



ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
Санкт-Петербург

Контроль коррозионного разрушения турбинных лопаток с помощью нейтронно-активационного анализа

А.З. Багерман
Д.С. Гришин
А.В. Конопатова
А.И. Лайкин
И.П. Леонова



Цель работы

Оценка возможности использования нейтронно-активационного анализа для измерения малых количеств продуктов коррозии турбинных лопаток на стадии разработки для них защитных покрытий.

Решаемая задача

В настоящей работе проведена оценка возможности нейтронно-активационного анализа для измерения концентрации хрома, появляющегося за счет вымывания продуктов его коррозии из под керамического покрытия через микротрещины и другие нарушения защитного покрытия, в дистиллированной обессоленной воде после кипячения в ней турбинных лопаток.



Методика выполнения работы

1. Подготовка образцов воды: после кипячения турбинных лопаток, после кипячения воды без лопаток, калибровочного образца раствора с известной концентрацией хрома.
2. Облучение образцов в контролируемых условиях тепловыми и быстрыми нейтронами в экспериментальных каналах исследовательского ядерного реактора.
3. Измерение активности образовавшихся в облученных образцах радионуклидов с помощью низкофонового гамма-спектрометра.
4. Оценка возможности данного метода для решения поставленной задачи.



Оценка чувствительности метода нейтронно-активационного анализа

Минимально обнаружимая масса чистого элемента на 1 г образца при плотности потока тепловых нейтронов $10^{11} \text{ с}^{-1}\text{см}^{-2}$, г	Элемент
10^{-11}	Dy, Eu
$10^{-11} - 10^{-10}$	In, Lu, Mn
$10^{-10} - 10^{-9}$	Au, Ho, Ir, Re, Sm, W
$10^{-9} - 10^{-8}$	Ag, Ar, As, Br, Cl, Co, Cs, Cu, Er, Ga, Hf, I, La, Sb, Sc, Se, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, Yb
$10^{-8} - 10^{-7}$	Al, Ba, Cd, Ce, Cr, Hg, Kr, Gd, Ge, Mo, Na, Nd, Ni, Os, Pd, Rb, Rh, Ru, Sr, Te, Zn, Zr
$10^{-7} - 10^{-6}$	Bi, Ca, K, Mg, P, Pt, Si, Sn, Ti, Tl, Xe, Y
$10^{-6} - 10^{-5}$	F, Fe, Nb, Ne
10^{-4}	Pb, S

Экспериментальное оборудование



**Многоцелевой исследовательский
ядерный реактор У-3**

**Диапазон энергетической мощности
реактора:
 $10^{-2} - 5 \cdot 10^4$ Вт**

**Удельные плотности потока тепловых
нейтронов:**

Выкатной короб: до $1,36 \cdot 10^6$ с⁻¹см⁻²Вт⁻¹

**Центральный экспериментальный канал:
 $4,64 \cdot 10^7$ с⁻¹см⁻²Вт⁻¹**

Радиальный канал: $2,4 \cdot 10^7$ с⁻¹см⁻²Вт⁻¹

Тангенциальный канал: $1,01 \cdot 10^7$ с⁻¹см⁻²Вт⁻¹



Экспериментальное оборудование



**Низкофоновый спектрометр
гамма-излучения на основе
полупроводникового детектора из
сверхчистого германия типа
GEM-80 (ORTEC)**

Рабочий диапазон энергий регистрируемого
гамма-излучения – от 40 до 3000 кэВ

Энергетическое разрешение по линии гамма-
излучения с энергией 1332,2 кэВ радионуклида
 ^{60}Co – 1,88 кэВ

Эффективность регистрации по пику полного
поглощения гамма-квантов с энергией 1332,2
кэВ радионуклида ^{60}Co от точечного источника
типа ОСГИ на расстоянии 5 см по оси от
торцевой поверхности кристалла – 1,0 %

Минимально обнаружимая активность
радионуклида ^{137}Cs – 0,2 Бк за 1 час

Свинцовая защита толщиной стенок 200 мм



Проведение эксперимента

- Приготовление образцов (кипяченая дистиллированная обессоленная вода, дистиллированная обессоленная вода после кипячения в ней турбинных лопаток) и эталонного раствора хрома в воде, объем образцов – 20 мл, тара для образцов – виалы из полиэтилена высокого давления;
- Облучение эталонного раствора хрома в воде в тангенциальном канале ИЯР У-3 при плотности потока тепловых нейтронов $10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в течение 1 часа;
- Облучение пустой тары для образцов в тангенциальном канале ИЯР У-3 при плотности потока тепловых нейтронов $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в течение 1 часа;
- Облучение образцов воды в тангенциальном канале ИЯР У-3 при плотности потока тепловых нейтронов $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в течение 1 часа;
- Дозиметрический контроль эталонного раствора и образцов;
- Гамма-спектрометрический анализ тары, эталонного раствора и образцов.



