

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **043794**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.06.23

(21) Номер заявки
202100073

(22) Дата подачи заявки
2021.03.09

(51) Int. Cl. **G01L 1/16** (2006.01)
G01N 33/44 (2006.01)
G01R 29/22 (2006.01)

(54) **УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МОНОЛИТНОМ ПОЛИМЕРНОМ МАТЕРИАЛЕ**

(43) **2023.02.28**

(96) **2021000031 (RU) 2021.03.09**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ "КАЗАНСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. А.Н. ТУПОЛЕВА -
КАИ" (КНИТУ-КАИ) (RU)**

(56) RU-C1-2412428
RU-C1-2753970
US-A1-20030129763
EP-B1-3265767
RU-C1-2736345

(72) Изобретатель:
**Бобина Елена Андреевна, Данилаев
Максим Петрович, Куклин Владимир
Александрович, Михайлов Сергей
Анатольевич (RU)**

(57) Изобретение относится к области измерительной техники, в частности к средствам контроля напряжений в монолитном полимерном материале, и может быть использовано при определении физико-механического состояния монолитного полимерного материала, обладающего пьезоэлектрическим эффектом и применяющегося, например, для остекления зданий, сооружений, транспортных средств и т.д. Технический результат заключается в обеспечении контроля изменений в структуре материала за счет одновременного измерения пьезоэлектрического отклика и механической деформации монолитного полимерного материала на внешнее механическое воздействие. Технический результат в устройстве контроля напряжений в монолитном полимерном материале, содержащем датчик деформации, достигается тем, что дополнительно содержит блок предварительной обработки сигнала, выход которого соединен с входом усилителя сигнала, выход которого соединен с входом первого аналого-цифрового преобразователя, выход которого соединен с первым входом блока обработки информации; два электрода из проводящего материала, к каждому из которых подсоединены по одному проводнику, другой конец каждого из проводников соединен с первым и вторым входами усилителя напряжения, выход которого соединен с входом второго аналого-цифрового преобразователя, выход которого соединен с первым входом блока обработки информации, выход которого соединен с блоком отображения информации, причем вход блока предварительной обработки соединен с выходом датчика деформации.

043794
B1

043794
B1

Изобретение относится к области измерительной техники, в частности к средствам контроля напряжений в монолитном полимерном материале, и может быть использовано при определении физико-механического состояния монолитного полимерного материала, обладающего пьезоэлектрическим эффектом и применяющегося, например, для остекления зданий, сооружений, транспортных средств и т.д.

Известные устройства контроля напряжений в монолитном полимерном материале основаны на известных способах контроля напряжений полимерных материалов, основными из которых являются:

способы, основанные на использовании ультразвуковых волн для контроля напряжений полимерных материалов [патент 2601388 Российская федерация, МПК G01N 29/04. Ультразвуковой способ измерения внутренних механических напряжений. Авторы: Степанова Л.Н., Курбатов А.Н., Тенитилов Е.С.; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский государственный университет путей сообщения" (СГУС); заявл. 27.06.2016; опубл. 10.11.2016];

способы, основанные на изменении параметров оптического излучения [Гуревич Л.Е. Иммерсионно-оптический метод исследования, измерения и контроля внутренней геометрии изделий из прозрачных материалов // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. - 1982. Вып.12. С. 63-64];

способы, основанные на использовании пьезоэлектрического отклика при воздействии на образец внешней силы [W. Steinmann and D. Pico Polymeric Sensor Fibers Based on a Piezoelectric Polymer and Metal Alloy/Carbon Nanotube/Polymer Composite for Structural Health Monitoring // Chemical Engineering Transactions. Vol. 60. P. 7-12. Sep. 2017. DOI: 10.3303/CET1760002].

Известные аналоги устройства контроля напряжений в монолитном полимерном материале основаны:

на устройстве для ультразвукового контроля [патент 2297627 Российская Федерация, МПК G01N 29/04, G01N 29/26. Устройство для ультразвукового контроля. Авторы: Курочкин А.С., Вopilкин А.Х., Моторков Г.А., Виноградов С.Г., патентообладатели: авторы; заявл. 19.12.2005; опубл. 20.04.2007. Бюл. № 11]. Суть изобретения заключается в том, что устройство для ультразвукового контроля содержит направляющие колеса и закрепленный внутри шины на валу, по крайней мере, один ультразвуковой преобразователь, при этом шина выполнена из акустически прозрачного материала и размещена с зазором внутри охватывающего ее экрана с выполненным в последнем окне для контакта через него шины с исследуемым изделием. Направляющие колеса осями их вращения закреплены на экране, и окно экрана расположено между направляющими колесами, ультразвуковой преобразователь расположен в полости шины, при этом наружная поверхность ультразвукового преобразователя сопряжена с поверхностью полости шины, ультразвуковой преобразователь установлен с возможностью его поворота относительно окна экрана, причем в экране выполнено направляющее продолговатое отверстие, через которое пропущен вал, а шина выполнена со сферической наружной поверхностью из эластичного желеобразного кремнийорганического компаунда, пластифицированного кремнийорганической жидкостью;

