

УДК 669.78

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-177-187

Для цитирования: Лихачев А. Н. Гибкие композиционные конструкции с управляемыми физико-механическими характеристиками // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 1. С. 177–187. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-177-187.

For citation: Likhachev A. N. [Flexible composite structures with controlled physical and mechanical characteristics]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 1, P. 177–187. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-177-187.

Гибкие композиционные конструкции с управляемыми физико-механическими характеристиками

А. Н. Лихачев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова
Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1
E-mail: alikhachev@yandex.ru

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, являющихся базой для разработок нового класса конструкций авиационно-космической техники, позволяющих реализовать подходы по созданию структур с изменяемыми морфологическими и функциональными характеристиками изделий. Конденсированные мягкие вещества, такие как эластомеры, гели, постепенно становятся функциональными элементами, на основе которых развивается создание мягких машин и электроники [1–3]. Исследования в данном направлении привели к созданию структур с особой архитектурой, которые являются механически совместимыми, деформируемыми и способными при определённой комбинации к восприятию и передаче сигнала, изменению своих форм и физических характеристик (теплопроводности, электропроводности и т. п.). Применение таких структур в определённом смысле моделирует многофункциональность, наблюдаемую в биологических объектах и структурах (коже, мышцах, нервной ткани) [4–7]. Создание конструкций, изменяющих свою форму, структуру и функционально-эксплуатационные характеристики в процессе работы с учётом меняющихся внешних и внутренних условий, является актуальной задачей для многих систем авиационно-космической техники. В данной работе рассмотрены морфологически изменяемые структуры, к которым можно отнести реконфигурируемые антенны, крылья летательных аппаратов (ЛА) с изменяемой формой и геометрией, гибкие робототехнические системы [8]. Применение таких систем, имеющих гибкие структурные элементы, позволяет создавать конструкции, способные преодолевать непредсказуемые препятствия за счёт своей адаптивной геометрии, вписываться в ограниченные пространства и выдерживать существенные нагрузки и вибрации. Одной из важнейших задач при разработке таких систем является организация распределённой системы актуации, связанная с проблемой создания внутренней структуры актуаторов, интегрированных в гибкую композиционную конструкцию актуаторов, выполненных из эластичных материалов.

В ряде источников [9–13] для работы термоактивных актуаторов исследовалось применение жестких наночастиц в качестве поверхностных нагревательных элементов или наполнителей для композитов, которые являются электрически чувствительными, магнитно-чувствительными и/или фотореактивными. Однако поверхностные нагревательные элементы ограничены в применении за пределами толщины в несколько сотен микрометров из-за низкой собственной теплопроводности [14]. Кроме того, жесткие компоненты существенно изменяют механические свойства создаваемой структуры, что ограничивает морфологические возможности создаваемых конструкций. Например, в [15] показано, что снижение электрического сопротивления для термонагревателя до приемлемых величин требует увеличения наполнителя до 15 % от массы структуры, при этом деформация срабатывания конструкции снижается на 35,0 %. Преодоление вышеупомянутые ограничений осуществляется путём создания материальной архитектуры, которая резко

расширяет диапазон свойств и динамических функций, разрабатываемого нагревательного элемента для актуатора. Многофункциональность достигается за счет встраивания в эластичную среду на основе полидиметилсилоксанового эластомера металлических волокон определённой конфигурации, которые обеспечивают подвижность и конформность деформируемой структуры актуатора при его функционировании. Показано, что, включение в структуру актуатора металлических волокон определённой конфигурации, не препятствуют его способности изменять форму и выполнять механическую работу в ответ на внешние раздражители. Морфинг формы в отсутствие внешней нагрузки может быть запрограммирован в структуре композита через включение в неё волокон с определёнными жесткостными и тепловыми характеристиками, такими, чтобы он мог обратимо переходить между запрограммированными морфологиями, используя электрическую или тепловую стимуляцию. Вместе эти свойства позволяют композиту демонстрировать богатое разнообразие функциональных возможностей, что позволяет ему одновременно реализовывать сенсорные и динамические характеристики.

Ключевые слова: Реконфигурируемые конструкции, морфологические характеристики, функциональные свойства, актуаторы, фазовый переход, композиционные структуры.

Flexible composite structures with controlled physical and mechanical characteristics

A. N. Likhachev

Baltic State Technical University "VOENMEH" D. F. Ustinov"
1,1st Krasnoarmeyskaya, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation
E-mail: alikhachev@yandex.ru

