

Особенности радиационной стойкости сталей и сплавов

Студенты группы 10405520 Ткачёва А.А., Макаревич В.О.

Научный руководитель – Корнеева Е. К.

Белорусский национальный технический университет
г. Минск

Особенность радиационно-стойких материалов заключается в сохранении стабильности структуры и свойств в условиях нейтронного облучения. Под воздействием радиоактивного облучения у металлов заметно возрастает предел текучести, например, у нержавеющей стали в 3 раза, у углеродистой стали и алюминиевых сплавов уменьшается пластичность, у керамических материалов уменьшается плотность и теплопроводность, проявляются признаки аморфизации структуры, стекло окрашивается. [1]

Конструкционные материалы под действием облучения испытывают структурные превращения, оказывающие отрицательное влияние в первую очередь на механические свойства и коррозионную стойкость. Из всех видов облучения (нейтроны, α - и β -частицы, γ -излучение) наиболее сильное влияние оказывает нейтронное облучение. [1]

Нейтронное облучение материалов приводит к таким изменениям характеристик материалов как: упрочнение, низко- и температурное радиационное охрупчивание, радиационной ползучести, радиационному росту и радиационному распуханию, появлению наведенная активность. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к облучаемым материалам является их высокая радиационная стойкость. [1]

Радиационная стойкость – способность материала сохранять в определенных допустимых пределах размеры, структуру и свойства при длительном воздействии радиационных излучений. [1]

Высокотемпературное облучение активизирует диффузионные процессы и способствует распаду пересыщенных твердых растворов – старению. Этим объясняется высокотемпературная хрупкость аустенитных хромоникелевых сталей. Активизацией диффузионных процессов также объясняется снижение длительной прочности при облучении. Падение жаропрочности растет с увеличением температуры и интенсивности нейтронного потока. [2]

При высокотемпературном облучении большими нейтронными потоками в аустенитных сталях на основе Ti, Ni, Mo, Zr, Вe зарождаются и растут вакансионные поры, а более подвижные межузельные атомы уходят на данные стоки (краевые дислокации, границы зерен и др.), что приводит к заметному увеличению объема металла – радиационному распуханию. [2]

Материалы под действием облучения испытывают структурные превращения, оказывающие отрицательное влияние в первую очередь на механические свойства и коррозионную стойкость. Облучение приводит к образованию точечных и линейных дефектов структуры материала. Один нейтрон способен создать в алюминии более 6000 вакансий; α -частица при этом создает около 80 вакансий, а протон – 48. На рисунке 1 представлена модель радиационных повреждений, возникающих при соударении нейтронов с атомами кристаллической решетки. Следовательно, из всех видов излучений наиболее опасно нейтронное. [2]

Структурные изменения приводят к изменению механических свойств. В результате при температуре ниже температуры рекристаллизации (низкотемпературное облучение) металл упрочняется, но теряет вязкость и пластичность (как при холодной пластической деформации). [2]

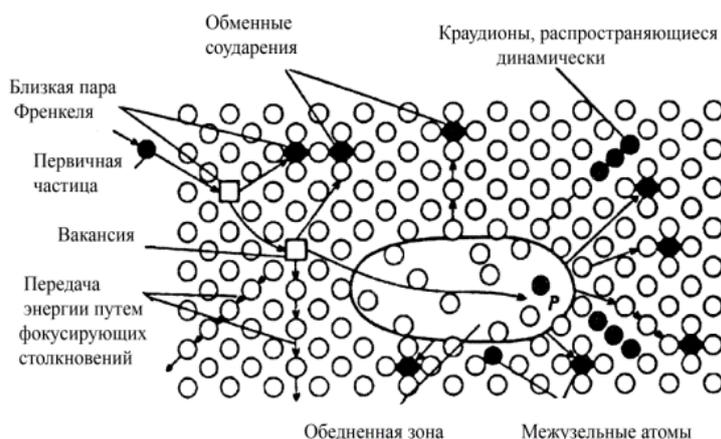


Рисунок 1 – Модель радиационных повреждений, возникающих при соударении нейтронов с атомами кристаллической решетки (модель Зеегера)