на способе измерения напряжений в полом изделия и толщины его стенки поляризационно-оптическим методом и устройстве для его осуществления [патент 2373504 Российская Федерация, МПК G01L 1/24, G01B 9/00. Способ измерения напряжений в полом изделия и толщины его стенки поляризационно-оптическим методом и устройство для его осуществления. Авторы: Гуревич Л.Е., Николаичев Б.А., Пархоменко С.И.; патентообладатель: Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-производственное предприятие "Исток"; заявл. 22.06.2007; опубл. 20.11.2009. Бюл. № 32]. Суть изобретения заключается в том, что устройство для измерения окружных напряжений стенки в полом изделия поляризационно-оптическим методом включает источник света, ванну с прозрачными стенками, заполненную иммерсионной жидкостью, поляризатор и анализатор света, расположенные соосно, при этом поляризатор света расположен внутри ванны с прозрачными стенками, заполненной иммерсионной жидкостью;

на устройстве, реализующем способ неразрушающего контроля деталей из полимерных композиционных материалов [патент 2488772 Российская федерация, МПК G01B 11/16, G01L 1/24, G01N 21/88. Способ неразрушающего контроля деталей из полимерных композиционных материалов. Авторы: Огнев Ю.Ф., Бердиев О.Ш.; патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Дальневосточный федеральный университет"; заявл. 13.09.2011; опубл. 27.07.2013]. Суть изобретения заключается в том, что композиция, используемая для формирования контролируемого объекта, содержит стекловолокно как материал, аналогичный используемому в качестве наполнителя для формирования каркасной матрицы детали, которое подключено к источнику света. Стекловолокно выполнено в виде цельных отрезков длиной, большей длины детали, которые размещены с пересечением траекторий вероятного формирования дефектов, в объеме детали, не подвергающемся обработке. О наличии дефекта судят по отсутствию прохождения светового луча или снижению яркости исходящего светового потока;

на устройстве волоконно-оптического датчика объемного напряженного состояния [патент 2643692 Российская федерация, МПК G01B 11/00, G01L 1/16. Волоконно-оптический датчик объемного напряженного состояния. Авторы: Паньков А.А.; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пермский национальный исследовательский

политехнический университет"; заявл. 04.04.2017; опубл. 05.02.2018]. Суть изобретения состоит в том, что волоконно-оптический датчик объемного напряженного состояния содержит пьезоэлектрический элемент, который помещен внутрь протяженного каркаса, внутри которого также размещены другие измерительные элементы. Каждый измерительный элемент дополнительно включает волоконно-оптический световод, выполненный с возможностью подключения к измерительному устройству, два управляющих непрерывных электрода, электролюминесцентный элемент;

на устройстве для определения остаточных напряжений в деталях с электропроводными покрытиями [патент 2412428 Российская федерация, МПК G01B 5/30, G01L 1/06. Устройство для определения остаточных напряжений в деталях с электропроводными покрытиями. Авторы: Иванова Т.О., Гринченко М.И., Пайкин А.Г., Крайников А.В., Царев В.И.; патентообладатель: Открытое акционерное общество "Московское машиностроительное предприятие им. В.В. Чернышева"; заявл. 14.08.2009; опубл. 22.02.2011], выбранном в качестве прототипа устройства контроля напряжений в монолитном полимерном материале. Прототип устройства контроля напряжений в монолитном полимерном материале содержит датчик деформации образца, а также трехэлектродную электролитическую ванну с катодом, электродом сравнения и горизонтально расположенным образцом в держателе в качестве анода; источник тока, в качестве которого используют потенциостат; преобразователь деформации; стойку инструментальную с приводом держателя образца, основание которой выполнено из неметаллического материала; компьютер; узел углового перемещения; механический привод горизонтального перемещения; удлинитель образца; микрометрический привод вертикального перемещения; увеличитель; контактную сферу датчика деформации; пузырьковый уровень.

Приведенное в качестве прототипа устройства контроля напряжений в монолитном полимерном материале имеет ряд недостатков. Основными недостатками являются:

отсутствует возможность контроля изменений в структуре монолитного полимерного материала, происходящих в нем при внешних механических воздействиях, приводящих к возникновению напряжений в монолитном полимерном материале. Возникающие изменения в структуре монолитного полимерного материала могут приводить к снижению предела его прочности. Этот недостаток делает невозможным прогнозирование предстоящего разрушения монолитного полимерного материала по результатам измерения возникающих в нем напряжений;

необходимость размещения монолитного полимерного материала в специальном устройстве для измерения остаточных напряжений, что не позволяет контролировать состояние габаритных изделий из монолитного полимерного материала в процессе их эксплуатации.

Техническая проблема заключается в создании устройства контроля напряжений в монолитном полимерном материале, обеспечивающего возможность контроля изменений в структуре монолитного полимерного материала, а также возможность контроля напряжений в изделиях из монолитного полимерного материала в процессе его эксплуатации.

Технический результат заключается в обеспечении контроля изменений в структуре материала за счет одновременного измерения пьезоэлектрического отклика и механической деформации монолитного полимерного материала на внешнее механическое воздействие.

