

Библиографический список

1. Phase instability, decomposition and redistribution of intermetallic precipitation in zircalloy-2 and -4 during neutron irradiation, M. Griffiths, R. W. Gilbert and G. Carpenter, *Journal of Nuclear Materials*, 1950 (1987), pp. 53-66.
2. Effects of high neutron fluences on microstructure and growth of zirconium alloys, Garzoli, Dewes, Maussner and Basso, *Zirconium in the nuclear industry: Eighth international symposium*, ASTM, Philadelphia, 1989, pp. 641-657.
3. Effect of in-PWR irradiation on size, structure and composition of intermetallic precipitates of Zr alloys; F. Garzaroli, W. Goll, A. Seibold and I. Ray; 11th ASTM Symposium in the Nuclear Industry, Sep. 11-14, 1995, pp. 541-556.
4. Microstructure and corrosion studies for optimized PWR and BWR zirconium cladding; Garzoli, Steinberg and Weidinger, *Zirconium in The Nuclear Industry: Eight International Symposium*, ASTM, Philadelphia, 1989, pp. 202-212.
5. Corrosion optimized zirconium for boiling water reactor (BWR) fuel elements, Garzaroli, Schuman and Steinberg, *Zirconium in The Nuclear Industry, Tenth Annual International Symposium*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994, pp. 709-723.
6. Corrosion and hydride resistant nuclear fuel rod. US Patent № 6,192,098 B1. Date of Patent: Feb. 20, 2001. Inventor: Leonard F.P. Van Swam, Richland, WA (US). Assignee: Siemens Power Corporation, Richland, WA (US).
7. Zirconium niobium tin alloys for nuclear fuel rods and structural parts for high burnup. US Patent № 5,844,959. Date of Patent: December 1, 1998. Inventors: Leonard F.P. Van Swam, Richland, Wash, Friedrich Garzoli, Hochstadt, Heinrich Ruhmann, Herzogenaurach. Assignee: Siemens Power Corporation, Richland, WA (US).
8. Method for making Zr alloy nuclear reactor fuel cladding having excellent corrosion and creep properties. US Patent № 6,125,161. Date of Patent: September 26, 2000. Inventors: Takeshi Isobe, Ohmiya; Yoshitaka Suda, Okegawa, both of Japan. Assignee: Mitsubishi Materials Corporation, Tokyo, Japan.
9. Tube for a nuclear fuel assembly and method for making same. US Patent № 5,940,464. Date of Patent: August 17, 1999. Inventors: Mardon, et al. (FR). Assignee: Framatome (FR), Compagnie Generale des Matieres Nucleaires (FR).
10. Zirconium-based alloy, manufacturing process and use in a nuclear reactor. US Patent № 5,832,050. Date of Patent: November 3, 1998. Inventors: Rebeyrolle; Veronique (FR), et al. Assignee: Compagnie Europeenne du Zirconium Cezus (Courbevoie, FR).
11. Pressurized water reactor nuclear fuel assembly. US Patent № 5,892,807. Date of Patent: April 6, 1999. Inventor: Leonard F.P. Van Swam, Richland, WA (US). Assignee: Siemens Power Corporation, Richland, WA (US).
12. Кузнецов Е.Д., Кузнецов Д.Е. Проблема обеспечения точности размеров и качества поверхности при производстве труб. Теоретические проблемы прокатного производства // Труды V Междунар. науч.-техн. конф., 16-18 мая 2000 г. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. Май 2000 г. – С. 336-339.

УДК 669.621

ИЗНОСОСТОЙКАЯ НЕЙТРОНПОГЛОЩАЮЩАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ КАРБИДА БОРА И РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЙ СТЕКЛОГРАФИТОВЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

*Б.В. Борц, М.М. Бровко, В.П. Канцедал, М.Ю. Ковалевский,
И.М. Неклюдов, В.Т. Сазонов, В.Г. Сердюк*

г. Харьков, Институт физики твердого тела материаловедения и технологий НИЦ ХФТИ

Н.В. Камышанченко, В.М. Никитин, Б.В. Храбростин
г. Белгород, Белгородский государственный университет

Данная работа содержит новые решения актуальной проблемы разработки конструкционных и композиционных материалов с заданными механическими и электродинамическими характеристиками. В докладе представлены результаты исследований по разработке износостойкой керамики на основе карбида бора и связующего на основе стекла [1].

