

## Металлические материалы в ядерной энергетике

Студент гр. 104215 Парницкий А.М.  
 Научный руководитель – Протасевич Г.Ф.  
 Белорусский национальный технический университет  
 г. Минск

Целью настоящей работы являлось изучение металлических материалов, используемых в ядерной энергетике

### 1. Перспективы ядерной энергетике.

В соответствии с оценками Международного энергетического агентства потребление энергии в мире в последние десятилетия росло со скоростью 3% в год. Примерно такой же рост ожидается и в 21 веке. Определяющими факторами в использовании различных источников энергии выступают запасы энергоресурсов, экономические показатели и экологические последствия их использования. Ядерная энергетика является важной составной частью производства электроэнергии, в настоящее время переживающей так называемый ядерный ренессанс. В 21 столетии во многих странах мира прогнозируется значительный рост мощностей ядерных энергоблоков (табл. 1). Сегодняшняя ядерная энергетика в мире – лучшее, что имеет человечество для целей производства и поставки дешевой электрической и тепловой энергии на необозримую перспективу с обеспечением ядерной, физической, экологической и технической безопасности в объемах, соответствующих нуждам общества.

Таблица 1 – Прогноз развития атомной энергетике на 2030 г. – интенсивный вариант

Страна	Производство электроэнергии на АЭС, млрд. кВт·ч	Доля АЭС в общем производстве электроэнергии, %	Дополнительные мощности, ГВт
США	2 037, 5	29,9	177
Китай	844,9	19,7	118
Индия	391, 3	20,8	53
Россия	433, 1	27,4	43
Бразилия	206,7	21,6	29
Франция	599, 2	78,2	26
Япония	464, 1	29,8	20
Украина	?	52...63	?

### 2. Аспекты радиационной повреждаемости.

Облучение конструкционных материалов при температурах эксплуатации реакторов создает беспрецедентную возможность изменения микроструктуры, механических свойств и даже внешних размеров вследствие явлений распухания, роста, ползучести. Эти изменения обусловлены радиационно-индуцированной эволюцией микроструктуры и микрокомпозиционного состава.

Именно радиационно-индуцированные явления определяют экономичность и безопасный срок эксплуатации каждого типа реакторов.

Основными механизмами деградации и размерной нестабильности материалов в процессе облучения являются смещения атомов в решётке; их последующая миграция и кластеризация; участие в процессах сегрегации и трансмутационные эффекты.

Результатом взаимодействия высокоэнергетических частиц с атомами материалов является образование не только атомных смещений, но и чужеродных атомов в результате ядерных реакций трансмутации. *Трансмутация* – это процесс, который очень чувствителен к нейтронному спектру. Образование большинства продуктов ядерных реакций трансмутации (He, H, V, Li, Mn) в нержавеющей стали вызывают тепловые нейтроны ( $< 0,5$  эВ). Скорость генерации ядер трансмутантов и элементов радиационной микроструктуры определяется произведением сечения реакции трансмутации на плотность потока нейтронов.

### 3. Материалы ядерных реакторов.

Целесообразность использования материалов в ядерных энергетических установках (ЯЭУ) определенного типа зависит от конструктивных особенностей ЯЭУ, используемого теплоносителя, энергетического спектра нейтронов и т.д. Нейтронное облучение материалов приводит к следующим изменениям характеристик материалов: упрочнению; низко- и высокотемпературному радиационному охрупчиванию; радиационной ползучести; радиационному росту и радиационному распуханию; появлению наведенной активности.

Именно эти характеристики, наряду с коррозионной стойкостью, являются приоритетными при оценке и сравнении различных конструкционных материалов. При разработке новых материалов главной задачей является достижение минимального или допустимого изменения этих характеристик с целью обеспечения требуемой надежности и долговечности элементов конструкции.

Стали *феррито-перлитного и феррито-мартенситного классов* являются основными материалами для изготовления корпусов водо-водяных реакторов.

*Нержавеющие стали и сплавы на основе никеля и хрома* используются в качестве оболочек поглощающих элементов, пружинных элементов твэлов и ТВС и в отдельных случаях для дистанционирующих решеток ТВС. Для быстрых реакторов, работающих при более высоких температурах и энергонапряженности, используются жаропрочные холоднодеформированные аустенитные стали, хромистые феррито-мартенситные стали, никелевые сплавы. Для первой стенки термоядерного реактора с гелиевым охлаждением основным материалом являются *малоактивируемые хромистые стали*, при охлаждении литием – *сплавы ванадия, легированные титаном и хромом*.

### 4. Реакторы на тепловых нейтронах.

Радиационно-индуцированная деградация механических свойств корпусных сталей в процессе эксплуатации является результатом микроструктурных изменений наноструктурного масштаба.

В настоящее время рассматриваются три основных микромеханизма, ответственных за изменение микроструктуры корпусных сталей при облучении:

1) повреждения в матрице из-за образования радиационно-индуцированных кластеров и дислокационных петель;

2) радиационно-ускоренное формирование мелкодисперсных выделений, обогащенных медью и карбонитридами;

3) радиационно-индуцированных структур на границах зёрен и межфазных границах охрупчивающих элементов, таких как фосфор, сера, мышьяк.

### 5. Сплавы циркония.

Основным конструкционным материалом активных зон реакторов на тепловых нейтронах с водным теплоносителем являются *циркониевые сплавы*, обладающие низким сечением захвата нейтронов, хорошей радиационной и коррозионной стойкостью.

### 6. Реакторы на быстрых нейтронах.

Создание широкомасштабной ядерной энергетики невозможно без использования ядерных энергетических реакторов на быстрых нейтронах, обеспечивающих расширенное воспроизводство вторичного ядерного горючего и использование в ядерном топливном цикле всего добываемого природного урана, а впоследствии – тория.

### 7. Аустенитные нержавеющие стали.

Из широкого спектра материалов, предлагаемых к использованию в активных зонах эксплуатируемых и разрабатываемых ядерных реакторов, наибольший интерес представляют аустенитные нержавеющие стали (АНС).

### 8. Феррито-мартенситные стали.

Феррито-мартенситные стали являются приоритетными кандидатными материалами для оболочек и чехлов быстрых реакторов и первой стенки термоядерных реакторов.