

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51

ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И АДАПТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СПОСОБОМ 3D-ПЕЧАТИ (обзор)

Е.Н. Каблов¹, С.В. Кондрашов¹, А.А. Мельников¹, П.А. Щур²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; mai@mai.ru

Аннотация. На основании обзора научно-технической литературы выявлены основные направления использования функциональных материалов, полученных способом FDM-печати, в областях разработки сенсоров различного назначения и полимерных актуаторов. Показано, что в настоящее время достигнут существенный прогресс в области печати сенсоров различного назначения: выбраны материалы, разработан концептуальный облик изделий, исследованы их характеристики. Продемонстрированы возможности использования полимерных материалов с памятью формы для изготовления актуаторов, полученных способом 3D-печати. Отмечено, что уникальность такого способа изготовления актуаторов связана с возможностью закладывать необходимую для работы устройства эпюру напряжений в ходе технологического процесса печати.

Ключевые слова: FDM-печать, 3D-печать, полимерные материалы с памятью формы, актуаторы, датчики из полимерных материалов, полимерные сенсоры различного назначения

Для цитирования: Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.

Scientific article

APPLICATION OF FUNCTIONAL AND ADAPTIVE MATERIALS OBTAINED BY 3D PRINTING (review)

E.N. Kablov¹, S.V. Kondrashov¹, A.A. Melnikov¹, P.A. Schur²

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; mai@mai.ru

Abstract. Based on a review of scientific and technical literature, the main directions of using functional materials obtained by the FDM printing method in the development of sensors for various purposes and polymer actuators are identified. It is shown that to date, significant progress has been achieved in the field of printing sensors for various purposes: materials have been selected, a conceptual appearance of products has been developed, their characteristics have been investigated. The possibilities of using polymeric materials with shape memory for the manufacture of actuators obtained by the 3D printing method are demonstrated. It is noted that the uniqueness of this method of manufacturing actuators is associated with the ability to lay the stress diagram necessary for the operation of the device during the printing process.

Keywords: FDM printing, 3D printing, polymer materials with shape memory, actuators, sensors made of polymer materials, polymer sensors for various purposes

For citation: Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.

Введение

Концепция четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0» предполагает новый подход к производству, который основан на внедрении информационных технологий в промышленность [1–5]. Основными направлениями, стимулирующими развитие данного похода, являются аддитивные технологии и «интернет вещей».

Невозможно представить развитие этих направлений без разработки качественно новых, «умных» материалов [6–8]. Так, создание «интернета вещей» предполагает мониторинг состояния конструкций и принятие решений о производстве деталей, выработавших свой ресурс. Решить такую задачу без датчиков, которые выполняют данную функцию, невозможно. В ряде случаев для увеличения эффективности работы изделия требуется изменение его геометрической формы при изменении условий эксплуатации без применения дополнительных исполнительных устройств. Для решения подобных задач крайне востребованы материалы с эффектом памяти формы.

Основой для создания таких материалов является придание полимерным матрицам функциональных качеств – электро- и теплопроводности, а также магнитных свойств. Технологические аспекты получения композитов с функциональными свойствами были описаны в работе [9].

Цель данной работы – обзор ряда применений функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати, для разработки сенсорных устройств и адаптивных материалов с управляемой формой поверхности.

Сенсоры, изготовленные способом FDM-печати

Благодаря интенсивному развитию микроэлектроники и IT-технологий сенсоры различных типов имеют большое значение в повседневной жизни, преобразуя изменение какой-либо физической величины, характеризующей состояние объекта, в электрический сигнал. Согласно работе [10], сенсоры можно разделить на две группы:

- датчики прямого действия, в которых внешнее воздействие преобразуется в электрический сигнал в ходе протекания физического явления (активный элемент);
- составные датчики, в которых электрический сигнал от активного элемента появляется после ряда преобразований энергии из одного вида в другой с помощью специального устройства – преобразователя.

Уникальная особенность FDM-технологии состоит в том, что она позволяет изготовить активный элемент и преобразователь в едином технологическом цикле, что существенно упрощает и удешевляет процесс производства [11].

