

УДК 629.73-03

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-152-160

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МЕХАНОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СЕНСОРОВ

Н.Ю. МАКАРОВА¹, Б.И. ШАХТАРИН¹

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия

В настоящее время отмечается интенсивное применение композиционных материалов для создания различных деталей авиационной техники. Незаменимость композитов обеспечивается сочетанием таких важнейших характеристик, как высокая механическая прочность, теплостойкость, коррозионная стойкость, малая плотность. Благодаря своей сложной структуре композиционные панели могут обладать интеллектуальным свойством самодиагностики своего состояния. Структурно-композиционная панель представляет собой матрицу, армированную волокнами. При встраивании в сеть армирующих стекловолокон оптических датчиков, передающих излучение в качестве информативного сигнала, можно создать автономную информационно-измерительную систему. Для контроля напряженно-деформированного состояния композиционных конструкций предложено встраивать в структуру композитов механолюминесцентные сенсоры. Способностью к генерации излучения при механическом нагружении (механолюминесценции) обладают кристаллофосфоры группы АІВVI. Такие сенсоры являются светогенерационными, энергонезависимыми, твердотельными, миниатюрными. При деформировании композитной конструкции сенсоры генерируют механолюминесцентное излучение, передающееся по армирующим волокнам на фотоприемное устройство и в блок обработки сигнала, в котором анализируется локализация и величина механического воздействия на композитную панель. В статье описаны физические основы механолюминесцентных сенсорных элементов, представлена математическая модель преобразования, позволяющая рассчитать выходной световой поток сенсора при механических воздействиях разных по длительности и по величине. На основе математической модели написано приложение в программе в MATLAB для моделирования оптического сигнала сенсоров с различными параметрами при изменении амплитудно-временных параметров входного воздействия. По математической модели был разработан алгоритм обработки сигнала механолюминесцентного сенсора, позволяющий выполнить обратное преобразование – по световому потоку восстановить параметры входного механического воздействия.

Ключевые слова: механолюминесценция, оптоэлектронные сенсоры, интеллектуальные композитные панели, контроль напряженно-деформированного состояния.

ВВЕДЕНИЕ

Авиационная техника в процессе эксплуатации подвергается различным повреждающим воздействиям, поэтому конструкция летательных аппаратов как особо серьезная, сложная и ответственная техническая система нуждается в регулярных тщательных многочисленных проверках. В условиях современного интенсивного внедрения полимерных композитов в качестве новых материалов для создания деталей авиационно-космической техники возникает потребность в появлении новых методов оценки их напряженно-деформированного состояния.

В настоящее время композиционные материалы очень широко используются в аэрокосмической области [1–3]. Это обусловлено, с одной стороны, высокой прочностью и жесткостью, свойственной композитам, и, с другой стороны, малой массой относительно массы металлических материалов. В ряде случаев при производстве летательных аппаратов композиционные панели выгодно замещают металлические. Уменьшение веса конструкции позволяет уменьшить размеры самолета или увеличить топливный запас. Кроме этого, применение конструкционных материалов улучшает аэродинамические характеристики за счет удлинения крыла и уменьшения относительной толщины профиля. Но, несмотря на совокупное по ряду факторов преимущество композитов, им свойственен один серьезный недостаток. При сильном

ударном воздействии на композитную панель деформация и разрушение проявляются на тыльной стороне панели, а со стороны удара на панели признаки повреждения могут быть с трудом обнаружены. Это связано с изгибом слоистой структуры композита, его натяжением и расслоением со стороны, противоположной удару. Повреждения, приводящие к расслоению композита, могут быть вызваны случайными незначительными ударами, такими как удар инструмента о крыло самолета при ремонтных работах, столкновением птиц или ударами камней при взлете и посадке. Это обстоятельство вынуждает прибегать к кропотливым и тщательным проверкам внешней поверхности композиционных панелей, исходя из затрудненного контроля состояния внутренней поверхности.