Расчет массы хрома

$$m_{Cr} = \frac{n \cdot \mu}{(1 - e^{-\lambda \cdot t_{акт}}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_{выд}} \cdot K} \cdot \frac{P_{Etalon}}{P_{Sample}}$$

m – масса хрома в образце, г;

n – скорость счета под пиком полного поглощения линии 320,07 кэВ, имп/с;

μ – молярная масса изотопа ^{50}Cr , 50 г/моль;

λ – постоянная распада изотопа ^{51}Cr , $2,897 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$;

$t_{акт}$ – время активации образцов, 3600 с;

$t_{выд}$ – время выдержки образца от окончания облучения до начала измерения, с;

K – измеренный экспериментально коэффициент пересчета от скорости счета под пиком полного поглощения к массе хрома, учитывающий плотность потока тепловых нейтронов, эффективность регистрации гамма-излучения под пиком полного поглощения 320,07 кэВ, сечение реакции $^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$, и ядерную концентрацию изотопа ^{50}Cr в 1 моле природного хрома. Коэффициент K равен $3,558 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} \text{ моль}^{-1}$ для спектрометра GEM-80;

P_{Etalon} – мощность реактора при облучении эталона, равная 100 Вт;

P_{Sample} – мощность реактора при облучении проб, равная 20 000 Вт.



Оценка масс других элементов

$$m_x = \frac{A \cdot \mu_x}{\sigma_x \cdot \phi \cdot (1 - e^{-\lambda_x \cdot t_{акт}}) \cdot e^{-\lambda_x \cdot t_{выд}} \cdot N_A \cdot v_{Nat}}$$

m_x – масса элемента в образце, г;

A – измеренная активность данного изотопа, Бк;

σ_x – сечение взаимодействия тепловых нейтронов с измеряемым изотопом по реакции (n, γ);

ϕ – плотность потока тепловых нейтронов, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$

μ_x – молярная масса данного изотопа, г·моль⁻¹;

λ_x – постоянная распада данного изотопа, с⁻¹;

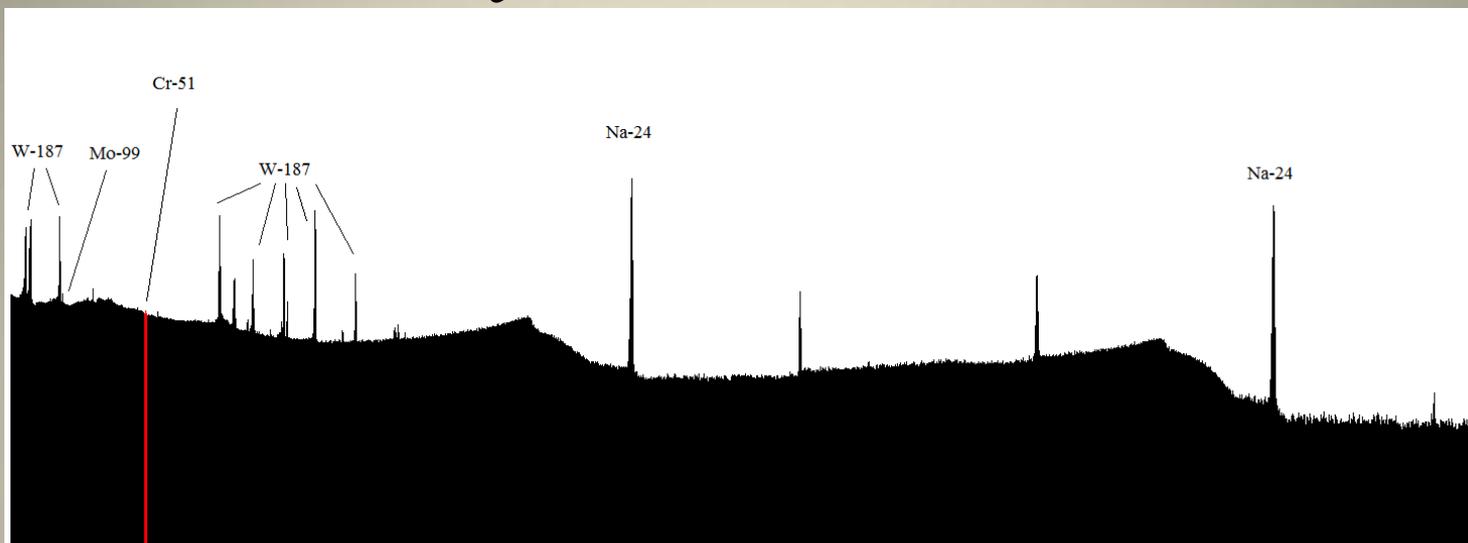
$t_{акт}$ – время активации проб, 3600 с;

