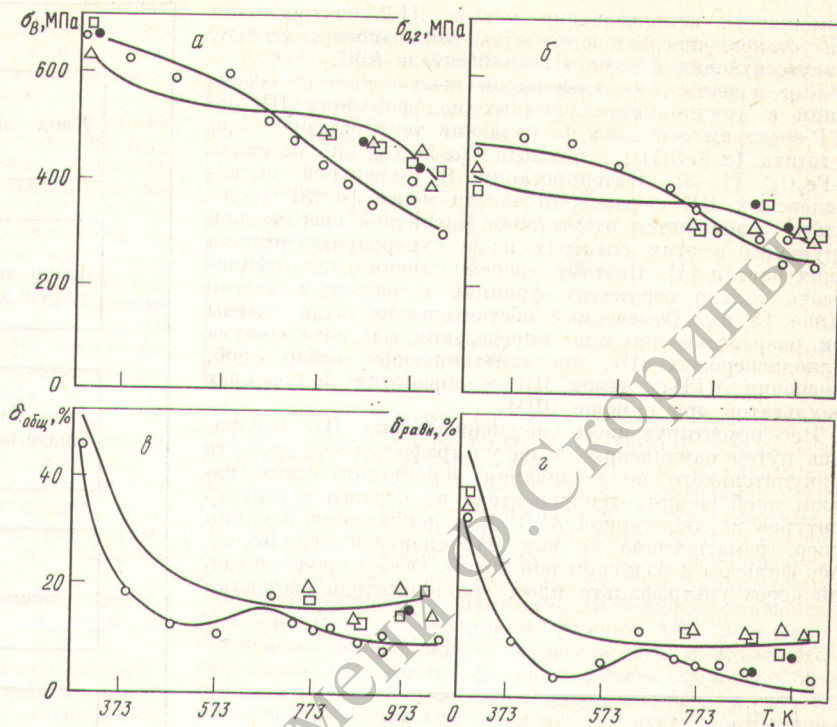


Температурные зависимости механических свойств σ_B (а), $\sigma_{0,2}$ (б), $\delta_{\text{общ}}$ (в), $\delta_{\text{равн}}$ (г) стали Х16Н15МЗБ в исходном состоянии (—), после выдержки в среде N_2O_4 (Δ —700—833 К, 3000 ч; $\square$ —700—973 К, 3000 ч; $\bullet$ —933 К, 10 000 ч) и после облучения в среде N_2O_4 ($\circ$)



чением температуры испытания до 725 К и выше наблюдается падение $\delta_{\text{общ}}$ до 10% и $\delta_{\text{равн}}$ до 3,5—4%, одновременно с этим значения σ_B и $\sigma_{0,2}$ становятся ниже исходных.

Таким образом, анализ диаграмм растяжения при температуре более 773 К для образцов, облученных в среде N_2O_4 до флюенса $2,4 \cdot 10^{20}$ нейтр./см² ($E > 0,1$ МэВ), показал, что при высокой температуре испытания наблюдается снижение пластичности от 18—20% (исходные образцы) до 10%. При этом пластичность снижается в основном за счет уменьшения равномерной деформации ($\delta_{\text{равн}} \approx 11\%$ для необлученного материала и 4% для облученного), а сосредоточенная деформация сохраняется на уровне 6—7% у облученных и необлученных образцов. В проведенном ранее [4] исследовании коррозии стали в среде N_2O_4 при 823 К установлено отсутствие межкристаллитной коррозии в условиях облучения, в то время как в обычных условиях наблюдается склонность к межзеренному окислению.

Электронно-микроскопическое исследование [5] облученных при 823 К образцов выявило присутствие карбидов хрома, не обнаруживаемых в исходных образцах. Можно предположить, что наличие карбидных выделений и их рассредоточение приводит к появлению значительных напряжений в окружающей матрице и к неоднородности напряженного состояния при нагружении. Истощение запаса пластичности в усиленно деформируемых областях вблизи крупных включений приводит к преждевременному разрушению материала при более низких общем напряжении и деформации, как это и наблюдалось при испытании облученных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольцев В. П. и др. Конструкционные материалы АЭС на диссоциирующем теплоносителе N_2O_4 . Минск, Наука и техника, 1976.
2. Балашов В. Д., Суханов Н. Л. Препринт НИИАР П-89. Мелекес, 1970.
3. Прохоров В. И. и др. Препринт НИИАР П-23 (317). Димитровград, 1977.
4. Гольцев В. П. и др. — В кн.: Весті АН БССР. Сер. физ.-энергет. наук, 1977, № 1, с. 22.
5. Гольцев В. П. и др. — В кн.: Докл. Всесоюз. школы по внутриреакторным методам исследований. Димитровград, изд. НИИАР, 1978, с. 182.