Необходимо отметить, что кроме перспективных материалов интенсивно внедряются бортовые системы мониторинга исправности воздушного судна, которые предсказывают отказы и ухудшение характеристик агрегатов. Использование композитных конструкций, обладающих свойствами самодиагностики напряженно-деформированного состояния, позволит передавать сигналы о текущем состоянии конструкции в блок принятия решений в режиме реального времени. Это значительно сократит трудоемкие проверки напряженно-деформированного состояния ответственных конструкций воздушного судна.

МОНИТОРИНГ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИТОВ

Текущее состояние полимерных композитных конструкций в настоящее время определяется методами неразрушающего контроля (акустическими, ультразвуковыми, радиофизическими), но это периодические проверки, которые не позволяют проводить непрерывный контроль состояния [3–5]. Для постоянного мониторинга используются электронные методы измерения (схемы с тензодатчиками), а также оптические методы, основанные на деформации оптоволокон (волоконно-оптические датчики на основе решеток Брэгга и датчики Фабри – Перо) [6]. Но деформации конструкционных материалов превышают предельные деформации тензодатчиков, поэтому применение их в ряде случаев нецелесообразно. Оптические же методы считаются в настоящее время наиболее перспективными. Но для их применения необходимо наличие источника излучения и аппаратуры для регистрации оптического сигнала.

В области исследований структурных разрушений композиционных материалов сравнительно недавно было открыто явление механолюминесценции (триболюминесценции). Эмиссия фотонов механолюминесценции связана с начальными и элементарными актами изменения структуры вещества, поэтому оптическое излучение при деформировании твердых тел как следствие возникновения в материале структурных дефектов можно рассматривать в качестве объективного показателя разрушения материала. Следовательно, регистрацию излучения механолюминесцентных сенсоров можно использовать для исследования микропроцессов, происходящих при деформировании и разрушении композитов.

Следует отметить следующие преимущества применения механолюминесцентных сенсоров для регистрации механического нагружения [6–7]:

1. Первичный носитель информации – поток фотонов является собственным продуктом процесса изменения состояния вещества, т. е. не требуются специальные воздействия и прямой контакт с материалом для получения информации.

2. Информация передается на фотоприемники регистрирующей аппаратуры со «световой скоростью» – практически безынерционно, что позволяет регистрировать повреждения в реальном масштабе времени даже при динамических, взрывообразных видах нагружения материала.

3. Информацию о разрушениях можно получать как интегрально, так и локально, т. е. возможно оперативное установление места возникновения разрушений в течение срока нагружения для реальных конструкций или наиболее важных их зон.

4. Обособленную измерительную информацию содержат интенсивность, спектральный состав, направление и характеристики степени поляризации излучения механолюминесценции,

т. е. целый комплекс параметров, позволяющий избирательно проводить исследования микропроцессов разрушения в объеме материала.

Оценка возможностей и успешное применение механолюминесцентных сенсоров для оценки деформированного состояния композитов невозможны без разработки физической и математической моделей механолюминесцентного преобразования, проведения имитационного математического моделирования и проверки адекватности моделей путем экспериментальных исследований макетных образцов датчиков. Также необходимо разработать алгоритм обработки механолюминесцентного излучения для определения величины механического воздействия, вызвавшего срабатывание сенсора. Это позволит количественно оценить напряженно-деформированное состояние композитной конструкции с внедренными люминесцентными сенсорами.

ИНТЕГРАЦИЯ МЕХАНОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СЕНСОРОВ В СТРУКТУРУ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Волокнистые композиционные материалы представляют собой слои полимерной матрицы, армированной волокнами бериллия, стекла, графита, карбида кремния, бора. Для контроля механического напряжения в таких материалах предлагается использовать механолюминесцентные датчики, встроенные в структуру композита. Механолюминофоры преобразуют энергию механического напряжения в оптический сигнал, который может передаваться по волокнам, армирующим матрицу композита в удаленный блок обработки информации. Волоконно-оптические системы сбора и обработки информации интенсивно применяются в авиационно-космической технике по следующим причинам: 1) такие системы могут стабильно работать в жестких условиях эксплуатации, особенно в условиях воздействия сильной вибрации, акустических шумов и ионизирующих излучений; 2) сенсоры и линии связи обладают высокой электромагнитной помехоустойчивостью, и в экранировании нуждается только блок обработки информации; 3) оптоволоконные линии связи обладают малым весом относительно металлических.

