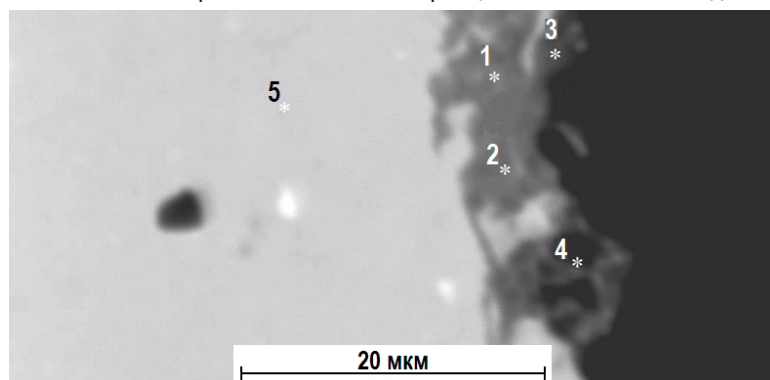


Рис. 5. Внешний вид оксидной пленки, сформированной при температуре 813 К в течение 1000 ч в сплаве Pb-Mg на образце из стали 16Х12ВМСФБР после механических испытаний

Таблица 3

Количественный анализ (% масс.) по точкам (рис. 4) оксидной пленки, содержащей Zr, сформированной при температуре 923 К в течение 1000 ч в сплаве Pb-Mg на образце стали 16X12ВМСФБР

| Элемент | Поверхность стали | | Номер точки по сечению образца | | | | | | |
|---------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | Среднее значение по четырем точкам | Средне-квадратичное отклонение | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Fe | 43,4 | 2,5 | 61,7 | 27,8 | 37,5 | 38,8 | 18,5 | 24,8 | 86,8 |
| Cr | 7,1 | 0,3 | 7,1 | 9,4 | 3,6 | 5,7 | 5,1 | 6,1 | 10,9 |
| V | 0,5 | 0,1 | 0,4 | 0,6 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| Pb | 4,1 | 0,9 | 0,6 | 2,4 | 0,5 | 0,9 | 3,9 | 3,2 | 0,0 |
| Zr | 10,7 | 0,3 | 0,7 | 7,5 | 1,3 | 1,6 | 9,1 | 5,3 | 0,0 |
| Si | 0,6 | 0,0 | 1,0 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 1,0 |
| Mg | 4,5 | 0,7 | 1,2 | 4,9 | 0,6 | 1,0 | 1,7 | 2,9 | 0,0 |
| O | 13,3 | 1,0 | 8,3 | 16,3 | 4,3 | 6,3 | 10,5 | 15,6 | 0,0 |
| C* | 15,9 | 0,7 | 19,0 | 30,6 | 51,5 | 44,8 | 50,5 | 41,6 | 1,1 |

Таблица 4

Состав (% масс.) пленки, сформированной при температуре 813 К в течение 1000 ч в сплаве Pb-Mg на образце стали 16X12ВМСФБР по точкам (рис. 5), после механических испытаний

| Элемент | Номер точки | | | | |
|---------|-------------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Fe | 44,6 | 54,6 | 23,2 | 19,4 | 86,1 |
| Cr | 6,1 | 8,1 | 3,4 | 4,0 | 11,4 |
| V | 0,2 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,1 |
| Pb | 3,6 | 1,7 | 1,8 | 2,7 | 0,0 |
| Zr | 1,9 | 1,2 | 0,1 | 0,3 | 0,0 |
| Si | 0,7 | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 1,1 |
| Mg | 3,4 | 2,0 | 0,4 | 0,3 | 0,0 |
| O | 34,7 | 29,1 | 29,3 | 20,9 | 0,0 |
| C | 4,7 | 2,3 | 41,1 | 51,9 | 1,3 |

Механические свойства стали (σ_B , МПа – предел прочности; $\sigma_{0,2}$, МПа – предел текучести; δ , % – относительное удлинение) образцов стали 16X12ВМСФБР (рис. 6) после испытаний в течение 1000 ч в условиях естественной конвекции эвтектики Pb-Mg, насыщенной Zr, с перепадом температуры 813 – 923 К подчиняются линейной зависимости от температуры (T , К).

