

Активация заряженными частицами деталей машин и механизмов как основа метода непрерывного контроля износа

В. И. ПОСТНИКОВ, В. Я. МОИСЕЕВ

УДК 621.039.85

В МВТУ им. Баумана разработан метод определения износа машин и механизмов с помощью радиоактивных изотопов (дифференциальный метод радиоактивных индикаторов), позволяющий непрерывно контролировать износ при стендовых испытаниях и в обычных эксплуатационных условиях. При этом количество радиоактивного вещества, образующегося на изучаемых деталях, настолько мало, что не требуется никаких мер радиационной защиты.

Износ определяется по уменьшению активности поверхностного слоя (в линейных единицах) путем сопоставления результатов измерения относительных количеств радиоактивного вещества на поверхности детали и на эталонных образцах, облученных одновременно с деталью.

Активация исследуемых и эталонных образцов осуществляется путем их облучения пучком заряженных частиц, ускоряемых на циклотроне. Состав радиоактивных изотопов и соотношение количества радиоактивных веществ, образующихся при этом, зависят от вида и энергии заряженных частиц активируемого металла, а также от времени, прошедшего после активации. Варьируя указанные факторы, можно в известных пределах получать оптимальные величины усредненного периода полураспада и наиболее подходящие для регистрации энергии γ -излучения.

Определение основных параметров активации деталей заряженными частицами. При исследовании износа разработанным методом необходимо знать следующие основные параметры активации:

- 1) количество заряженных частиц, необходимых для получения заданной активности детали;
- 2) состав образующейся смеси радиоактивных изотопов;
- 3) глубину активированного слоя.

Эти параметры проверяются и уточняются экспериментально. Авторы рассчитывали указанные параметры для деталей из легированного чугуна при их облучении дейтонами энергией 13,4 Мэв. Полученные результаты можно сопоставить с экспериментальными данными.

Количество радиоактивных веществ в детали (например, гильзе цилиндра двигателя) зависит от накопления различных изотопов, образующихся при взаимодействии дейтонов с ядрами отдельных элементов, содержащихся в легированном чугуне, химический состав которого следующий: 94,7 вес.% Fe; 2,82 вес.% C; 0,82 вес.% Mn; 0,18 вес.% V; 0,16 вес.% Cr; 0,07 вес.% Ti; 0,05 вес.% Ni; 0,098 вес.% P; 0,076 вес.% S.

Как показывает опыт работы, при этом следует учитывать реакции, продуктами которых являются радиоактивные изотопы с периодом полураспада свыше 1 ч. Это связано с тем, что за 24 ч (т. е. за минимальное время между окончанием активации и началом исследования) количество образовавшихся радиоактивных изотопов с периодом полураспада менее 1 ч будет примерно в $1,58 \cdot 10^7$ раз меньше первоначального и им можно пренебречь.

Данные о значениях выходов реакций (d, p) на один дейтон получены в результате расчетов по полумпирической формуле Максимова [1]. Значения для других реакций рассчитаны по известным формулам.

Выход радиоактивных изотопов B на один акт взаимодействия с учетом содержания стабильных изотопов определялся по формуле (мкюри/мка·ч)

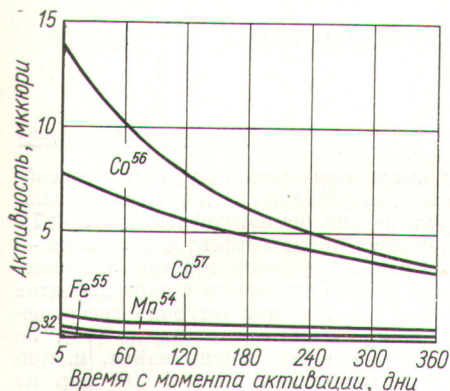
$$B = 1,15 \cdot 10^4 \frac{B_1 K_1 K_2}{T_{1/2}}, \quad (1)$$

где B_1 — выход радиоактивного изотопа, ядер/дейтон; $T_{1/2}$ — период полураспада радиоактивного изотопа, ч; K_1 — содержание стабильного изотопа в природной смеси, образующей элемент, ат.%; K_2 — содержание элемента в легированном чугуне, ат.%. Результаты расчетов представлены в таблице.

