

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.1>

УДК539.3; 531.787.5

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНДИКАТОРНОГО ПОЛИМЕРНОГО ОПТОВОЛОКОННОГО PEL-ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

А. А. Паньков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29

Статья поступила в редакцию 17 июня 2021 г.

Аннотация. Разработана математическая модель функционирования индикаторного полимерного пьезоэлектролюминесцентного (PEL) покрытия для диагностирования внешних механических воздействий – квазистатических вдавливаний жестких шаровых частиц. Представлен алгоритм численной обработки информативной интенсивности светового потока на выходе из оптического волокна встроенного в индикаторное покрытие оптоволоконного PEL-датчика. Численный анализ для случая одиночного воздействия выявил закономерности влияния значений шага спирали датчика на информативные части результирующих спектров интенсивности светового потока и распределения давления по длине спирали датчика. Выявлены информативные характерные точки графиков спектров давлений - точки максимумов, абсциссы и величины которых позволяют найти искомые значения радиуса и силы вдавливания жесткой шаровой частицы.

Ключевые слова: индикаторное полимерное покрытие, встроенный оптоволоконный датчик, механолюминесценция, механическое воздействие, численное моделирование.

Abstract. A mathematical model of the functioning of the indicator polymer piezoelectroluminescent (PEL) coating for diagnosing external mechanical effects - quasi-static pressing of rigid ball particles has been developed. The algorithm of numerical processing of informative intensity of light flux at the output from optical fiber built into indicator coating of optical fiber PEL-sensor is presented. A numerical

analysis for the case of single mechanical effect revealed the regularities of influence of the values of the sensor spiral pitch on the informative parts of the resulting spectra of light flux intensity and pressure distribution along the length of the sensor spiral. Informative characteristic points of pressure spectra plots were revealed; these are points of maxima, abscissa and values of which make it possible to find the desired values of radius and pressing force of a rigid ball particle.

Key words: indicator polymer coating, built-in fiber optic sensor, mechanoluminescence, mechanical impact, numerical simulation.

Введение

Индикация внешних механических воздействий типа вдавливаний и/или ударов жёстких частиц по несущим поверхностям авиационной техники является одной из актуальных задач мониторинга прочностных и аэродинамических характеристик элементов конструкций как при высокоскоростном ударе (кусочками бетонной крошки из-под переднего колеса при взлёте с взлётно-посадочной полосы, осколками снарядов и пуль в боевых ситуациях), так и при низкоскоростном ударе, например, градом [1]. Оптоволоконные датчики, в частности, на основе брэгговских решеток эффективно используются для диагностики напряженного состояния и дефектоскопии полимерных композитных изделий авиационного назначения [2,3].

Цель – разработка электромеханической модели и изучение закономерностей функционирования индикаторного полимерного покрытия со встроенным оптоволоконным PEL-датчиком [4,5] для диагностирования механических воздействий в квазистатическом приближении теории электроупругости.

1. Индикаторное PEL-покрытие

Индикаторное полимерное PEL-покрытие – слой полимера постоянной толщины со встроенным в него оптоволоконным PEL-датчиком (рис.1,а) с укладкой в плоскости покрытия в виде спирали Архимеда (рис.1,б,в). В общем

случае, «многоточечное» распределенное механическое воздействие (рис.1,в) на внешнюю поверхность индикаторного PEL-покрытия моделируем квазистатическим вдавливанием (низкоскоростным ударом) в индикаторное покрытие множества n монодисперсных жестких шаровых частиц под действием различных нормальных к поверхности покрытия сил (или импульсов сил, энергий ударов) p_1, \dots, p_n , которые являются реализациями случайной величины P , где n – число частиц. В целом, распределенное воздействие на индикаторное PEL-покрытие характеризуется искомым спектром сил $f_p(p)$ – функцией плотности распределения случайной величины P . Считаем, что полидисперсные зоны возмущений (рис.1,в) ограничены некоторым малым граничным значением возмущения (давлением $\sigma_0 \approx 0$) и не пересекаются между собой, радиусы этих зон r_1, \dots, r_n пропорциональны соответствующим значениям сил вдавливания p_1, \dots, p_n частиц.