Технология изготовления износостойкой керамики предусматривает проведение

двух этапов обработки исходных материалов. На первом этапе осуществляется предварительное спекание смеси порошков исходных компонентов на воздухе при температуре 800-1000 °С. Во время спекания происходит окисление поверхности частиц карбида бора и смачивание окисленной поверхности расплавом стекла. В результате предварительного спекания исходная смесь превращается в однородную массу, в которой частицы карбида бора смочены распла-

вом стекла и фторида кальция. На втором этапе обработки проводится окончательное спекание материала при повышенной температуре (1150-1400 °С) в неокислительной среде, в результате чего однородный материал приобретает кристаллическую структуру с плотностью 85-90 % от теоретической (~ 2,6 г/см³).

Для реализации вышеописанной технологии была разработана и изготовлена установка, состоящая из следующих составных частей: высокочастотного генератора марки ВЧГ6-60/044 с колебательной мощностью 60 кВт и частотой 440 кГц; индуктора, внутри которого помещен тигель, где происходит спекание исходного композиционного материала; системы водяного охлаждения и вентиляционной системы.

Из полученного с помощью данной установки кристаллического материала методом горячего прессования на воздухе были изготовлены упорные подшипники для погружного насоса марки ПЭН6-240-250 с размерами дорожки скольжения 40x60 мм. Такие же по конструкции подшипники были изготовлены из порошка чистого карбида бора методом горячего прессования в вакууме при температуре 2200 °С и давлении 500 кг/см². Те и другие подшипники были установлены в насос ПЭН6-240-250 и работали при следующих условиях: давление на выходе насоса 0,5 МПа, частота вращения ротора 3000 об/мин, усилие, приложенное к подшипнику, 8,9 кН, содержание песка в перекачиваемой жидкости 1 г/л. В указанных условиях через 163 ч работы на подшипниках, изготовленных из спеченного в вакууме карбида бора, появились трещины и сколы. Подшипники из предлагаемого композиционного материала были в хорошем состоянии. Испытания были продолжены до 984 ч. Измерение износа, проведенное методом базовой поверхности, показало, что величина износа подшипников из предлагаемого материала не превышала 20 мкм, причем сколов и трещин на них не наблюдалось. В то же время на подшипниках из спрессованного в вакууме карбида бора количество сколов и трещин увеличилось. Испытания подшипников, изготовленных из карбида бора, были проведены при таком же содержании абразивных частиц,

но при меньшем приложенном усилии, которое составляло 0,96 кН. Частота вращения ротора и в этом случае равнялась 3000 об/мин. Примерно через 200 ч работы в указанных условиях был зафиксирован износ поверхности дорожки скольжения в пределах от 0,15 до 0,2 мм. Таким образом, сопоставительный анализ экспериментальных образцов подшипников показал, что износостойкость чистого карбида бора существенно ниже износостойкости композиционного материала.

Другой областью применения описанной выше композиционной керамики на основе карбида бора является использование её в качестве материала – поглотителя тепловых нейтронов [2, 3], в контейнерах для транспортировки и хранения источников с нейтронной составляющей излучения. Предлагаемый к использованию материал также состоит из B_4C и связующего на основе стекла [4]. Он предназначен для защиты от тепловых нейтронов на радиационно-опасных участках объектов. Материал может найти применение при стабилизации конструкций объекта “Укрытие” (ОУ) и обращения с радиоактивными отходами (РАО) в виде:

- прочного материала в виде блоков, плит для хранилищ радиоактивных отходов;
- контейнеров для транспортировки и хранения источников с нейтронной составляющей излучения;
- защиты мобильных транспортных средств;
- элементов модулей наращиваемых конструкций для проходки тоннелей и эвакуации материалов ОУ.