Количественное изменение изотопного состава в зависимости от времени показано на рисунке. Интенсивность γ -излучения, создаваемого смесью образовавшихся изотопов, определялась эксперимен-

Выходы ядерных реакций при активации легированного чугуна дейтонами энергией 13,4 Мэв

Реакция	Порог, Мэв	Выход	
		ядер/дейтон	мкюри/мка·ч
Fe ⁵⁴ (d, p) Fe ⁵⁵	—	$5,8 \cdot 10^{-4}$	0,14
Fe ⁵⁴ (d, n) Co ⁵⁵	—	$2,4 \cdot 10^{-4}$	77
Co ⁵⁵ $\rightarrow$ Fe ⁵⁵	—	—	0,056
Fe ⁵⁴ (d, α) Mn ⁵²	—	$4,5 \cdot 10^{-5}$	1,7
Fe ⁵⁶ (d, n) Co ⁵⁷	—	$8,6 \cdot 10^{-4}$	10,78
Fe ⁵⁶ ($d, 2n$) Co ⁵⁶	7,9	$1,7 \cdot 10^{-4}$	10,3
Fe ⁵⁶ (d, α) Mn ⁵⁴	—	$8,4 \cdot 10^{-5}$	1,1
Fe ⁵⁷ (d, n) Co ⁵⁸ *	—	$4,2 \cdot 10^{-5}$	10
Fe ⁵⁷ (d, n) Co ⁵⁸	—	$1,9 \cdot 10^{-5}$	0,03
Fe ⁵⁷ ($d, \alpha n$) Mn ⁵⁴	2,0	$6,5 \cdot 10^{-6}$	0,002
Fe ⁵⁸ (d, p) Fe ⁵⁹	—	$6,9 \cdot 10^{-5}$	0,02
Fe ⁵⁸ (d, α) Mn ⁵⁶	—	$4,5 \cdot 10^{-5}$	5,5
C ¹³ (d, p) C ¹⁴	—	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Mn ⁵⁵ ($d, 2n$) Fe ⁵⁵	3,4	$6,8 \cdot 10^{-4}$	0,025
V ⁵¹ ($d, 2n$) Cr ⁵¹	3,9	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Cr ⁵⁰ (d, p) Cr ⁵¹	—	$6,1 \cdot 10^{-4}$	0,0071
Cr ⁵⁰ (d, α) V ⁴⁸	—	$2,3 \cdot 10^{-4}$	0,005
Cr ⁵² ($d, 2n$) Mn ⁵²	8,6	$5,4 \cdot 10^{-5}$	0,6
Cr ⁵³ (d, n) Mn ⁵⁴	—	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Cr ⁵⁴ ($d, 2n$) Mn ⁵⁴	4,6	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Ti ⁴⁶ (d, α) Se ⁴⁴ *	—	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$
Ti ⁴⁶ (d, α) Se ⁴⁴	—	$7 \cdot 10^{-5}$	0,26
Ti ⁴⁷ (d, n) V ⁴⁸	—	$5,2 \cdot 10^{-4}$	0,009
Ti ⁴⁸ (d, n) V ⁴⁹	—	$5,2 \cdot 10^{-4}$	0,044
Ti ⁴⁹ (d, α) Se ⁴⁷	—	$2,3 \cdot 10^{-4}$	0,014
Ni ⁸⁸ (d, p) Ni ⁸⁹	—	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-8}$
Ni ⁵⁸ (d, α) Co ⁵⁶	—	$2,3 \cdot 10^{-4}$	0,005
Ni ⁶⁰ (d, n) Cu ⁶¹	—	$3,7 \cdot 10^{-4}$	1,7
Ni ⁶² (d, α) Co ⁶⁰	—	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Ni ⁶⁴ (d, p) Ni ⁶⁵	—	$5,4 \cdot 10^{-4}$	0,13
Ni ⁶⁴ ($d, \alpha n$) Co ⁶¹	1,6	$2,3 \cdot 10^{-4}$	0,09
P ³¹ (d, p) P ³²	—	$6,2 \cdot 10^{-4}$	0,31
S ³⁴ (d, p) S ³⁵	—	$7,4 \cdot 10^{-4}$	0,002
S ³⁴ (d, α) P ³²	—	$8,2 \cdot 10^{-4}$	0,009



Изменение состава смеси радиоактивных изотопов, полученной при активации легированного чугуна дейтонами.

тально и по известным формулам. Предельные величины активности, допускаемые для работы в обычных производственных условиях, зависят от степени радиотоксичности смеси радиоактивных изотопов и при работах с деталями из чугуна и стали не должны превышать 10 мкюри.

