

О НАВЕДЕННОЙ АКТИВНОСТИ ПРИ ДЕФЕКТОСКОПИИ ТОЛСТЫХ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПОМОЩЬЮ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЕТАТРОНА

О. В. СОКОЛОВ

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института
электронной интроскопии)

При дефектоскопии стальных конструкций с помощью тормозного излучения, генерируемого бетатроном, возникают фотоядерные реакции на изотопах элементов, входящих в состав сталей. Учет фотоядерных реакций необходим для соблюдения правил техники безопасности.

Из табл. 1 видно, что возникающие в результате фотоядерных реакций радиоактивные изотопы испускают в основном β -излучения. Исключение представляют изотопы Fe^{53} и V^{52} , являющиеся как β , так и γ -излучателями.

Величина наведенной активности определится выражением [5]

$$a = N_{\gamma} \sigma n \left(1 - e^{-\frac{0.693 t_1}{T_{1/2}}} \right) e^{-\frac{0.693 t_2}{T_{1/2}}} \frac{\text{расп}}{\text{сек}}, \quad (1)$$

где a — наведенная активность в расп/сек;

N_{γ} — поток γ -квантов;

σ — сечение реакции;

n — число атомов облучаемого вещества;

t_1 — время облучения;

t_2 — время после облучения;

$T_{1/2}$ — период полураспада активного изотопа.

Так как фотоядерные реакции происходят при определенной энергии γ -квантов, то для вычисления наведенной активности необходимо знать спектральный состав тормозного излучения. Достаточно точным приближением к реальному спектру тормозного излучения может служить спектр, описываемый выражениями, полученными Шиффом [8].

При вычислении числа атомов облучаемого вещества необходимо знать процентное содержание данного элемента, а также площадь облучаемого участка и его толщину.

Площадь облучаемого участка находится из известных величин фокусного расстояния g и угла расхождения пучка тормозного излучения γ . Толщина облучаемого материала, из которой возможен выход β -излучения, возникающего в результате фотоядерных реакций, определяется величиной максимального пробега β -частиц в данном веществе, которая определяется по формуле

$$R_x = R_{Al_m} \frac{\left(\frac{Z}{A} \right)_{Al}}{\left(\frac{Z}{A} \right)_x}, \quad (2)$$

Таблица 1

Изотоп	Природное содержание в %	Процентное содержание в стали	Реакция	Порог реакции в Мэв	Полуширина резонансной кривой в Мэв	Интегральное сечение реакции в Мэв	Вид излучения	Период полураспада	Энергия излучения в Мэв	Примечание
Углерод C^{12}	98,9	0,1—2	$C^{12}(\gamma n)C^{11}$	18,6	4,2	0,047	β^+	20,5 мин	0,968	1,2
Железо Fe^{54}	5,81	70—99,9	$Fe^{54}(\gamma n)Fe^{53}$	13,8	5,7	0,42	β^+	8,9 мин	2,4	1,2
							γ	8,9 мин	0,51 0,37	3
Кремний Si^{28}	92,28	0,5—3,5	$Si^{28}(\gamma n)Si^{27}$	16,9	3,5	0,07	β^+	4,9 сек	4,9	1, 2, 4
Никель Ni^{58}	69,18	4—26	$Ni^{58}(\gamma n)Ni^{57}$	12	5,6	0,34	β^+	36 час	0,67	1, 2, 3
Хром Cr^{53}	9,43	12—27	$Cr^{53}(\gamma n)V^{52}$	7,75	—	—	β^+	3,74 мин	2,05	1, 2
							γ	—	1,44	4
Молибден Mo^{92}	15,8	1	$Mo^{92}(\gamma n)Mo^{91}$	13,2	5,5	0,18	β^+	11,2 сек	2,8	1, 2, 3
Титан Ti^{46}	7,95	1	$Ti^{46}(\gamma n)Ti^{45}$	13,3	5,1	0,44	β^+	3,08 час	1,2	1—3

где R_{Alm} — максимальный пробег в алюминии.

