

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2022-16-83-85>

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЛЬФРАМОВЫЕ ПОКРЫТИЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Окунев В.С.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия*

Ключевые слова: вольфрамовые покрытия, ядерный реактор БРЕСТ, пустотный эффект реактивности, коррозия.

Аннотация. Основная цель работы – обоснование возможности использования вольфрамовых покрытий оболочек твэлов реактора типа БРЕСТ большой мощности. Автор используется расчетные методы. Результаты проведенного исследования показывают, что вольфрамовые покрытия не только позволяют снизить скорость коррозии и эрозии в жидком свинце, но и снизить пустотный эффект реактивности, температуру топлива, исключить экзоэнергетическую реакцию пара с хромом.

MULTIFUNCTIONAL TUNGSTEN COATINGS FOR FUEL CLADDINGS IN LEAD-COOLED NUCLEAR REACTORS

Okunev V.S.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: tungsten coatings, BREST nuclear reactor, void reactivity effect, corrosion.

Abstract. The main purpose of the work is to substantiate the possibility of using tungsten coatings for fuel rod cladding in a high-power BREST reactor. The author uses calculation methods. The results of the study show that tungsten coatings not only reduce the rate of corrosion and erosion in liquid lead, but also reduce the void effect of reactivity, fuel temperature, and eliminate the heat-releasing reaction of steam with chromium.

В 2021 г. в России начато строительство АЭС с реактором БРЕСТ-ОД-300 [1]. Это реактор на быстрых нейтронах с UN-PuN-топливом и свинцовым теплоносителем. К середине XXI в. подобные реакторы мощностью 1,2 ГВт (эл.) войдут в структуру энергетики России. Безопасность, экономическая эффективность и возможность самообеспечения топливом зависят от материалов активной зоны. Защитные вольфрамовые покрытия конструкционных материалов (в первую очередь оболочек твэлов) способствуют минимизации скорости коррозии и эрозии в жидком свинце и повышению безопасности реактора [2]. Вольфрамовые покрытия, полученные с помощью плазменного напыления, имеют слоистую структуру, не трескаются и не отслаиваются даже при изгибах.

Использование вольфрама в быстрых реакторах привлекательно по причине высокой температуры его плавления (3422°C). Вольфрам один из наиболее коррозионно-устойчивых металлов. Взаимодействует с азотом при температуре более 2000°C (образуя WN_3), с углеродом – при 1100...1200 °C (образуя WC и W_2C) [3]. Двух и трехвалентный вольфрам – сильный

восстановитель. При высоких температурах защитные оксидные пленки на поверхности вольфрама не образуются. Окислительная способность четырехвалентного вольфрама проявляется слабо [3]. Добавки вольфрама улучшают жаропрочность и механические свойства стали [4]. Содержание вольфрама в стали может достигать 85% [3]. Вольфрам и содержащие его стали можно использовать в качестве конструкционных материалов в контакте с натрием при температуре около 800°C [4]. Вольфрам устойчив во многих жидкометаллических теплоносителях: в натрии, калии и их эвтектике до 1200°C; в литии – до 1400...1650°C, в свинце – до 1000°C [5]. Вольфрам характеризуется относительно высоким сечением поглощения быстрых нейтронов [6].

Добавки вольфрама ускоряют окисление стали при высоких температурах [4]. При использовании вольфрама в реакторах требуется очистка жидкометаллического теплоносителя от кислорода. Вольфрам характеризуется низкой стойкостью в кислородсодержащих средах. На поверхности металлах появляется неплотная отслаивающаяся пленка. Добавки вольфрама уменьшают склонность стали к тепловой хрупкости (при температуре выше 400°C) [4]. При определенных температурах вольфрам переходит из пластического состояния в хрупкое [5]. (Известны химические и физические способы предотвращения хладноломкости [5].) По этим причинам содержание вольфрама в стали быстрых реакторов ограничивают. Например, в конструкционной стали ЭП-823 реактора БРЕСТ содержание вольфрама не превышает 0,006% [1].