Поступило в Редакцию 29.09.81

УДК 621.039.553

Применение ЯГР-спектроскопии для определения фазового состава мелкодисперсных продуктов коррозии реакторных материалов в водном теплоносителе

МОСКВИН Л. Н., ЕФИМОВ А. А., СОСНОВСКАЯ Е. В., ГУСЕВ Б. А., ТОМИЛОВ С. Б.

Для углубления физико-химических представлений о коррозионных процессах, протекающих в контурах действующих АЭС, важны сведения о фазовом составе мелкодисперсной фракции (размер частиц меньше 10^3 нм) продуктов коррозии (ПК) реакторных материалов в водном теплоносителе. При изучении структуры грубодисперсных ПК в теплоносителе и коррозионных отложений

на поверхностях оборудования АЭС положительно зарекомендовал себя абсорбционный вариант ЯГР-спектроскопии (ядерный гамма-резонанс), обладающий рядом достоинств по сравнению с такими методами структурного анализа, как рентгеновская спектроскопия, электронография, электронная спектроскопия для химического анализа и др. [1, 2]. В настоящей работе рассматривается

возможность использования метода ЯГР-спектроскопии для установления фазового состава мелкодисперсных ПК, присутствующих в водном теплоносителе АЭС.

Как известно, идентификация железоокисных соединений в крупнокристаллических модификациях ПК по ЯГР-спектрам основана на различии температуры Кюри у гетита (α -FeOON), гематита (α -Fe₂O₃) и магемита (γ -Fe₂O₃) [1—3]. Интерпретация ЯГР-спектров мелкодисперсных ПК с размером частиц менее 10 нм значительно усложняется отсутствием магнитной сверхтонкой структуры в этих спектрах из-за суперпарамагнетизма таких частиц [4]. Поэтому уверенно можно идентифицировать только структуру фракции с размером частиц свыше 15 нм. Отмеченные обстоятельства были учтены при разработке методики определения фазового состава мелкодисперсных ПК, предусматривающей отбор проб, измерения ЯГР-спектров ПК и обработку полученных результатов при помощи ЭВМ.

Неседиментирующиеся мелкодисперсные ПК отбирались путем накопления их на ультрафильтре в процессе принудительного продавливания перистальтическим насосом проб водного теплоносителя из первого и второго контуров двухконтурной АЭС. Для исключения влияния суперпарамагнетизма на вид ЯГР-спектров использовались фильтры с размером пор 90 нм. Объем продавливаемой через ультрафильтр пробы теплоносителя составлял

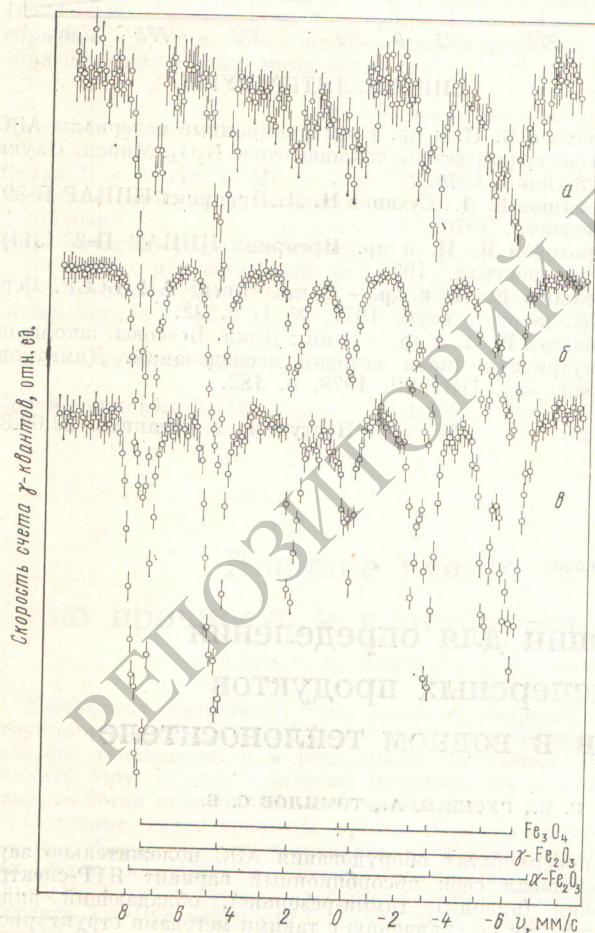


Рис. 1. ЯГР-спектры мелкодисперсных ПК в теплоносителе двухконтурной АЭС из первого (а) и второго (б) контуров; из второго контура через 9 мес работы станции (в)

