

Нанесение покрытий осуществляется на каждой лопатке в обозначенных зонах по входной и выходной кромкам, а также при необходимости в прикорневой зоне лопатки. Общее время обработки определяется толщиной и площадью нанесения покрытия.



Рисунок 4 – Внешний вид лопатки паровой турбины с ЭИЛ покрытием на рабочей кромке

Материалы, из которых изготавливаются лопатки паровых турбин имеют в составе хром. Такие материалы могут в процессе термического воздействия образовывать трещины.

В Испытательном Центре ГНУ ИПМ было проведено исследование микроструктуры материала основы до и после нанесения износостойкого покрытия, полученного методом электроискрового легирования на лопатку паровой турбины.

Исследование микроструктуры проводили на световом микроскопе "MeF-3" фирмы "Reichert" (Австрия) при увеличении  $\times 100$ ,  $\times 200$ ,  $\times 500$ .

С рабочей части лопатки для исследования были взяты три образца: один образец исходного материала лопатки (до нанесения покрытия) и два образца после нанесения покрытия.

Результаты исследования при увеличении  $\times 500$  представлены на рисунке 5.

В результате анализа установлено, что микроструктура материала лопатки в процессе электроискрового легирования не меняется. Толщина переходного слоя не превышает 10 мкм.

Работы были проведены на Лукомльской ГРЭС под контролем лаборатории металлов и сварки. Нанесение покрытий осуществляли на кромки в неразлопаченом состоянии. Ротор турбины с лопатками находился на стапелях.

УДК 681.324

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Сычик В.А., Уласюк Н.Н., Солонович Е.И.

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Для бесконтактного контроля высоких постоянных напряжений путем оценки интенсивности излучаемых ими электростатических полей широко используются преобразователи электрических полей статического и динамического типа, которые, однако, обладают невысокой чувствительностью и разрешающей способностью.

Нанесение ЭИЛ покрытий осуществляли на лопатки с худшим состоянием кромок.



а



б

Рисунок 5 – Микроструктура основы в исходном состоянии (а) и образца с покрытием (б)

**Выводы.** Оборудование и технология ЭИЛ позволяет проводить ремонтные работы лопаток паровых турбин. Оборудование для ЭИЛ на основе источника питания с динамически изменяемой формой импульса тока позволяет сформировать покрытие из стеллитового материала без образования трещин в основном металле.

### Литература

1. Оборудование и технология электроискрового легирования для продления срока службы энергооборудования / В.В. Саранцев, А.В. Беляков, Ф.И. Пантеленко, Е.Л. Азаренко // Электронная обработка материалов. – № 50(5) – 2014. – С. 95–99.
2. Технология электроискрового легирования для повышения ресурса рабочих лопаток паровых турбин и оборудование для её реализации / А.В. Беляков, В.В. Саранцев, А.Н. Горбачев, Ф.И. Пантеленко, Е.Л. Азаренко, Б.Ф. Реутов // Электрические станции. – № 1. – 2016. – С. 30–34.

Нами разработан специальный миниатюрный преобразователь электрических полей (ПЭП) на основе полупроводниковых приборных структур, в котором существенно улучшены указанные параметры.

Типовая конструкция синтезированного полупроводникового преобразователя электрических

полей (см. рисунок 1) включает усилительный элемент, содержащий n-области входного и выходного электродов (истока и стока) и p-полупроводникового основания, на верхней стороне которого, т. е. на поверхности индуцированного p-канала, сформирован слой полярного диэлектрика с размещенным измерительным электродом и омическим выводом из проводящего материала. На измерительный электрод и всю оставшуюся сторону усилительного элемента нанесен слой нейтрального диэлектрика, на котором размещен экранирующий электрод из проводящего материала с внешним выводом. Приборная структура преобразователя помещена в экран, содержащий внутренний диэлектрический и наружный слой. Усилительный элемент имеет омические выводы от истока и стока, основание защищено окисным слоем SiO<sub>2</sub>. Измерительный и экранирующий электроды коммутируются на корпус контактной группой электронного коммутатора.

За основной параметр преобразователя взята удельная крутизна, которую находим из общего уравнения ВАХ

$$S = dJ_c / dU_{zu} = \frac{\mu_n \varepsilon_{ox} W}{2d_{ox} L}, \quad (1)$$

где  $\mu_n$  – подвижность основных носителей в канале;  $\varepsilon_{ox}$ ,  $d_{ox}$  – диэлектрическая проницаемость и толщина диэлектрического подзатворного слоя;  $W$ ,  $L$  – толщина и длина индуцированного канала.