В частности, $\sigma_B = -2,1196 \cdot T + 2082,2$ ($R^2 = 0,99$); $\sigma_{0,2} = -1,8949 \cdot T + 1873$ ($R^2 = 0,99$); $\delta = 0,076 \cdot T - 48,2$ ($R^2 = 0,95$), где R^2 – величина достоверности аппроксимации. Пределы прочности и текучести стали 16X12ВМСФБР после этих испытаний снизились, а относительное удлинение увеличилось. В петлевых испытаниях существовала возможность поступления в эвтектику кислорода, поэтому он обнаружен в составе покрытия, обогащенного циркони-

ем, что не сказалось на антикоррозионных свойствах покрытия.

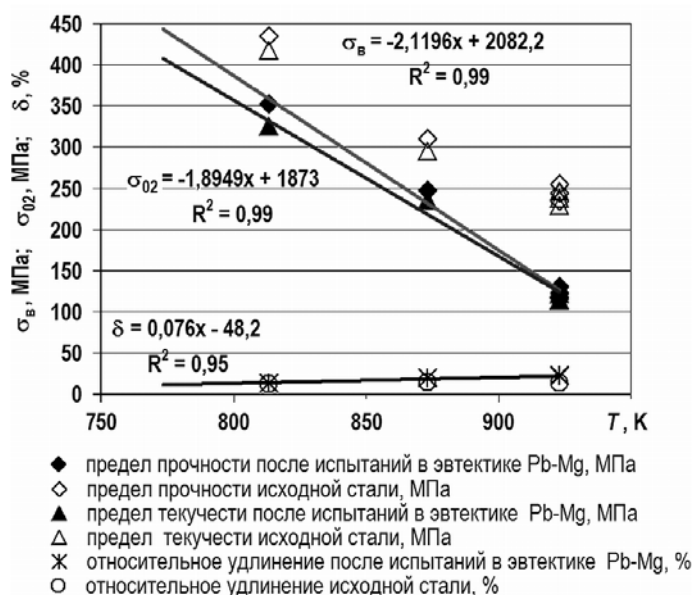


Рис. 6. Механические свойства стали 16X12ВМСФБР после испытаний при 813 – 923 К в течение 1000 ч в условиях естественной конвекции теплоносителя (эвтектика Pb-Mg) в сравнении с исходными (фрагмент окна MS Excel)

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ К ВНУТРИТВЭЛЬНОМУ ЗАЗОРУ

Разработан и изготовлен рабочий участок для исследований по формированию нитридных и (или) карбидных защитных покрытий из эвтектического расплава Pb-Mg в узком зазоре между коаксиально расположенными трубками из стали 16X12ВМСФБР диаметром 9,7×0,5 и 8,4×0,4 мм, проведены пробные испытания. Разработана технология, изготовлен сплав в дозированном количестве (ФЗИ) и загружен в экспериментальные твэлы (ВНИИНМ), поставленные на испытания в июне 2014 г. в реакторную установку БОР-60.

ВЫВОДЫ

Применение совместимого с нитридным топливом и оболочкой твэла жидкометаллического внутритвэльного подслоя за счет формирования защитных пленок в процессе их контакта (эвтектического сплава Pb-Mg, насыщенного цирконием) может обеспечить надежную работу твэла при глубоком выгорании. Особое внимание следует уделить обеспечению формирования нитридных и (или) карбидных, а не оксидных покрытий, т.к. в оксидных покрытиях обнаружено проникновение свинца в сталь. Новизна и оригинальность решения задачи состоит в разработке фундаментальных принципов создания твэлов нового поколения, а именно синергетической совместимости компонентов, приводящей к снижению температуры в топливе и, соответственно, снижению давления, распухания топлива, повышению ресурса, экономичности и др.

Авторы приносят глубокую благодарность сотрудникам ОАО «НИКИЭТ» С.Н. Бозину и А.В. Башкину за исследование поверхности и поперечного сечения образцов стали 16X12ВМСФБР на РЭМ с помощью волнового рентгеноспектального микроанализа INCA.