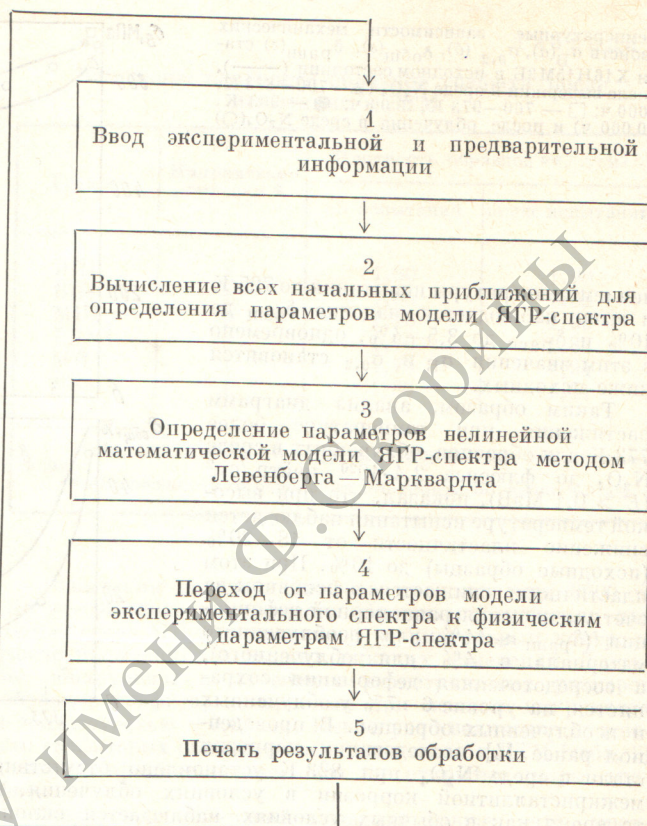


Рис. 2. Структурная схема программы MESSA 2 для обработки ЯГР-спектров

5—10 л в зависимости от содержания ПК, чтобы обеспечить наличие около 20 мг/см² железа на фильтрах, играющих роль поглотителей при измерении ЯГР-спектров на спектрометре ЯГРС-4. Источником резонансных γ -квантов являлся ⁵⁷Со в хrome. Методика измерения ЯГР-спектров ПК, загрязненных долгоживущими радионуклидами активационного и осколочного происхождения, не отличалась от описанной ранее [1]. На рис. 1 приведены ЯГР-спектры некоторых образцов мелкодисперсных ПК. Видно, что применяемая методика отбора проб и измерения их ЯГР-спектров позволяет получать спектры с достаточно высоким резонансным поглощением (~0,5%).

Для обработки многокомпонентных ЯГР-спектров (см. рис. 1) была составлена на языке ФОРТРАН программа MESSA 2, где использован эффективный метод Левенберга—Марквардта для согласования математической модели ЯГР-спектров с экспериментальными данными. Этот метод позволяет [5] обеспечить высокую скорость обработки спектров и хорошую точность определения искоемых параметров нелинейной модели при «разумных» начальных приближениях, задаваемых экспериментатором. Кроме того, следует отметить, что программа MESSA 2 выполнена в виде блоков, объединяющих относительно независимые процедуры вычисления, что позволяет легко расширять возможности программы.

По структурной схеме программы MESSA 2 (рис. 2) можно проследить последовательность обработки ЯГР-спектров от момента ввода экспериментальных данных (блок 1) до вывода на печать результатов обработки (блок 5). Конечным результатом обработки по программе MESSA 2 является определение таких физических параметров ЯГР-спектра, как изомерный сдвиг, квадрупольное расщепление и напряженность магнитного поля на

ядре $^{57}\text{Fe}(H_{\text{эф}})$. В отношении методики представляет интерес блок 2, где вычисляются приближенные параметры модели ЯГР-спектра. Использование в этом блоке такой априорной информации, как число компонентов в сложном ЯГР-спектре; положение, амплитуда и полуширина одной линии i -го компонента; табличные значения $H_{\text{эф}}$ для i -го компонента, позволяет существенно сократить число задаваемых экспериментатором начальных приближений, необходимых для определения на ЭВМ искомых параметров ЯГР-спектра i -го компонента. Этому также способствуют и положенные в основу расчета следующие практические следствия из теории ЯГР-спектроскопии [6]:

1) в общем случае спектр одного химического соединения железа при наличии в нем тонкого квадрупольного и сверхтонкого магнитного взаимодействий представляется в виде секстета, расстояние между крайними линиями в котором определяется значением $H_{\text{эф}}$;

2) для мелкодисперсных изотропных ПК железа отношение интенсивности линий в секстете подчиняется правилу 3 : 2 : 1 : 1 : 2 : 3;

3) при отсутствии в соединении железа сверхтонкого магнитного взаимодействия ($H_{\text{эф}} = 0$) ЯГР-спектр представляет собой дублет с линиями примерно равной интенсивности, расстояние между которыми определяется значением квадрупольного расщепления;

4) при отсутствии в соединении железа тонких и сверхтонких взаимодействий спектр ЯГР-перехода вырождается в синглет.