Технический результат в устройстве контроля напряжений в монолитном полимерном материале, содержащем датчик деформации, достигается тем, что устройство контроля напряжений в монолитном полимерном материале дополнительно содержит блок предварительной обработки сигнала, выход которого соединен с входом усилителя сигнала, выход которого соединен с входом первого аналого-цифрового преобразователя, выход которого соединен с первым входом блока обработки информации, два электрода из проводящего материала, к каждому из которых подсоединены по одному проводнику, другой конец каждого из проводников соединен с первым и вторым входами усилителя напряжения, выход которого соединен с входом второго аналого-цифрового преобразователя, выход которого соединен с первым входом блока обработки информации, выход которого соединен с блоком отображения информации, причем вход блока предварительной обработки сигнала соединен с выходом датчика деформации.

На фиг. 1 изображена структурная схема устройства контроля напряжений в монолитном полимерном материале.

На фиг. 2 изображена структурная схема устройства контроля напряжений в монолитном полимерном материале, где электроды размещены на исследуемом объекте.

На фиг. 3 представлен алгоритм работы блока обработки информации устройства контроля напряжений в монолитном полимерном материале.

На фиг. 4 представлены типовые зависимости пьезонапряжения 13 - $U(\epsilon)$, силы отклика образца на внешнее воздействие 14 - $P(\epsilon)$, коэффициента 15 - $\gamma(\epsilon)$ для испытаний на растяжение.

На фиг. 5 представлены типовые зависимости пьезонапряжения 13 - $U(\epsilon)$, силы отклика образца на внешнее воздействие 14 - $P(\epsilon)$, коэффициента 15 - $\gamma(\epsilon)$ для испытаний на изгиб.

Устройство контроля напряжений в монолитном полимерном материале, изображенное на фиг. 1, содержит датчик деформации 1, выход которого соединен с входом блока предварительной обработки

сигнала 2, выход которого соединен с входом усилителя сигнала 3, выход которого соединен с входом первого аналого-цифрового преобразователя 4, выход которого соединен с первым входом блока обработки информации 5, два электрода из проводящего материала, - первый электрод 6 и второй электрод 7, к каждому из электродов, первому 6 и второму 7 подсоединены по одному проводнику 8, другой конец каждого из проводников 8 соединен соответственно с первым и вторым входами усилителя напряжения 9, выход которого соединен с входом второго аналого-цифрового преобразователя 10, выход которого соединен со вторым входом блока обработки информации 5, выход которого соединен с блоком отображения информации 11.

Устройство контроля напряжений в монолитном полимерном материале, изображенное на фиг. 2, содержит датчик деформации 1, выход которого соединен с входом блока предварительной обработки сигнала 2, выход которого соединен с входом усилителя сигнала 3, выход которого соединен с входом первого аналого-цифрового преобразователя 4, выход которого соединен с первым входом блока обработки информации 5, два электрода из проводящего материала, - первый электрод 6 и второй электрод 7, к каждому из электродов 6 и 7 подсоединены по одному проводнику 8, другой конец каждого из проводников 8 соединен соответственно с первым и вторым входами усилителя напряжения 9, выход которого соединен с входом второго аналого-цифрового преобразователя 10, выход которого соединен со вторым входом блока обработки информации 5, выход которого соединен с блоком отображения информации 11, электроды первый 6 и второй 7 размещены на исследуемом объекте 12 и закреплены на нем путем, например, подклейки.

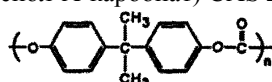
Блок предварительной обработки сигнала 2, усилитель сигнала 3, первый аналого-цифровой преобразователь 4, блок обработки информации 5, усилитель напряжения 9, второй аналого-цифровой преобразователь 10 и блок отображения информации 11 имеют систему электропитания, которая на фиг. 1 и 2 не представлена.

Объектом исследования может быть монолитный материал, который проявляет пьезоэлектрические свойства. Например, это может быть монолитный прозрачный поликарбонат [Бобина Е.А., Гимадеева Л.А., Данилаев М.П. Определение механических напряжений, возникающих в полимерных стеклах в процессе эксплуатации // ИВД. 2018. № 2 (49)], поливинилиденфторид [Conjugated polymers. Processing and application. Edited by Terje A. Skotheim, John R. Reynolds. 2007. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business. 1693 p.], полимерная композиция с наполнителем из материала, обладающего пьезоэлектрическим эффектом [Kiran Kumar Sappati, Sharmistha Bhadra Piezoelectric Polymer and Paper Substrates: A Review // Sensors, 2018, 18, 3605; doi: 10.3390/s18113605].