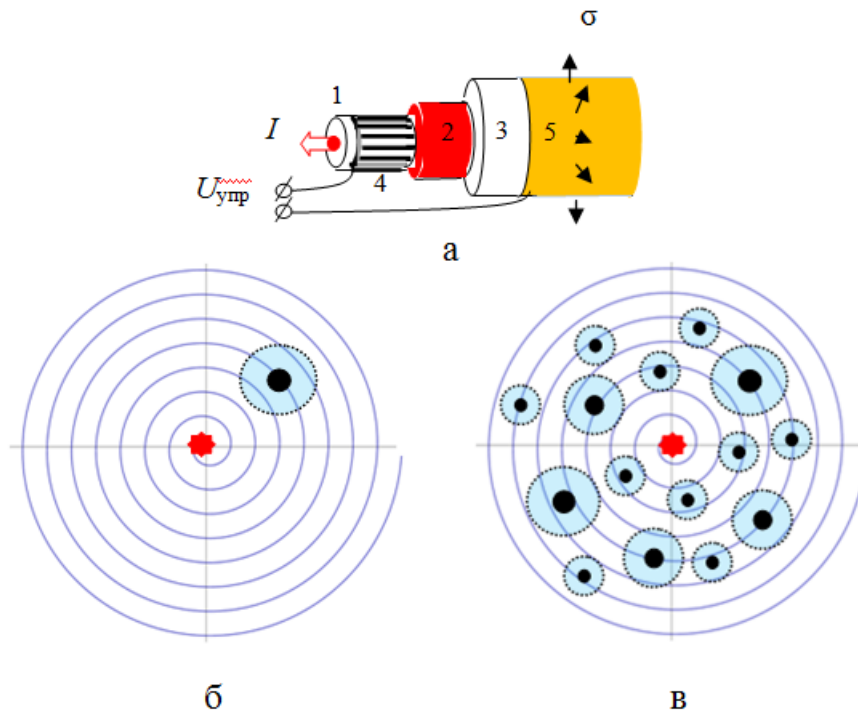


Рис. 1. Оптоволоконный PEL-датчик (а) внутри индикаторного покрытия (б,в) при одиночном (б) и множественном (в) вдавливаниях жёстких шаровых частиц, пятно контакта (чёрный круг) в центре «зоны возмущения» (голубой круг), фотодетектор – в центре спирали (красная точка).

Спектр $f_{\sigma}(\zeta)$ распределения давления $\sigma(\xi)$ по линейной координате $\xi \in (0;l)$ вдоль спирали датчика длиной l находим по результатам измерения функции интенсивности светового потока $I(U_{\text{упр}})$ на выходе из оптоволоконна PEL-датчика как решение интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода

$$I(U_{\text{упр}}) = l \int_{-\infty}^{\infty} K_1(U_{\text{упр}}, \zeta) f_{\sigma}(\zeta) d\zeta \quad (1)$$

с ядром $K_1(U_{\text{упр}}, \zeta) = i_0(a_1 U_{\text{упр}} + a_2 \zeta)$, где $i_0(U_{\text{люом}})$ – известная функция плотности интенсивности светоотдачи на единицу длины люминесцентного слоя в зависимости от приложенного к нему электрического напряжения $U_{\text{люом}}$, $U_{\text{упр}}$ – управляющее электрическое напряжение на электродах, $a_{1,2}$ – передаточные коэффициенты и l – длина спирали датчика [4,5]. Далее, искомый спектр сил $f_p(p)$ находим как решение интегрального уравнения

$$f_{\sigma}(\zeta) = \int_{-\infty}^{\infty} K_2(\zeta, p) f_p(p) dp, \quad K_2(\zeta, p) = \partial l_{\zeta} / (l \partial \zeta) \quad (2)$$

с использованием найденного ранее спектра давления $f_{\sigma}(\zeta)$ (1), где $l_{\zeta} = l_{\zeta}(\zeta, p)$ – суммарная длина множества различных участков спирали датчика, для которых выполняется условие $\sigma < \zeta$ для значений реализующейся функции давления $\sigma(\xi)$, выполняется равенство $K_2(\zeta, 0) = \delta(\zeta)$ – дельта-функция Дирака. Функцию $l_{\zeta} = l_{\zeta}(\zeta, p)$ находим с учетом шага спирали Δ_p по известной зависимости давления $\zeta = \zeta(p, r)$ в зоне возмущения от значений силы p и радиальной координаты r .

