

Табл. 1 позволяет заключить, что введение в состав СКМ демпфирующей прослойки из микролегированной меди, содержащей в своём составе в качестве микродобавки один или несколько элементов из группы: скандий, иттрий, редкоземельные металлы, цирконий, алюминий, бор, хром, олово или фосфор – и прослойки из микролегированного ниобия, содержащего в качестве микродобавки один или несколько элементов из группы: скандий, гольмий, диспрозий, неодим, празеодим, гадолиний, цирконий, бор – и фиксация толщин прослоек в интервале толщин от 0,2 до 1,2 мм приводит к повышению термоциклической выносливости в 1,7 – 3,5 раза.

В НИЦ ХФТИ освоено изготовление СКМ типа титан-сталь на вакуумном прокатном стане ДУО-170. Изготовлены опытно-промышленные партии композиционного материала с использованием в качестве барьерных и демпфирующих прослоек микролегированной меди и ниобия, исследованы физико-механические свойства и работоспособность композитов в опытных конструкциях.

Работа выполнена при поддержке Научно-технологического центра Украины, проект № 1760.

Библиографический список

1. Лопата А.Т., Неклюдов И.М., Шевченко С.В. Термоциклическая биметалла цирконий – сталь для переходниковых элементов // Вопросы атомной науки и техники. Труды конференции: Проблемы циркония и гафния в атомной энергетике. – Харьков, 1999.
2. Тронь А.С., Забашта Л.А., Лопата А.Т. Влияние циклических нагревов на свойства соединений разнородных металлов // Проблемы прочности.– 1975.– №12.– С. 57.
3. Амоненко В.М., Эпов Г.А., Тронь А.С. Освоение технологии получения высокопрочных биметаллических плит титан-сталь прокаткой в вакууме // Электронная техника. – Сер. 6. – Материалы. – 1973.– Вып. 5. – С. 39.
4. Иванов В.Е., Амоненко В.М., Тронь А.С. Свойства соединений титановых сплавов со сталью, полученных через тонкие металлические прослойки // ФиХОМ.– 1971.– №2.
5. Минаков В.П., Поляков Л.М., Тронь А.С., Механические свойства тонких медных прослоек в композициях // Проблемы прочности.–1975.–№10. – С. 71-74.
6. Амоненко В.М., Тронь А.С., Шевченко С.В. Сплав на основе меди.– А.с. №1203919 от 8.09.1985.
7. Шевченко С.В., Неклюдов И.М., Лопата А.Т. Сплав на основе меди // Патент НИЦ ХФТИ.- 10.03.95.– Бюл. № 7.
8. Патент № 27789 Украина, МКИ В32 В15/01. Слоистый композиционный материал / Неклюдов И.М., Лопата А.Т., Шевченко С.В. (Украина). – 5 с. Оpubл. 16.10.00. – Бюл. № 5.

УДК: 621.774.08:531.717.11/.12.[669.296

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРООТКЛОНЕНИЙ НАРУЖНОЙ И ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУБ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛ ИЗ СПЛАВА ЦИРКОНИЯ

В.С. Вахрушева, Д.Е. Кузнецов

г. Днепропетровск, Государственный трубный институт

Долговечность работы оболочек тепловыделяющих элементов является одной из наиболее актуальных проблем, определяющих эффективность работы атомных энергетических установок. Повышение цен на углеводородные материалы, возрастающие проблемы в угледобывающей промышленности, сложность практической реализации проектов, связанных с альтернативными источниками энергии, и ряд других причин заставляют искать технические решения, способные повысить работоспособность оболочек ТВЭЛ. В докладе излагаются некоторые результаты исследований, проводимых в Государственном трубном институте Украины по изучению закономерностей формирования поверхностей оболочечных труб из материалов различного типа, в том числе на основе сплавов циркония. Цель этих исследований состоит в создании технологий производства оболочечного материала, пригодного для работы при повышенных степенях выгорания ядерного топлива.

Постановка задачи исследований. Как известно, назначение оболочки ТВЭЛ со-

стоит в предотвращении контакта между ядерным топливом и продуктами его распа-

да с охладителем. При этом нужно обеспечить минимальную абсорбцию тепловых нейтронов, что и определяет необходимость применения сплавов на основе циркония. В области малых степеней выгорания ядерного топлива этим требованиям вполне удовлетворяют оболочки из известных циркониевых сплавов, изготавливаемые по технологиям, достаточно подробно описанным во многих литературных источниках.

Увеличение сроков эксплуатации ограничено проблемой разгерметизации оболочек ТВЭЛ-ов. Публикации на эту тему [1–5] позволяют предположить, что одной из причин разрушения является развитие процессов коррозии, в том числе и нодулярной коррозии.

