

УДК 539.21; 539.12.04

**СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
КАК СЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ФАКТОРОВ**¹⁾ Мукашев К.М., ¹⁾ Мурадов А.Д., ²⁾ Умаров Ф.Ф., ¹⁾ Яр-Мухамедова Г.Ш.¹⁾ *Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*²⁾ *Казахско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан*

Представлены результаты исследования радиационной повреждаемости нержавеющей стали 10X18H10T-ВД, имеющей условное обозначение ЭП-502. Радиационные свойства стали изучались методом позитронной спектроскопии. Основным структурно-чувствительным параметром послужила вероятность перераспределения аннигиляции позитронов между электронами проводимости и связанными электронами атомов матрицы. Объект исследования был подвергнут комплексному воздействию различных факторов. Основными из них являются обработка в расплаве жидкометаллического лития при температуре 600 °С в течение 1000 часов изотоженного, ненапряженного и напряженного состояний. Следующим этапом исследования было изучение структурных характеристик стали после насыщения водородом из этих же состояний. В последнюю очередь металл подвергался облучению электронами (4 МэВ) и реакторными нейтронами при флюенсах 10^{18} и 10^{19} см⁻² при температуре не выше 70 °С с последующей обработкой в расплаве лития. Результаты исследований позволили установить неоднозначность влияния расплавленного лития на радиационную повреждаемость нержавеющей стали и умеренную его агрессивность на процессы корродирования стали.

ВВЕДЕНИЕ

Овладев самым передовым знанием и вооружившись новейшей технологией, одновременно проникнув в океанские глубины и космические просторы, построив цветущие оазисы в одном месте и оставив безжизненные пространства в другом уголке Земли, человечество вступило в XXI век, не имея ни малейшей надежды на беззаботное существование в обозримом будущем. Ускоренное развитие науки и техники при опережающем росте потребностей человечества в новых источниках энергии и материалах с уникальными свойствами привело к резкому изменению ситуации с мировыми запасами сырья и полезных ископаемых. Наиболее характерным в этом плане является постепенное сокращение добычи традиционного органического топлива, запасы которого при нынешнем уровне потребления ограничиваются ближайшими 100–150 годами, и последовательный и систематический переход на освоение ядерной энергетики. Попытка восполнить имеющийся энергетический дефицит за счет нетрадиционных источников (гелиоэнергетика, энергия морских приливов, ветра и др.) не сыграла решающей роли в общем балансе и поэтому основные усилия исследователей были направлены на извлечение внутриатомной энергии сначала за счет управляемой реакции деления ядер, а в последующем – за счет управляемых реакций термоядерного синтеза. По оценкам специалистов только земные ресурсы в случае использования D-D-реакции синтеза могут составить несколько миллиардов лет [1]. К сожалению, чем заманчивее идея обеспечения человечества неограниченным запасом энергии, тем труднее ее практическая реализация. Тем не менее, в настоящее время многие наиболее развитые страны (в том числе и Казахстан) считают своей честью иметь долго-

временную научно-техническую программу, предусматривающую целенаправленные исследования по реализации в начальном этапе управляемой реакции D-T-синтеза. Астрономическое значение требуемой при этом температуры для удержания плазмы и мощный поток нейтронов сопровождения выдвигают на первый план проблему надежности материала первой стенки и других конструктивных элементов термоядерного реактора (ТЯР).

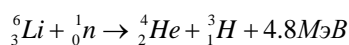
**МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ
ИССЛЕДОВАНИЯ**

После самой крупной в истории человечества техногенной катастрофы, произошедшей на Чернобыльской АЭС, в различных странах мира начались работы по разработке наиболее безопасных конструкций атомных реакторов, хотя эти поиски еще не внесли что-либо новое в существующий порядок путей решения самой проблемы, которые заключаются в следующем. Во-первых, это наращивание количества и эффективности различных защитных и локализуемых систем с максимальной автоматизацией процесса управления реактором, что позволило бы свести к минимуму последствия любой аварии. Во-вторых, разрабатываются такие конструкции атомных реакторов или предлагаются такие научные и инженерные решения самой проблемы, чтобы на основе рационального использования законов природы исключить самую возможность возникновения крупных аварий. Каким бы заманчивым ни был первый подход, ему присущ существенный недостаток – любое наращивание и усложнение связано с удорожанием каждой единицы вырабатываемой энергии. В то же время эти меры не могут устранить возможности появления аварии и ее причин, а в случае отказа, они сами могут стать причинами тяжелых катастроф. Поэтому второй путь более целесообразен.