Локальность зон возмущений индикаторного покрытия (рис.1,б,в), в частности, при вдавливании одиночной частицы (рис.1,б) позволяет выделить информативную часть

$$I_1(U_{\text{упр}}) = l_1' \int_{-\infty}^{\infty} K_1(U_{\text{упр}}, \zeta) f_{\sigma 1}(\zeta) d\zeta \quad (3)$$

из результирующего спектра интенсивности светового потока на выходе из оптоволоконной спирали PЕL-датчика $I(U_{\text{упр}}) = I_1(U_{\text{упр}}) + (1 - \nu_1)li_0(a_1U_{\text{упр}})$, где спектр $f_{\sigma 1}(\zeta)$ входит в разложение полного спектра давления $f_{\sigma}(\zeta) = \nu_1 f_{\sigma 1}(\zeta) + (1 - \nu_1)\delta(\zeta)$, $\nu_1 = l'_1/l$ – относительная доля суммарной «возмущенной» длины датчика, $l'_1 = \sum_0^n l_k$ – сумма длин дуг l_k спирали датчика в зоне возмущения индикаторного покрытия.

2. Численное моделирование одиночного воздействия

Напряженно-деформированное состояние в объеме зоны возмущения индикаторного покрытия моделируем известным аналитическим решением [6] осесимметричной задачи о вдавливании абсолютно жесткого шара радиусом R в упругое полупространство. Упругие свойства полимерного покрытия (силиконовая резина) заданы модулем Юнга $E = 4\text{МПа}$ и коэффициентом Пуассона $\nu = 0.45$, радиус частицы $R = 5\text{мм}$, длина спирали датчика $l = 1\text{м}$. Считаем, что для «S-образной» функции $i_0(U_{\text{люм}})$ (1) начало свечения происходит при $U_{\text{люм}} > U_{\text{мин}}$, насыщенное свечение ($i_0 = i_{\text{макс}}$) при $U_{\text{люм}} \geq U_{\text{макс}}$, где $U_{\text{мин}} = 3\text{В}$, $U_{\text{макс}} = 6\text{В}$ [5]. Результаты численного моделирования информативных спектров $I_1(U_{\text{упр}})$, $f_{\sigma 1}(\zeta)$ для случая вдавливания одиночной жесткой шаровой частицы (рис.1,б) силой $p_1 = 1\text{Н}$, когда центр кругового «пятна контакта» частицы на поверхности индикаторного покрытия расположен над осью спирали датчика даны на рис.2, рис.3, где интенсивность I_1 обусловлена интегральной люминесценцией лишь на множестве дуг спирали датчика в круговой зоне возмущения индикаторного покрытия, $I_{1\text{макс}} = \nu_1 I_{\text{макс}}$ – максимальное значение интенсивности I_1 при насыщенном свечении всех этих дуг с учетом равенства $I_{\text{макс}} = i_{\text{макс}} l$.

Наличие «неинформативного» импульса при $\zeta \approx 0$ на графике спектра давления $f_{\sigma 1}(\zeta)$ (рис.3) обусловлено наличием значительной периферийной области в зоне возмущения, где $\sigma \approx 0$. Каждый информативный импульс в

спектре давления $f_{\sigma_1}(\zeta)$ (рис.3) и, как следствие, в спектре $f_{\sigma}(\zeta)$ формируется на соответствующей паре дуг с общей длиной $2l_k$, расположенных в зоне возмущения симметрично относительно дуги с номером $k = 0$, где $k = 0, 1, 2, \dots, n$.