Физико-технические характеристики предлагаемого материала:

- предел прочности при сжатии 950 МПа;
- предел прочности при изгибе 118 МПа;
- коэффициент термического расширения (в интервале температур 200-1000 °С) $7,2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- плотность 2,6 г/см³;
- рабочая температура до 1200 °С.

Измерен коэффициент прохождения пучка тепловых нейтронов с энергией 0,025 эВ через образцы исследуемой кера-

мики. Источник Pu-Be помещался в полностью закрытый парафиновый контейнер с толщиной стенки 7 см. Пучок тепловых нейтронов направлялся на образцы, которые представляли собой пластины диаметром 4 см с толщиной $\delta = 0,5$ см, 1,2 см. Регистрация потока тепловых нейтронов осуществлялась борным детектором типа СНМ-11, обернутым в листовую кадмий толщиной 1 мм. При этом размеры чувствительной области детектора составили 3 см по его длине. Для определения коэффициента прохождения пучка тепловых нейтронов измерялся поток нейтронов с образцами и без образцов. Фоновые измерения проводились при полностью обернутом кадмием детекторе.

Результаты измерений показаны в таблице:

δ , см	Коэффициент прохождения
0,5	$5,1 \pm 0,4$
1,2	$6,3 \pm 0,5$

По результатам испытаний определен линейный коэффициент ослабления излучения для тепловых нейтронов, равный $5,6 \text{ см}^{-1}$. В сравнении с традиционно используемыми материалами, работающими в радиационных условиях, предлагаемый в докладе материал обладает значительно большей прочностью (в 10-15 раз выше бетонов, стекол), рабочая температура на 300°C выше, чем $V_4\text{C}$.

Разработан также радиопоглощающий стеклографитовый электропроводящий материал на основе алюмоборосиликатных стекол [5, 6, 7]. Образцы этого материала были испытаны на поглощающую способность электромагнитных волн в диапазоне 4 мм и 3-10 см. Измерения в диапазоне длин волн 3-10 см проводились по стандартной методике на испытательном стенде, состоящем из генератора сверхвысоких частот, аттенюатора, волновода. Результаты измерений таковы.

Физико-технические характеристики материала:

1. Плотность, г/см^3	3,2...3,6
2. Длина волны, см	3...10
3. Коэффициент стоячей волны	1,01...1,06

4. Уровень поглощаемой мощности, Вт/см^2	20
5. Максимальная температура нагрева, $^\circ\text{C}$	1000
6. Удельное электрическое сопротивление, $10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	0,53...2,2
7. Прочность на сжатие, МПа	700...850
8. Микротвердость микросфер, кг/мм^2	1007
9. Предельная температура без газовыделения в вакууме, $^\circ\text{C}$	1200
10. Тангенс угла потерь ($\text{tg } \delta$)	0,3...0,5
11. Относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ)	3...12
12. Ослабление сигнала на поглощающей нагрузке, дБ	26

Результаты испытаний материала в свободном пространстве:

- ослабление излучения падающего электромагнитного поля на изделии диаметром 1 см, дБ	20
- уровень отражений падающего излучения, %	6

Измерения в диапазоне длин волн 4 мм ($75,5 \text{ ГГц}$) проводились на испытательном стенде, состоящем из генератора ГЗ-37, аттенюатора, волноводного тракта, индикаторного прибора (точность измерения $\pm 5\%$) с применением усилителя типа У2-6 и измерительной линии типа Р2-12. В процессе измерений получено значение коэффициента стоячей волны, равное 1,07 (в волноводе с оконечной нагрузкой, выполненной из данного материала).

Приведенные результаты измерений показывают, что созданный композиционный материал характеризуется малой отражательной способностью и может быть применен для изготовления радиопоглощающих покрытий и элементов в диапазоне сверхвысоких частот.

Таким образом, представленные результаты исследований по созданию новых керамических материалов позволяют сделать вывод о высоких технических характеристиках таких материалов, благодаря которым они могут быть успешно использованы в машиностроении, радиотехнике и радиоэлектронике, атомной и других областях науки и техники.