Рассмотрим работу устройства контроля напряжений в монолитном полимерном материале на примере монолитного прозрачного поликарбоната. Монолитный прозрачный поликарбонат может быть использован для остекления кабины летательного аппарата, например вертолета [Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Перфилова Д.Н., Румянцева Т.В. Пожаробезопасные литые термопласты и термоэластопласты // Труды ВИАМ, № 11. 2013]. В процессе эксплуатации монолитный прозрачный поликарбонат подвергается различным внешним воздействиям, например механическим под действием набегающего воздушного потока [Иванов Д.А., Зюкин В.С., Колосков А.А. Оценка влияния нестационарных дозвуковых воздушных потоков на механические и эксплуатационные свойства элементов конструкции воздушного транспорта // Техничко-технологические проблемы сервиса, № 2(44). 2018. С. 16-20], ультрафиолетовому облучению [Шнел, Г. Химия и физика поликарбонатов: [пер. с англ.]/Г. Шнел. - М.: Химия, 1967. - 232 с]. Большая часть внешних воздействий приводит к накоплению напряжений, а также и изменений в структуре монолитного прозрачного поликарбоната [Али М. Абед Аль-Зобайде. Чигарева Ю.А. Фрактальная модель накопления повреждений в твердых телах // Наука и техника. 2014. № 6]. Это, в свою очередь, приводит к изменению прочности и предела прочности монолитного прозрачного поликарбоната, используемого для остекления кабины летательного аппарата. По этой причине необходимо создать такой метод контроля напряжений в монолитном прозрачном поликарбонате, который позволяет контролировать изменения в его структуре, происходящие при внешних воздействиях. Изменения в структуре монолитного прозрачного поликарбоната зависят от комплекса внешних воздействий на материал и могут представлять собой: изменение молекулярной массы вследствие разрыва полимерных молекул под действием, например, солнечной радиации [Говстоног В.А. Комплексное моделирование характеристик старения полимерных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". 2007. № 3. С.3-22]; появление микротрещин (например, при механических деформациях под действием набегающего воздушного потока на летательный аппарат), невидимых невооруженным взглядом и не ухудшающих прозрачность монолитного прозрачного поликарбоната [Жималов А.Б., Горина И.Н., Сучков С.Г., Селифонов А.В., Сучков Д.С., Николаевцев В.А. Инновационный неразрушающий метод ультразвукового контроля нано- и микротрещин и дефектов в листовом стекле // NBI-technologies. 2010. № 4].

В рассматриваемом устройстве контроля напряжений в монолитном полимерном материале используется пьезоэлектрический эффект. Пьезоэлектрический эффект в полимерных материалах известен, подробно исследован и опубликован, например, в источниках литературы [L. Vertuccio, L. Guadagno, G. Spinelli, P. Lamberti, V. Tucci, S. Russo Piezoresistive properties of resin reinforced with carbon nanotubes

for health-monitoring of aircraft primary structures // *Composites Part B*. 107. 2016. P. 192-202; W. Steinmann and D. Pico *Polymeric Sensor Fibers Based on a Piezoelectric Polymer and Metal Alloy/Carbon Nanotube/Polymer Composite for Structural Health Monitoring* // *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 60. P. 7-12. Sep. 2017. DOI: 10.3303/CET1760002; Лушечкин Г.А., Джуманбаев Х.Д. Пьезоэффект и электрретный эффект в полимерах. // *Пласт. массы*. 1977. № 10. С. 7-9]. В основе пьезоэлектрического эффекта в полимерных материалах лежит поляризация полимерного материала при внешнем механическом воздействии. Поляризация происходит вследствие смещения полярных групп полимерных молекул относительно своего положения равновесия [H. Nalwa *Ferroelectric Polymers* // Marcel Dekker, Inc., New York, 1995. - 895 p; Магеррамов А.М., Шерман М.Я., Лесных О.Д., Корчагин А.Г., Турышев Б.И. О природе поляризации и пьезоэлектричества в сополимере винилиден-фторида и тетрафторэтилена. // *Высокомолекул. соед. Сер. А*. - 1998. Т. 40. № 6. С. 982-987]. Молекулы монолитного прозрачного поликарбоната содержат полярные группы, например атомы кислорода O и CH₃ группы [Шнелл Г. *Химия и физика поликарбонатов*. Пер. с англ. Под ред. Г.С. Колесникова. М.: Химия. 1967. 232 с.; Смирнова О.В., Ерофеева С.Б. *Поликарбонаты*. М.: Химия. 1975. 288 с.]: химическая формула типового монолитного прозрачного поликарбоната (поли-бис-фенол-А-карбонат) CAS 24936-68-3:



Первый электрод 6 и второй электрод 7 расположены на противоположных сторонах исследуемого объекта 12 друг напротив друга и закреплены по поверхности исследуемого объекта 12, например, путем подклейки тонкой полоски проводящего металла, например меди [А.М. Чалый, В.А. Дмитриев, М.А. Павлейно, О.М. Павлейно, М.С. Сафонов Об особенностях сваривания и разрушения поверхности силовых слоистых контактов импульсными токами // *ЭОМ*. 2016. № 6]. Форму и размеры первого электрода 6 и второго электрода 7 выбирают в зависимости от формы и размеров исследуемого объекта 12, а также исходя из типовых механических деформаций, возникающих при его эксплуатации. Экспериментальные исследования показали, что, например, для плоского образца монолитного прозрачного поликарбоната размерами 0.1×0.1 м, закрепленного по своему периметру, электрод может иметь размеры 0.01×0.08 м. Первый электрод 6 и второй электрод 7, таким образом, размещают на противоположных сторонах исследуемого объекта, чтобы они располагались друг напротив друга.