Вольфрамовые покрытия конструкционных материалов реакторов типа БРЕСТ не только минимизируют скорость коррозии и эрозии. Относительно высокое сечение поглощения нейтронов и невозможность выноса вольфрама из активной зоны ведет к снижению пустотного эффекта реактивности. При использовании вольфрамовых оболочек и теплоносителя на основе свинца ториевых руд этот эффект отрицателен в реакторах бесконечной мощности (бесконечного радиуса) и равен $-0,86 \beta$ (где β – эффективная доля запаздывающих нейтронов). По сравнению с коррозионно-стойкой сталью, легирующими добавками и UN-PuN-топливом вольфрам характеризуется высокой теплопроводностью в широком диапазоне температур. Это способствует повышению теплоотвода от топлива. Теплоперенос через тонкое покрытие значительно отличается от теплопереноса внутри макроскопических тел. Толщина вольфрамового покрытия должна быть более 50 нм. При этом теплопроводность остается высокой. В БРЕСТ предусмотрена двухконтурная схема преобразования энергии. При разгерметизации трубок теплообменника возможно вовлечение паровых пузырей в активную зону. Водяной пар (рабочее тело) взаимодействует с хромом (в составе стали ЭП-823) с выделением теплоты. Вольфрамовые покрытия предотвращают парохромовую реакцию.

Список литературы

1. Lemekhov V.V., Moiseyev A.V., Sarkulov M.K., et al. Present-day status and development prospects of fast-neutron lead-cooled reactors // Materials of the 5-th International Conference “Innovative designs and technologies of nuclear power”. Moscow, JSC NIKIET, 2018. P. 35-37.
2. Okunev V.S. Substantiation of the Feasibility of Using Fuel Rods with Tungsten Spraying in Power Fast Reactors of New Generation // Thermal Engineering. 2011. Vol. 58, No. 14, pp. 1167-1171.
3. Бусев А.И., Иванов В.М., Соколова Т.А. Аналитическая химия вольфрама. М.: Наука, 1976. 240 с.
4. Вольфрам в сталях. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. 2022. URL: <https://chem21.info/info/14597/>
5. Самойлов А.Г., Волков В.С., Солонин М.И. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1996. 400 с.
6. Николаев М.Н. Вольфрам. Энциклопедия нейтронных данных РОСФОНД (Российская библиотека файлов оцененных нейтронных данных). ГИЦ РФ ФЭИ им. А.И. Лейпунского, Обнинск, 2006г.

References

1. Lemekhov V.V., Moiseyev A.V., Sarkulov M.K., et al. Present-day status and development prospects of fast-neutron lead-cooled reactors // Materials of the 5-th International Conference “Innovative designs and technologies of nuclear power”. Moscow, JSC NIKIET, 2018. P. 35-37.
2. Okunev V.S. Substantiation of the Feasibility of Using Fuel Rods with Tungsten Spraying in Power Fast Reactors of New Generation // Thermal Engineering, 2011. Vol. 58, No. 14, pp. 1167-1171.
3. Busev A.I., Ivanov V.M., Sokolova T.A. Analytical chemistry of tungsten. Moscow: Science, 1976. 240 p.
4. Tungsten in steels. Handbook of a chemist 21. Chemistry and chemical technology. 2022. URL: <https://chem21.info/info/14597/>
5. Samoilov A.G., Volkov V.S., Solonin M.I. Fuel elements of nuclear reactors. Moscow: Energoatomizdat, 1996. 400 p.
6. Nikolaev M.N. Tungsten. Encyclopedia of Neutron Data ROSFOND (Russian Library of Estimated Neutron Data Files). IPPE, Obninsk, 2006.

Окунев Вячеслав Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры физики	Okunev Viacheslav Sergeevich — candidate of technical sciences, associate professor of the Department of physics
okunevvs@bmstu.ru	

Received 20.04.2022