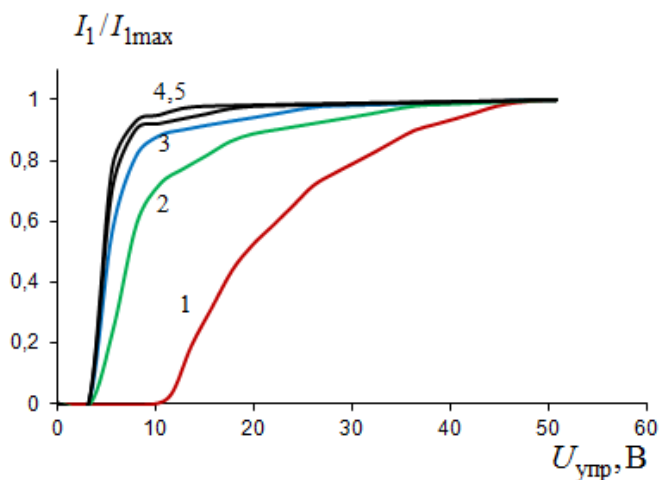


Рис.2. Интенсивности света I_1 в зависимости от управляющего электрического напряжения $U_{упр}$ при шаге спирали $\Delta_p = 1$ мм (1), 2 мм (2), 3 мм (3), 4 мм (4), 5 мм (5).

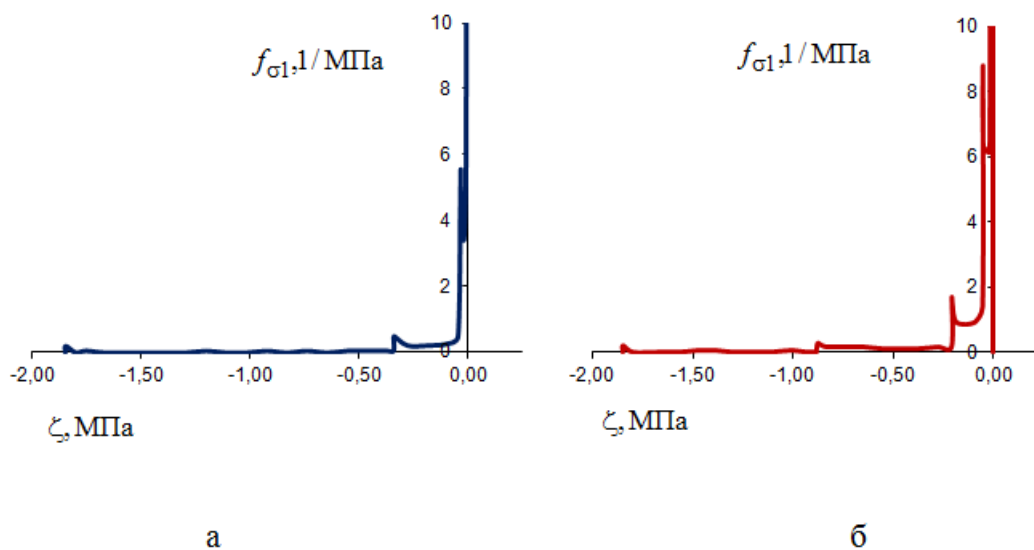


Рис.3. Спектр давления $f_{\sigma_1}(\zeta)$ при шаге спирали $\Delta_p = 5$ мм (а), 3 мм (б).

Значение $k = 0$ соответствует «центральной» дуге (диаметру зоны возмущения), над которой расположен центр пятна контакта, а значение $k = n$ – периферийной паре дуг (хорд) вблизи круговой границы зоны возмущения. Последовательность значений абсцисс σ_k для вершин импульсов (рис.3) образует последовательность значений давления σ_k на различных расстояниях

