

Не каждый человек согласится тратить много времени на поиски мест переработки, а уж тем более на дороге к ним. Сделав пункты сортировки отходов более доступными, можно постепенно устранить экологический кризис. Сортировка бумаги, стекла, биоразлагаемых неперерабатываемых материалов и пластика по соответствующим маркировкам позволит лучше перерабатывать отходы и не загрязнять ими окружающую среду.

Важно также уделять внимание биоразлагаемым отходам, например, остаткам пищи требуется небольшой период для разложения, однако, находясь они в пластиковой упаковке, на это уйдет больший срок, поэтому важно сортировать отходы всех видов для наименьшего выделения токсинов и эффективного результата.

Во дворах должны быть установлены сортировочные урны, которые будут находиться в общем доступе и действительно отвозить его в перерабатывающие пункты. Пластик нуждается в ежедневной сортировке и тогда он не будет вредить нам.

Таким образом, на основе произведенного анализа можно сформулировать следующие условия, при которых использование альтернатив пластиковой таре является экологичным:

- 1) Использование заменителя пластика должно быть экологичнее использования пластика с учетом полного жизненного цикла сравниваемых материалов;
- 2) При соблюдении первого условия, необходимо нивелировать негативные экологические последствия от использования пластика. Иначе, на экологическую обстановку влияют сразу две производственные и потребительские инфраструктуры;
- 3) Разработка и применение регламентов разумного потребления пластика и его альтернатив.

ЛИТЕРАТУРА

1. С пластиковых пакетов сняли обвинение - МЕТЕОВЕСТИ от ФОБОС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.meteovesti.ru/news/63767565581-plastikovyh-paketov-snyali-obvinenie/>. – Дата доступа : 03.03.2022.
2. Сроки разложения мусора: насколько еще нам хватит планеты? - greenbelarus.info [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://greenbelarus.info/articles/29-07-2014/sroki-razlozheniya-musora-naskolko-esche-nam-khvatit-planety/>. – Дата доступа : 07.03.2022.
3. Черная, Н. В. Состояние современного рынка бумажной и картонной продукции / Н. В. Черная, Е. В. Дубоделова, И. П. Деряго // Новейшие достижения в области инновационного развития целлюлозно-бумажной промышленности: технология, оборудование, химия : материалы научно-технической конференции, 4-6 апреля, Минск / Белорусский государственный технологический университет. – Минск : БГТУ, 2017. – С. 33-38.
4. Глобальная оценка лесных ресурсов 2020 года – FAO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fao.org/forest-resources-assessment/2020/ru>. – Дата доступа : 07.03.2022.
5. Федяева, О.А. Промышленная экология. Конспект лекций. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 145 с.
6. Что в какой контейнер - Irecycle [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://irecycle.ecoidea.by>. – Дата доступа : 07.03.2022.
7. Куда сдать пластик на переработку [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://belvtorresurs.by/ru/nashi-uslugi/otkhody-plastika/>. – Дата доступа : 07.03.2022.

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

THE EFFECT OF IONIZING RADIATION ON STRUCTURAL MATERIAL

В. И. Красовский^{1,2}, В. И. Бразинский^{1,2}

V. I. Krasovsky^{1,2}, V. I. Brazinsky^{1,2}

¹Белорусский государственный университет, БГУ, г.Минск, Республика Беларусь

²Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ, г. Минск, Республика Беларусь

¹Belarussian State University, BSU, Minsk, Republic of Belarus

²International Sakharov Environmental Institute of Belarussian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

vikras@iseu.by; braz31122001@gmail.com

В работе дан анализ влияния нейтронного облучения на ряд конструкционных материалов, включая железоуглеродистые сплавы. Рассматриваются причины деструктивных изменений кристаллических решеток материалов. Устанавливаются аналогии при нейтронном облучении и термической обработке материалов.

This text analyzes the effect of neutron radiation on some structural material including iron-carbon alloys. Causes of destructive changes of crystal structure of materials are considered. Analogies are established in neutron irradiation and heat treatment of metals.

Ключевые слова: нейтрон, конструкционные материалы, кристаллическая решетка, энергия.

Keywords: neutron, structural material, crystal structure, energy.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2022-2-338-341>

Различные виды излучения, воздействуя на твердые тела, вызывают специфические радиационные дефекты. В настоящее время имеются многочисленные доказательства не только образования дефектов, но и изменения их вида, формы, скорости движения в процессе облучения. Многие обычные конструкционные материалы под действием облучения испытывают структурные превращения, которые приводят к нежелательным изменениям свойств в эксплуатации. В связи с этим материалы, эксплуатирующиеся в условиях облучения, должны быть радиационно-стойкими.