К первому электроду 6 и второму электроду 7 из проводящего материала любым известным способом подсоединены соответствующие концы проводников 8. Проводники 8 представляют собой, например, медные провода марки HELUKABEL UL/CSA, находящиеся в изоляции (ГОСТ 31947-2012). После зачистки провода, осуществляемой по ГОСТ 23585-79, конец каждого проводника 8 приклеивается к соответствующим первому электроду 6 и второму электроду 7 из проводящего материала с использованием клея высокой электропроводимости (марки "Kontaktol"), наполненного частицами серебра. В качестве усилителя напряжения 9 может быть использован операционный малошумящий усилитель ADA4625-2, минимальный коэффициент усиления 130 дБ [URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4625-1-4625-2.pdf>]. Для уменьшения коэффициента шума в состав усилителя напряжения 9 включен повторитель напряжения, выполненный на полевом транзисторе 2N3819 [Титце У., Шенк К., *Полупроводниковая схемотехника*, пер. с нем., М., 1982]. Второй аналого-цифровой преобразователь 10 может быть построен на микросхеме AD7771 (тип SAR), имеющий 12 разрядов с последовательной аппроксимацией сигнала. Соединение усилителя напряжения 9 с таким вторым аналого-цифровым преобразователем 10 обеспечивает отношение сигнал/шум >80 дБ [Дьячков А.Б., Горкунов А.А., Лабозин А.В., Миронов С.М., Панченко В.Я., Фирсов В.А., Цветков Г.О. Автоматизация исследовательского комплекса для разделения изотопов в атомном паре лазерным методом // *Приборы и техника эксперимента*. 2018. № 4. С. 81-89]. Это позволяет обеспечить удовлетворительное выделение полезного сигнала, а именно напряжение пьезоэлектрического отклика, на фоне действующих шумов [Баскаков С.И. *Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2000*].

Одновременно с этим на поверхности исследуемого объекта 12 расположен датчик деформации 1. Датчик деформации 1 представляет собой, например, оптическое волокно с встроенной решеткой Брегга [Сарбаев Б.С, Смердов А.А., Таирова Л.П., Селезнев В.А., Соколов С.В., Буймистряк Г.Я., Изотов В.И., Рогов А.М. Исследование деформированного состояния конструкций из композиционных материалов с помощью волоконно-оптических датчиков // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Машиностроение"*. 2011. № SP]. Датчик деформации 1 крепится на поверхность исследуемого объекта 12 в области, где возможна наибольшая механическая деформация (например, растяжение) в процессе эксплуатации исследуемого объекта 12. Такой датчик деформации 1 крепится к исследуемому объекту 12 путем подклеивания, например, с использованием эпоксидного клея. Блок предварительной обработки сигнала 2 представляет собой блок преобразования оптического сигнала (с оптического волокна со встроенной решеткой Брегга) в электрический сигнал. Этот блок может быть выполнен, например, по схеме, предложенной в работе [Shin C.S., Chiang C.C. *Fatigue damage monitoring in polymeric composites using multiple fiber Bragg gratings* // *Int. J. Fatigue*. - 2006. - Vol. 28. No. 10. - P. 1315-1321]. Блок предварительной обра-

ботки сигнала 2 дополнительно содержит источник оптического излучения, например, полупроводниковый лазер, и тем самым формирует зондирующий сигнал [Матюнин С.А., Бабаев О.Г.-О. Экспериментальное исследование деполяризации лазерного излучения элементами волоконной оптики // Компьютерная оптика. 2017. № 3]. Усилитель сигнала 3, может быть выполнен как и усилитель напряжения 9, с использованием малошумящего операционного усилителя ADA4625-2 [URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4625-l-4625-2.pdf>]. Первый аналого-цифровой преобразователь 4, который может быть выполнен как и второй аналого-цифрового преобразователь 10 и построен на микросхеме AD7771 (тип SAR). Сигналы с аналогово-цифровых преобразователей 4 и 10 поступают и обрабатываются в блоке обработки информации 5, представляющем собой, например, запрограммированный микроконтроллер ATmega8 [Баранова Елизавета Михайловна, Глаголев Владислав Максимович, Щепакин Константин Михайлович Программирование микроконтроллера на языке Си // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. № 9-2. URL: https://www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_datasheet.pdf]. Выход блока обработки информации 5 соединен с входом блоком индикации 11, представляющим собой графический дисплей MT-12232A [Лютов Александр, Жидкокристиаллические индикаторы производства МЭЛТ // Компоненты и Технологии. 2002. № 19].

Рассмотрим работу устройства контроля напряжений в монолитном полимерном материале, представленного на фиг. 1 и 2, с учетом выполнения алгоритма работы блока обработки информации 5 по фиг. 3.

Устройство контроля напряжения в монолитном полимерном материале готово к работе после включения источников электрического питания, которые на фиг. 1 и 2 не показаны. После включения электрического питания в блок обработки информации 5 загружается программа согласно алгоритму, приведенному на фиг. 3.

