

О ПРИМЕНЕНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ КОРПУСОВ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ

А.М. Паршин, О.Э. Муратов

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;

О.А. Кожевников

ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена возможность использования α -сплавов титана в качестве конструкционных материалов корпусов водо-водяных реакторов. На основе анализа характеристик титановых α -сплавов показаны преимущества их использования для создания перспективных энергоблоков повышенного ресурса и высокой экологической безопасности.

Безопасность любой ЯЭУ обеспечивается надежностью и прочностью элементов оборудования, трубопроводов, конструкций и, главным образом, корпуса реактора, являющегося основным барьером для удержания продуктов ядерных реакций от распространения в окружающую среду. Корпус реактора, работающий в условиях одновременного воздействия нейтронного облучения, высоких температур и несущий давление теплоносителя, является незаменимым и практически неремонтопригодным, поэтому срок его безопасной эксплуатации определяет срок эксплуатации энергоблока. Обязательным требованием, предъявляемым к проектируемым в настоящее время любым типам реакторов, является их повышенный ресурс (~ 60 лет) с возможностью дальнейшего продления. Поэтому для корпусов перспективных реакторов различных типов требуется создание нового поколения конструкционных материалов, обеспечивающих качественное изменение параметров эксплуатации и служебных характеристик ЯЭУ.

Условия работы ЯЭУ предъявляют к перспективным конструкционным материалам ряд требований, обеспечивающих их безопасность в условиях беспрецедентных флюенсов нейтронов (~ $5 \cdot 10^{20}$ нейтр/см²) в течение срока эксплуатации 60 лет и возможного его продления до 100 лет [1]. Главными из них являются:

- необходимый уровень прочности;
- высокое сопротивление радиационному охрупчиванию;
- высокая коррозионная стойкость;
- стабильность физико-механических свойств.

Помимо свойств конструкционных материалов, обеспечивающих безопасность ЯЭУ в течение срока эксплуатации, огромное значение приобрела проблема утилизации корпусов реакторов водо-водяного типа, выработавших свой ресурс. В настоящее время только в России выведено из эксплуатации и подлежит утилизации более 200 транспортных и стационарных ЯЭУ (в основном реакторов АПЛ). Препятствием на пути экологически безопасного решения проблемы утилизации ЯЭУ является

высокий уровень наведенной активности сталей корпусов реакторов (особенно аустенитной стали внутренней антикоррозионной наплавки) и медленный ее спад во времени (около 100 лет). Проблема обеспечения экологической безопасности при утилизации ЯЭУ окончательно не решена ни в одной стране, цикл утилизации не является замкнутым, поэтому во всем мире ведутся исследования по разработке конструкционных материалов, обладающих низким уровнем активации в нейтронных полях и быстрым спадом во времени наведенной активности.

Наряду с созданием малоактивируемых корпусных материалов на основе композиций железа и хрома (коррозионно-стойкие хромистые ферритные стали типа X13 и высокопрочные коррозионно-стойкие мартенситно-старенеющие стали типа X13N4M) [2] перспективным конструкционным материалом для корпусов водо-водяных реакторов могут быть низколегированные α -сплавы титана, которые по уровню наведенной активности более чем на порядок превосходят композиции на основе железа и хрома.

Титановые сплавы начали применяться в качестве конструкционных материалов только во второй половине XX века. В России разработан широкий спектр конструкционных титановых сплавов и накоплен большой опыт их использования. Это корпусные титановые сплавы (5В, 5ВА, 23А), сплавы энергетики (ПТ1М, ПТ7М), сплавы машиностроения (ТЛ3, ТЛ5), а также сплавы для медицинской техники и точных приборов [3].