Таким образом, если, например, ЯГР-спектр, состоящий в сумме из 24 линий (см. рис. 1) представить с помощью блока 2 (см. рис. 2) как суперпозицию четырех секстетов, то для обработки этого спектра на ЭВМ по программе MESSA 2 необходимо задать для каждого секстета начальные приближения четырех параметров: положения, амплитуды, полуширины первой линии секстета и значения $H_{\text{эф}}$, т. е. всего 16 значений начальных приближений. Для сравнения отметим, что в отсутствие блока 2 для обработки такого же спектра экспериментатор должен задать 73 начальных приближения [5].

Результаты определения фазового состава некоторых образцов мелкодисперсных ПК первого и второго контуров АЭС приведены в таблице. Следует отметить, во-первых, отсутствие в теплоносителе двухконтурной АЭС гидроокислов железа (FeOОН), обнаруженных в теплоносителе одноконтурных АЭС [1, 7], во-вторых, практически неизменный состав мелкодисперсных ПК в теплоносителе второго контура в течение всех 9 мес эксплуатации АЭС. Эти особенности можно понять, если предположить гидротермическую схему образования мелкодисперсных ПК [8], согласно которой на первой стадии происходит вынос в теплоноситель тонких форм железа, на второй — в процессе гидролиза образуются гидроокислы железа. Структура конечных ПК формируется на третьей стадии

Фазовый состав окислов железа в мелкодисперсных ПК конструкционных материалов двухконтурной АЭС, мас. %

Место отбора проб теплоносителя (контур)	Номер отбора	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Fe_3O_4
Первый	1	17	27	54
Второй *	1	60	—	40
То же	2	62	—	38
То же	3	59	—	41

* Между отборами 1 и 3 из второго контура прошло 9 мес работы АЭС на мощности.

в результате термической дегидратации гидроокислов железа с образованием Fe_2O_3 . По-видимому, при рабочей температуре первого и второго контуров двухконтурной АЭС ($\sim 300^\circ\text{C}$) вторая и третья стадии образования конечных форм ПК протекают достаточно быстро, поэтому в составе мелкодисперсной фракции отсутствуют гидроокислы железа. В противоположность этому в одноконтурных АЭС имеются низкотемпературные участки, характеризующиеся замедленной скоростью стадии температурной дегидратации. При стационарном режиме АЭС достигается равновесие коррозионных процессов, чем и объясняется отмеченное постоянство фазового состава продуктов коррозии в теплоносителе двухконтурной АЭС в течение 9 мес эксплуатации (см. таблицу). Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о возможности применения ЯГР-спектроскопии для определения фазового состава мелкодисперсных ПК реакторных материалов в контурах АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москвин Л. Н. и др. — Атомная энергия, 1979, т. 46, вып. 1, с. 28.
2. Седов В. М. и др. — Там же, 1980, т. 48, вып. 6, с. 396.
3. Bowen L. — Mössbauer Effect Ref. Data J., 1979, v. 2, N 3, p. 76.
4. Application Mössbauer Spectroscopy. N.Y., Acad. Press, 1976, p. 85.
5. Ефимов А. А., Сосновская Е. В., Томилов С. Б. — В кн.: Прикладная ядерная спектроскопия. М., Атомиздат, 1979, вып. 9, с. 134.
6. Meisel W. — J. de Phys. supp. N 1, 1980, t. 41, s. C1-63.
7. Мамет В. А. и др. — Теплоэнергетика, 1979, № 12, с. 53.
8. Морозова И. К. и др. — В кн.: Вынос и отложения продуктов коррозии реакторных материалов. М., Атомиздат, 1975, с. 106.

Поступило в Редакцию 08.12.80

УДК 621 039.531

Влияние микроструктуры сварного соединения на эрозию при ионном облучении

КАЛИН Б. А., ГУСЕВА М. И., ЯКУШИН В. Л., СКОРОВ Д. М., КОРШУНОВ С. Н.

Изготовление разрядной камеры термоядерных установок и реакторов, представляющей собой сложную конструкцию, предусматривает использование различных видов соединений. Один из основных способов соединения элементов конструкций — сварка. В условиях работы

термоядерных реакторов первая стенка разрядной камеры будет подвергаться воздействию интенсивных потоков нейтронов, нейтральных и заряженных частиц, поэтому для практических целей важно знать радиационную стойкость сварных швов, в частности в условиях ионного облучения.