The article presents the results of theoretical and experimental studies that are the basis for the development of a new class of aerospace engineering structures that allow implementing approaches to create structures with variable morphological and functional characteristics of products. Condensed soft substances, such as elastomers, gels, gradually become functional elements on the basis of which the creation of soft machines and electronics develops [1–3]. Research in this direction has led to the creation of structures with a special architecture that are mechanically compatible, deformable and capable, with a certain combination, of perceiving and transmitting a signal, changing their shapes and physical characteristics (thermal conductivity, electrical conductivity, etc.). The use of such structures in a certain sense models the multifunctionality observed in biological objects and structures (skin, muscles, nervous tissue) [4–7]. The creation of structures that change their shape, structure and change their functional and operational characteristics in the process of work, taking into account changing external and internal conditions, is an urgent task for many systems of aerospace technology. In this paper, morphologically changeable structures are considered, which include reconfigurable antennas, aircraft wings with variable shape and geometry, flexible robotic systems [8]. The use of such systems with flexible structural elements makes it possible to create structures capable of overcoming unpredictable obstacles due to their adaptive geometry, fit into limited spaces and withstand significant loads and vibrations. One of the most important tasks in the development of such systems is the organization of a distributed actuation system associated with the problem of creating an internal structure of actuators integrated into a flexible composite design of actuators made of elastic materials. In a number of works for the operation of thermoactive actuators, the use of rigid nanoparticles as surface heating elements or as fillers for composites that are electrically sensitive, magnetically sensitive and/or photoreactive has been investigated [9–13]. However, surface heating elements are limited in use beyond a thickness of several hundred micrometers due to their low intrinsic thermal conductivity [14]. In addition, rigid components significantly change the mechanical properties of the structure being created, which limits the morphological capabilities of the structures being created. For example, in [15], it is shown that reducing the electrical resistance for a thermal heater to acceptable values requires an increase in the filler to 15% of the mass of the structure, while the

deformation of the actuation of the structure is reduced by 35.0%. In this paper, overcoming the above limitations is carried out by creating a material architecture that dramatically expands the range of properties and dynamic functions of the heating element being developed for the actuator. Multifunctionality is achieved by embedding metal fibers of a certain configuration into an elastic medium based on polydimethylsiloxane elastomer, which provide mobility and conformality of the deformable structure of the actuator during its operation. It is shown that the inclusion of metal fibers of a certain configuration in the structure of the actuator does not interfere with its ability to change shape and perform mechanical work in response to external stimuli. Shape morphing in the absence of an external load can be programmed in the composite structure by including fibers with certain stiffness and thermal characteristics in it so that it can reversibly switch between programmed morphologies using electrical or thermal stimulation. Together, these properties allow the composite to demonstrate a rich variety of functionality, which allows it to simultaneously realize sensory and dynamic characteristics.

Keywords: reconfigurable structures, morphological characteristics, functional properties, actuators, phase transition, composite structures.

Введение

Проблема создания конструкций с изменяемой формой и размерами, адаптирующихся к изменяющимся внешним условиям в процессе эксплуатации изделия, является актуальной для многих задач авиационно-космической техники, таких как задачи создания крупногабаритных космических конструкций, точной настройки и коррекции оптических систем аппаратов, создания реконфигурируемых антенн и т. п. В данной работе рассмотрены морфологически изменяемые структуры, к которым можно отнести реконфигурируемые антенны, крылья ЛА с изменяемой формой и геометрией, гибкие робототехнические системы [16]. Применение таких систем, имеющих гибкие структурные элементы, позволяет создавать конструкции, способные преодолевать непредсказуемые препятствия за счёт своей адаптивной геометрии, вписываться в ограниченные пространства и выдерживать существенные нагрузки и вибрации. Одной из важнейших задач при разработке таких систем является организация распределённой системы актуации, связанная с проблемой создания внутренней структуры актуаторов, интегрированных в гибкую композиционную конструкцию. Рассмотрены основные структурные элементы таких систем, в частности архитектура нагревательного элемента (НЭ) термоактивного актуатора [17]. Разработан новый вид НЭ на основе композитного электро- и теплопроводного материала (КЭТМ). Он обладает рядом привлекательных свойств, таких как высокая удельная жесткость, высокие теплопроводность и электропроводность, хорошая демпфирующая способность и возможность регулировки свойств КЭТМ. Композиционная структура НЭ (рис. 1) состоит из эластичной матрицы на основе полидиметилсилоксана и хаотически уложенных металлических волокон, собранных в ленточную структуру. Металлические волокна могут скрепляться полимерным связующим или же оставаться не скреплёнными и изготавливаются в виде матричного материала.

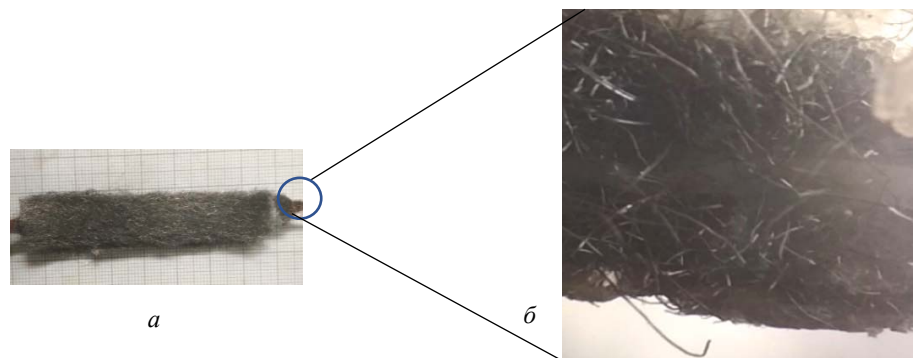


Рис. 1. Нагревательный элемент (а), микроструктура нагревательного элемента (б)

Fig. 1. Heating element (a), microstructure of the heating element (b)

Данная система предназначена для нагрева и последующего охлаждения активной структуры актуатора, что с точки зрения его работы выдвигает ряд неоднозначных требований. Она должна быть легко деформируемой в процессе работы актуатора, иметь высокую теплопроводность, позволяющую быстро нагревать и охлаждать рабочий материал актуатора, быть электропроводной, изменять свои характеристики под действием управляющего сигнала пропорционального деформации актуатора.