Наиболее широкое применение титановые сплавы получили в атомном кораблестроении. В 1968 г. в СССР была спущена первая в мире АПЛ с титановым корпусом (К-162, проект 661), которая во время ходовых испытаний установила мировой рекорд подводной скорости 44,7 узла, непревзойденный до настоящего времени. В дальнейшем в 70...80-е годы с корпусами из титановых сплавов строились серии многоцелевых АПЛ (проекты 705, 945, 685) и АПЛ специального назначения (проекты 1851, 1910 и 10831). Кроме корпусов в АПЛ проекта 705 титановые сплавы применялись и для изготовления других

элементов конструкций и корабельных систем. Применение для корпусов АПЛ титановых сплавов, обладающих малым удельным весом и высокой удельной прочностью, позволили создать корабли с глубиной погружения 1000 м (проекты 1851, 1910, 10831, 685) [4].

Опыт эксплуатации данного типа АПЛ подтвердил целесообразность применения титановых сплавов для высоконагруженных и высокоресурсных конструкций, срок службы которых определяется десятками лет. Наиболее эффективным оказалось применение титановых сплавов для парогенераторов транспортных ЯЭУ. Ресурс первых парогенераторов, изготовленных из нержавеющей стали, из-за явления межкристаллитного растрескивания не превышал 3000...5000 ч. Применение титановых сплавов кардинально решило проблему работоспособности парогенераторов. Разработанные технологии изготовления титановых труб и их сварки позволили довести наработку титановых парогенераторов более чем 150000 ч.

Преимущества титанового оборудования при долгосрочной эксплуатации, выявленные при изучении опыта работы транспортных ЯЭУ, определили наиболее перспективные направления применения титановых сплавов для оборудования реакторного, турбинного и химического цехов энергоблоков стационарных АЭС. При реконструкции I блока Ленинградской АЭС заменено на титановое более 30 единиц теплообменного оборудования. Это позволило обосновать продление ресурса I энергоблока станции сверх проектного.

Техническим основанием применения титановых сплавов в качестве конструкционных материалов для изготовления корпусов водо-водяных реакторов ЯЭУ повышенного ресурса с высокой степенью радиационной и экологической безопасности являются [5]:

- высокая удельная прочность;
- малая активированность и быстрый спад во времени наведенной радиоактивности титана;
- высокая радиационная стойкость при рабочих температурах (250...400°C);
- абсолютная коррозионная стойкость в природных средах, в том числе в воде и паре при температуре до 400°C в условиях нейтронного облучения;
- стабильность механических свойств при длительных выдержках;
- освоенность промышленностью: слитки массой до 18 т, листы толщиной от 0,05 до 135 мм, поковки массой до 20 т, трубы диаметром от 3 до 125 мм;
- большой опыт использования титановых сплавов в атомном кораблестроении: корпуса АПЛ, трубные системы парогенераторов, теплообменники ЯЭУ и др.;
- высокая технологичность, хорошая свариваемость различными видами сварки при любых толщинах.

Высокая коррозионная стойкость титановых сплавов в рабочих средах водо-водяных реакторов

позволит отказаться от антикоррозионной наплавки корпуса реактора, решит проблему засорения продуктами коррозии фильтров очистки воды I контура и исключит выброс продуктов коррозии в окружающую среду, а также увеличит срок безопасной работы оборудования.

Высокая удельная прочность титана, кроме увеличения срока эксплуатации, позволит значительно сократить металлоемкость конструкций.

Применение титановых сплавов для корпусов реакторов исключит резьбовые соединения титановых трубных систем парогенераторов с элементами стального корпуса реактора, что дополнительно повысит надежность и безопасность ЯЭУ.

Основными критериями работоспособности α -сплавов титана в качестве конструкционных материалов для корпусов реакторов являются предел хрупкости и снижение ударной вязкости в условиях нейтронного облучения и уровнем наводороживания. Исследования образцов из титановых сплавов ПТ-7М и ПТ-3В, проведенные в каналах реакторов ледоколов «Сибирь» и «Арктика» показали, что по критерию охрупчивания в поле нейтронного облучения, α -сплавы титана не уступают корпусным отечественным и зарубежным сталям.