Наиболее сильное влияние оказывает нейтронное облучение. Влияние облучения α - частицами, протонами, тем более легкими β -частицами и γ -излучения менее сильно. Влияние облучения оценивается радиационной стойкостью.

Радиационная стойкость – это свойство стабильности структуры и эксплуатационных параметров материалов в условиях жестких облучений. Наибольшее влияние структурные изменения от облучения оказывают на механические свойства и коррозионную стойкость.

При упругом столкновении бомбардирующей частицы с атомом конструкционного материала, последний в некоторых случаях приобретает энергию E_p , превышающую энергию, которая называется пороговой энергией смещения E_d . В таком случае возбужденный атом покидает свое место в решетке. При этом он может пройти одно или несколько межатомных расстояний, пока не остановится в междоузлии. В момент перемещения такой атом теряет связь с решеткой, но оказывает возбуждающее влияние на электронные связи атомов окружения. Образуется пара Френкеля: вакансия – межузельный атом. E_d для обычных металлов находится в пределах 20–40 эВ. Если $E_p \sim E_d$, то образуется одна пара Френкеля; при $E_p \gg E_d$ создается два, три или целый каскад дефектов такого же типа [1].

При облучении кристаллической решетки потоком тяжелых частиц, энергия, получаемая атомом вещества, достигает больших значений, и вблизи конца пути первично выбитого атома среднее расстояние между соударениями в плотноупакованных кристаллических решетках должно быть приблизительно равно среднему межатомному расстоянию. В этом случае атом на пути первично выбитого атома смещается со своего места и образуется область сильного искажения, интерпретируемая как пик смещения.

При облучении материалов нейтронами спектра реактора либо тяжелыми частицами с большой энергией кристаллическая решетка испытывает огромное число элементарных повреждений.

Несмотря на отсутствие корректной теории, учитывающей коллективные процессы и совокупность взаимодействий в решетке, усредненное число смещенных атомов можно оценить довольно точно с помощью очень простой модели, основанной на представлении о парных столкновениях.

Одной из характеристик столкновения является энергия, передаваемая бомбардируемому атому. В зависимости от геометрических параметров столкновения (взаимного направления движения частицы и колебания атома) она может меняться от нуля, при столкновениях под очень малым углом, до максимальной величины E_{max} , при лобовом столкновении. Из законов сохранения энергии и импульса при упругом столкновении E_{max} определяется соотношением:

$$E_{max} = 4EMm / (M + m)^2, \quad (1)$$

где E и m – энергия и масса взаимодействующей быстрой частицы; M – масса атома вещества.

Для электронов с высокой энергией ($E \gg 1$ МэВ) следует учитывать релятивистские эффекты. В этом случае предыдущее выражение превращается в

$$E_{max} = 2E(E + 2m_e c^2) / (Mc^2). \quad (2)$$

В случае столкновения с тяжелой частицей высокой энергии можно ожидать возникновение каскада смещений. Среднее число атомных смещений рассчитывается в простейшем случае по формуле

$$N_d = \phi t N \sigma_d v, \quad (3)$$

где ϕ – плотность потока ионизирующего излучения; t – время облучения; N – число атомов в единице объема; σ_d – сечение столкновений, вызывающих смещения; v – среднее число смещений на один первично смещенный атом.

$$v = E_p / (2E_d), \quad (4)$$

где E_p – средняя энергия, передаваемая атому быстрой частицей. Величина E_d зависит от направления смещения относительно кристаллографических осей кристалла, что связано с анизотропией сил связи, а также от природы сил связи атомов в решетке.

Весь спектр дефектов, наблюдаемых в металлических твердых телах после облучения с помощью методов электронной и ионной микроскопии, образуется из первичных радиационных дефектов – пар Френкеля – в результате их взаимодействия между собой и с существующими в материале дефектами кристаллического строения,

а также под воздействием локальных возбуждений в электронной подсистеме кристаллической решетки, иницируемых ионизирующим излучением.

Помимо смещений большие нейтронные потоки за счет своей энергии возбуждают атомы, усиливают их колебания, 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.

Степень изменения свойств при облучении зависит от суммарного потока Φ частиц (число частиц, которое пошло через сечение в 1 м^2), а также от температур облучения и рекристаллизации металла. При облучении число дефектов в металле возрастает с увеличением суммарного потока. По характеру влияния на механические свойства облучение напоминает холодную пластическую деформацию.