При длительной эксплуатации, характерной для повышенных степеней выгорания топлива, на оболочках из циркониевых сплавов, на наружной поверхности, возникает очаговая (нодулярная) коррозия. Потенциальной причиной зарождения трещины называют также местную коррозию внутренней поверхности, возникающую в результате реакции металла трубы с продуктами деления ядерного топлива.

Принято считать, что под воздействием нагрева и облучения высокой интенсивности места образования коррозии в процессе эксплуатации трансформируются в участки локальной деформации, где в конечном итоге появляется трещина. Известны данные, что такого рода трещины имеют продольную ориентацию и, как правило, зарождаются на внутренней поверхности оболочки.

Анализ патентов по повышению долговечности оболочек ТВЭЛ из циркониевых сплавов, опубликованных в последние годы, дают основание выделить следующие предложения по решению рассматриваемой проблемы:

- применительно к известным сплавам циркония формировать на наружной и внутренней поверхности оболочек поверхностные слои, стойкие против образования местных очагов коррозии;

- для повышения коррозионной стойкости и улучшения свойств ползучести сплавов циркония, легированных ниобием, на этапах трубного предела, следующих после проведения β -закалки, проводить отжиг

в заданных параметрах суммарной температуры и времени;

- создание новых видов циркониевых сплавов, обладающих повышенной коррозионной стойкостью.

К первому направлению можно отнести патент [6], где предлагается применять в реакторах на кипящей воде оболочки ТВЭЛ, изготовленные из сплава циркалой-4 с переменным градиентом содержания кислорода, изменяющимся от 1600 ppm на наружной поверхности до 1200 ppm на внутренней поверхности. Такой градиент создается путем плакировки наружной и внутренней поверхностей оболочки сплавами с заранее подобранным химическим составом. Авторы считают, что за счет этого будут обеспечены условия более интенсивного образования гидридов циркония на внутренней поверхности, что приведет к замедлению коррозии наружной поверхности оболочки.

К первому направлению относится и патент [7], в котором предлагается создавать структуру циркониевого сплава, легированного ниобием, обеспечить равномерное распределение вторичной β -ниобиевой фазы внутри и по границам зерен.

В патенте [8] предлагается повысить коррозионную стойкость и улучшить свойства ползучести сплавов циркония, легированных ниобием, за счет оптимизации режимов термической обработки на этапах трубного предела, следующих после проведения β -закалки.

К направлению, связанному с созданием новых циркониевых сплавов, можно отнести патент [9]. В нем предлагается при изготовлении оболочек ТВЭЛ применять циркониевый сплав, содержащий (%): 0,8–1,8 ниобия; 0,2–0,6 олова; 0,02–0,4 железа; углерода в пределах 10–120 ppm; кремния 10–120 ppm и кислорода 600–1800 ppm. Предполагается, что повышенное содержание ниобия свыше предела растворимости (около 0,6%) улучшит коррозионную стойкость в водной среде при повышенных температурах, а легирование оловом и ниобием улучшит сопротивление ползучести, а также коррозионную стойкость в водной среде, содержащую литий, без ухудшения уровня пластичности, требуемого для прокатки труб. Добавка железа компенсирует небла-

гоприятное влияние олова на общую коррозию. Неизбежное наличие примесей оговаривается на минимально возможном уровне.

В определенной мере неожиданным техническим решением можно считать патент [10], в котором предлагается применять известные сплавы циркония с повышенным содержанием серы на уровне 8-100 ppm, предпочтительнее в интервале 8-30 ppm. В действующих стандартах серу рассматривают как неизбежную примесь и обычно оговаривают содержание ее на уровне менее 2 ppm. Такой уровень серы, по мнению авторов, гарантирует хорошую пластичность и не ухудшает коррозионную стойкость циркониевых сплавов. В основу патента положены результаты исследований, показавших, что увеличение до определенного уровня содержания серы снижает склонность к ползучести без ухудшения коррозионных свойств.

Для улучшения показателей прочности и ползучести в патенте [11] предложено известные циркониевые сплавы дополнительно легировать висмутом в пределах 1,5 – 1,6 %. Автор патента считает, что висмут, обладая низкой способностью поглощения тепловых нейтронов, обеспечит повышение прочностных свойств оболочки.

Обобщая результаты литературного и патентного анализа, можно сделать заключение, что в ранее выполненных работах, направленных на повышение стойкости оболочек тепловыделяющих элементов, не ставилась задача по выявлению различия труб в исходном состоянии, которое могло привести к преждевременному разрушению одних и удовлетворительному состоянию других труб, находящихся в топливной сборке. Если воспользоваться критериями теории надежности, можно утверждать, что изготавливаемые трубы не в достаточной мере являются взаимозаменяемыми. В свою очередь локальный характер образования очагов коррозии и последующего зарождения трещины позволяют полагать, что различие по взаимозаменяемости следует в первую очередь искать в характеристиках поверхностей.

