

Студент гр. 104218 Медведев А.Э.
Научный руководитель – Пучков Э.П.
Белорусский национальный технический университет
г. Минск

Ядерная энергетика предъявляет повышенные требования к используемым конструкционным материалам, технологии их производства и контролю работоспособности. Конструкционные материалы под действием облучения испытывают структурные превращения, оказывающие отрицательное влияние в первую очередь на механические свойства и коррозионную стойкость. Из всех видов облучения (нейтронами, α - и β -частицами, γ -излучения) наиболее сильное влияние оказывает нейтронное облучение.

Радиационную среду принято характеризовать нейтронным спектром и нейтронным потоком. Спектр определяется дискретными уровнями энергии нейтронов. В зависимости от энергии нейтронов, используемых для осуществления цепной ядерной реакции, различают реакторы на тепловых (медленных) и быстрых нейтронах. Нейтронный поток характеризует интенсивность радиационной среды и выражается числом нейтронов с энергией $E > 0,1$ МэВ, пересекающих площадь 1 см^2 за 1 с (нейтрон/ $\text{см}^2 \cdot \text{с}$). Нейтронный поток, суммированный по времени (нейтрон/ см^2), или флюэнс нейтронов, характеризует суммарную дозу облучения и является мерой накопления радиационного воздействия. Более точной характеристикой дозы облучения является суммарное количество смещений в расчете на один атом (смещ/ат). Соударения вызывают смещения атомов или каскад смещений в структуре в зависимости от количества энергии, передаваемой нейтроном атому металла. Подвергшийся удару нейтроном первый атом, подобно бильiardному шару, ударяя по другим атомам, вызывает в структуре дополнительные смещения. В результате развития каскада образуются объемы с высокой концентрацией вакансий, по периферии окруженные зонами с повышенной плотностью межузельных атомов. Например, один нейтрон способен создать в алюминии более 6000 вакансий, в бериллии с большей энергией межатомной связи — более 450 вакансий.

Помимо смещений большие нейтронные потоки за счет своей энергии возбуждают атомы, усиливают их колебания (это явление Инденбом назвал «радиационной тряской»), что сопровождается локальным повышением температуры. Рост температуры способствует радиационному отжигу, сопровождающемуся аннигиляцией вакансий и межузельных атомов. Высокие температуры и нейтронное облучение могут вызвать в материале ядерные реакции с образованием гелия, что в свою очередь приводит к появлению газовых пузырей по границам зерен.

Структурные изменения приводят к изменению механических свойств. В результате при температуре ниже температуры рекристаллизации — низкотемпературного облучения — металл упрочняется, но теряет вязкость и пластичность. Сталь приобретает максимальное упрочнение при $\Phi = 3 \cdot 10^{19}$ нейтрон/ см^2 , причем $\sigma_{0,2}$ растет интенсивнее σ_b , что приводит к снижению способности к деформационному упрочнению. Дальнейшее увеличение потока практически не влияет на свойства стали.

Действие низкотемпературного облучения на свойства напоминает наклеп — холодную пластическую деформацию. Однако, несмотря на такую аналогию, механизмы воздействия радиационного повреждения и наклепа на структуру материала принципиально различны, поскольку радиационное повреждение связано преимущественно с образованием точечных дефектов, тогда как деформационное упрочнение связано в основном с появлением линейных дефектов.

В условиях облучения выше температуры рекристаллизации (высокотемпературное облучение) роль точечных радиационных дефектов снижается. Вакансии и межузельные

атомы частично аннигилируют, частично взаимодействуют с примесями, дислокациями, границами зёрен. Оставшиеся межузельные атомы и вакансии объединяются в кластеры, которые в свою очередь могут превращаться соответственно в дислокационные петли межузельного или вакансионного типов.

Высокотемпературное облучение активизирует диффузионные процессы и способствует распаду пересыщенных твердых растворов (старению). Это объясняет высокотемпературную хрупкость аустенитных хромоникелевых сталей. Активизацией диффузионных процессов также объясняется снижение длительной прочности при облучении. Падение жаропрочности растет с увеличением температуры и интенсивности нейтронного потока.

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

Объем аустенитных сталей, облученных при рабочей температуре 450 °С, линейно растет с увеличением нейтронного потока. Объем может увеличиться на 20 % и более. Распухание усиливается в результате скопления в микропорах газов, образовавшихся при облучении.

Легирование хромоникелевых сталей Ti, Mo, Nb снижает их распухание. Высокохромистые ферритные и перлитные стали с меньшей растворимостью водорода характеризуются меньшей склонностью к распуханию.

Радиационная ползучесть сталей проявляется при температуре 300 – 500 °С, когда роль термической ползучести еще пренебрежимо мала. Один из возможных механизмов радиационной ползучести – механизм переползания, т. е. скольжения дислокаций. Установившаяся скорость радиационной ползучести пропорциональна приложенному напряжению и повреждающей дозе.

Аустенитные стали имеют достаточно высокую длительную прочность при 670 – 700 °С за счет легирования Mo, введения Nb, микродобавок В (0,003 – 0,008 %). Длительная прочность хромистой жаропрочной стали ниже, чем аустенитных, что связано с более высокой диффузионной подвижностью атомов в ОЦК-решетке. Легирование Mo, Nb, V и В увеличивает прочность лишь при 600 – 650 °С.

Изменение свойств сталей при низких температурах при облучении называют низкотемпературным радиационным охрупчиванием (НТРО). К НТРО склонны ферритные и ферритно-мартенситные стали и в меньшей степени аустенитные коррозионностойкие стали, что связано с особенностями дислокационной структуры и фазовых превращений в феррите.

В области, где температура составляет более 0,55 температуры плавления сталей, наблюдается высокотемпературное радиационное охрупчивание (ВТРО). ВТРО проявляется в необратимом уменьшении относительного удлинения (до 3 – 5 %) и преобладании межзеренного разрушения.