При облучении большими потоками нейтронов последние не только смещают атомы материала в межузлия, но возбуждают их колебания и электронные оболочки, передавая часть своей энергии. Усиление колебаний атомов в узлах решетки сопровождается локальным повышением температуры в кристалле. Увеличение температуры локальных участков кристалла одновременно вызывает процесс образования скоплений вакансий, которые при очень больших потоках превращаются либо в дислокационные петли, либо в нано- и микропоры, что приводит к увеличению объема материала.

Облучение при температуре ниже температуры рекристаллизации называется низкотемпературным облучением. Оно влияет на структуру и механические свойства металлов и сплавов так же, как при холодной пластической деформации: материал упрочняется, но теряет пластичность.

Максимальная прочность углеродистых сталей при $20\text{ }^\circ\text{C}$ достигается при облучении суммарным нейтронным потоком $\phi = 2 \cdot 10^{23}\text{ м}^{-2}$. При суммарном потоке нейтронов $\phi = 3 \cdot 10^{23}\text{ м}^{-2}$ сталь приобретает максимальное упрочнение. При дальнейшем увеличении суммарного потока свойства не меняются.

Облучение при температуре выше температуры рекристаллизации считается высокотемпературным. Такое облучение сопровождается радиационным отжигом, который способствует восстановлению структуры и механических свойств в процессе радиации. Перлитные стали при температуре облучения $250\text{--}450\text{ }^\circ\text{C}$ мало изменяют свойства, а при температуре выше $450\text{ }^\circ\text{C}$ свойства практически не изменяются, так как рекристаллизация проходит полностью. Аустенитные стали стабильны при температуре выше $600\text{ }^\circ\text{C}$.

Алюминий и магний, имеющие низкие температуры рекристаллизации, радиационно-стойкие при температуре выше $150\text{ }^\circ\text{C}$. Пластичность при облучении не меняется, а прочность даже увеличивается. Упрочнение, полученное в результате низкотемпературного облучения, в них сохраняется при последующем нагреве до температуры ниже температуры рекристаллизации.

В молибдене упрочнение, полученное при облучении ($\phi = 8 \cdot 10^{24}\text{ м}^{-2}$ при $20\text{ }^\circ\text{C}$), сохраняется при температуре до $300\text{ }^\circ\text{C}$, но при этом они обладают низкой пластичностью. Восстановление пластичности начинается только с температуры $300\text{ }^\circ\text{C}$. Полностью структура и свойства облученного молибдена восстанавливаются лишь в процессе отжига при $1000\text{ }^\circ\text{C}$.

Влияние температуры нагрева при облучении может быть более сложным, если сплав при этом испытывает структурные превращения, например, распад пересыщенных твердых растворов (старение или отпуск) так как облучение активизирует диффузионные процессы. Именно этим объясняется высокотемпературная хрупкость аустенитных хромоникелевых сталей. Пластичность облученной стали восстанавливается при $500\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$, а затем при дальнейшем нагреве вновь снижается. Длительная прочность при облучении всегда снижается, особенно в стареющих сплавах. Это вызвано активизацией диффузионных процессов под действием облучения, которые ответственны за разрушение при повышенных температурах. Снижение жаропрочности при облучении усиливается с увеличением нейтронного потока, температуры облучения и температуры испытания.

Бериллий, облученный при температуре $800\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$ нейтронным потоком $\phi = 10^{24}\text{ м}^{-2}$, увеличивает объем на $3\text{--}5\%$. Аустенитная сталь, облученная при температуре $450\text{ }^\circ\text{C}$ потоком $\phi = 10^{27}\text{ м}^{-2}$, увеличивает объем на 10% (рис. 5.5). Наибольшее изменение объема материала таких сталей обнаруживается при рабочих температурах этих сталей $350\text{--}650\text{ }^\circ\text{C}$.

Изменение объема материала вызывает изменение формы и размеров деталей, а также ухудшение механических свойств. Оно усиливается скоплением в образовавшихся при облучении микропорах молекулярного водорода либо водородосодержащих газов с большим внутренним давлением. Дополнительное легирование хромоникелевых сталей такими элементами, как Ti, Mo, Nb, уменьшает изменение объема материала. Возможно это является результатом уменьшения растворимости и скорости диффузии водорода в таком сложнолегированном аустените. Холодная пластическая деформация аустенитных сталей снижает изменение объема материала, видимо, по той же причине. Перлитные и ферритные высокохромистые стали, растворимость водорода в которых мала, менее склонны к разбуханию. 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 [2].