Постановка задачи исследования

Задачей исследования, решаемой на данном этапе, было создание инженерной аналитической методики расчёта такой структуры с оценкой влияния ключевых особенностей анизотропной структуры на ее прочность, электропроводность и теплопроводность. При этом, характерные напряжения и деформации, полученные с использованием плотности энергии деформации, были применены для определения деформации волокнистого наполнителя. Для описания стохастического волокнистого материала была построена трехмерная периодическая модель контактируемых друг с другом стержней, основанная на механике сплошной среды. Прогнозирование деформационных характеристик трехмерного массива связанных волокон является сложной задачей, особенно если они расположены нерегулярно. Для случайного распределения ориентации волокна отклонение сегмента волокна будет ограничено соседними сегментами. Предполагается, что при усреднении по объему эффекты ограничения будут сведены на нет, в этом случае общую деформацию можно предсказать путем суммирования вкладов отдельных сегментов, взятых изолированно. Чистое осевое удлинение ($\Delta X/X$) и чистое поперечное сжатие ($\Delta Z/Z$) прогнозируются в соответствии с уравнениями (1) и (2) соответственно:

$$e_x = \frac{\Delta x}{x} = \left(\frac{16F_x}{9E_f} \right) \left(\frac{L}{D} \right)^2, \quad (1)$$

$$e_z = \frac{\Delta z}{z} = \left(-\frac{16F_z}{9E_f} \right) \left(\frac{L}{D} \right)^2, \quad (2)$$

где F_x и F_z – компоненты приложенной нагрузки; E_f – модуль волокна; L , D – длина и диаметр волокна, соответственно. Результирующая деформация волоконной матрицы приводит к изменению формы, как показано на рис. 2.

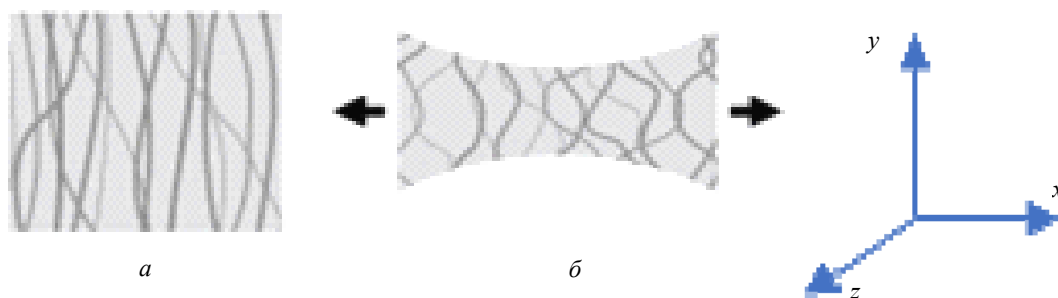


Рис. 2. Структура КЭТМ: *a* – исходная; *b* – деформированная

Fig. 2. CETM structure: *a* – initial; *b* – deformed

Прогнозируемые изменения формы, полученные с использованием уравнений (1) и (2), представлены на рис. 2 и зависят от соотношения сторон сегмента волокна, L/D . Были проведены измерения осевого удлинения для отдельной волоконной структуры, при этом соотношение сторон сегментов волокна для связанных волоконных массивов было оценено по микрофотографиям (рис. 1.) По результатам эксперимента установлено, что измеренные отклонения больше, чем предсказанные моделью, в среднем на 20–25 %. Впрочем, в данном случае не ожидается близкого согласия

с экспериментом, поскольку в действительности деформационное поведение волоконной сети является сложным, а вызванные внешним воздействием на КЭТМ изменения формы могут быть существенными. В соответствии с этим предположением электрическое сопротивление, которое является фундаментальной физической величиной, больше не является постоянным по всему образцу. В данной работе математические модели оцениваются с точки зрения электрического сопротивления, которое зависит от размера образца. При этом существенный пьезорезистивный эффект наблюдается (сопротивление меняется на порядок), когда композит подвергался одноосному растяжению или трансверсальному сжатию, что связано с перестройкой внутренней структуры конструкции и изменением характера и количества контактов электропроводящей структуры. Пьезорезистивный отклик материала можно регулировать, изменяя параметры структуры наполнителя (её анизотропию), размеры волокон (L , D), их объёмную долю в композиционном материале и жёсткость контакта между матрицей и волокнами. Анизотропия в ориентации металлических волокон приводит к анизотропии проводимости композита. Поток электрического тока через структуру КЭТМ зависит от анизотропных свойств наполнителя и различается на порядок в зависимости от того, как расположены оси большинства волокон (перпендикулярно или вдоль направления тока), что объясняет разницу в сопротивлении КЭТМ (7,6 Ом – волокна расположены параллельно направлению тока, 84 Ом – перпендикулярно). Электрическая и механическая анизотропия материала КЭТМ может быть уменьшена путем изготовления слоистого композита с осью большинства волокон каждого проводящего слоя, ориентированного в различных направлениях. Однако при этом существенно увеличивается жесткость структуры КЭТМ. Он становится похож на многослойные композиционные структуры, применяемые при создании ортотропных конструкций, обладающих высокой жесткостью. Были проведены испытания для оценки удельного сопротивления образца КЭТМ при его растяжении (рис. 3). Эти измерения были проведены с использованием четырехточечного зонда для компенсации влияния контактного сопротивления, а значения удельного сопротивления были получены путем учета геометрических изменений образца в процессе его удлинения.

