

**Виктор Иванович БОЧЕНИН** —  
профессор кафедры энергетики  
и технологии металлов

Курганского государственного университета,  
доктор технических наук

УДК 620.179.15

**ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ ЖАРСТОЙКОСТИ  
АЛЮМИНИЕВОГО ПОКРЫТИЯ ПОСЛЕ ДРОБЕСТРУЙНОЙ  
ОБРАБОТКИ ПО РЕГИСТРАЦИИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,  
ВОЗБУЖДАЕМОГО БЕТА-ЧАСТИЦАМИ РАДИОНУКЛИДА  $^{147}\text{Pm}$**

*АННОТАЦИЯ.* В статье изложен ядерно-физический способ контроля жаростойкости алюминиевого покрытия после дробеструйной обработки поверхности изделия, на которую оно наносится. Опробована применимость способа для контроля жаростойкости алюминиевого покрытия на лопатках газовых турбин.

*In the article the nuclear-physical way of the control of heat resistance of aluminium coating after shot blasting processing of the surface of a product, on which it is put described. The applicability of the way described for the control of heat resistance of aluminium coating on blades of gas turbines is tested.*

Широкое применение энергетических машин сопровождается повышением температур, при которых они работают. Воздействие окислительной газовой среды на поверхностный слой изделий приводит к развитию высокотемпературной коррозии, и в итоге — к их разрушению. Для защиты от коррозии на поверхностный слой наносят алюминиевое покрытие способом диффузионной металлизации [1]. В процессе эксплуатации изделий толщина покрытия со временем уменьшается и в итоге оно может полностью исчезнуть. В этом случае газовая среда воздействует непосредственно на поверхностный слой изделия, что сокращает срок его службы. Поэтому проблема контроля защитных свойств алюминиевого покрытия является актуальной и необходимой.

Известно [2], что дробеструйный наклеп создает в поверхностном слое металла микрорельеф, который влияет на прочность сцепления покрытия с подложкой. В связи с этим необходима информация о степени устойчивости его после дробеструйной обработки. С учетом изложенного нами разработан ядерно-физический способ контроля жаростойкости алюминиевого покрытия при дробеструйной обработке подложки, на которую оно наносится. Физическая сущность его основана в оценке удельной потери веса покрытия при окислительном процессе по измерению радиоизотопных параметров. С целью малой глубинности измерений поверхностный слой покрытия облучается ( $\beta$ -частицами радионуклида  $^{147}\text{Pm}$  и в геометрии отражения регистрируется тормозное излучение алюминия.

Начальный поток тормозного излучения после нанесения алюминиевого покрытия диффузионной металлизацией равен [3]

$$N_a = \hat{E}_i \cdot m_a \cdot Z^{0.7} \quad (1)$$

Аналогично, поток излучения после окислительного процесса

$$N_o = \hat{E}_i \cdot m_o \cdot Z^{0,7} \quad (2)$$

где  $\hat{E}_i$  — постоянный коэффициент, зависящий от энергии  $\beta$ -частиц;  $m_a$  — поверхностная плотность покрытия после диффузионной металлизации ( $\text{г}/\text{см}^2$ ),  $m_o$  — тоже, после выдержки образца в высокотемпературной среде;  $Z$  — атомный номер алюминия. Отношение (2) к (1) при сокращении постоянных ( $\hat{E}_i, Z$ ) примет вид

$$\frac{N_o}{N_a} = \frac{m_o}{m_a} \quad (3)$$

Из равенства (3) определяется ядерно-физическим способом поверхностная плотность покрытия после окислительного процесса ( $\text{г}/\text{см}^2$ )

$$m_o = m_a \cdot \frac{N_o}{N_a} \quad (4)$$

и удельная потеря веса его (жаростойкость)

$$W = m_a - m_o = \Delta m_a \quad (5)$$

Исследовали достоверность равенства (3), выполняя измерения весовым методом и ядерно-физическим способом. Готовили образцы из стали X25H20C2 (диаметр 60 мм, толщина 5). Предварительно взвешивали каждый образец без покрытия, определяя начальный вес ( $P_n$ ). Далее на поверхностный слой образцов наносили диффузионной металлизацией алюминиевое покрытие. Изменением продолжительности процесса диффузионного насыщения получали различное количество алюминия в покрытии. Затем образцы с покрытием взвешивали, определяя  $P_n$ . И по разности  $P_n - P_n$  рассчитывали вес покрытия в каждом случае  $P_o$ . Путем деления веса покрытий на площадь образцов ( $S = 28,4 \text{ см}^2$ )

находили поверхностную плотность  $\left( m_o = \frac{P_o}{S} \right)$ . Используя образец с максимальным весом покрытия ( $P_o$ ), рассчитывали изложенным способом величину  $m_o$ . Удельную потерю веса покрытий определяли по формуле (5).