Примеры изменения свойств некоторых материалов под действием нейтронного облучения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Интегральный поток быстрых нейтронов, см ⁻²	Материал	Воздействие облучения
10 ¹⁴ –10 ¹⁵	Политетрафторэтилен, полиметил-метакрилат и целлюлоза	Снижение прочности при растяжении
10 ¹⁶	Каучук	Снижение эластичности
10 ¹⁷	Органические жидкости	Газовыделение
10 ¹⁸ –10 ¹⁹	Металлы	Заметный рост предела текучести
10 ²⁰	Полистирол	Снижение прочности при растяжении
	Керамические материалы	Уменьшение теплопроводности, плотности, кристалличности
	Все пластмассы	Непригодны в качестве конструкционного материала
	Углеродистые стали	Значительное снижение пластичности, удвоение предела текучести, повышение температуры перехода от вязкого разрушения к хрупкому
10 ²⁰ –10 ²¹	Коррозионностойкие стали	Трехкратное увеличение предела текучести
10 ²¹	Алюминиевые сплавы	Снижение пластичности без полного охрупчивания

При облучении резко снижается коррозионная стойкость металлов и сплавов. Вода и водяной пар являются теплоносителями в водном и водно-паровом трактах АЭС. Вследствие радиолитического разложения воды с образованием ионов и атомов кислорода, водорода и щелочной гидроксильной группы –ОН. Конструкционные реакторные материалы, подвергающиеся облучению, работают в контакте с водой и паром. Образующийся кислород окисляет металл, а водород его наводороживает и тем самым дополнительно охрупчивает. Радиолитическое разложение воды и увеличение концентрации гидроксильных групп способствует растворению поверхностных оксидных пленок, в обычных условиях, защищающих металл от коррозии. Для многих конструкционных материалов, работающих в условиях облучения в энергетических ядерных установках, коррозионной средой является вода либо влажный или перегретый пар. В таких средах электрохимический процесс коррозии может сопровождаться химической коррозией. При облучении стойкость металлов в условиях химической коррозии снижается из-за разрушения поверхностных защитных оксидных пленок. Облучение, вызывая структурные повреждения материалов, снижает электрохимический потенциал и ускоряет процесс коррозионного разрушения. В пассивирующихся металлах облучение разрушает поверхностные защитные пленки.

Скорость коррозии алюминия и его сплавов в воде при облучении при 190 °С тепловыми нейтронами со скоростью потока 10¹⁶ с⁻¹ м⁻² увеличивается в 2–3 раза. Потеря коррозионной стойкости алюминия в таких условиях может быть вызвана увеличением концентрации ОН - группы, что приводит к растворению поверхностных защитных оксидов.

Радиолитическое разложение воды уменьшает коррозионную стойкость циркониевых сплавов. При облучении тепловыми нейтронами, поток в единицу времени которых равен 10¹⁷ с⁻¹ м⁻² скорость коррозии сплава Цирколой-2 (хороший поглотитель нейтронов) при 20 °С увеличивается в 50–70 раз из-за разрушения защитных пленок.

В конструкциях, подверженных облучению (оболочки урановых стержней, корпуса и трубопроводы реактора, корпуса синхротронов), в качестве конструкционных материалов, обладающих необходимым комплексом жаропрочности и коррозионной стойкости, используют высоколегированные стали перлитного, аустенитного класса и сплавы. Широкое применение сплавов на основе Zr, Вe, Al, Mg в таких конструкциях объясняется их удовлетворительной жаропрочностью и коррозионной стойкостью, а также необходимым комплексом теплофизических свойств, в частности способностью слабо поглощать нейтроны. Необходимая радиационная стойкость конструкционного материала может быть обеспечена соответствующим химическим составом, структурой и оптимальными условиями эксплуатации: рабочей температурой, видом и энергией облучающих частиц, величиной потока облучения и свойствами коррозионной среды [3].

Выводы: влияние нейтронного облучения на конструкционные материалы, может вызывать как уменьшение прочностных свойств, так и увеличение. Указанный элемент неоднозначности требует дополнительных исследований с конкретизацией материала и его состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов, П. В. Физика твердого тела / П. В. Павлов, А. Ф. Хохлов – М.: Высшая школа, 2000. – 494 с.
2. Радиационная стойкость материалов: справочник/ В. Б. Дубровский, П. А. Лавданский [и др.]; под ред. Дубровский В.Б. – Москва, 1973
3. Вопросы дозиметрии и радиационная безопасность на атомных электрических станциях / А. В. Носовский [и др.]; под ред. А. В. Носовского. – Славутич, 1998.