

Н.О. САВВИН, А.Е. ЕВСИН, С.С. ДОВГАНЮК, Н.А. ПУНТАКОВ, Д.П. ЧЕРНЫЙ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА НА ЕГО КОРРОЗИЮ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ И В ПЛАЗМЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ОБЛУЧЕНИЯ

Исследованы особенности коррозии циркониевых сплавов различного состава при плазменном воздействии и при выдержке в газовых средах. Показано, что плазменное облучение сплавов Zr-Nb-Fe воспроизводит результаты автоклавных испытаний, в то время как при совместном облучении этих сплавов с Zr-Nb-Sn-Fe корреляция нарушается. Сделан вывод, что применимость плазмы для коррозионных испытаний зависит от структуры оксидных слоев сравниваемых сплавов.

N.O. SAVVIN, A.E. EVSIN, S.S. DOVGANYUK, N.A. PUNTAKOV, D.P. CHERNIY,
L.B. BEGRAMBEKOV

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

EFFECT OF THE ZIRCONIUM ALLOY COMPOSITION ON ITS CORROSION IN GASEOUS AMBIENT AND IN PLASMA UNDER VARIOUS IRRADIATION REGIMES

The corrosion behavior of Zr alloys was investigated under both plasma irradiation and gas exposure. It was shown that plasma corrosion of Zr-Nb-Fe alloys reproduces the results of autoclave tests, whereas the correlation is disrupted when these alloys are compared with Zr-Nb-Sn-Fe. It is concluded that plasma applicability for corrosion tests depends on the oxide layer structure of the alloys.

Серьезной проблемой современных легководных ядерных реакторов является коррозия оболочек твэлов в теплоносителе, препятствующая повышению ресурса твэлов и глубины выгорания топлива. Разработчики циркониевых оболочечных сплавов постепенно повышают их коррозионную стойкость, однако темпы развития данного направления ограничены большой продолжительностью дореакторных испытаний, проводимых в водных автоклавах. В связи с этим, существует потребность в экспресс-методе, который бы позволял в короткий срок воспроизводить коррозионное поведение циркониевых сплавов, проявляемое в автоклавных испытаниях. Известно, что окисление металлов в кислородной плазме происходит быстрее, чем в кислороде или в парах воды. Однако, механизмы формирования оксидных слоев на поверхности циркониевых сплавов при плазменном воздействии почти не изучены, и поэтому возможности применения плазмы для быстрой оценки коррозионной стойкости этих материалов не ясны.

В данной работе образцы сплавов Zr-Nb-Fe и Zr-Nb-Sn-Fe облучались в Ar + 50%O₂ плазме несамостоятельного разряда с накальным катодом при температуре 600°C и давлении газа $(1-2) \cdot 10^{-3}$ Торр. Облучение проводилось в двух режимах. В одном из них облучаемые образцы находились в плазме под плавающим потенциалом, в другом режиме на образцы подавался потенциал анода, и они облучались преимущественно потоком электронов. Для сравнения часть образцов выдерживалась в газовой среде Ar + 50%O₂ $((1-2) \cdot 10^{-3}$ Торр) и в кислороде (760 Торр) без облучения. После экспериментов поверхности и поперечные шлифы образцов были проанализированы методами СЭМ и ЭДС.

Результаты выдержки сплавов в кислороде атмосферного давления показали, что оксидный слой на поверхности Zr-Nb-Sn-Fe толще, чем у остальных сплавов, что коррелирует с результатами автоклавных испытаний. При этом, как и в автоклаве, оксидный слой сплава Zr-Nb-Sn-Fe содержит в себе большое число параллельных поверхности трещин. В случае выдержки сплавов в разреженной газовой среде корреляция с результатами испытаний в автоклавах нарушается. Под действием плазмы скорость коррозии всех сплавов возрастает, и в анодном режиме облучения на порядок превышает наблюдаемую при газовой выдержке. Повышение тока разряда и потенциала на образце в плазме способствует ускорению роста оксида, однако для сплавов разного состава оно происходит неодинаково. Скорость коррозии сплава Zr-Nb-Sn-Fe возрастает в меньшей степени, чем сплавов Zr-Nb-Fe, и, в результате, при более интенсивной коррозии нарушение корреляции между результатами плазменного воздействия и выдержки этих сплавов в автоклаве проявляется сильнее. Вместе с тем, соотношение скоростей плазменной коррозии сплавов Zr-Nb-Fe между собой качественно воспроизводит результат автоклавных испытаний.

Сделан вывод, что корреляция результатов плазменного облучения и автоклавной выдержки зависит от структуры оксидных слоев сравниваемых сплавов. При выдержке в автоклаве или в атмосфере кислорода более быстрая коррозия одного сплава, по сравнению с другим, обусловлена более ранним развитием сплошной сети дефектов в оксидном слое и быстрым проникновением газообразного кислорода по этой сети в глубину. Плазменное облучение характеризуется низким давлением газа, но высокой скоростью преодоления поверхностного барьера окисляющими частицами. Поэтому при облучении в плазме проникновение оксиданта по сети дефектов происходит медленно, и скорость коррозии сплавов определяется скоростью твердотельного транспорта кислорода – диффузии и дрейфа. Большое число параллельных поверхности трещин в оксидном слое сплава Zr-Nb-Sb-Fe препятствует диффузии и дрейфу кислорода, поэтому, в отличие от автоклава, в плазме коррозия этого сплава происходит медленнее, чем Zr-Nb-Fe. В то же время, оксидные слои семейства сплавов Zr-Nb-Fe имеют между собой схожую структуру, поэтому твердотельный транспорт кислорода в этих слоях происходит с одинаковой скоростью, и различия в их дефектности проявляются при плазменном облучении так же, как при выдержке в автоклаве.