Используя образцы с известными значениями  $m_o, m_o$ , выполняли измерения ядерно-физическим способом. Структурная схема регистрирующей установки приведена на рис. 1. Конструктивно она смонтирована в виде датчика, подключаемого с помощью кабеля к гамма-спектрометру БРА-6 (бескристалльный рентгеновский анализатор). Бета-частицами радионуклида  $^{147}\text{Pm 1}$  ( $E_\beta = 223 \text{ кэВ}$ , активность 0,5 10 Бк), изготовленного в виде кольца, облучается поверхностный слой покрытия 2. Тормозное излучение алюминия ( $E_{\text{max}} = 14 \text{ кэВ}$ ) регистрируется сцинтилляционным детектором 3. Для снижения фона перед входным окошком счетчика устанавливается алюминиевый фильтр 4. Сигнал с детектора подается в анализатор 5, на выходе которого поток тормозного излучения измеряется в виде скорости счета. Помещая образцы в датчик регистрирующей установки, облучая их поверхностный слой  $\beta$ -частицами, измеряли поток тормозного излучения ( $N_o, N_a$ ). Величину  $N_o$  измеряли от образца с максимальным весом покрытия  $m_o$ , рассчитывая по равенству (4)  $m_o$ , а по формуле (5) —  $\Delta m_o$ .

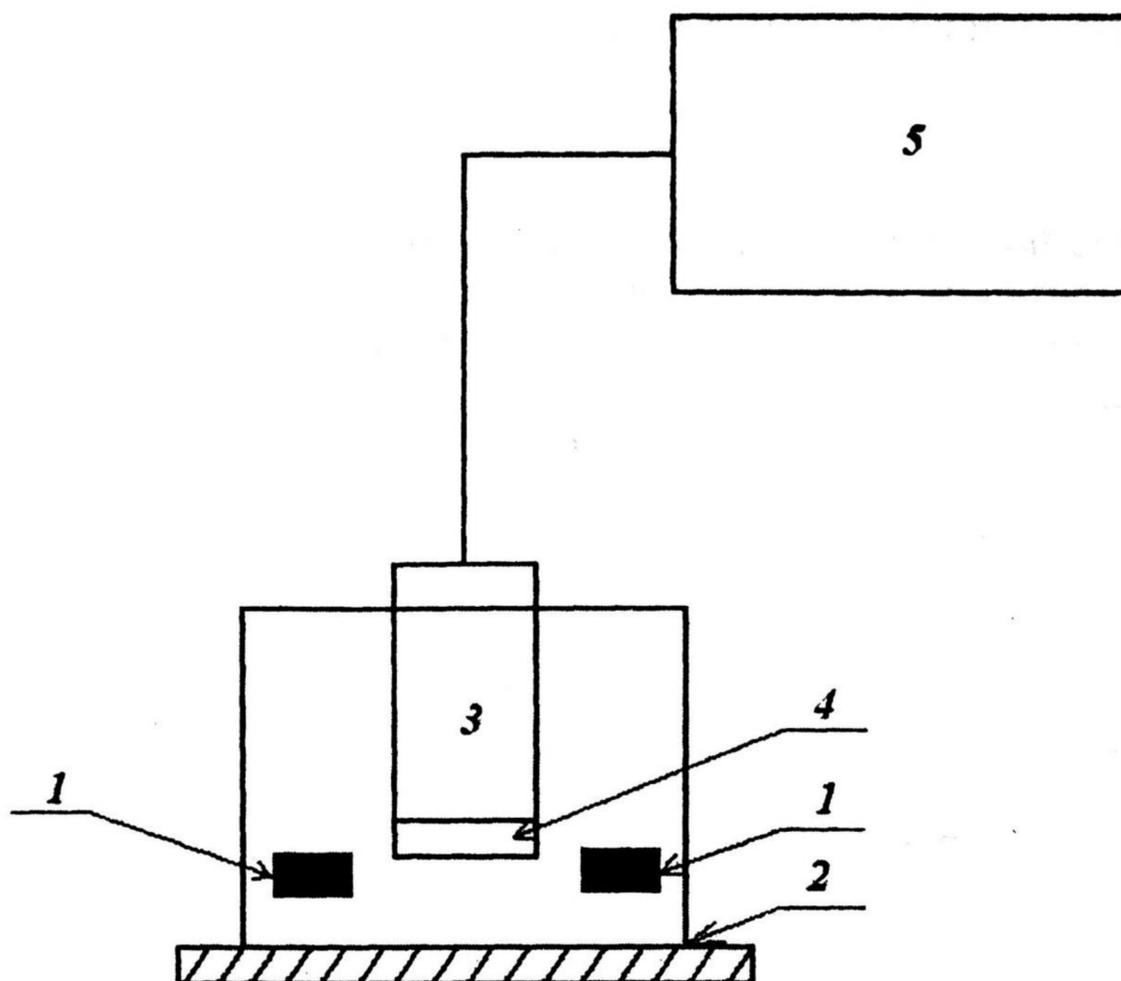


Рис. 1. Структурная схема регистрационной установки

В табл. 1 приведены сравнительные результаты измерений. Как видно, отклонения данных радиоизотопного способа от метода взвешивания оказались незначительными.