зен и перспективен, если, разумеется, удастся решить при этом противоречивые, иногда взаимоисключающие задачи. Наиболее важной среди этих задач является проблема выбора теплоносителя первого контура, обеспечивающего отвод тепла со скоростью, необходимой для предупреждения перегрева.

В качестве охладителя могут быть использованы как газообразные, так и жидкие среды, которые должны обладать высоким коэффициентом теплопередачи, низкой стоимостью, малым сечением захвата нейтронов и т.д. Разумеется, в ближайшее время бесспорное преимущество среди жидких теплоносителей сохраняется за водой, но у нее низкая точка кипения, а также она корродирует с металлом. В космических аппаратах и установках специального назначения будущее принадлежит жидкометаллическим охладителям. Уже сейчас некоторые реакторы на быстрых нейтронах используют в качестве теплопередающей среды жидкий натрий, при этом отмечается достаточно высокая безопасность таких установок [1]. Но, тем не менее, натриевым теплоносителям также присущи определенные недостатки, основным из которых является его химическая активность к воде и воздуху, в результате чего возникают тепловые взрывы и натриевые пожары. Эти качества присущи всем щелочным металлам – кандидатам в теплоносители, которые должны обладать еще низкой температурой плавления и высокой точкой кипения. Исходя из этого, наиболее пожаробезопасным считается эвтектический сплав Pb-Bi, лишенный указанных недостатков. Но этим сплавам, как и натрию, свойственна высокая степень наведенной радиоактивности, что усложняет вопросы защиты теплообменника.

Использование термоядерных реакторов в качестве источника энергии требует решения проблемы сырья для производства термоядерного топлива-трития. Считается, что такой реактор должен иметь blanket-зону, в которой энергия нейтронов превращается в тепловую с одновременным воспроизводством трития по реакции [2]:



Тогда использование Li в качестве охладителя позволит решить одновременно две задачи, разумеется, при условии обеспечения полной безопасности эксплуатации, поскольку при горении Na и Li образуют аэрозоли, опасные для человека и окружающей среды. Кроме того, всем охладителям предъявляется еще одно немаловажное требование - минимальные затраты на его перекачку. С учетом всех этих обстоятельств, для определения пригодности того или иного металла в качестве теплоносителя, Китцесс ввел так называемый коэффициент выигрыша при затрате энергии на его перекачку [3]:

$$H = \frac{M^{2.75} \cdot C^3 \cdot K^{0.75} \cdot (\Delta T)^{3.75}}{\rho^{0.75} \cdot \sigma^{3.75}},$$

где M – молекулярный вес; C – теплоемкость; K – теплопроводность; ΔT – произвольный диапазон между точкой плавления и 650°C ; ρ – удельный вес; σ – сечение захвата нейтронов теплоносителем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В таблице 1 приведены расчетные значения коэффициента выигрыша для наиболее вероятных кандидатов – металлов. Видно, что наилучшим сочетанием свойств обладает тяжелый изотоп ${}^7\text{Li}$, которого в природном Li содержится в количестве 92 %. Если затраты на отделение изотопов оправдывают себя и при условии обеспечения безопасных режимов эксплуатации [4], то ${}^7\text{Li}$ может оказаться наиболее подходящей теплопередающей средой, у которого $T_{\text{пл}} = 179^\circ\text{C}$, $T_{\text{кип}} = 1370^\circ\text{C}$, $\sigma = 0,033$ барн. Следовательно, материал первой стенки, кроме высокой радиационной стойкости к распуханию в поле мощного нейтронного излучения, еще должен обладать не менее высоким антикоррозионным свойством в условиях длительной работы в расплавленном металле.