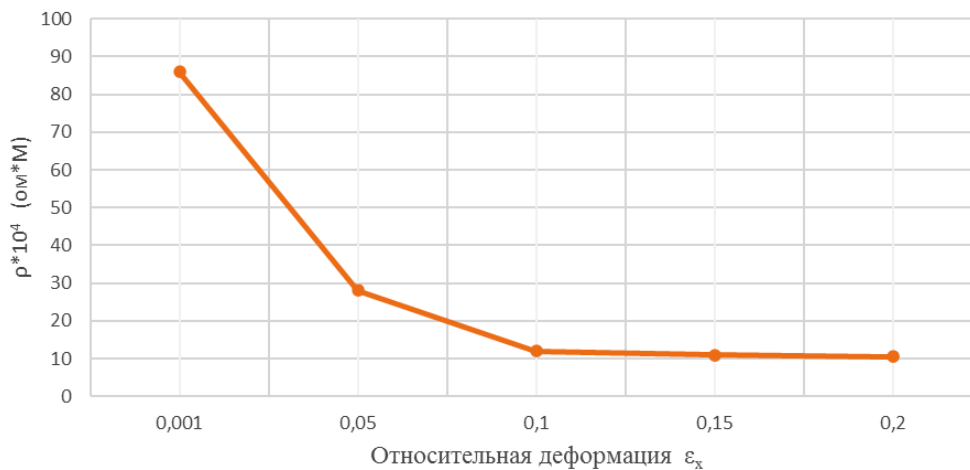


Рис. 3. Зависимость изменения сопротивления КЭТМ от величины относительной деформации при растяжении

Fig. 3. Changes in the CETM resistance from the magnitude of the relative strain under tension

Рис. 3 иллюстрирует влияние относительной деформации, возникающей при растяжении выше, описанной структуры металлических волокон, находящихся внутри силиконовой полимерной матрицы, на изменение сопротивления образца КЭТМ. Деформируемая упруго силиконовая матрица приводит к изгибу тонких податливых металлических нитей наполнителя, изменяя условия контакта отдельных волокон друг с другом, а, следовательно, и влияя на общее электрическое сопротивление исследуемого образца КЭТМ. График на рис. 3 характеризует зависимость удельного сопротивления от деформации образца, который был удлинен в направ-

лении, перпендикулярном оси большинства волокон металлического наполнителя, при этом направление тока соответствовало направлению удлинения образца. График показывает снижение удельного сопротивления с $89,0 \times 10^{-4}$ Ом*м при относительной деформации 0,001 до $10,0 \times 10^{-4}$ Ом*м, при относительной деформации равной 0,20. Последнее связано с изменением структуры материала КЭТМ, приводящей к увеличению числа контактов в структуре и их более плотной упаковке при её деформации. Проведены исследования основных структурных элементов такой системы, в частности архитектура нагревательного элемента актуатора термоактивного типа [1], основанного на использовании эластичных волокон, находящихся внутри конструктивного элемента нагревателя, выполненного из силиконового эластомера. Исследования показали, что с уменьшением диаметра волокна качество архитектуры улучшается, количество полученных контактов волокон между собой увеличивается, а длина между контактами уменьшается. Уплотнение материала структуры металлического наполнителя происходит после деформации материала, отдельного металлического волокна. При этом, благодаря пластичности зоны контакта между волокнами локализация деформации вызывает существенный изгиб волокна, выполненного из металла, в результате чего величина макроскопической деформации структуры проводящего наполнителя при заданном напряжении становится существенно больше. Было исследовано влияние начальной плотности материала на его электрические характеристики. С этой целью проведены испытания на сжатие образцов материала различной начальной плотностью (80,120 и 180 кг/м³). Несмотря на относительно невысокую электропроводность материала образца, использование стальных волокон для изготовления КЭТМ является рациональным, что связано с особенностями сочетания электрических и механических свойств такого наполнителя. Функциональная полезность такого подхода при создании деформируемого проводящего материала связана со следующими положительными качествами создаваемой структуры: а) металлические волокна обеспечивают электропроводящие пути через волоконную сеть структуры наполнителя; б) реализация высокой эластичности спутанной волоконистой структуры позволяет реализовать высокую степень деформации при нагружении без её разрушения; в) высокой модуль упругости металлических волокон позволяет создавать обратимые деформации структуры при динамическом нагружении и возвращаться к исходной геометрии КЭТМ после снятия нагрузки. Растяжимость металлической структуры КЭТМ достигается за счет изгиба отдельных тонких металлических волокон. Когда такая структура металлического наполнителя растягивается в направлении, перпендикулярном оси большинства волокон, волокна изгибаются и занимают удалённые позиции друг от друга. Жесткость при изгибе металлической структуры, предполагая, что она имеет форму стержня, определяется по формуле

$$K = \frac{EID^4}{64}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости; I – момент инерции; EI – жесткость при изгибе, диаметр волокна равен D .