Библиографический список

1. Бровко М.М., Сердюк В.Г., Смирнов С.А. А.С. SU 155-2572 А 104В 35156, 35/00 от 22.11.1989.
2. Бровко М.М., Ковалевский М.Ю., Слезов В.В., Сердюк В.Г., Сазонов В.Т. Исследование керамического композиционного материала – поглотителя тепловых нейтронов // Труды Международной конференции “Укрытие-98”, Славутич, 25-27 ноября 1998 г. – С. 49.
3. Канцелал В.П., Кириченко В.В., Ковалевский М.Ю., Кохнюк К.С., Сердюк В.Г., Халин Н.Ф., Филоненко В.С. О применении композиционной керамики в контейнерах “Украина”, строительных конструкциях хранилищ РАО // Труды Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению, 2000 г. – С. 291.
4. Сердюк В.Г., Халин Н.Ф., Головия В.Я., Большаков А.К., Коленков В.Г. Керамический композиционный материал – поглотитель нейтронов. Международная конференция Украинского ядерного общества “Экология предприятия ядерной энергетики” (тезисы докладов). – Одесса, 1998 г. – С. 25.
5. А.С. № 673125 от 15.03.1979 г.
6. А.С. № 847651 от 13.03.1981 г.
7. А.С. № 1012562 от 23.06.1983 г.

УДК 539.4

КОРРОЗИОННО-УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА В МОРСКОЙ ВОДЕ

М.А. Скотникова

С.-Петербург, С.-Петербургский институт машиностроения

Во все времена была актуальной проблема коррозионной усталости машиностроительных материалов в морской воде под действием циклически изменяющихся напряжений, по уровню более низких, чем их условный предел текучести [1–4]. Сегодня наибольший интерес представляют вопросы изучения физической природы коррозионной усталости, выявления факторов, повышающих напряженное состояние материалов, установления роли структурно-химической неоднородности, возникающей в результате распада пересыщенных твердых растворов в легированных сплавах [5–9].

Целью данной работы явилось изучение связи результатов коррозионно-усталостных испытаний горячедеформированных титановых заготовок с особенностями структурно-химической и кристаллографической текстурированности, установление причин появления выпадов (низких значений) результатов испытаний в морской воде с использованием методов оптической металлографии, цветного электролитического окрашивания и растровой электронной микроскопии.

Малоцикловые испытания проводились на образцах из сплава титана Ti–6Al–1Mo–1V с кольцевым надрезом, так, что их ось была параллельна направлению прокатки. Испытывали образцы в количестве 120 штук в 3%-ном растворе NaCl, в режиме от нулевого растяжения при пульсирующем цикле нагруже-

ния с частотой 2–3 цикла/мин, с амплитудой приложенного напряжения 0,8 и 0,7 от среднего значения предела текучести. При этом число циклов до разрушения изменялось, соответственно, от 200 до 1900 циклов и от 700 до 3800. Таким образом, с уменьшением уровня приложенного напряжения увеличивался разброс значений числа циклов до разрушения, наряду с одновременным возрастанием среднего их значения.

Образцы были вырезаны из верхней части горячедеформированного листового полуфабриката толщиной 150 мм полосчатого строения. Полосы прокатки, сплюснутые по толщине листа, были двух типов: широкие размером до 1000 мкм и узкие размером 20...30 мкм. Как показал метод цветного электрохимического окрашивания, узкие полосы представляли собой сплюснутые монослои из α -зерен с призматической ориентацией границ раздела типа {1010} с направлением оси $\langle 0001 \rangle$ преимущественно вдоль направления прокатки. Как показали результаты рентгено-спектрального анализа, узкие монослои α -зерен содержали повышенное количество алюминия на 0,5...0,8 % по сравнению с матрицей.

Фрактографический анализ изломов испытанных образцов позволил заключить, что по мере увеличения длины магистральной трещины и уменьшения живого сечения