В композиционных панелях кварцевые волокна могут играть роль линий связи, по которым передается информация от деформированного механолюминесцентного кристалла, введенного в структуру композита, к системе фотоприемников (рис. 1).

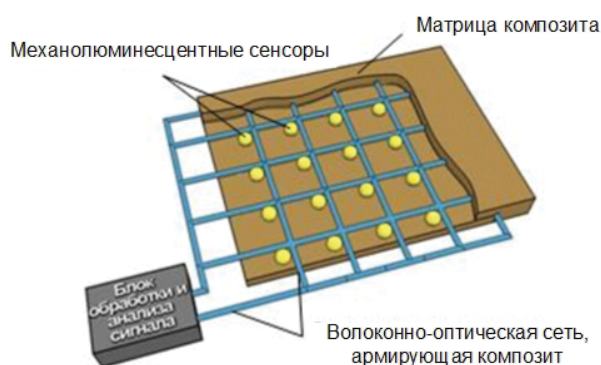


Рис. 1. Полимерная композиционная панель, армированная волоконно-оптической сетью со встроенными механолюминесцентными сенсорами для оценки напряженно-деформированного состояния

Fig. 1. Polymer composite panel reinforced with fiber optic net with built-in mechanical luminescent sensors for assessment of stress-strain behavior

Таким образом, создаются так называемые интеллектуальные композиционные материалы, обладающие свойством самодиагностики. В исследованиях научного центра оборонного агентства Великобритании DERA сообщается об интеллектуальных полимерных композиционных материалах со встроенными механолюминесцентными (триболоминесцентными) кристаллами. Пример реализации системы контроля состояния крыльев планера самолета со встроенными МЛД показан на рис. 2 [7].

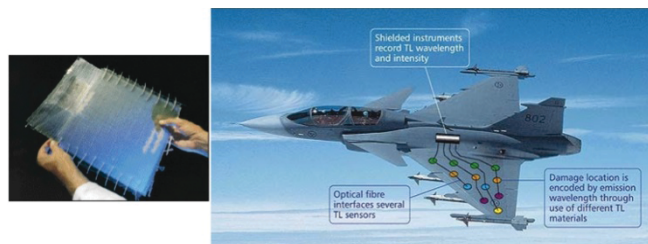


Рис. 2. Исследования агентства DERA: композиционная панель со встроенными триболюминесцентными сенсорами и пример использования таких панелей в авиастроении
Fig. 2. DERA agency examined composite panel with built-in tribo-luminescent sensors and an example of using such panels in aviation design

Здесь для достоверного распознавания конкретного места повреждения применяются распределенные системы оптических волокон и механолюминофоры с различным спектром излучения. Причем как положительное свойство отмечается наличие порогового характера зависимости интенсивности свечения от приложенной механической нагрузки. Это обстоятельство обеспечивает нечувствительность датчиков к незначительным нагрузкам и вибрациям в процессе эксплуатации самолета. Интеграция функций в пределах одной конструкции позволяет создавать встроенные датчики, обладающие способностью избирательно определять степень повреждения композиционной панели и конкретное место локализации повреждения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Обобщенная структурная схема механолюминесцентного датчика, детализирующая процесс преобразования энергии в информационной цепи, показана на рис. 1. Схема соответствует структуре оптопары и включает механолюминесцентный сенсор (излучатель), фотоприемник и оптический канал связи между ними. Здесь на входе датчика действует импульс давления (механического напряжения) $\sigma(t)$, вызывающий деформацию кристаллов люминофора. При деформировании люминофор генерирует световой импульс $\Phi(t)$.