$t_{выд}$ – время выдержки пробы между окончанием облучения и началом измерения, с;

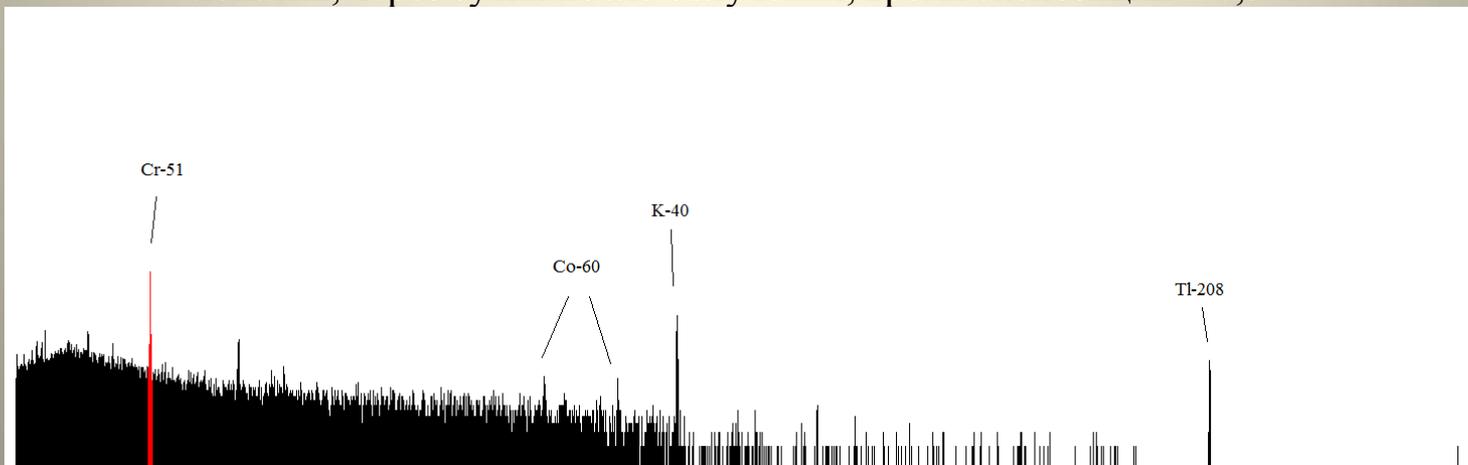
N_A – число Авогадро, $6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹;

v_{Nat} – процентное содержание данного изотопа в естественной смеси.

Полученные данные



Энергетический спектр гамма-излучения дистиллированной воды после кипячения турбинной лопатки, через сутки после облучения; время экспозиции – 0,5 ч



Энергетический спектр гамма-излучения дистиллированной воды после кипячения турбинной лопатки, через 22 дня после облучения ; время экспозиции – 2 ч



Результаты

- Концентрация хрома в воде после кипячения турбинных лопаток $0,5 \cdot 10^{-6} \div 1,5 \cdot 10^{-6}$ г/г ;
- Помимо хрома в образцах найдены следующие элементы: вольфрам, кобальт, молибден;
- Аргон, натрий, хлор и марганец присутствуют как в контрольных образцах (фоновых, без кипячения лопаток), так и в измеряемых образцах.



Выводы

- Нейтронно-активационный анализ позволяет контролировать коррозионное разрушение турбинных лопаток с керамическим покрытием по наличию хрома и ряда других элементов (вольфрам, кобальт, молибден) в воде после из кипячения в ней;
- Минимально обнаружимая концентрация хрома в образце воды объемом 20 мл при облучении 1 час плотностью потока тепловых нейтронов $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и выдержке в течение 20 дней за время измерения 2 часа составляет $3,5 \cdot 10^{-8} \text{ г/г}$;
- Изотоп ^{41}Ar образуется за счет облучении воздуха, содержащегося в виале (между зеркалом воды и крышкой), а также воздуха, растворенного в воде;
- Обессоленная дистиллированная вода содержит малое количество натрия (около $5 \cdot 10^{-8} \text{ г/г}$) и хлора (около 10^{-7} г/г);
- Образцы воды после облучения необходимо выдерживать в течение нескольких дней, чтобы активность примесей (натрий, хлор, аргон) снизилась и не маскировала излучение изотопа ^{51}Cr .



Спасибо за внимание

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

196158 Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44

+7 (812) 415-46-07

krylov@krylov.spb.ru

Лайкин Андрей Игоревич

Гришин Денис Сергеевич

+7 (812) 587-85-36