В зависимости от энергии максимальный пробег β -частиц находится из эмпирических формул [9]:

$$\begin{aligned} \text{при } E_{\beta \max} &= 0,03 \div 0,15 \text{ Мэв; } & R_{Alm} &= 0,15 E_{\beta \max} - 0,0028 \text{ г/см}^2; \\ \text{при } E_{\beta \max} &= 0,15 \div 0,8 \text{ Мэв; } & R_{Alm} &= 0,407 E_{\beta \max}^{1,38} \text{ г/см}^2; \\ \text{при } E_{\beta \max} &> 0,8 \text{ Мэв; } & R_{Alm} &= 0,542 E_{\beta \max} - 0,133 \text{ г/см}^2; \end{aligned}$$

$E_{\beta \max}$ — максимальная энергия β -спектра;

$\left(\frac{Z}{A}\right)_{Al}$ и $\left(\frac{Z}{A}\right)_x$ — отношение порядкового номера к атомному весу для алюминия и данного элемента.

Все β -частицы, возникающие на толщинах, больших R_x , будут поглощаться в материале. Число атомов i -го элемента облучаемого вещества находится по выражению

$$R_i = \frac{N}{A_i} m p, \quad (4)$$

где N — число Авогадро;

A_i — атомный вес элемента;

m — масса облучаемого участка, $m = R \times S p_i$; $S = 4\pi^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma}{2}$,

если пучок имеет квадратное сечение;

P_i — весовое содержание элемента.

Доза на поверхности данного участка, создаваемая β -излучением, находится по формуле [6]:

$$D_\beta = 0,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-8} E_{\beta \max} \tau, \quad (5)$$

где τ — удельная активность расп./сек.

Для γ -излучающих изотопов мощность дозы вблизи поверхности изделия можно определить по формуле [10]

$$P = \frac{2\pi \Gamma a_v}{\mu} \{1 - \Phi(\mu d)\}, \quad (6)$$

где a_v — активность, приходящаяся на единицу объема;

Γ — гамма-постоянная изотопа;

μ — коэффициент ослабления;

$\Phi(\mu d)$ — функция Кинга.

В качестве примера проведен расчет наведенной активности для строительной стали, основными составляющими которой являются железо и углерод. При расчете были приняты следующие данные: максимальная энергия в спектре тормозного излучения бетатрона $E_{\gamma \max} = 32$ Мэв; мощность дозы тормозного излучения $P = 200$ рад/мин·м; фокусное расстояние $r = 1,5$ м; половинный угол расходимости пучка тормозного излучения составляет 6° ; время облучения изделия $t_1 = 30$ мин; соответствующая этому времени толщина контролируемого изделия составляет 300 мм.

Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что время выдержки после облучения изделия в течение 30 мин. будет определяться γ -излучением, и для получения предельно допустимой дозы (2,8 мр/час) [7] должно составлять 33 мин.

Для экспериментального определения наведенной активности в строительной стали был применен бетатрон с максимальной энергией тормозного излучения $E_{\beta \max} 35$ Мэв. Мощность дозы на расстоянии 1 м от мишени составляла 230 рад/мин. Образец в виде диска диаметром 2 см, толщиной 2 мм помещался на расстоянии 2 м и облучался в течение времени $t_1 = 8$ мин. Результаты измерений суммарной активности с помощью газоразрядного счетчика в свинцовом домике представлены

Таблица 2

Поток квантов, падающих на поверхность	Поверхность облучаемого участка	Максимальный пробег частиц		Число атомов в облучаемом участке		Суммарная наведенная активность	Мощность дозы на поверхности созд. β -излуч.	Мощность дозы вблизи поверхности от γ -излучения	Время выдержки
		$E_{\beta \max} = 0,968$ Мэв	$E_{\beta \max} = 2,7$ Мэв	C^{12}	Fe^{54}				
$\frac{кв}{см^2сек}$	$см^2$	$см$	$см$	$\frac{расп}{сек}$		$\frac{рад}{сек}$	$\frac{p}{сек}$	мин	
$5,33 \cdot 10^8$	1000	0,055	0,156	$4,32 \cdot 10^{22}$	$1,5 \cdot 10^{26}$	$1,97 \cdot 10^7$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	0,80	33

на рис. 1. Эффективность счетчика по отношению к γ -квантам составляла 0,4%, геометрический фактор — 0,095. Число γ -квантов, испускаемое образцом непосредственно после облучения, составило $3,14 \cdot 10^6$ кв/см²·сек, активность, приходящаяся на единицу объема, — $a_v = 0,067$ мкюри.