Таблица 1. Значения коэффициента выигрыша для металлов [3]

Металлы	H	Металлы	H
${}^7\text{Li}$	$2,5 \cdot 10^{20}$	Sn	$4,9 \cdot 10^{11}$
Bi	$6,6 \cdot 10^{16}$	K	$1,5 \cdot 10^{11}$
Pb	$3,7 \cdot 10^{12}$	NaK	$2,4 \cdot 10^{13}$
Na	$2,5 \cdot 10^{13}$	BiPb	$2,6 \cdot 10^{13}$

Поскольку в большинстве случаев в качестве конструкционных материалов ЯЭУ служат нержавеющей сталь, то изучение ее основных характеристик в условиях наиболее приближенных к реальным, представляется своевременным и актуальным. Поэтому в качестве объектов исследования была выбрана аустенитная нержавеющая сталь марки ЭП-502 (10X18Н10Т-ВД), которая была подвергнута облучению электронами ($E = 4$ МэВ) и нейтронами до флюенсов 10^{18} и 10^{19} см $^{-2}$ как из отожженного состояния, так и после обработки в расплавленном Li при температуре 600°C в течение 1000 часов. Этим же видам воздействий подвергались образцы стали из напряженного, ненапряженного и наводороженного состояний.

Установка для обработки металлов в расплавленном литии представляла систему из различных металлических объемов, предназначенных для загрузки, перекачки, обработки и слива. Рабочие объемы были снабжены термометрами, манометрами, уровнями и устройствами для отбора проб. Жидкий металл перекачивался из одного объема в другой под давлением инертного газа – аргона через фильтр-ловушку со скоростью $v = 1$ м/с.

Исследование аннигиляционных характеристик образцов проводилось методом измерения спектров угловой корреляции при комнатной температуре с последующим извлечением двух основных параметров: $D_F = S_1/(S_2+S_3)$, пропорционального относитель-

**СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
КАК СЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ФАКТОРОВ**

ной вероятности перераспределения аннигиляции позитронов между электронами проводимости и ионного остова и ширины спектра на половине его высоты FWHM [4], сведенные в таблицу 2, где Φ_{e1} и Φ_{e2} – флюенсы электронов: Φ_n – флюенс нейтронов, равный 10^{18} см⁻². Более высокий уровень флюенса нейтронов создавал в стали значительный уровень наведенной радиоактивности, что приводил к значительным искажениям спектра угловых характеристик аннигиляционного излучения, лишившим возможности его практического использования.

Таблица 2. Аннигиляционные параметры стали ЭП-502, прошедшей сложную физико-химическую обработку

Состояние материала	Вид и флюенс облучения, см ⁻²	D_F	ΔD_F , %	FWHM, мрад.	$\Delta FWHM$, %
Облучение из отожженного состояния	0	1,95	—	13,45	—
	$\Phi_{e1}=10^{18}$	2,99	53	11,66	13,3
	$\Phi_{e2}=10^{19}$	3,54	82	10,80	19,7
	$\Phi_{n1}=10^{18}$	4,55	133	10,07	25,1
Облучение после обработки в расплаве лития при $T=600$ °С, $t=10^3$ час.	0	2,42	24	12,10	10,0
	$\Phi_{e1}=10^{18}$	3,61	85	10,55	21,6
	$\Phi_{e2}=10^{19}$	3,98	104	10,79	19,8
	$\Phi_{n1}=10^{18}$	4,67	140	10,39	22,7
Обработка в Li из ненапряженного состояния		2,74	41	11,78	12,4
Обработка в Li из напряженного состояния		2,54	30	12,09	10,1
Насыщение водородом из ненапряженного состояния и обработка в Li		3,18	63	11,90	11,5
Насыщение водородом из напряженного состояния и обработка в Li		3,38	74	12,09	10,1
Погрешность ±		0,01	1,0	0,05	0,1