Таблица 1

## Сравнительные результаты определения жаростойкости

| № п/п образцов | Продолжительность диффузионной металлизации, мин | Метод взвешивания |  | Ядерно-физический способ                   |  | Отклонение  |   |
|----------------|--|-------------------|--|--|--|---|---|
|                |  | $\frac{m_o}{m_d}$ | $\Delta m_p \cdot 10^{-4}$ , г/см <sup>2</sup> | $\left(\frac{N_f - m_o}{N_d - m_d}\right)$ | $\Delta m_p \cdot 10^{-4}$ , г/см <sup>2</sup> | $\left(\frac{N_f - m_o}{N_d - m_d}\right) \cdot 10^3$ | $\Delta m_d - \Delta m_a$ , г/см <sup>2</sup> |
| 1              | 15   | 0,021             | 10,8   | 0,024                                      | 10,5   | +3  | -0,3  |
| 2              | 30   | 0,082             | 24,3   | 0,078                                      | 24,0   | -4  | 0,3   |
| 3              | 45   | 0,163             | 31,2   | 0,159                                      | 31,6   | -14   | +0,4  |
| 4              | 50   | 0,326             | 42,9   | 0,329                                      | 42,1   | +3  | -0,8  |
| 5              | 65   | 0,491             | 54,6   | 0,498                                      | 54,9   | +7  | +0,3  |
| 6              | 80   | 0,558             | 64,8   | 0,551                                      | 64,3   | -7  | -0,5  |
| 7              | 95   | 0,631             | 75,0   | 0,640                                      | 75,4   | +9  | +0,4  |

Исследовали влияние дробеструйного наклепа подложки на защитные свойства покрытия. Подбирали оптимальный режим дробеструйного наклепа, обеспечивающий наибольшую прочность сцепления подложки с покрытием. В эксперименте использовали три группы образцов стали X25H20C2 по семь штук в каждой. Поверхностный слой каждого перед нанесением покрытия обдували чугунной дробью диаметром 1 мм при давлении воздуха 6 атм. Меняя параметры дробеструйной обработки (расстояние от среза сопла до поверхности подложки, продолжительность обдува, угол наклона подложки), с помощью профилографа записывали микрорельеф поверхностного слоя. После этого наносили на него алюминиевое покрытие. Обработанные таким способом образцы помещали в печь с температурой нагрева 1000 °С, выдерживая 90 часов. После этого извлекали их из печи, очищая поверхностный слой от окалины. Помещая

каждый образец в датчик (рис. 1), изложенным способом измеряли поток тормозного излучения  $Al$  ( $N_o, N_d$ ), облучая поверхностный слой бета-частицами. Используя равенство (4), рассчитывали поверхностную плотность ( $m_p$ ). По формуле (5) определяли удельную потерю веса покрытия (жаростойкость). В табл. 2 приведены результаты эксперимента. Как видно, при расстоянии от среза сопла до поверхности подложки 120 мм получается наибольшая высота микрорельефа и, соответственно, наименьшая потеря веса покрытия. Продолжительность обдува в течение трех секунд также обеспечивает наибольшую жаростойкость и угол наклона подложки  $90^\circ$ .

Таблица 2

Влияние режимов дробеструйной обработки на рельеф поверхности и удельную потерю веса покрытия

| № п/п образцов | 1-я группа  |                          |  | 2-я группа                     |                          |  | 3-я группа                    |                          |  |
|----------------|---|--------------------------|--|--------------------------------|--------------------------|--|-------------------------------|--------------------------|--|
|                | Расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности, мм | Высота микрорельефа, мкм | $\Delta m_p \cdot 10^{-4}$ , г/см <sup>2</sup> | Продолжительность обработки, с | Высота микрорельефа, мкм | $\Delta m_p \cdot 10^{-4}$ , г/см <sup>2</sup> | Угол наклона обложки (градус) | Высота микрорельефа, мкм | $\Delta m_p \cdot 10^{-4}$ , г/см <sup>2</sup> |
| 1              | 50  | 10,4                     | 16,3   | 2                              | 14,1                     | 11,9   | 45                            | 10,3                     | 16,5   |
| 2              | 70  | 15,5                     | 11,2   | 3                              | 22,7                     | 2,7  | 50                            | 11,7                     | 14,4   |
| 3              | 120   | 21,7                     | 3,6  | 4                              | 18,8                     | 4,3  | 65                            | 14,1                     | 12,5   |
| 4              | 130   | 18,9                     | 4,5  | 5                              | 15,3                     | 11,2   | 70                            | 15,2                     | 11,2   |
| 5              | 150   | 16,1                     | 6,3  | 6                              | 14,2                     | 12,6   | 75                            | 16,7                     | 6,8  |
| 6              | 180   | 15,4                     | 11,2   | 7                              | 11,6                     | 14,8   | 80                            | 18,3                     | 4,3  |
| 7              | 200   | 11,5                     | 14,3   | 8                              | 10,2                     | 16,1   | 90                            | 21,5                     | 3,2  |