Изучением явления механолюминесценции (триболюминесценции или деформационной люминесценции) занимались зарубежные и отечественные ученые [6–8]. Рассмотренные труды в основном раскрывают теоретические основы механолюминесценции и экспериментальное исследование различных кристаллофосфоров.

При деформации некоторых кристаллов, преимущественно полупроводников группы $A^{II}B^{VI}$, генерируется нетепловое излучение люминофора, называемое механолюминесценцией. При пластической деформации кристаллов происходит движение электрически заряженных дислокаций. Движение дислокаций в структуре люминофора и их взаимодействие с центрами излучения приводит к возбуждению или к ионизации центров излучения с их последующими механолюминесцентными излучательными переходами.

Механолюминесцентный сенсор с внутрицентровым люминофором описывается математической моделью, основу которой составляет выражение

$$\Phi(t) = 2N_{RC} \frac{\eta}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \int_0^{t_{\sigma}} \dot{N}_{RC}(t) dt, \quad (1)$$

где $\Phi(t)$ – световой поток механолюминесцентного сенсора; N_{RC} – число излучающих центров в механолюминесцентном материале; η – энергия кванта механолюминесцентного излучения; τ – постоянная кинетики затухания внутрицентральной люминесценции; t_{σ} – длительность механического воздействия; $\dot{N}_{RC}(t)$ – скорость увеличения количества возбужденных центров свечения.

Модель позволяет рассчитать временную зависимость оптического сигнала механолюминесцентного сенсорного элемента при разных входных механических напряжениях с длительностью воздействия t_{σ} [7]. При пластическом деформировании движущиеся дислокации возбуждают центры излучения, число которых в люминофоре равно N_{RC} . Это взаимодействие сопровождается излучательными переходами с энергией кванта излучения η и с постоянной времени затухания внутрицентральной люминесценции τ .

Излучение механолюминесцентного сенсора с рекомбинационным люминофором описывается выражением

$$\Phi(t) = \eta\beta \left(\int_0^{t_{\sigma}} \dot{N}_{RC}(t) dt \right)^2 / \left(1 + \beta t \int_0^{t_{\sigma}} \dot{N}_{RC}(t) dt \right)^2, \quad (2)$$

где β – коэффициент, характеризующий вероятность рекомбинации.

Аналогично внутрицентральной люминесценции световой поток $\Phi(t)$ зависит от скорости ионизации центров излучения во всем объеме кристалла $\dot{N}_{RC}(t)$ при его упруго-пластическом деформировании, но кинетика излучения такого люминофора описывается гиперболическим законом. Скорость ионизации (возбуждения) центров излучения в люминофоре $\dot{N}_{RC}(t)$ пропорциональна средней плотности движущихся дислокаций $\tilde{N}_{mD}(t)$

$$\dot{N}_{RC}(t) = 2N_{RC}(t)r_{int}(t)\tilde{N}_{mD}(t)\tilde{U}_D(t), \quad (3)$$

где $r_{int}(t)$ – расстояние взаимодействия движущейся дислокации с центром свечения; $\tilde{N}_{mD}(t)$ – средняя плотность движущихся дислокаций; $\tilde{U}_D(t)$ – средняя скорость перемещения дислокаций. При пластическом деформировании люминофора дислокации, движущиеся со скоростью $\tilde{U}_D(t)$, находясь на расстоянии $r_{int}(t)$ от центра свечения, ионизируют его с последующим излучательным переходом.