При внешнем механическом воздействии на исследуемый монолитный прозрачный поликарбонат, приводящем к возникновению в нем деформаций (например, деформации растяжения или изгиба), он проявляет пьезоэлектрические свойства [H. Nalwa *Ferroelectric Polymers* // Marcel Dekker, Inc., New York, 1995. - 895 p]. Вследствие этого на противоположных поверхностях монолитного прозрачного поликарбоната возникает разность потенциалов [Xin Lu, Hang Qu, Maksim Skorobogatiy *Piezoelectric Microstructured Fibers via Drawing of Multimaterial Preforms* // Scientific Reports, 2017. № 7. art. № 2907 DOI: 10.1038/s41598-017-01738-9], которую измеряют с помощью расположенных на части поверхности монолитного полимерного материала первого электрода 6 и второго электрода 7 из проводящего материала, соединенных проводами 8 с усилителем напряжения 9. Полученный таким образом сигнал пьезоэлектрического отклика усиливается усилителем напряжения 9 и оцифровывается путем использования второго аналого-цифрового преобразователя 10. После чего оцифрованный сигнал подается в блок обработки информации 5. Одновременно с этим в блок обработки информации 5 поступает сигнал о деформации, полученный с датчика деформации 1, преобразованный в электрический сигнал в блоке предварительной обработки сигнала 2, усиленный в усилителе сигнала 3 и оцифрованный в первом аналого-цифровом преобразователе 4.

В блоке обработке информации 5 алгоритм по фиг. 3 реализуется с использованием любого языка программирования. В начале работы алгоритма устанавливается номер измерения $n=0$, где n - натуральный ряд чисел, а следующим действием задается номер текущего измерения по формуле $n=n+1$. В случае $n=1$ сигнал о пьезонапряжении $U_1(\varepsilon_1)$, являющийся функцией механической деформации 8, и значение механической деформации ε_1 записываются в памяти блока обработки информации 5, например во встроенной памяти микропроцессора ATmega8 (U_1 и ε_1 - значения пьезонапряжения и механической деформации, соответствующие номеру измерения $n=1$). После этого выполнение алгоритма продолжается с метки "1". В случае $n=2$ алгоритм выполняет те же действия, а в память блока обработки информации 5, например во встроенную память микропроцессора ATmega8, записывают значения $U_2(\varepsilon_2)$ и ε_2 (U_2 и ε_2 - значения пьезонапряжения и механической деформации, соответствующие номеру измерения $n=2$). После этого выполнение алгоритма продолжается с метки "1", и после проверки невыполнения условия $n \leq 2$ осуществляется вычисление значения коэффициента γ_{n-2} по формуле $\gamma_{n-2} = U_{n-1}(\varepsilon_{n-1}) - U_{n-2}(\varepsilon_{n-2})$ (где U_{n-1} , ε_{n-1} и γ_{n-1} - значения пьезонапряжения, механической деформации и коэффициента, соответствующие номеру измерения $n=n-1$; U_{n-2} , ε_{n-2} и γ_{n-2} - значения пьезонапряжения, механической деформации и коэффициента, соответствующие номеру измерения $n=n-2$). После чего выполняется проверка выполнения условия $n=3$, и, если условие выполняется, выполнение алгоритма продолжается с метки "1". Если условие $n=3$ не выполняется, то алгоритм переходит к проверке одновременного выполнения условий

$$\gamma_{n-1}/\gamma_1 < 0.1, \varepsilon_{n-2} < \varepsilon_{n-1}, \varepsilon_{n-2} - \varepsilon_{n-1} \neq 0 \quad (1)$$

Если условия (1) одновременно не выполняются, то выполнение алгоритма продолжается с метки "1". Если условия (1) выполняются одновременно и $\gamma=0.1$, то в блоке отображения информации 11 отображается информация "Предупреждение о возможном разрушении" изделия из монолитного полимерного материала. После чего выполнение алгоритма заканчивается до его перезапуска оператором, при необходимости.

Для подтверждения практической реализуемости данного изобретения были проведены экспериментальные исследования.

Результаты экспериментов приведены на фиг. 4 и 5, где приняты условные обозначения: 13 - $U(\epsilon)$, 14 - $P(\epsilon)$, 15 - $\gamma=\gamma(\epsilon)$, где $U(\epsilon)$ - пьезонапряжение, $P(\epsilon)$ - сила отклика исследуемого образца монолитного прозрачного поликарбоната на внешнее механическое воздействие, $\gamma(\epsilon)$ - коэффициент, характеризующий величину и изменение механических и пьезоэлектрических свойств исследуемого материала. На фиг. 4 приведены экспериментальные графики зависимостей $U(\epsilon)$, $P(\epsilon)$ и $\gamma=\gamma(\epsilon)$ при испытании образцов монолитного прозрачного поликарбоната на растяжение, на фиг. 5 - при испытании на изгиб.