Использовали оптимальный режим дробеструйной обработки перед нанесением покрытия на поверхностный слой компрессорных лопаток турбин, изготовленных из стали X25H20C2. Для оценки защитных свойств покрытия разработали методику промышленного контроля. Измерения выполняли в двух вариантах. В первом использовали образец-свидетель, поверхность которого перед нанесением покрытия обрабатывали дробеструйным наклепом совместно с лопатками. Затем на поверхностный слой лопаток и образца-свидетеля наносили алюминиевое покрытие. Весовым методом определяли начальный вес покрытия в образце-свидетеле ( $P_o$ ), а ядерно-физическим способом — поток тормозного излучения ( $N_o$ ). В момент планового ремонта турбин, проработавших определенное время ( $t_1$ ), применяли второй вариант контроля. Поверхностный слой лопаток очищали от окалины и загрязнений. Радиоизотопный датчик (рис. 1) в выносном варианте устанавливали на поверхностный слой лопаток, облучая его  $\beta$ -частицами радионуклида и регистрируя с помощью гамма-спектрометра поток тормозного излучения ( $N_d$ ). Рассчитав параметр  $m_p$ , по формуле (4) определяли удельную потерю веса покрытия  $m_p$ , а по равенству (5) — жаростойкость ( $W_1$ ). Повторный контроль проводили во время второго планового ремонта ( $t_2$ ), определяя изложенным способом  $W_2$ . Затем рассчитывали среднюю скорость потери веса покрытия

$$\bar{V} = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \tag{6}$$

Результаты многократного контроля показали, что за период работы турбины в течение 2,5-3 месяцев поверхностная плотность покрытия по сравнению с начальной (после диффузионной металлизации) снижается до 40-50%.

#### *Выводы*

1. Разработан ядерно-физический способ оценки жаростойкости алюминиевого покрытия по регистрации тормозного излучения, возбуждаемого  $\beta$ -частицами радионуклида  $^{147}\text{Pm}$ .

2. Исследованиями установлено, что дробеструйный наклеп подложки обеспечивает снижение удельной потери веса покрытия, повышая его жаростойкость.

3. Промышленный контроль жаростойкости лопаток турбин позволяет оценить скорость выгорания покрытия и его надежность.

4. Достоинством предлагаемого способа является портативность регистрирующей аппаратуры, стабильность измерительного тракта и высокая экспрессность (результат выдается за 2-3 минуты).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камерон Дж., Роудс Дж. Применение радиоактивных источников в рентгеноспектрометрии. «Атомная техника за рубежом», 1962. № 2. С. 30-35.
2. Коломыцев П. Т. Жаростойкие диффузионные покрытия. М.: Металлургия, 1979. 269 с.
3. Морозов В. И., Шубина Н. Б. Наклеп дробью тяжело нагруженных зубчатых колес М.: Машиностроение, 1972. 103 с.

*Борис Антонович БЕЗУГЛЫЙ —  
доцент кафедры радиофизики,  
кандидат физико-математических наук*

*Сергей Игоревич ЧЕМОДАНОВ —  
преподаватель кафедры радиофизики,  
кандидат физико-математических наук*

*Татьяна Владимировна ШАЛЯ —  
студентка 2 курса физического факультета*

*Сергей Владимирович ШАЛЯ —  
студент 3 курса физического факультета*

УДК 544.722.22

### **ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ДАВЛЕНИЯ МОНОСЛОЯ ГЕКСАДЕКАНОЛА НА ВРЕМЯ ЗАДЕРЖКИ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ОТКЛИКА**

*АННОТАЦИЯ. Исследована зависимость времени задержки термокапиллярного (ТК) отклика слоя воды от площади, приходящейся на одну молекулу гексадеканола, нанесенного на ее свободную поверхность. На основе этой зависимости предложен способ контроля поверхностного давления монослоя ПАВ.*

*The dependence of the delay time of the thermocapillary (TC) response of a layer water on the area per molecule of hexadecanol that is charged liquid surface is studied. By using the above dependence the method of the evaluation of a surfactant monolayer surface pressure is proposed.*