Напряженное состояние деформированного механолюминесцентного сенсорного элемента рассматривалось с использованием микродинамической теории пластичности. Благодаря этому установлена зависимость макроскопических параметров внешнего воздействия (механического напряжения и деформации) с микроскопическими параметрами, описывающими упруго-пластическое деформирование. Скорость пластических деформаций $\dot{\epsilon}_1^p$ пропорциональна вектору Бюргерса $|\vec{b}|$, характеризующему искажение кристаллической решетки кристалла дислокацией, плотности подвижных дислокаций и их скорости и описывается выражением

$$\dot{\epsilon}_1^p = |\vec{b}| \tilde{N}_{mD} \tilde{U}_D. \quad (4)$$

Величина пластической деформации связана с механическим напряжением на входе сенсора выражением

$$\sigma(t) = \sigma_1 + E \cdot \epsilon_1^p, \quad (5)$$

где E – модуль упругости; σ_1 – главное значение тензора напряжения.

Выражения (1–5) лежат в основе модели механолюминесцентного преобразования.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основе рассмотренной модели механолюминесцентного преобразования было разработано приложение в программе MATLAB и проведено моделирование. В программе задаются параметры входного механического напряжения (однократного импульсного воздействия) – амплитуда и длительность, и вычисляется оптический отклик сигнала механолюминесцентного сенсора. Пример расчета приведен на рис. 3.

Так как генерация механолюминесцентного излучения происходит лишь в области пластической деформации кристалла, т.е. в диапазоне превышения предела текучести механического напряжения $\sigma(t)$, то по оптическому сигналу можно восстановить значения механического напряжения, превышающие предел текучести данного механолюминофора.

Пример восстановления импульса давления по выходному сигналу сенсора согласно алгоритму обработки приведен на рис. 4. Пунктиром показан импульс $\sigma(t)$, вызвавший генерацию излучения датчика.

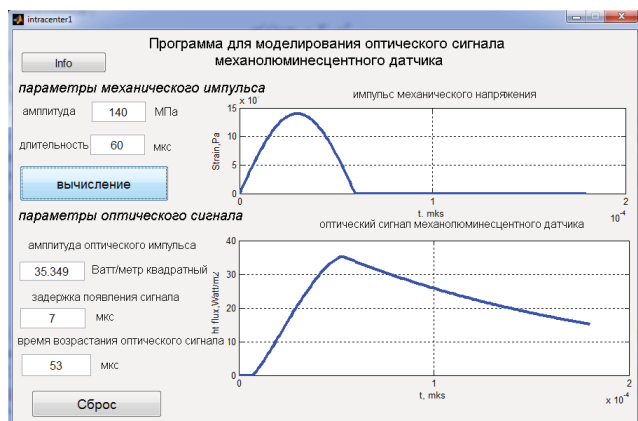


Рис. 3. Интерфейс программы для моделирования оптического сигнала механолюминесцентного сенсора
Fig. 3. Interface of the program for modeling an optical signal of a mechanical luminescent sensor

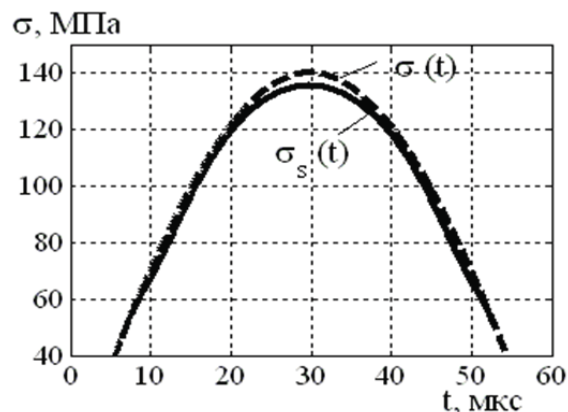


Рис. 4. Восстановленный импульс механического напряжения $\sigma_s(t)$ по выходному сигналу датчика с использованием алгоритма обработки сигнала
Fig. 4. Restored impulse of mechanical strain $\sigma_s(t)$ under sensor exit signal with using an algorithm of signal processing