Тонкий металлический наполнитель в виде спутанных волокон был выбран, потому что жесткость при изгибе нелинейно зависит от диаметра металлического волокна и с уменьшением диаметра волокна их податливость существенно увеличивается, что благоприятно сказывается на условия функционирования такой структуры при знакопеременных нагрузках, характерных для работы актуатора, частью которого является нагреватель, выполненный из КЭТМ. В данной работе использовались металлические волокна со средним диаметром волокна ~30 мкм в качестве проводника для КЭТМ, что позволило создать проводящий композит, способный к обратимой деформации.

Разработанная структура сочетает в себе эластичность эластомеров с электропроводностью металлического проводника, создавая податливый проводящий материал, который может быть встроен в корпус деформирующейся структуры, например, мягкого робота. Предложенные решения связаны с созданием КЭТМ, способного реализовать концепцию деформируемого

эластичного нагревателя, позволяющего организовать электрический путь в любом требуемом направлении, в том числе и перпендикулярно плоскости расположения металлических волокон в эластомерной структуре. Эксперименты подтвердили, что образцы обладают высокой растяжимостью с относительным удлинением при разрыве $380 \pm 12\%$ ($n = 5$ измерения). Разрушение структуры происходило в результате расслоения между слоем эластомера и электропроводной волокнистой структурой КЭТМ. Такая устойчивость к деформации при растяжении образца превосходит требования к большинству функциональных устройств, в которых возможно использование таких элементов. Исследование образца КЭТМ на растяжение показало, что сопротивление КЭТМ незначительно изменяется при удлинении образца до 200%. Небольшое изменение сопротивления ($< 0,3$ Ом) наблюдалось, когда образец подвергали циклическому испытанию (количество циклов нагружения равно 800 при удлинении 100%). Результаты испытания показали, что, хотя сопротивление образцов менялось при начальной нагрузке ($< 1,5$ Па), это изменение снижалось при более высокой нагрузке на образец. Сопротивление КЭТМ $< 2,0$ Ом было достигнуто для всех образцов при нагрузке на сжатие $> 1,5$ Па.

Для определения теплопередачи в процессе нагрева и охлаждения НЭ была рассмотрена задача передачи тепла для волокнистой среды, ориентированной под углом θ по отношению к тепловому потоку (рис. 4). Задача рассматривается при допущении, что сплошная и дисперсная фазы (металлические волокна) имеют форму параллельных пластин (слоёв) и образуют угол θ с направлением теплового потока. Рассмотрен подход с использованием простейших моделей, система состоит из плоскопараллельных слоёв материалов, имеющих различные коэффициенты теплопроводности λ_f и λ_m для волокна и матрицы, соответственно. Процентное содержание волокон в слое равно φ . При расположении слоёв материала вдоль потока тепла теплопроводность системы будет максимальной и определяется из выражения (4)

$$\lambda_{\max} = \varphi\lambda_f + (1 - \varphi)\lambda_m. \quad (4)$$

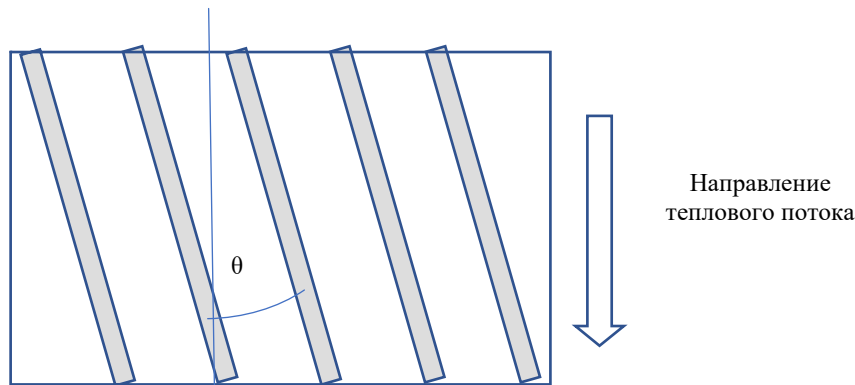


Рис. 4. Схема структуры волокнистой среды КЭТМ с заданной ориентацией

Fig. 4. Diagram of the structure of a fibrous medium of a CETM with a given orientation

В случае расположения слоёв перпендикулярно направлению теплового потока теплопроводность системы минимальна и равна

$$\lambda_{\min} = \frac{\lambda_f\lambda_m}{\varphi\lambda_m + (1 - \varphi)\lambda_f}. \quad (5)$$

В реальных структурах слои теплопроводящего материала располагаются под углом θ по отношению к тепловому потоку (рис. 4). Используя выражения (4) и (5), можно записать результирующее выражение для эффективной теплопроводности такой системы:

$$\lambda_{\text{eff}} = \sqrt{\lambda_{\max}^2 \cos^2(\theta) + \lambda_{\min}^2 \sin^2(\theta)}. \quad (6)$$

Для случая распределения волокон случайным образом использованы решения, основанные на модели двухфазной эффективной теплопроводности (модель Гамильтона) [17]:

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_m} = \frac{\alpha + (n-1) + (n-1)(\alpha-1)\varphi}{\alpha + (n-1) + (1-\alpha)\varphi}. \quad (7)$$

Здесь $\alpha = \lambda_f / \lambda_m$; n – эмпирический коэффициент формы ($n = 6$ для волокон в форме цилиндра).