$\Delta\rho_k = k\Delta\rho$ от центра пятна контакта, где $\Delta\rho$ – известное значение шага спирали, выполняется неравенство $|\sigma_{k+1}| < |\sigma_k|$. Информативное количество n этих импульсов на графике спектра давления $f_{\sigma 1}(\zeta)$ (рис.3) увеличивается с уменьшением шага спирали $\Delta\rho$ и, в целом, характеризует радиус зоны возмущения $r_* = n\Delta\rho$, обусловленный искомыми значениями радиуса R и силы p_1 вдавливания шаровой частицы в индикаторное покрытие. При достаточно большом количестве n информативных импульсов становится возможным достаточно точная аппроксимация реальной зависимости давления $\sigma(\Delta\rho)$ от удаления от центра пятна контакта $\Delta\rho$ по найденным точкам $\Delta\rho_k, \sigma_k$ этой зависимости, что позволяет повысить точность нахождения величин R, p_1 .

Вид спектра $f_{\sigma 1}(\zeta)$ (рис.3) обуславливает появление последовательности информативных импульсов на графике полного спектра давления $f_{\sigma}(\zeta)$ (6) дополнительно к импульсу $(1 - \nu_1)\delta(\zeta)$, обусловленного расположением значительной части спирали датчика вне зоны возмущения индикаторного покрытия. Геометрическая вероятность

$$\kappa_k \equiv P(\sigma \in \sigma_k) \approx 2l_k / l, \quad \kappa_k = \int_{\sigma_k} f_{\sigma}(\zeta) d\zeta \quad (4)$$

вычисляется через интегрирование спектра $f_{\sigma}(\zeta)$ по области σ_k информативного k -го импульса. Упорядоченное множество значений длин $l_k = \kappa_k l / 2$ «дуг возмущений» различных витков спирали датчика, найденных с использованием величин κ_k (4), позволяет диагностировать реальную форму зоны возмущения и, как результат, уточнить форму вдавливаемой частицы.

Заключение

Разработана математическая модель и алгоритм диагностирования внешних механических воздействий – квазистатических вдавливаний жестких шаровых частиц в индикаторное полимерное покрытие по результатам численной

обработки измеряемой интенсивности светового потока $I(U_{\text{упр}})$ на выходе из оптического волокна встроенного PDL-датчика. Численный анализ (рис.2, рис.3) выявил закономерности влияния значений шага спирали Δ_p на информативные части $I_1(U_{\text{упр}})$, $f_{\sigma 1}(\zeta)$ результирующих спектров интенсивности светового потока $I(U_{\text{упр}})$ и давления $f_{\sigma}(\zeta)$ как решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода (1). Уточнение алгоритма диагностирования (1)-(4) возможно в результате уточнения ядер Фредгольма $K_1(U_{\text{упр}}, \zeta)$ (1), $K_2(\zeta, p)$ (3) с учетом реальной толщины и неоднородности упругих свойств индикаторного покрытия, что может быть осуществлено, например, асимптотическими методами осреднения для периодических структур, в частности, по аналогии с известным асимптотическим решением для криволинейной слоистой структуры со спиральной намоткой слоев [7].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-41-596010.

Литература

1. Фегенбаум Ю.М., Дубинский С.В., Божевалов Д.Г., и др. *Обеспечение прочности композитных авиационных конструкций с учетом случайных эксплуатационных ударных воздействий*. М.: Техносфера. 2018. 506 с.
2. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Дианов Е.М., Васильев С.А., Медведков О.И. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах. *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2010. №3. С.10-15.
3. Качура С.М., Постнов В.И. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор). *Труды ВИАМ*. 2019. № 5. С.52–61.
4. Паньков А.А. *Волоконно-оптический датчик давления*. Патент RU № 2630537. Оpubл.: 11.09.2017. Бюлл. № 26.

5. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. Vol.288. P.171-176.
6. Белоус П.А. *Осесимметричные задачи теории упругости*. Одесса: ОГПУ, 2000. 183 с.
7. Победря Б.Е. *Механика композиционных материалов*. М.: Изд-во Моск. университета. 1984. 336 с.

Для цитирования:

Паньков А.А. Электромеханическая модель индикаторного полимерного оптоволоконного PЕL-покрытия для диагностирования механических воздействий. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.1>