Разработанный алгоритм обработки выходных оптических сигналов был проверен экспериментально. Выходной оптический сигнал и входной импульс ударного ускорения регистрировались при помощи двухканального блока виртуального осциллографа PCS64i фирмы Velleman [9]. Оба сигнала заносились в цифровом виде в память персонального компьютера, подвергались первичной обработке – процедурам фильтрации и линеаризации [10], а затем сигнал механолюминесцентного датчика подвергался обработке по предложенному алгоритму. Затем проводилось сравнение реализаций вычисленного входного импульса давления $\sigma_s(t)$ и зарегистрированного $\sigma(t)$. По результатам серии из 32 экспериментов отклонения между расчетными и экспериментальными реализациями импульса давления не превысили 6–8 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проанализирована возможность создания композиционных материалов, армированных кварцевыми волокнами со встроенными механолюминесцентными сенсорами

для мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций. При деформировании такой конструкции генерируется излучение в кристаллах люминофора и оптический сигнал по армирующим волокнам передается к фотоприемному устройству (одиночным фотодиодам или фотодиодной линейке) в блоке обработки информации. Отличительными свойствами таких сенсоров являются светогенерационность, помехоустойчивость, возможность интеграции в волоконно-оптические сети и встраивания в композиционные конструкции.

В статье рассмотрена математическая модель сенсора, позволяющая получить световой отклик сенсора в ответ на механическое воздействие. Для оценки применимости сенсора моделируется реакция сенсора на возможные предельные значения входного ударного воздействия. Результаты моделирования показывают, что, во-первых, функция преобразования сенсора имеет явно выраженный порог чувствительности, во-вторых, функция преобразования имеет нелинейный характер, в-третьих, форма выходных оптических сигналов значительно отличается от формы входных импульсов давления. На основе модели предложен алгоритм обработки оптического сигнала датчика для получения входного механического воздействия. Модель прямого и обратного преобразования были проверены экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Nikhil V. Nayak.** Composite materials in aerospace application. International Journal of Scientific and Research Publications, 2014, Vol. 4, Iss. 9, pp. 20–31.
2. **Campbell F.C.** Structural composite materials. ASM international, 2010, 629 p.
3. **Gay D., Suong V. Hoa, Tsai S.W.** Composite materials design and application. CRC Press LLC, 2003, 524 p.
4. **Mallick P.K.** Fiber-reinforced composite materials, manufacturing and design, Taylor & Francis Group, LLC, 2007, 617 p.
5. Composite materials for aircraft structures. Edited by Alan Baker, Stuart Dutton, Donald Kelly. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2004, 597 p.
6. **Lau K.T.** Structural health monitoring for smart composites using embedded FBG sensor technology. Materials Science and Technologies, 2014, Vol. 30, No 13a, pp. 1642–1654.
7. **Sage I., Humberstone L., Oswald I., Lloyd P., Bourhill G.** Getting light through black composites: embedded triboluminescent structural damage sensors. Smart Mater. Struct. 2001, № 10, pp. 332–337.
8. **Fontenot R.S., Bhat K.N., Hollerman W.A., and Aggarwal M.D.** Triboluminescent materials for smart sensors. Materials today, 2011, Vol. 14, No 6, pp. 292–293.
9. **Татмышевский К.В., Макарова Н.Ю., Павлов Д.Д.** Математическое моделирование механолюминесцентного сенсора давления // Автоматизация в промышленности. 2010. № 10. С. 56–60.
10. **Грибов А.Ф., Шахтарин Б.И.** Обоснование обобщенного метода квазигармонической линеаризации // Вестник московского государственного университета им Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2014. № 1 (52). С. 3–16.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Макарова Наталья Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, mak-nat@inbox.ru.

Шахтарин Борис Ильич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, shakhtarin@mail.ru.