Одним из основных физических эффектов, который используется для таких сенсоров, является пьезорезистивный эффект, т. е. изменение электрического сопротивления проводящей цепи, интегрированной в объем эластичного материала при его деформировании [12]. Подробно такой тип активного элемента исследовали авторы работы [13]. В качестве полимерной матрицы использовали термопластичный полиуретан (ТПУ), модифицированный многостенными углеродными нанотрубками (УНТ), которые нековалентно функционализированы пиренкарбоновой кислотой. Исходные компоненты подвергали ультразвуковому диспергированию в диметилформамиде, затем полученный продукт высушивали, гранулировали и с помощью одношнекового экструдера получали филамент для FDM-печати. Использование нековалентно модифицированных многостенных УНТ позволило увеличить равномерность их распределения по объему нанокомпозита. В результате увеличилась относительная деформация материала с 465 до 601 %, а предел прочности – с 8 до 17 МПа, существенно уменьшилось удельное сопротивление – с $4,2 \cdot 10^3$ до $1,2 \cdot 10^2$ Ом·м.

Чувствительность пьезорезистивных датчиков характеризуют калибровочным коэффициентом (gauge factor – GF), который представляет собой отношение изменения сопротивления при изменении деформации активного элемента:

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta L/L_0},$$

где ΔR и R_0 – изменение сопротивления и начальное сопротивление активного элемента; ΔL и L_0 – изменение длины сенсора при приложении нагрузки и его начальная длина [14].

На рис. 1 приведены зависимости удельного сопротивления от величины относительного удлинения для активных элементов различного состава, которые получены авторами работы [14].

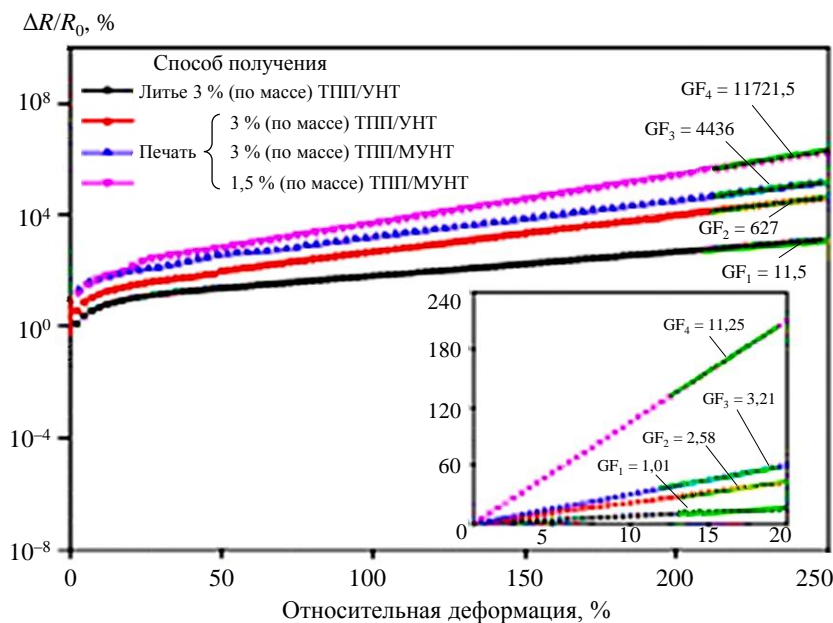


Рис. 1. Изменение сопротивления $\Delta R/R_0$ при изменении относительной деформации (ТПП – термопластичный полиуретан; УНТ – углеродные нанотрубки; МУНТ – модифицированные УНТ; GF – калибровочный коэффициент)

Как видно из приведенных данных, калибровочный коэффициент не является постоянным и зависит от относительной деформации $\Delta L/L_0$. Для малых значений $\Delta L/L_0$ калибровочный коэффициент составляет от 1 до 11, а для относительной деформации 200–250 % величина GF составляет 11721,5 (для нанокомпозита, содержащего 1,5 % нековалентно модифицированных нанотрубок).