Титановые α -сплавы сохраняют высокую пластичность после нейтронного облучения и обладают низким темпом ее снижения от флюенса нейтронов. По этим характеристикам они превосходят как низколегированные, так и аустенитные стали. В облученном состоянии α -сплавы титана не имеют провала пластичности в интервале температур 200...400°C, ее минимум обнаруживается при комнатной температуре. При повышении температуры пластичность монотонно увеличивается. Такая закономерность изменения пластичности получена при относительно небольших дозах облучения ($\sim 5 \cdot 10^{21}$ нейтр/см²), однако есть основания полагать, что с увеличением дозы нейтронного облучения (особенно при наводороживании), интервал хрупкости будет расширяться в область более высоких температур. Эти вопросы требуют дальнейшего экспериментального исследования.

Для широкого использования титановых α -сплавов в качестве конструкционных материалов корпусов реакторов требуется провести целый ряд исследований, однако уже сейчас по общему набору свойств, надежности и безопасности можно утверждать, что они являются перспективным конструкционным корпусным материалом. Наиболее привлекательны α -сплавы титана для реакторов АЭС малой и средней мощности, особенно подземных, так как значительно снижается материалоемкость конструкции.

Хотя единицы массы титановых полуфабрикатов в несколько раз превышает цену такого же типа стального полуфабриката, общая стоимость корпусов реакторов из стали и титанового α -сплава будут сопоставимы, так как в этом случае нет необходимости нанесения антикоррозионной наплавки и проведения специального отпуска для создания однород-

ной структуры материала, составляющих до половины стоимости корпуса реактора.

Несмотря на то, что предстоит решить еще много вопросов по физике прочности и по общей надежности титановых α -сплавов, уже сейчас имеется достаточно оснований для их использования в качестве перспективных реакторных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.В. Горынин, Г.П. Карзов, Г.Н. Филимонов и др. Материаловедческие проблемы настоящего и будущего российской атомной энергетики // *Материалы Всероссийской науч.-техн. конф. «Перспективы участия атомной энергетики в решении энергетических проблем российских регионов»*. СПб, 2003, с. 25–30.

2. А.М. Паршин, В.А. Жуков, А.П. Петкова. Особенности радиационной хладноломкости и пути повышения работоспособности материалов корпусов реакторов // *Труды ЦКТИ. Атомное энергомашиностроение*. 2002, в. 282, с. 258–266.

3. Н.В. Суворов. Титановые сплавы – материал энергетики XXI века // *Научно-технические ведомости СПбГТУ*. 2002, № 3, с. 37–40.

4. В.Е. Ильин, А.И. Колесников. *Подводные лодки России*. Иллюстрированный справочник. М.: «Астрель», 2002, 286 с.

5. И.В. Горынин, В.В. Рыбин, С.С. Ушков, О.А. Кожевников. Титановые сплавы как перспективные реакторные материалы // *Радиационное материаловедение и конструкционная прочность реакторных материалов. Юбилейный сборник*. СПб: ЦНИИ КМ «Прометей», 2002, с. 37–45.

ПРО ЗАСТОСУВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ КОРПУСІВ ВОДО-ВОДЯНИХ РЕАКТОРІВ

А.М. Паршин, О.Е. Муратов, О.А. Кожевников

Розглянута наявність використання α -сплавів титана як конструкційних матеріалів корпусів водо-водяних реакторів. На основі аналізу характеристик титанових α -сплавів показані переваги їх використання для створення перспективних енергоблоків підвищеного ресурса та високої екологічної безпеки.

ABOUT USING OF TITANIUM ALLOYS FOR PRESSURIZED WATER REACTORS

A.M. Parshin, O.E. Muratov, O.A. Kojevnirov

The opportunity of using α -alloys of the titan is considered as constructional materials of cases of pressurized water reactors. On the basis of the analysis of characteristics titanic α -alloys advantages of their use to creation of perspective power units of raised resource and high ecological safety are shown.