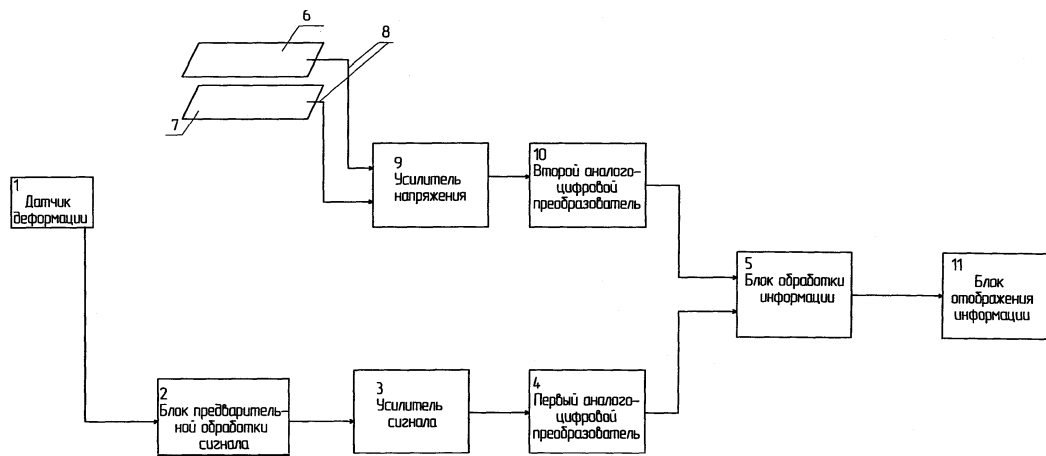
Эксперименты проводились на испытательной машине для механических испытаний Shimadzu по схеме, приведенной в работе. Пьезонапряжение $U(\epsilon)$ измерялось вольтметром В7-78/1 (входное сопротивление ~ 10 ГОм) с погрешностью измерений не более 10%. Результаты измерений силы отклика $P(\epsilon)$ образца на внешнее воздействие и величина деформации ϵ определялись с использованием программного обеспечения TRAPEZIUM X, учитывающего параметры образцов. Погрешности измерений $P(\epsilon)$ и ϵ не превышали $\pm 5\%$. Образцы нагружались со скоростью 0,5 мм/мин (для растяжения), 5 мм/мин (для изгиба). Пьезонапряжение, деформация и сила отклика измерялись в процессе нагружения образцов.

Характер изменения параметра $\gamma=\gamma(\epsilon)$ показывает его существенное снижение (на порядок величины) к моменту достижения максимума силы отклика $P(\epsilon)$, который характеризует предел прочности исследуемого материала. Это отмечается как для испытаний на растяжение, так и на изгиб образцов из монолитного прозрачного поликарбоната. Таким образом, в экспериментах при уменьшении на порядок величины $\gamma=\gamma(\epsilon)$ наблюдалось снижение прочности изделия и приближение момента его разрушения. Такое поведение коэффициента, характеризующего величину и изменение механических и пьезоэлектрических свойств исследуемого материала, γ можно объяснить существенными необратимыми изменениями в структуре материала, например началом трещинообразования.

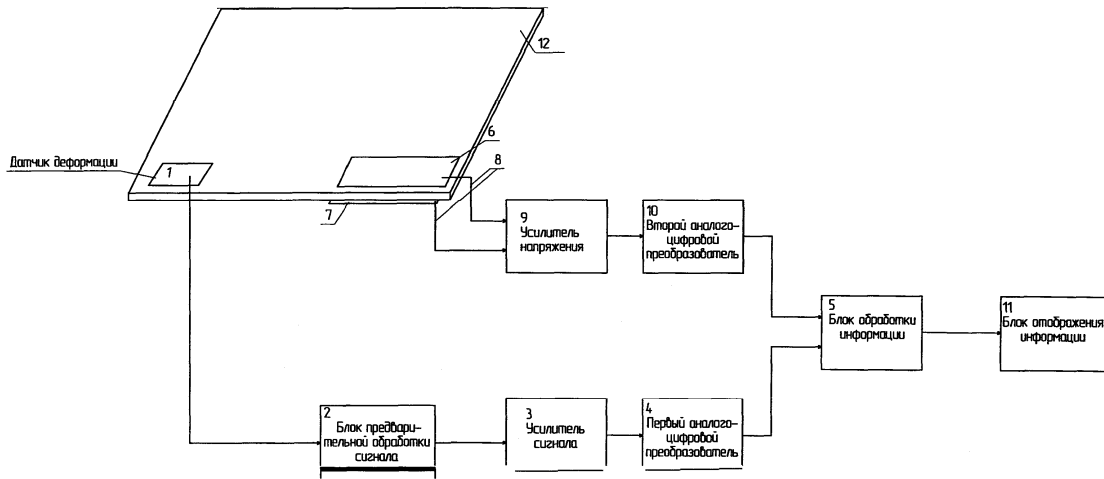
Таким образом, устройство контроля напряжений в монолитном полимерном материале позволяет учесть изменения в структуре этого материала за счет одновременного измерения пьезоэлектрического отклика и механической деформации монолитного полимерного материала на внешнее механическое воздействие, а также осуществлять контроль напряжений в монолитном полимерном материале в процессе его эксплуатации.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