Литература

1. Адамов Е.О., Орлов В.В., Смирнов В.С. Progress in lead cooled fast reactor design. // Proc. Intern. Conf. on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants. Tokyo, Japan, Oct.25-29. – 1992. – Vol. 2. – Paper №16-6. – PP. 1-4.
2. Беляева А.В., Крюков Ф.Н., Никитин О.Н. и др. Основные результаты исследований уран-плутониевого нитридного топлива после облучения в реакторе БОР-60. / Сб. докл. Международной научн.-техн. конф. «Инновационные продукты и технологии ядерной энергетики», 27-29 ноября 2012 г. – М.: НИКИЭТ, 2012. – С. 223-228.
3. Орлов В.В., Орлова Е.А., Цикунов В.С. и др. Формирование защитных нитридных покрытий на поверхности сталей. Препринт № ЕТ – 08/77. – М.: НИКИЭТ, 2008.
4. Орлова Е.А., Гурбич А.Ф., Молодцов С.Л. и др. Формирование и исследование защитных покрытий, совместимых с нитридным топливом, на сталях ферритно-мартенситного класса// Атомная энергия. – 2008. – Т. 105. – Вып. 5. – С. 269-274.
5. Орлов В.В., Леонов В.Н., Орлова Е.А. Способ формирования защитного покрытия на поверхности металла. / Патент РФ 2439203. – Опубл. 10.01.12. – Бюлл. № 1.
6. Орлова Е.А., Букин Е.А. Формирование карбонитридных защитных покрытий на стали. [Электронный ресурс] / Сб. докл. на межведомственном семинаре «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в быстрых реакторах» 20-22 октября 2010 г. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2010 – С. 406-414 (CD-ROM).
7. Орлова Е.А., Орлов Ю.И., Крючков Е.А. и др. Самоорганизующееся карбонитридное покрытие на стали из расплавленной эвтектики свинец-магний. / Сб. докл. Международной научно-техн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики (МНТК НИКИЭТ-2012)», 27-29 ноября 2012 г. – М.: ОАО «НИКИЭТ», 2012. – С. 174-182.

Поступила в редакцию 17.06.2013 г.

Авторы

Орлова Екатерина Андреевна, ведущий научный сотрудник

E-mail: eorlova@ippe.ru

Орлов Юрий Иванович, советник директора

E-mail: yuorlov@ippe.ru

Крючков Евгений Александрович, начальник лаборатории

E-mail: ekryuchkov@ippe.ru

Комышный Владимир Николаевич, начальник лаборатории

E-mail: kvn@ippe.ru

Жмурин Виктор Григорьевич, ведущий инженер

E-mail: eorlova@ippe.ru

Загребяев Сергей Анатольевич, младший научный сотрудник

E-mail: eorlova@ippe.ru

Котовский Николай Алексеевич, старший научный сотрудник

E-mail: ekryuchkov@ippe.ru

Дворцовой Виктор Геннадьевич, инженер первой категории

E-mail: eorlova@ippe.ru

SELF-ORGANIZING CARBON NITRIDE COATINGS ON STEEL FROM MOLTEN LEAD-MAGNESIUM EUTECTIC

Orlova E.A., Orlov Yu.I., Kryuchkov E.A., Komysheyn V.N., Zhmurin V.G., Zagrebaev S.A., Kotovskij N.A., Dvorcevoj V.G.

State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering. 1, Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

The best way to solve the problem of compatibility of a liquid metal sublayer with fuel element cladding in the presence of nitride fuel is to provide spontaneous formation of a zirconium nitride coating on the steel surface in lead eutectic with a ratio of 2,25% wt. (0,164 nuclear shares) magnesium to 0,2% wt. zirconium. Self-curing of accidental damage to the cladding is thus provided. Corrosion damage and changes in the mass of 16Cr12WMoSiVNB and Cr13Mo2Si2 steel samples were absent during 50-500 h their ampoule and loopback tests at a temperature of 873-1023 K. To in an eutectic of 2,25% of Mg-0,2 of % of Zr, with the rest being Pb, and also after tests at 973 K during 5700 h with a truncated model of the fuel element with uranium nitride core, a heat-transmitting underlayer of a specified structure and 16Cr12WMoSiVNB steel cladding, with the covering previously created on it from zirconium nitride.