Принципы легирования радиационно-стойких сталей и сплавов

Бериллий и его соединения: бериллий имеет наименьшее из всех металлов сечение поглощения тепловых нейтронов, большое сечение рассеяния и высокую температуру плавления, поэтому является отличным замедлителем и отражателем. Сечения взаимодействия нейтронов с ядрами характеризуют вероятность ядерной реакции (например, поглощения) или изменения энергии нейтронов (рассеяния). [3]

Прочность оксида бериллия падает с ростом флюенса нейтронов в тем большей степени, чем выше плотность образца. Повышение температуры облучения до 350–400 °С заметно уменьшает влияние нейтронного потока, но оно остается еще значительным. Отжиг при 1300 °С полностью восстанавливает прочностные свойства. [3]

Магний и его сплавы: являются низкотемпературными (температура плавления магния 650 °С) конструкционными материалами, коррозионно-стойкими на воздухе и в среде углекислого газа (до ~ 400 °С), но имеющими низкое сопротивление коррозии в водной среде, жидкометаллическом натрии и эвтектиках Mg–Na и Mg–K. По ядерным свойствам магний уступает лишь бериллию. Его существенным недостатком является высокое термическое сопротивление. Теплопроводность магния и его сплавов более чем в 100 раз ниже, чем сплавов алюминия. [3]

При температурах ниже 500 °С в среде углекислого газа сплавы магния показали хорошую радиационную стойкость: никаких существенных радиационных дефектов (распухания, радиационной ползучести, изменения прочности и пластичности) не наблюдалось. [3]

Цирконий и его сплавы: цирконий получил широкое распространение благодаря своей высокой механической прочности при повышенных температурах, хорошей коррозионной стойкости в воде и паре, технологичности. По ядерным параметрам цирконий является третьим после бериллия и магния элементом. Низкая теплопроводность циркония компенсируется относительно низким тепловым расширением. Невысокая коррозионная стойкость при высоких температурах и относительная дороговизна сдерживают применение сплавов циркония. [3]

Алюминий и его сплавы: основными радиационными дефектами для алюминия является радиационное распухание и увеличение предела длительной прочности. Радиационное распухание обусловлено реакциями взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами алюминия, при которых образуются кремний, водород и гелий. Длительная прочность алюминиевого сплава 1100 после облучения нейтронами с флюенсом возрастает, что является следствием радиационного упрочнения материала. Значительные дозы облучения не приводят к радикальному изменению механических свойств. [3]

Сталь марки 15Х2МФА постоянно совершенствовалась (рисунок 2), и в настоящее время является лучшим конструкционным материалом по радиационной стойкости. [4]