При рассмотрении стохастической модели распределения волокон использовалась следующую зависимость:

$$\lambda_e = \lambda_f^\varphi \lambda_m^{1-\varphi}. \quad (8)$$

Применив подход, предложенный Толлом [18], использовано уравнение для вычисления максимальной плотности упаковки волокон без ограничений на основе статистического анализа распределения точек контакта волокна с волокном:

$$\varphi = \frac{\frac{N_0}{4}}{\frac{2}{\pi r_f f} + g + 1}, \quad (9)$$

где N_0 – количество точек контакта волокна с волокном, которое предполагается равным 8, а f и g – константы, зависящие от распределения ориентации волокна; $r_f = \frac{l_f}{d_f}$ – относительная

длина волокна зависящей от его длины l_f и диаметра d_f . Для случайного трехмерного расположения волокон уравнение (9) преобразуется в следующее:

$$\varphi = \frac{4}{r_f + 3}. \quad (10)$$

На рис. 5 представлено сравнение результатов расчёта и эксперимента по определению коэффициента эффективной теплопроводности образца КЭТМ на основе силиконового эластомера и металлических волокон при различных значениях содержания волокон φ_{max} в КЭТМ и углов ориентации волокон относительно теплового потока θ .

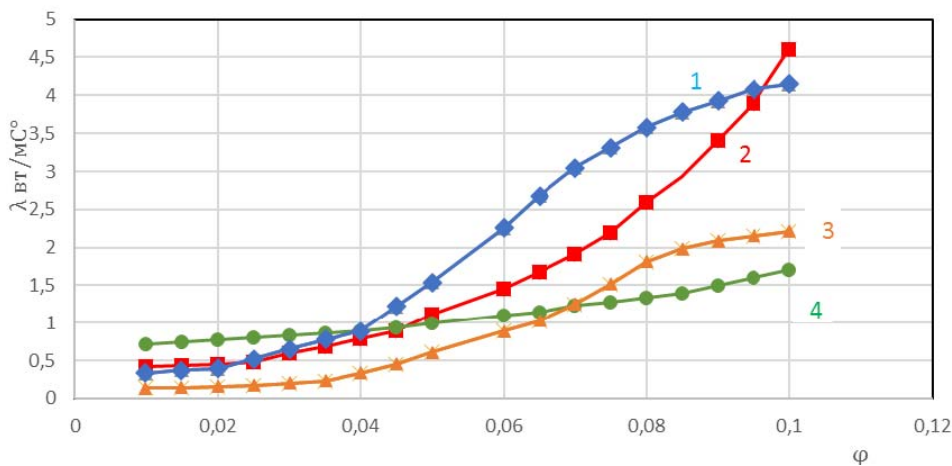


Рис. 5. Зависимость теплопроводности КЭТМ от относительного объема волокон $\lambda_{eff} = F(\varphi)$ и угла ориентации волокна θ . Результаты экспериментальных измерений: 1 – $\theta = 0^\circ$, 3 – $\theta = 45^\circ$. Результаты расчёта: 2 – $\theta = 0^\circ$; 4 – $\theta = 45^\circ$

Fig. 5. The dependence of the thermal conductivity of the CETM on the relative volume of the fibers $\lambda_{eff} = F(\varphi)$ and the angle of orientation of the fiber – θ . Results of experimental measurements: 1 – $\theta = 0^\circ$, 3 – $\theta = 45^\circ$. Calculation results: 2 – $\theta = 0^\circ$; 4 – $\theta = 45^\circ$

Заключение

Был разработан и исследован эластично деформируемый нагревательный элемент для эластомерных актуаторов на базе силиконовых эластомеров и металлических волокон, предназначенный для использования в управляемых «интеллектуальных» композиционных конструкциях. Разработанная конструкция КЭТМ обладает низким сопротивлением электрическому току и может быть легко встроена в гибкие структуры, такие как реконфигурируемые антенны, гибкие робототехнические устройства и т. п. В отличие от обычных проводов, КЭТМ можно использовать для распределения электрического тока и потенциала по всему корпусу мягкого устройства, когда структура подвергается большим упругим деформациям (более 100 %) в процессе своего функционирования. Сочетание электропроводности, деформируемости и конформности КЭТМ позволяет создавать электрические соединения с твердыми металлическими компонентами во время их перемещения и изменения формы. Эти свойства облегчают сопряжение обычных жестких электрических элементов с мягкими устройствами, а также обеспечивают создание полностью мягких электрических устройств. Применение таких систем основе КЭТМ позволяет решить проблему создания электрических соединений для деформируемых структур с помощью эластомерного полимера. КЭТМ может быть полезным в мягкой робототехнике, где создание деформируемых электрических соединений с помощью эластомеров облегчит внедрение жестких электрических и механических компонентов в мягкие структуры. Объединение мягких приводов с электрическими компонентами на базе КЭТМ, предназначенными для встраивания в мягкие устройства, является важным шагом на пути к созданию мягких роботов, которые могут воспринимать внешнюю среду и реагировать на нее. В работе было проведено экспериментальное и теоретическое исследование кондуктивного теплообмена в эластомерной матрице с металлическим волокнистым материалом. Для теоретического исследования использовано несколько моделей приближения – Толла и Гамильтона – для расчета эффективной теплопроводности для двух направлений укладки (0° и 45°) металлических волокон в эластичной среде. С использованием сопряженного моделирования были сделаны следующие основные выводы:

1. Результаты, рассчитанные с помощью моделей Гамильтона и Толла для КЭТМ для металлических волокон, случайно распределенных в эластичной среде, удовлетворительно согласуются с результатами, полученными экспериментальным путём. Следовательно, такой подход позволяет прогнозировать эффективную теплопроводность такой структуры.

2. Эксперименты показали экспоненциальное уменьшение коэффициента теплопроводности структуры с увеличением угла между направлением теплового потока и ориентацией волокна. Предлагаемая модель не позволяет отследить такую зависимость, что указывает на необходимость её уточнения.

3. Использование подходов, основанных на многофазной модели, содержащей изолированные и проводящие волокна, позволило определить влияние объёмной доли волокон на эффективную теплопроводность композитного электро-теплопроводного материала (КЭТМ). Из представленных экспериментальных и расчётных результатов следует, что эта зависимость близка к линейной за исключением зоны с высоким содержанием металлических волокон ($\varphi > 0,06$), что указывает на нелинейность процессов образования контактов между волокнами металлического наполнителя.

Библиографические ссылки

1. White T. J., Broer D. J. Programmable and adaptive mechanics with liquid crystal polymer networks and elastomers // *Nat. Mater.* 2015. No. 14. P. 1087–1098.
2. Rich S. I., Wood R. J., Majidi C. Untethered soft robotics // *Nat. Electron.* 2018. No. 1. P. 102–112.
3. Yang C., Suo Z. Hydrogel ionotronics // *Nat. Rev. Mater.* 2018. No. 3. P. 125–142.
4. Liu Y., Pharr M., Salvatore G. A. Lab-on-skin: A review of flexible and stretchable electronics for wearable health monitoring // *ACS Nano.* 2017. No. 11. P. 9614–9635.

5. Behl M., Razzaq M. Y., Lendlein A. Multifunctional shape-memory polymers // *Adv. Mater.* 2010. No. 22. P. 3388–3410.
6. Mirvakili S. M., Hunter I. W. Artificial muscles: Mechanisms, applications, and challenges // *Adv. Mater.* 2018. No. 30. P. 1704407.
7. Jeon S.-J., Hauser A. W., Hayward R. C. Shape-morphing materials from stimuli-responsive hydrogel hybrids // *Acc. Chem. Res.* 2017. No. 50. P. 161–169.
8. Wermter H., Finkelmann H. Liquid crystalline elastomers as artificial muscles // *e-Polymers.* 2001. No. 1. P. 013.
9. Actuation of liquid crystal elastomers reprocessed with carbon nanoparticles / M. Chambers, B. Zalar, M. Remškar et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2006. No. 89. P. 243116.
10. Nematic elastomers with aligned carbon nanotubes: New electromechanical actuators / S. Courty, J. Mine, A. R. Tajbakhsh, E. M. Terentjev // *Europhys. Lett. (EPL)*. 2003. No. 64. P. 654–660.
11. Carbon-nanotube sensitized nematic elastomer composites for IR-visible photo-actuation / J. E. Marshall, Y. Ji, N. Torras et al. // *Soft Matter*. 2012. No. 8. P. 1570–1574.
12. Liquid crystal elastomer actuators: Synthesis, alignment, and applications / R. S. Kularatne, H. Kim, J. M. Boothby, T. H. Ware // *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.* 2017. No. 55. P. 395–411.
13. Shahinpoor M. “Electrically activated artificial muscles made with liquid crystal elastomers” in *Smart Structures and Materials 2000: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* (International Society for Optics and Photonics. 2000. Vol. 3987. P. 187–193.
14. Reversible infrared actuation of carbon nanotube–liquid crystalline elastomer nanocomposites / L. Yang, K. Setyowati, A. Li et al. // *Adv. Mater.* 2008. No. 20. P. 2271–2275.
15. Electromechanically responsive liquid crystal elastomer nano-composites for active cell culture / A. Agrawal et al. // *ACS Macro Lett.* 2016. No. 5. P. 1386–1390.
16. Лихачёв А. Н. Исследование создания деформируемых гибких композиционных структур с изменяемой жесткостью на основе гидравлических принципов // *Актуальные проблемы защиты и безопасности : тр. XXV Всерос. науч.-практ. конф. РАРАН. Т. 1. Вооружение, военная и специальная техника.* 2022. С. 93–96.
17. Лихачёв А. Н. Экспериментально-теоретические исследования создания морфинговых композиционных конструкций на основе управляемого гибкого каркаса с изменяемой жесткостью // *Решетневские чтения : материалы XXV Междунар. науч. конфер. (10–13 ноября, 2021, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмч. ун-т. Красноярск, 2021. С. 100–101.*
18. Jagjiwanram, Singh R. Effective thermal conductivity of highly porous two-phase systems // *Applied Thermal Engineering.* 2004. Vol. 24. P. 2727–2735.
19. Toll S. Packing Mechanics of Fiber Reinforcements // *Polymer Engineering and Science.* 1998. Vol. 38, No. 8. P. 1337–1350.