Для исходного состояния стали характерны следующие значения аннигиляционных параметров: $D_F = 1,95$ и FWHM = 13,45 мрад. Облучение электронами при двух флюенсах приводит к сужению спектра от 13 до 25 % при соответствующем повышении параметра D_F от 53 до 133 %, что является следствием возникновения структурных нарушений, о которых речь шла раньше. Непрерывная тысячасовая обработка стали в расплавленном литии при $T = 600$ °С также увеличивает параметр D_F при одновременном сужении спектра, но на заметно меньшую величину, чем при электронном и нейтронном облучении. Вероятной причиной этого процесса может быть взаимодействие жидкого металла с твердым телом, конечный результат которого определяется диаграммой состояния. Поскольку изучаемая сталь является многокомпонентной, то установление типа диаграммы с Li, которая зависит от многих причин и, прежде всего, от электроотрицательности металлов и размерных факторов, практически не представляется возможным. Но качественную оценку наблюдаемым явлениям дать можно. Изучение поверхности металлов после обработки в Li в оптическом микроскопе

с увеличением X200 показало присутствие на ней ямок травления, концентрация и размеры которых зависят от многих причин. Следовательно, сталь ЭП-502 в определенной степени подвержена массопереносу в потоке расплавленного лития. На скорость массопереноса могут оказывать влияние температура расплава, длительность обработки, скорость потока и т.д. Но на результаты позитронных исследований при этом оказывает свое влияние не столько сам процесс, сколько его следствие, в результате которого происходит выщелачивание с поверхности образца атомов компонентов. Наиболее легко подверженным выщелачиванию считается никель. Не последнюю роль в процессе взаимодействия расплавленного металла с поверхностью твердого тела играет, очевидно, диффузионное внедрение атомов Li в кристаллическую решетку стали, которые могут занимать как междоузельные положения, так и сегрегировать на границах зерен. В том и другом случае, эти атомы внедрения способны связывать или высвобождать электроны основного металла, вынуждая их образовывать в решетке локализованные состояния. Последние для позитронов оказывают эффект захвата, в результате которого возрастает относительная вероятность аннигиляции с локализованными носителями заряда, что приводит к соответствующему возрастанию параметра D_F и сужению спектра. Правда, реальная концентрация внедренных атомов, следовательно, и влияние их на аннигиляционные характеристики в принципе могли быть значительно больше наблюдаемых, если обеспечить полную смачиваемость жидкости с твердым телом. Но поиск путей увеличения смачиваемости Li с нержавеющей сталью в ходе выполнения этих исследований не ставился. Тем не менее, не трудно заметить умеренную агрессивность Li к сталям этого сорта.

Облучение как ускоренными электронами, так и нейтронами деления после литиевой обработки не намного изменяет аннигиляционные характеристики материала (104 % против 81 % при облучении электронами и 139 % против 133 % при нейтронном) по сравнению с чистым облучением без предварительной обработки в Li. Следовательно, в этом случае присутствие атомов Li как на поверхности, так и внутри решетки не оказывает решающего влияния на повреждаемость металла. Но это совершенно не означает, что роль Li в этом процессе действительно незначительна. Дело в том, что облучение электронами и нейтронами проводилось не в момент обработки образцов в расплавленном металле, что в условиях данного эксперимента практически не осуществимо, а значительно позже. Поэтому относительно небольшое приращение аннигиляционных параметров в данном случае может быть вызвано образованием в процессе облучения связанного комплекса радиационный дефект - внедренный примесный атом.

Как известно, все элементы конструкции активной зоны реактора в процессе эксплуатации испытывают значительные внутренние напряжения вследствие циклического воздействия высокой температуры, мощного нейтронного потока, а также подвергаются статической, динамической и вибрационной нагрузке как в результате неравномерного энерговыделения по объему, так и из-за различия в величине коэффициента теплового расширения. В связи с этим представляется не менее важным изучение процесса воздействия расплавленного металла на твердое тело из напряженного и ненапряженного состояний, а также до и после наводороживания из этих состояний. Было установлено, что диффузионное проникновение атомов Li в кристалл и образование локализованных состояний из ненапряженного состояния происходит относительно легче, чем из напряженного, что, видимо, связано с остаточными