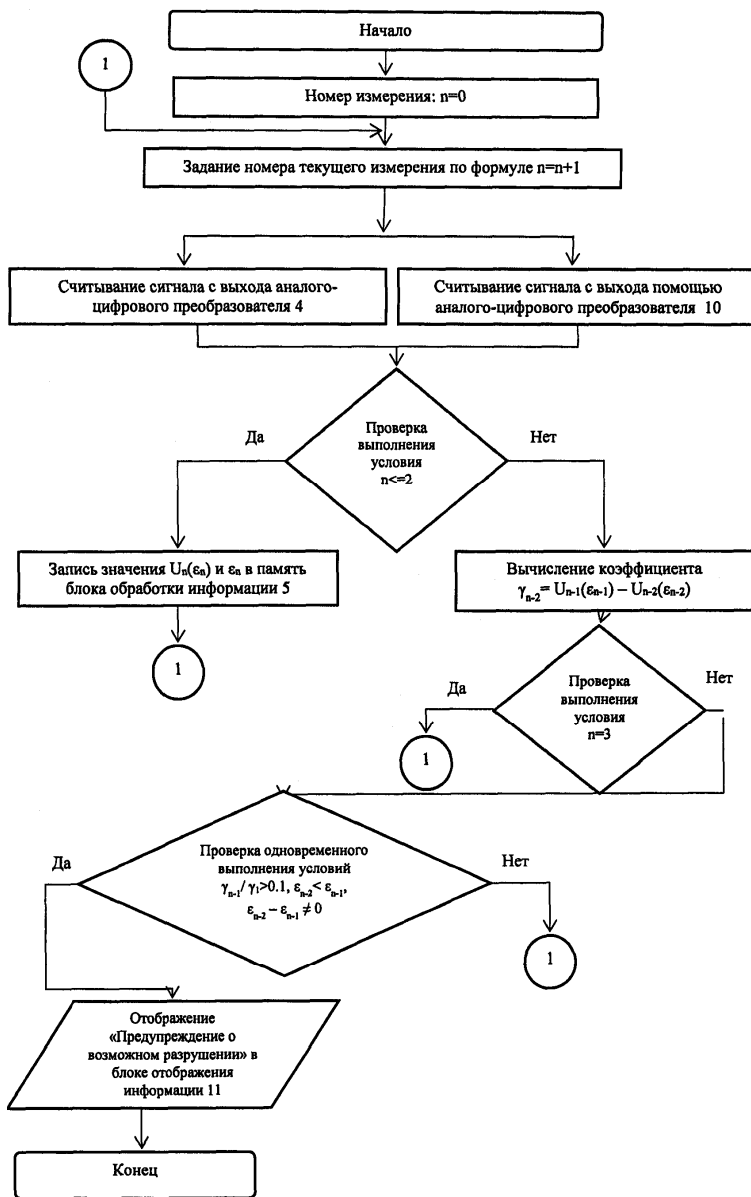
Устройство контроля напряжений в объекте из монолитного полимерного материала, обладающего пьезоэлектрическим эффектом, содержащее датчик деформации, отличающееся тем, что дополнительно содержит блок предварительной обработки сигнала, выход которого соединен с входом усилителя сигнала, выход которого соединен с входом первого аналого-цифрового преобразователя, выход которого соединен с первым входом блока обработки информации; два электрода из проводящего материала, размещаемые на противоположных сторонах исследуемого объекта друг напротив друга, к каждому из которых подсоединены по одному проводнику, другой конец указанных проводников соединен соответственно с первым и вторым входами усилителя напряжения, выход которого соединен с входом второго аналого-цифрового преобразователя, выход которого соединен со вторым входом блока обработки информации, причем вход блока предварительной обработки сигнала соединен с выходом датчика деформации.



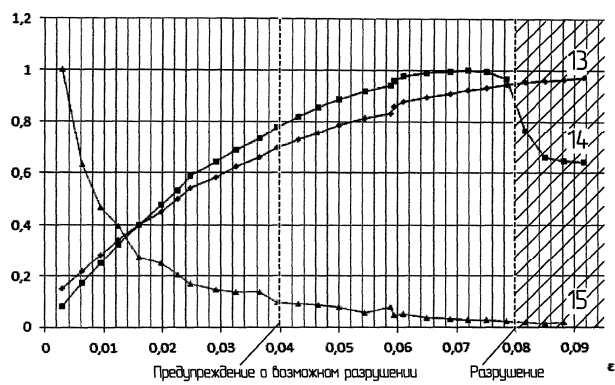
Фиг. 1



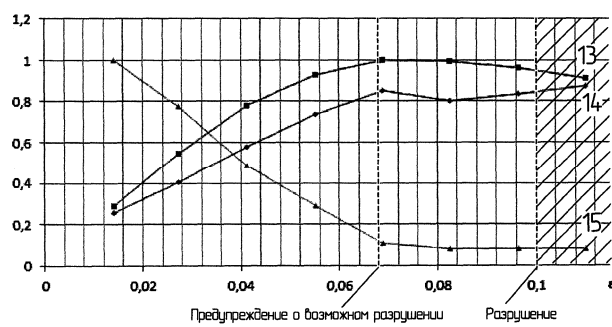
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2