Приняв отношение  $W/L = \text{const}$ , на базе (1) выбираем материал диэлектрического подзатворного слоя, который должен обладать высокими диэлектрическими свойствами ( $tg\delta, \varepsilon, TK\ell$ ). Этим требованиям удовлетворяет титанат бария с  $tg\delta = 0,03$  и  $\varepsilon \cong 100$ . Поскольку крутизна ВАХ структуры обратно пропорциональна толщине подзатворного слоя диэлектрика, то последняя определяется полной степенью изоляции измерительного электрода от канала и составляет 1-2 мкм.

Изменение заряда на измерительном электроде  $\Delta Q_3 = \varepsilon_{ан} E_x \Delta S_3$ , соответственно заряд во входной цепи МДП-триодной структуры и входное напряжение  $U_{вх.} = U_3$  возрастет на стадии экспонирования ( $\Delta Q_3^+, \Delta U^+$ ) и спадает на стадии экранирования ( $\Delta Q_3^-, \Delta U^-$ ). В общем случае ток в цепи измерительного электрода

$$i = \frac{dQ_3^+}{dt} + \frac{\Delta Q_3^-}{dt} \approx \frac{\Delta Q_3^+}{\Delta t_1} + \frac{\Delta Q_3^-}{\Delta t_2}, \quad (2)$$

где  $\Delta t_1 = t_{es}$  – время экспонирования измерительного электрода;  $\Delta t_2 = t_{ек}$  – время экранирования измерительного электрода;  $S_3$  – площадь измерительного электрода;  $\varepsilon_{ан}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость нейтрального диэлектрика.

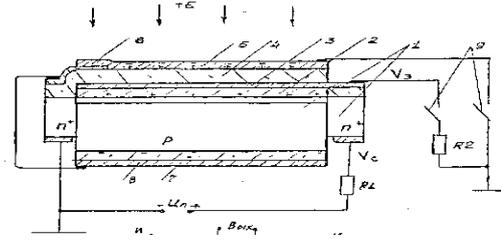


Рисунок 1 – Конструкция преобразователя электрических полей на основе МДП-элемента: 1 – усилительный МДП-элемент; 2, 7 – слои полярного диэлектрика; 4 – слой нейтрального диэлектрика; 6 – электрод; 8 – проводящий слой; 9 – контактные группы коммутатора; 3 – измерительный электрод

Для повышения чувствительности и точности ПЭП необходимо оптимизировать входной ток, поскольку  $U_{вх.} = iZ_{вх.}$ , где  $Z_{вх.} \cong R_2$  определяет постоянную времени входной цепи. С учетом того что

$$\Delta Q_3^+ = \Delta Q_3^- = Q_{эм} - Q_0 \cong Q_{эм}, \quad (3)$$

причем  $Q_0 \cong 0$ , условие (3) выполняется, если  $t_{ес} = \tau_1$ , а  $t_{ек} = \tau_2$ , где  $\tau_1$  – постоянная времени индуцирования на измерительном электроде максимально возможного для данного  $E_x$  заряда

$\Delta Q_3^+ = Q_{эм}$ , а  $\tau_2$  – постоянная времени считывания сигнала, соответствующая времени полной нейтрализации заряда на измерительном электроде на стадии экранирования ( $Q_3 = Q_0 \cong 0$ ). Поскольку входная цепь ПЭП имеет емкостной характер, то среднее значение тока

$$J_o = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \cong \frac{Q_{эм}}{\tau_1} (1 - e^{-\frac{T}{\tau_1}}) + \frac{Q_{эм}}{\tau_2} e^{-\frac{T}{\tau_2}} = Q_{эм} \left[ \frac{1 - e^{-T/\tau_1}}{\tau_1} + \frac{e^{-T/\tau_2}}{\tau_2} \right]. \quad (4)$$

Если  $\tau_1 = \tau_2$ , то  $J_o = Q_{эм} / \tau_1 \cong \frac{Q_{эм}}{T_0}$ , где  $T_0 = 1/f_0$

$= \tau_1 + \tau_2$ ;  $f_0$ ,  $T_0$  – оптимальная частота и период управляющего сигнала;  $\tau_1$  – определяется временем дипольной поляризации подзатворного диэлектрика, его объемом и для титаната бария  $\tau_1 \cong 10^{-3} \dots 10^{-4}$  с.  $\tau_2 \cong C_{вх.} R_2$ ,  $R_2 > 1$  кОм, где  $C_{вх.}$  – емкость входной цепи ПЭП.

Если в управляющую цепь ПЭП подведено напряжение  $U_{yc}$  с  $f_y = f_0$  и  $U_{cu} > 0$ , то в его выходной цепи формируется пропорциональное измеряемому электрическому полю напряжение

$$U_{вх.} = \mu U_{вх.} R_n / Z_{вх.} = SR_i \frac{R_1}{R_2} = KE_x \quad (5)$$

где  $R_i$  – сопротивление канала.

Синтезированный ПЭП обладает чувствительностью  $E_{min} = 0,85$  В/м и эффективно используется в устройствах контроля высоких постоянных напряжений.