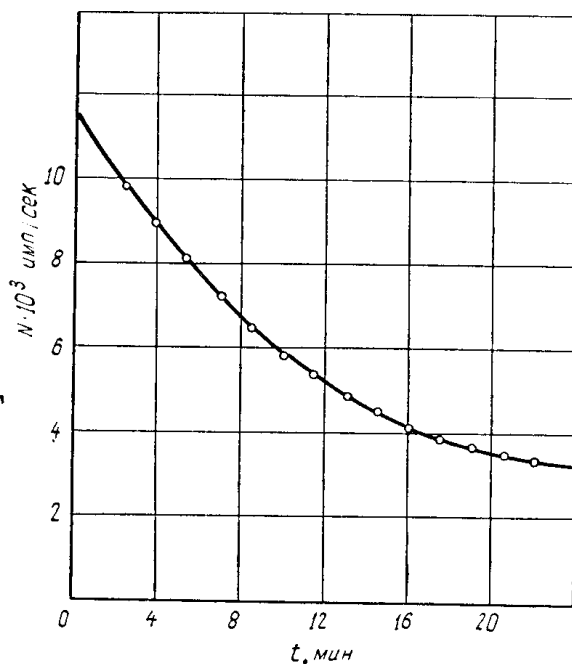


Рис. 1. Зависимость скорости счета от облученного образца от времени после облучения.

Мощность дозы от образца, определенная по формуле (6), составила 0,139 р/час. Пересчет экспериментальных данных на условия, используемые при расчете, дает величину мощности дозы 1,77 р/час.

Суммарная измеренная активность по β -излучению составляла $1,15 \cdot 10^6$ расп/сек. Пересчет экспериментальных данных на расчетные условия дает величину суммарной активности по β -излучению $a = 1,23 \cdot 10^8$ расп/сек.

Расхождения между расчетными и экспериментальными значениями объясняются различием в максимальных энергиях тормозного излучения, принятого и используемого в эксперименте, ошибкой в определении эффективности счетчика, погрешностями в определении сечений реакции и их порогов, а также возможным наличием примесей в облучаемом образце.

Экспериментальные данные подтверждают образование достаточно высокой наведенной активности при дефектоскопии стальных изделий с помощью тормозного излучения бетатрона и необходимости установления времени выдержки после облучения по условиям техники безопасности. Время выдержки может быть сведено к нулю за счет сокращения времени пребывания в поле излучения.

На внутренней поверхности облучаемого изделия величина наведенной активности будет зависеть от толщины облучаемой конструкции. Проведенные нами расчеты показывают, что мощности дозы как по γ -излучению, так и по β -излучению для толщины стали, равной 300 мм, будут ниже предельно допустимых.

При дефектоскопии изделий из легированных сталей суммарная наведенная активность, согласно табл. 1, будет возрастать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фотоядерные реакции. Сб. статей под редакцией Р. Л. Баринского, У. Я. Маргулис. М., ИЛ, 1953.
 2. В. Рицлер. Введение в ядерную физику. М., ИЛ, 1968.
 3. Katz L., Johus H., Backer R. G. Phys Rev 82, 271, 1951.
 4. Sher R., Halpern I., Mann A. K. Phys Rev 84, 387, 1951.
 5. Н. Н. Шумиловский, Л. В. Мельтцер. Радионуклидные методы автоматического контроля состава сложных сред. М.-Л., «Энергия», 1934.
 6. Радиационная дозиметрия. Под ред. Хайна и Браунелла. М., ИЛ, 1932.
 7. Инструкция по работе с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений в научных учреждениях. М., Изд-во АН СССР, 1963.
 8. О. В. Богданкевич, Ф. А. Николаев. Работа с пучком тормозного излучения. М., Атомиздат, 1964.
 9. Е. И. Долгирев, П. И. Малеев, В. В. Сидоренко. Детекторы ядерных излучений. Л., Судпромгиз, 1961.
 10. С. Н. Ардашников, С. М. Гольдин и др. Защита от радиоактивных излучений. М., Металлургиздат, 1934.
-