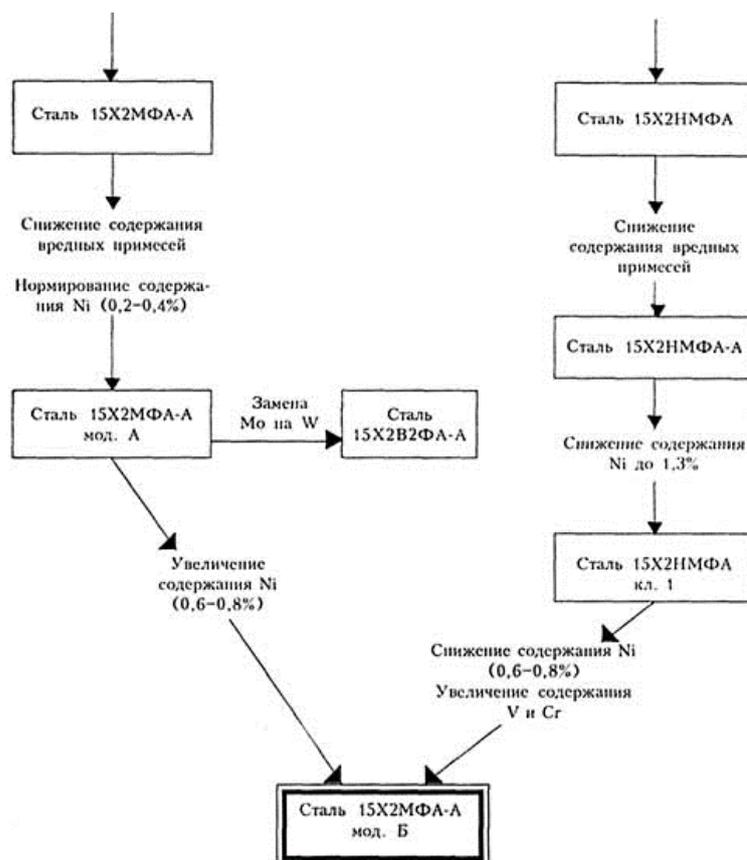


Рисунок 2 – Эволюция химического состава сталей для корпусов атомных реакторов

Аналоги зарубежных радиационно-стойких сталей самых распространенных марок 15X2MΦA-A мод А и 15X2MΦA-A мод. Б по своим механическим и служебным характеристикам превосходят отечественные и зарубежные аналоги. При сравнении характеристик данных сталей и зарубежного аналога (сталь А533В-1) видно существенное превосходство аналогичных показателей сталей (таблица 1). [4]

Таблица 1 – Сравнение показателей стали марок 15X2MΦA-A мод. А и 15X2MΦA-A мод. В с зарубежными аналогами

Марка стали	15X2MΦA-A мод. А 15X2MΦA-A мод. Б	A533B-1 (США)
Толщина поковок	до 660 мм	До 200-300 мм
Механические свойства при растяжении при комнатной температуре	$\sigma_B \geq 610$ МПа $\sigma_{0,2} \geq 490$ МПа	$\sigma_B \geq 590$ МПа $\sigma_{0,2} \geq 345$ МПа
Критическая температура хрупкости	Не выше минус 35 °С	Не выше 0°С
Коэффициент радиационного охрупчивания	Не выше 9	23

Усовершенствованные теплоустойчивые радиационно стойкие стали марок 15X2MΦA-A мод. А и 15X2MΦA-A мод. Б, обладают конкурентными преимуществами:

- Обеспечение категории прочности КП45 в крупногабаритных заготовках с толщиной стенки под термическую обработку до 660 мм при исходном значении критической температуры хрупкости не выше минус 35°С.

- Высокое сопротивление радиационному и тепловому охрупчиванию в процессе эксплуатации, обеспечивающее проектный ресурс корпуса реактора не менее 60-80 лет с возможностью его пролонгации.

- Обеспечение стабильности рабочих характеристик в течение длительного срока эксплуатации.

- Превосходит отечественные и зарубежные аналоги при сопоставлении значений рабочих характеристик.

Области применения радиационно-стойких сталей и сплавов преимущественно использование в ядерных электрических установках, которые в свою очередь используются на атомных электростанциях. [4]

Список использованных источников

1. Радиационная физика металлов и сплавов [Электронный ресурс] / Радиационная физика металлов и сплавов. – Режим доступа: <http://irbiscorp.spsl.nsc.ru>. – Дата доступа: 12.11.2023.

2. Радиационностойкие материалы [Электронный ресурс] / Радиационностойкие материалы. – Режим доступа: <https://www.naukaspb.ru>. – Дата доступа: 12.11.2023.

3. Радиационностойкие Материалы [Электронный ресурс] / Радиационностойкие Материалы. – Режим доступа: <https://telegra.ph>. – Дата доступа: 12.11.2023.

4. Прикладное материаловедение: металлы и сплавы [Электронный ресурс] / Прикладное материаловедение: металлы и сплавы. – Режим доступа: <https://elar.urfu.ru>. – Дата доступа: 15.11.2023.