

щейся ленты.

Так как поток рентгеновского излучения можно интерпретировать, как комбинацию источников гамма-излучения с различными энергетическими весами, то приведенные выше результаты могут быть легко перенесены на случай применения рентгеновского источника излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плотников Р. И., Пшеничный Г. А. Флюоресцентный рентгенорадиометрический анализ. Под ред. проф. В. А. Мейера и Н. И. Комяка. - М.: Атомиздат, 1973. - 264 с.
2. Забродский В. А. Применение обратно рассеянного рентгеновского излучения в промышленности. - М.: Энергоиздат, 1989. - 128 с.
3. Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике. - К.: Наукова думка, 1975. - 416 с.
4. Фано У., Спенсер Л., Бергер М. Перенос гамма-излучения. Пер. с англ. - М.: Гос. Изд. по атомной науке и технике, 1963. - 284 с.
5. Руководство по радиационной защите для инженеров. Т. 1. Пер. с англ. Под ред. Д. Л. Бродера и др. - М.: Атомиздат, 1973. 426 с.

И.И. ТОЛМАЧЕВ

СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПРИМЕСЕЙ

Уран-гадолиниевое топливо в виде таблеток $(U,Gd)O_2$ во всевозрастающих масштабах применяется в реакторах атомных электростанций для повышения коэффициента полезного действия реактора за счет более полного выгорания ядерного топлива в тепло-выделяющих элементах (ТВЭлах) [1]. Структура таблетки представляет собой почти твердый раствор $(U, Gd)O_2$, что подтверждается линейным изменением размеров кристаллической решетки с увеличением содержания гадолиния до 10%. Поскольку $(U, Gd)O_2$ топливо аналогично по структуре UO_2 топливу, то их механические и химические свойства близки. Однако теплопроводность таблеток $(U, Gd)O_2$ ниже теплопроводности таблеток из UO_2 .

Число таблеток, содержание в них Gd_2O_3 могут варьироваться в широких пределах по высоте столба топлива. Так, например, в ТВЭлах активной зоны на АЭС "Брокдорф" (ФРГ), таблетки $(U,Gd)O_2$ с содержанием Gd_2O_3 от 3 до 7% по массе занимают до 70% высоты столба топлива [2].

Поскольку содержание гадолиния в активной зоне реактора влияет не только на его мощность, но и на выработку электрической энергии, то необходимо измерять достаточно точно как среднее содержание гадолиния в активной зоне, так и его содержание в каждой таблетке $(U,Gd)O_2$. При снаряжении ТВЭлов таблетками UO_2 и $(U,Gd)O_2$ их можно перепутать, так как они не отличаются ни по размеру, ни по цвету. Контроль местоположения таблеток $(U,Gd)O_2$ по длине ТВЭла и содержания в них гадолиния может проводиться магнитным, вихретоковым, активационным, нейтронографическим и рентгенофлюоресцентным методами.

Разработанные методы неразрушающего контроля содержания Gd_2O_3 в каждой таблетке $(U,Gd)O_2$ по высоте столба топлива ТВЭла обеспечивают требуемую точность. Наиболее совершенным, точным и производительным методом является магнитный метод, основанный на использовании магнитометра со сверхпроводящим магнитом фирмы General Electric (США), однако, он связан с большими энергетическими затратами. Более простым методом является вихретоковый метод контроля, обеспечиваю-

ший приемлемую точность определения концентрации Gd_2O_3 в таблетках $(U,Gd)O_2$ с высоким содержанием в них Gd_2O_3 и низким содержанием ферромагнитных металлических включений.

Кроме основного материала $(U,Gd)O_2$ в таблетках, выпускаемых промышленным способом, допустимо наличие небольшого количества магнитных и немагнитных примесей (например, железа до 0,06%), которые попадают туда в процессе производства таблеток. Наличие примесей железа является мешающим фактором при использовании магнитного и вихретокового методов контроля, так как частицы магнитомягкой стали обладают значительно лучшими магнитными свойствами чем Gd_2O_3 . Особенно сильно ферромагнитные примеси влияют при измерении концентрации Gd_2O_3 вихретоковым методом.

Поэтому для дальнейшей разработки магнитного и вихретокового метода контроля необходимо метрологическое обеспечение для данных методов. Для настройки и калибровки аппаратуры необходимы стандартные образцы предприятия с известной массовой концентрацией Gd_2O_3 в пределах 3...7% при наличии примесей в допустимых пределах. Технология производства таких стандартных образцов в литературе не описана. Кроме того, на стадии разработки и настройки аппаратуры, необходимо иметь комплект стандартных образцов с низким содержанием ферромагнитных примесей (в диапазоне 0,01...0,06%) для оценки влияния этих примесей на точность измерения. В данной работе предложена технология изготовления стандартных образцов, где в качестве примеси выступает мелкодисперсный металлический порошок, изготовленный из магнитомягкой стали 20. Размер фракций порошка не превышает 30 мкм.

Размеры стандартного образца совпадают с размерами твэла, применяемого в производстве. Образцы изготовлены из диамагнитного материала (эпоксидная смола), для снижения хрупкости материала допустимо добавление талька до 5% массовой концентрации. Поскольку удельный вес эпоксидной смолы и твэла из $(U,Gd)O_2$ значительно отличаются, при расчете концентрации магнитного порошка вводился пересчетный коэффициент.

Для создания стандартных образцов с очень низкими значениями концентраций примесей использовались аналитические весы с порогом чувствительности 0,0002 г, что позволило создать линейку стандартных образцов с содержанием ферромагнитных примесей 0,06%; 0,05%; 0,04%; 0,03%; 0,02%; 0,01% с погрешностью $\pm 3\%$. Технология изготовления и опытная партия стандартных образцов аттестованы и переданы заказчику.

Заключение

Разработана технология производства стандартных образцов из диамагнитного материала с низким содержанием ферромагнитных примесей. Стандартные образцы пригодны для оценки влияния ферромагнитных примесей в технике неразрушающего контроля и, в частности, для оценки влияния низких концентраций стальных примесей в таблетках твэлов атомных реакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горский В. В. Применение гадолиния в легководных реакторах.-Атомная техника за рубежом, 1987, N 3, с. 3-11.
2. Lefvert T. Improving fuel economy by optimized in-core fuel management.-Kerntechnik, 1988, Bd 52, N 4, S. 228-233.