Методика исследований. В [12] отмечалось, что применяемые в настоящее время методики контроля размеров и состояния

поверхностей труб, не обеспечивают их полную взаимозаменяемость. Зачастую трубы, прошедшие комплексный контроль, предписанный современными стандартами, имеют значительные размерные аномалии, которые могут существенно влиять на эксплуатационные свойства.

В настоящем докладе излагаются результаты исследований макроотклонений наружной и внутренней поверхностей труб из сплава циркония марки КТЦ-110А, со следующим химическим составом (%): Nb 0,9–1,1; Cu ≤ 0,005; O 0,1–0,14; C ≤ 0,02; N ≤ 0,006.

К макроотклонениям были отнесены отклонения наружной и внутренней поверхностей с периодом в пределах 0,05 – 2,0 мм. Отклонения с меньшим периодом рассматривались как микрорельеф, а с большей продолжительностью, вплоть до нескольких метров, классифицировались как размерные отклонения.

Оценку макроотклонений наружной и внутренней поверхностей проводили при помощи кругломера "Талиронд 3". Погрешность измерений не превышала 0,1 микрометра. Измерительный сигнал преобразовывали в цифровую форму с дискретностью 3200 значений за оборот датчика относительно измеряемого патрубка.

Обработка измерительной информации заключалась в оценке статистических и амплитудно-частотных характеристик измеренных профилей, взаимно корреляционных функций профилей наружной и внутренней поверхностей.

Для трехмерного анализа отклонений поверхностей проводили продольное сканирование патрубка с шагом 2 мм. По результатам измерений формировали трехмерную матрицу, с помощью которой оценивали пространственную структуру макроотклонений.

Исследования проводили на оболочечных трубах размером диаметр наружный 9,15 мм, диаметр внутренний 7,76 мм, изготовленных по различным технологическим режимам.

Полученные результаты. На всех исследованных патрубках выявлены локальные углубления поверхностей. На рис. 1 показаны отклонения наружной поверхности

трубы готового размера, прокатанной на роликовом стане, подвергнутой вакуумной термической обработке и последующей правке на косовалковом стане. В рассматриваемом случае отклонения профиля поперечного сечения связаны с овализацией трубы и образованием отклонений более высокой частоты.



Рис. 1. Профиль поперечного сечения наружной поверхности трубы из сплава циркония.



Рис. 2. Профиль поперечного сечения внутренней поверхности трубы из циркониевого сплава.

На рис. 2 показаны отклонения поперечного сечения внутренней поверхности трубы, изготовленной по аналогичной технологической схеме. В этом случае овализация не столь значима, но характер высокочастотных отклонений аналогичен.

Результаты амплитудно-частотного анализа профилей поперечных сечений труб дают основания утверждать, что макроот-

клонения могут быть описаны суммой гармонических и случайных колебаний. В большинстве случаев гармонические составляющие вносят наибольшую размерную погрешность. Такая закономерность позволяет утверждать, что выявленная размерная аномалия в области макроотклонений поверхностей является следствием неравномерности деформации в процессе прокатки труб.

Правомочность этого вывода также подтверждается результатами исследований взаимнокорреляционных функций контуров поперечных сечений наружных и внутренних поверхностей. В частности, установлено существование отчетливо выраженных связей в определенных частотных диапазонах макроотклонений. Эти результаты позволяют с достаточно высокой точностью выявить механизм образования размерных погрешностей этого вида.

Результаты трехмерного анализа макроотклонений поверхностей труб показали, что трубы, изготавливаемые по действующей технологии, основанной на применении холодной прокатки, могут иметь продольно ориентированные локальные углубления. В исследованных образцах были выявлены относительно узкие локальные углубления, достигающие величины 30–40 микрометров при длине до 60 мм.

В ряде случаев заметна тенденция образования на внутренней поверхности более глубоких продольно ориентированных утонений, нежели на наружной.

Заключение. Выявленные размерные отклонения дают основания утверждать, что трубы из циркониевых сплавов, изготавливаемые по действующей технологии, не в достаточной мере обеспечивают взаимозаменяемость, что может приводить к существенному разбросу продолжительности эксплуатации оболочек. Характер расположения и размеры выявленных макроотклонений позволяют рассматривать их как потенциальные источники зарождения трещин. Применяемые в настоящее время методы контроля не позволяют выявить такого рода размерные аномалии, а современные стандарты не регламентируют их допустимые размеры.

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 zircaloy cladding; Garzoli, Steinberg and Weidinger, *Zirconium in The Nuclear Industry: Eight International Symposium*, ASTM, Philadelphia, 1989, pp. 202-212.
5. Corrosion optimized zircaloy 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, Friedlich 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 НЕЙТРОННОПОГЛОЩАЮЩАЯ 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-