Пробег дейтонов в легированном чугуне определялся по формуле, предложенной в работе [2]:

$$R(E_a) = \frac{J_A^2}{Z_a^2 (Z_A/A)} F(y), \quad (2)$$

где $R(E_a)$ — пробег заряженных частиц с начальной энергией E_a , мэ/см²; J_A — средний потенциал возбуждения элемента, кэв; a — массовое число заряженной бомбардирующей частицы; Z_a — заряд частицы; Z_A/A — отношение заряда атомов элемента к его массовому числу; $F(y)$ — функция от безразмерной величины y :

$$y = \frac{E_a}{aJ_A}. \quad (3)$$

Для чугуна, являющегося сплавом различных элементов, значение J_A может быть определено как величина $J_{\text{сред}}$, подчиняющаяся в первом приближении правилу аддитивности, и получено по формуле

$$J_{\text{сред}} = \frac{\sum (J_A K_2)}{\sum K_2}. \quad (5)$$

При этом величину J_A для элементов, входящих в состав чугуна, определяем по данным работы [2] или по приближению Блоха [3].

В результате преобразований получим

$$R(E_a) = \frac{2,4 J_{\text{сред}}^{1/4}}{Z_a^2 (Z_A/A) a^{3/4}} E_a^{7/4}. \quad (5)$$

Подставляя в формулу (5) найденные значения $J_{\text{сред}} = 0,259$; $a = 2$; $Z_a = 1$; $(Z_A/A)_{\text{сред}} = 0,470$, находим $R(13,4) = 202$ мэ/см², что соответствует глубине активации 285 мк.

Количество дейтонов (мка·ч), необходимое для получения 10 мкюри через t дней, находим по формуле

$$L_d = \frac{10}{A_t}, \quad (6)$$

где A_t — активность смеси на 1 мка·ч дейтонов через t дней после активации, мкюри (определяется по графику, приведенному на рисунке).

Идентификация радиоактивных изотопов и анализ результатов исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) основными радиоактивными изотопами, образующимися при активации легированного чугуна дейтонами, являются Co^{56} , Co^{57} , Mn^{54} , Fe^{55} ;

2) основные линии γ -излучения Co^{56} (0,845 и 1,24 Мэв) и Mn^{54} (0,835 Мэв) достаточно жесткие, что позволяет измерять износ через стенки деталей машин и механизмов.

Эксперимент. Образцы и изнашивающиеся детали из легированного чугуна активировались на 120-сантиметровом циклотроне при $E_d \approx 13,4$ Мэв. В процессе облучения измерялся ток пучка.

Измерения γ -спектров проводились в Научно-исследовательском институте ядерной физики МГУ с помощью сцинтилляционного спектрометра с кристаллом NaJ(Tl) (10×60 мм), смонтированного на ФЭУ-29, и анализатора импульсов АИ-100 не ранее чем через 10 дней после облучения деталей. Были выделены линии γ -излучения с энергиями, равными 0,51; 0,83 и 1,19 Мэв.

В качестве детекторов γ -излучения при регистрации излучения от активированных деталей использовались как газоразрядные, так и сцинтилляционные счетчики.

Для учета влияния распада радиоактивных изотопов на результаты определения износа были проведены контрольные эксперименты в условиях, аналогичных условиям работы на исследуемом двигателе.

Толщина слоя, в котором образовывались радиоактивные изотопы, определялась путем последовательной шлифовки поверхности эталонных образцов. При этом периодически через 3–5 мк измеряли толщину шлифованного слоя и скорость счета от образца.

Скорости счета N_0 при регистрации излучения от смеси радиоактивных изотопов, образовавшихся после облучения, сравнивались с данными, полученными для Mn^{54} , Fe^{55} и Co^{57} по известным формулам. При этом учитывалось ослабление γ -излучения чугуна толщиной 52 мм [4].

Из результатов сравнения данных теоретически рассчитанной N_p и экспериментально найденной N_0 скоростей счета через 10 дней после активации следует, что $N_p = 13\,900$ имп/мин, $N_0 = 14\,040 \pm 37$ имп/мин, отклонение составляет 1%.

По теоретическим данным глубина активации должна быть равна 285 мк, экспериментально найденное значение 244–280 мк.

Проведенное сравнение показывает, что результаты расчетов при определении параметров активации хорошо совпадают с экспериментальными данными, а разработанный метод позволяет значительно расширить работы с применением радиоактивных изотопов в обычных производственных условиях.

Поступило в Редакцию 22/X 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. З. Максимов. «Атомная энергия», 10, 260 (1961),
2. М. З. Максимов. ЖЭТФ, 37, 127 (1959).
3. Г. Бете, Ю. Ашкинен. Экспериментальная ядерная физика. Под ред. Э. Сегре. М., Изд-во иностр. лит., 1956.
4. В. И. Постников. «Изотопы в СССР», № 3, 11 (1966).