STRESS-STRAIN STATE MONITORING SYSTEM OF COMPOSITE STRUCTURES WITH THE MECHANOLUMINESCENT SENSORS

Natalia Yu. Makarova¹, Boris I. Shakhtarin¹

Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia

ABSTRACT

At present, the intensive use of composite materials for the creation of various parts of aviation equipment is noted. The irreplaceability of composites is provided by a combination of such important characteristics as high mechanical strength, heat resistance, corrosion resistance, low density. Due to its complex structure, composite panels can have the intellectual property of self-diagnostics of their condition. Structurally, the composite panel is a matrix reinforced with fibers. Optical sensors embedded into composite matrix transmit radiation through the reinforcing glass fiber. So, an autonomous information-measuring system can be created. To control the stress-strain state of composite structures, it is proposed to incorporate mechanoluminescent sensors into the structure of composites. The phosphors of the AIBVI group possess the ability to generate radiation under mechanical loading (mechanoluminescence). Such sensors are light-generating, non-volatile, solid-state, miniaturized. When the composite structure is deformed, the sensors generate mechanoluminescent radiation transmitted along the reinforcing fibers to the photodetector device and to the signal processing unit, in which the localization and magnitude of the mechanical action on the composite panel are analyzed. The physical principles of mechanoluminescent sensor elements are described in the article, a mathematical model of transformation is presented, which allows calculating the output light flux of the sensor under mechanical actions of different duration and magnitude. On the basis of the mathematical model, an application is realized in the MATLAB for modeling the optical signal of sensors with different parameters when the amplitude-time parameters of the input effect change. According to the mathematical model, an algorithm for processing the signal of a mechanoluminescent sensor has been developed, which makes it possible to perform an inverse transformation – to restore the parameters of the input mechanical action by the light flux.

Key words: mechanoluminescence, optoelectronic sensors, smart composite structures, monitoring of the stress-strain state.

REFERENCES

1. **Nikhil V. Nayak.** Composite materials in aerospace application. International Journal of Scientific and Research Publications, 2014, Vol. 4, Iss. 9, pp. 20–31.
2. **Campbell F.C.** Structural composite materials. ASM international, 2010, 629 p.
3. **Gay D., Suong V. Hoa, Tsai S.W.** Composite materials design and application. CRC Press LLC, 2003, 524 p.
4. **Mallick P.K.** Fiber-reinforced composite materials, manufacturing and design, Taylor & Francis Group, LLC, 2007, 617 p.
5. Composite materials for aircraft structures. Edited by Alan Baker, Stuart Dutton, Donald Kelly. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2004, 597 p.
6. **Lau K.T.** Structural health monitoring for smart composites using embedded FBG sensor technology. Materials Science and Technologies, 2014, Vol. 30, No 13a, pp. 1642–1654.
7. **Sage I., Humberstone L., Oswald I., Lloyd P., Bourhill G.** Getting light through black composites: embedded triboluminescent structural damage sensors. Smart Mater. Struct. 2001, № 10, pp. 332–337.
8. **Fontenot R.S., Bhat K.N., Hollerman W.A., and Aggarwal M.D.** Triboluminescent materials for smart sensors. Materials today, 2011, Vol. 14, No 6, pp. 292–293.
9. **Tatmyshevsky K.V., Makarova N.Yu., Pavlov D.D.** *Matematicheskoye modelirovaniye mekhanolyuminescentnogo sensora davleniya* [Mathematical modeling of mechanoluminescent pressure sensor]. Automation in industry, 2010, No 10, pp. 56–60 (in Russian)
10. **Gribov A.F., Shakhtarin B.I.** *Obosnovaniye obobshchennogo metoda kvazigarmonicheskoy linearizatsii* [The justification of the generalized method of quasiharmonic linearization]. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Science, 2014, No 1 (52), pp. 3–16. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalya Yu. Makarova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Autonomous Information and Control Systems Chair of the Bauman Moscow State Technical University, mak-nat@inbox.ru.

Boris I. Shakhtarin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Autonomous Information and Control Systems Department of the Bauman Moscow State Technical University, shakhtarin@mail.ru.

Поступила в редакцию 01.09.2017
Принята в печать 20.09.2017

Received 01.09.2017
Accepted for publication 20.09.2017