силами взаимодействия атомов напряженного металла, которые препятствуют проникновению атомов инородного металла. Наоборот, процесс наводороживания напряженного металла снижает (может быть, снимает) внутренние напряжения, созданные внешними силами, и атомы Li относительно легко диффундируют в решетку матрицы, вызывая соответствующее возрастание степени локализованного состояния ее электронов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучение воздействия расплавленного лития на нержавеющую сталь выявило ряд интересных моментов, в результате которых установлена неоднозначность его влияния на радиационную повреждаемость металла и умеренная агрессивность жидкого Li на процессы коррождения стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петунин В.П. Теплоэнергетика ядерных установок. – М.: Атомиздат. 1960 300 с.
2. Левин В.Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. – М.: Атомиздат 1979. 400 с.
3. Джесси Рассел. Реактор с жидкометаллическим теплоносителем. – М.: Атомиздат. 1989. 255 с.
4. Мукашев К.М. Физика медленных позитронов и позитронная спектроскопия. – Алматы. 2015. 510с.

КОНСТРУКЦИОННО-МАТЕРИАЛДЫҚ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ КЕШЕНДІ ФАКТОРЛАРДЫҢ ӘСЕРІ

¹⁾ Қ.М. Мұқашев, ¹⁾ А.Д. Мурадов, ²⁾ Ф.Ф. Умаров, ¹⁾ Г.Ш. Яр-Мухамедова

¹⁾ *Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

²⁾ *Қазақ-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан*

Тоттануға төзімді 10X18H10T-ВД болаттың радиациялық өңдеулерге байланысты ақаулану дәрежесі кең ауқымды зерттеулерден өткізілген. Материалдың радиациялық қасиеттерін зерттеу үшін позитрондық спектроскопия тәсілі қолданылды. Зерттеу тәсілінің негізгі құрылымдық-сезімтал көрсеткіші ретінде позитронның атом құрамындағы еркін электрондар мен байланысқан электрондар арасында аннигиляция құбылысына қатысу ықтималдығы пайдаланылды. Зерттеу нысаны түрлі факторлардың кешенді әсері арқылы өңдеуден өткізілді. Бірінші кезеңде зерттеу нысаны жасылған, күйзеліссіз және күйзелісті күйден 600 °C температурада 1000 сағ. ішінде сұйық литийде өңделді. Келесі кезең сондай күйдегі болатты сутекпен қанықтырудан жүргізілді. Соңғы кезеңде болат материал энергиясы жоғары электрондармен (4 МэВ) және реакторлық нейтрондармен 10^{18} және 10^{19} см⁻² флюенспен сәулелендіруден кейін тағы да сұйық литийде өңдеуден өткізілді. Зерттеу нәтижелері балқыған литийдің тоттануға төзімді болаттың радиациялық ақаулануына әртүрлі деңгейде әсері болатындығын және оның коррозиялануына да ықпалын тигізетіні белгілі болды.

STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF THE CONSTRUCTION MATERIAL AS THE CONSEQUENCE OF THE IMPACT OF INTEGRATED FACTORS

¹⁾ K.M. Mukashev, ¹⁾ A.D. Muradov, ²⁾ F.F. Umarov, ¹⁾ G.Sh. Yar-Mukhamedova

¹⁾ *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan*

The paper presents the results of a study of the radiation damage of stainless steel 10X18H10T-VD, which has the symbol EP-502. Radiation properties of steel were studied by the method of positron spectroscopy. The main structurally sensitive parameter was the probability of redistribution of positron annihilation between conduction electrons and bound electrons of matrix atoms. The object of the study was subjected to a complex effect of various factors. The main ones are melt processing of liquid metal lithium at 600 °C for 1000 hours from annealed, unstressed and stressed states. The next stage of the study was to study the structural characteristics of steel after saturation with

hydrogen from these earthquakes. Lastly, metal was exposed to electrons and neutrons at fluences 10^{18} and 10^{19} cm⁻² at a temperature of no higher than 70 °C. The results of the investigations made it possible to establish the ambiguity of the influence of molten lithium on the radiation damage of stainless steel and its moderate aggressiveness on the corrosion processes of steel.