On the basis of pilot studies it is possible to recommend the use of the eutectic Pb-Mg alloy rich in zirconium as a liquid-metal sublayer in fuel elements with nitride fuel.

A working site has been developed to study the formation of nitride and (ore) carbide cover from eutectic Pb-Mg alloy in the narrow gap between coaxial tubes. Trial tests have been conducted.

Key words: lead, magnesium, zirconium nitride, fuel element sublayer, corrosion protection

REFERENCES

1. Adamov E.O., Orlov V.V., Smirnov V.S. Progress in lead cooled fast reactor design, in: Proc. Intern. Conf. on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants. Tokyo, Japan, Oct.25-29. 1992, v. 2, paper №16-6, pp. 1-4.
2. Beljaeva A.V., Krjukov F.N., Nikitin O.N., Kuzmin S.V., Malcseva E.B. The main results of uranium-plutonium nitride fuel after irradiation in BOR-60, in Sb. dokl. Mezhdun. nauchn.-tehn. konf. «Innovacionnye produkty i tehnologii jadernoj jenergetiki (ISTC NIKIET-2012)» [Proceedings of the ISTC «Innovative products and technology of nuclear power»], 27-29 November 2012. Moscow, JSC «NIKIET» Publ., 2012, pp. 223-228 (in Russian)..
3. Orlov V.V., Orlova E.A., Cikunov V.S., Bozin S.N., Bashkin A.V. Formation of protective nitride coatings on steel surfaces: preprint № ET-08/77. Moscow, JSC «NIKIET» Publ., 2008 (in Russian).
4. Orlova E.A., Gurbich A.F., Molodcov S.L., Orlov V.V., Bozin S.N., Bashkin A.V. The Formation and Investigation of Protective Coatings on the Ferrite – Martensite Steel Surface, which are Compatible with Nitrogen Fuel. *Atomic Energy*. 2008, v. 105, iss. 5, pp. 269-274 (in Russian).
5. Orlov V.V., Leonov V.N., Orlova E.A. A method of forming a protective coating on the metal surface. Patent RF 2439203, 10.01.12. Bul. № 1 (in Russian).
6. Orlova E.A., Bukin E.A. Formation of carbonitride coatings on steel [electronic resource], in: Sb. dokl. na mezhdunostvennom seminare «Tjazhyolye zhidkometallicheskie teplonositeli v bystryh reaktorah» [Proceedings of interagency

workshop «Heavy liquid metal cooled fast reactors»] 20-22 October 2010. Obninsk, FEI Publ., 2010, pp. 406-414 (CD-ROM) (in Russian).

7. Orlova E.A., Orlov Ju.I., Krjuchkov E.A., Komyshnyj V.N., Egorov V.S., Zhmurin V.G., Dvorcevoj V.G., Zagrebaev S.A., Kolosov K.V. Self-organized carbon nitride coating on steel from molten eutectic lead-magnesium, in: Sb. dokl. mezhdunar. nauchno-tehn. konf. «Innovacionnye proekty i tehnologii jadernoj jenergetiki (ISTC NIKIET-2012)» [Proceedings of the ISTC «Innovative products and technology of nuclear power»], 27-29 November 2012. Moscow, JSC «NIKIET» Publ., 2012, pp. 174-182. (in Russian).

Authors

Orlova Ekaterina Andreevna, Leading Researcher

E-mail: eorlova@ippe.ru

Orlov Yuriy Ivanovich, Member of Scientific and Technical Board

E-mail: yuorlov@ippe.ru

Kryuchkov Evgenij Aleksandrovich, Head of Laboratory

E-mail: ekryuchkov@ippe.ru

Komyshnyj Vladimir Nikolaevich, Head of Laboratory

E-mail: kvn@ippe.ru

Zhmurin Victor Grigor'evich, Leading Engineer

E-mail: eorlova@ippe.ru

Zagrebaev Sergey Anatol'evich, Junior Researcher

E-mail: eorlova@ippe.ru

Kotovskij Nicolaj Alekseevich, Senior Researcher

E-mail: ekryuchkov@ippe.ru

Dvorcevoj Victor Gennad'evich, Engineer

E-mail: ekryuchkov@ippe.ru