References

1. White T. J., Broer D. J. Programmable and adaptive mechanics with liquid crystal polymer networks and elastomers. *Nat. Mater.* 2015, No. 14, P. 1087–1098.
2. Rich S. I., Wood R. J., Majidi C. Untethered soft robotics. *Nat. Electron.* 2018, No. 1, P. 102–112.
3. Yang C., Suo Z. Hydrogel ionotronics. *Nat. Rev. Mater.* 2018, No. 3, P. 125–142.
4. Liu Y., Pharr M., Salvatore G. A. Lab-on-skin: A review of flexible and stretchable electronics for wearable health monitoring. *ACS Nano.* 2017, No. 11, P. 9614–9635.
5. Behl M., Razzaq M. Y., Lendlein A. Multifunctional shape-memory polymers. *Adv. Mater.* 2010, No. 22, P. 3388–3410.
6. Mirvakili S. M., Hunter I. W. Artificial muscles: Mechanisms, applications, and challenges. *Adv. Mater.* 2018, No. 30, P. 1704407.
7. Jeon S.-J., Hauser A. W., Hayward R. C. Shape-morphing materials from stimuli-responsive hydrogel hybrids. *Acc. Chem. Res.* 2017, No. 50, P. 161–169.

8. Wermter H., Finkelmann H. Liquid crystalline elastomers as artificial muscles. *e-Polymers*. 2001, No. 1, P. 013.
9. Chambers M., Zalar B., Remškar M. et al Actuation of liquid crystal elastomers reprocessed with carbon nanoparticles. *Appl. Phys. Lett.* 2006, No. 89, P. 243116.
10. Courty S., Mine J., Tajbakhsh A. R., Terentjev E. M. Nematic elastomers with aligned carbon nanotubes: New electromechanical actuators. *Europhys. Lett. (EPL)*. 2003, No. 64, P. 654–660.
11. Marshall J. E., Ji Y., Torras N. et al. Carbon-nanotube sensitized nematic elastomer composites for IR-visible photo-actuation. *Soft Matter*. 2012, No. 8, P. 1570–1574.
12. Kularatne R. S., Kim H., Boothby J. M., Ware T. H. Liquid crystal elastomer actuators: Synthesis, alignment, and applications. *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.* 2017, No. 55, P. 395–411.
13. Shahinpoor M. “Electrically activated artificial muscles made with liquid crystal elastomers” in Smart Structures and Materials 2000: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* (*International Society for Optics and Photonics*. 2000, Vol. 3987, P. 187–193.
14. Yang L., Setyowati K., Li A. et al. Reversible infrared actuation of carbon nanotube–liquid crystalline elastomer nanocomposites. *Adv. Mater.* 2008, No. 20, P. 2271–2275.
15. Agrawal A. et al. Electromechanically responsive liquid crystal elastomer nano-composites for active cell culture. *ACS Macro Lett.* 2016, No. 5, P. 1386–1390.
16. Likhachev A. N. [Research on the creation of deformable flexible composite structures with variable stiffness based on hydraulic principles]. *Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti : tr. XXV Vseross. nauch.-prakt. konf. RARAN. T. 1. Vooruzhenie, voennaya i spetsial'naya tekhnika* [Actual problems of protection and safety: tr. XXV All-Russian. scientific-practical. conf. RARAN. T. 1. Armament, military and special equipment]. 2022, P. 93–96 (In Russ.).
17. Likhachev A. N. [Experimental and theoretical studies of the creation of morphing composite structures based on a controlled flexible frame with variable stiffness]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XXV Mezhdunar. nauch. konfer.* [Reshetnev readings: materials of the XXV Intern. scientific conf.]. (November 10–13, 2021, Krasnoyarsk): at 2 pm / under the general ed. Yu. Yu. Loginova; Sib. state aerospace un-t. Krasnoyarsk, 2021, P. 100–101 (In Russ.).
18. Jagjiwanram, Singh R. Effective thermal conductivity of highly porous two-phase systems. *Applied Thermal Engineering*. 2004, Vol. 24, P. 2727–2735.
19. Toll S. Packing Mechanics of Fiber Reinforcements. *Polymer Engineering and Science*. 1998, Vol. 38, No. 8, P. 1337–1350.

© Лихачев А. Н., 2023

Лихачёв Алексей Николаевич – доктор технических наук, доцент, директор НОЦ КМК; Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова. E-mail: alikhachev@yandex.ru.

Likhachev Alexey Nikolaevich – Dr. Sc., Associate Professor, Director of REC CMC; Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov. E-mail: alikhachev@yandex.ru.