Одной из основных характеристик напечатанных пьезорезистивных активных элементов является воспроизводимость их характеристик при воздействии циклических нагрузок. На рис. 2 приведены зависимости напряжения растягивающей нагрузки и величины $\Delta R/R_0$ от относительной деформации активного элемента для деформаций 30, 100 и 250 %. Видно, что изменение относительного сопротивления практически не зависит от количества циклов при деформации 30 % и остается стабильным после 10 циклов при деформации 100 и 250 %.

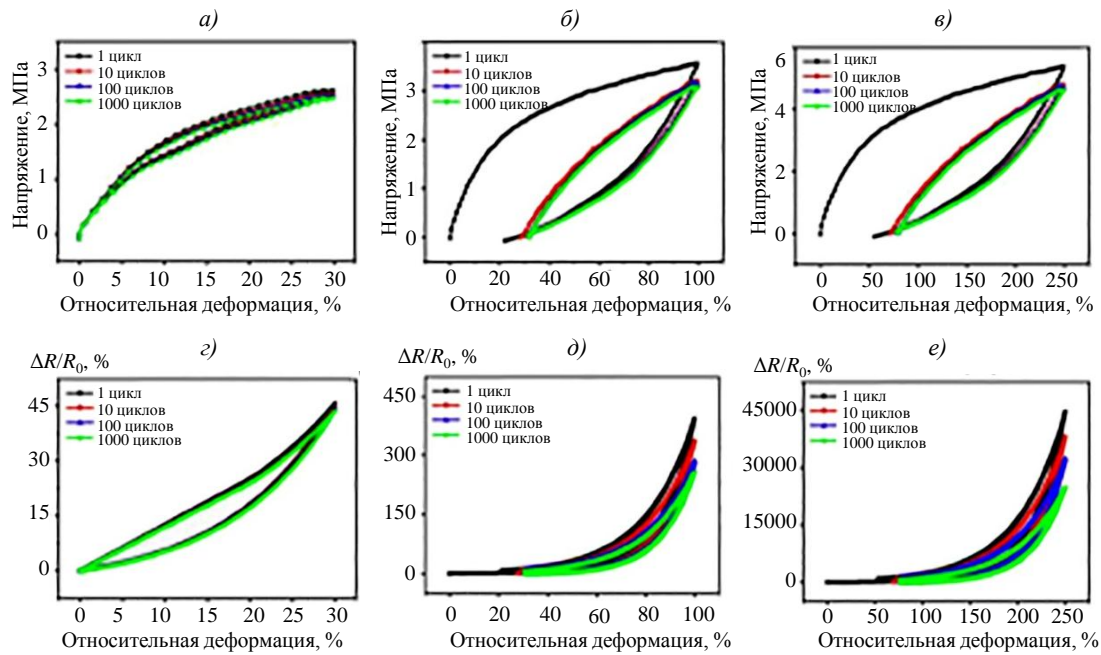


Рис. 2. Зависимости напряжения (а–в) и относительного изменения сопротивления (г–е) для деформаций 30, 100 и 250 % для термопластичного полиуретана, модифицированного многостенными углеродными нанотрубками в количестве 3 % (по массе)

Существенное увеличение величины коэффициента GF до 43260 при относительной деформации 250 % продемонстрировано авторами работы [15], которые использовали для модификации ТПУ углеродные нанотрубки, декорированные наночастицами серебра. Такие активные элементы обладают высокой линейностью и быстродействием 57 мкс. По-видимому, задача увеличения области линейности характеристик пьезорезистивных сенсоров может быть решена путем функционализации углеродных трубок, а также использованием смеси многостенных УНТ с электропроводящей сажей [16].

Для обеспечения высокой чувствительности пьезорезистивного сенсора в области малых деформаций возможно использовать нанокompозит в виде специальной структуры – ауксетика, обладающего отрицательным значением коэффициента Пуассона [17], или изготавливать чувствительный элемент в виде извилистой линии [18].

С использованием температурной зависимости электрического сопротивления нанокompозита «полипропилен/аморфный углерод в количестве 20,4 % (по массе)» (рис. 3, а) авторы работы [19] способом FDM-печати изготовили сенсор для измерения температуры (рис. 3, б). Материал практически не изменял свои электропроводящие свойства при длительном воздействии солнечного излучения и электрического тока величиной 2–40 мкА.

Для реализации активного элемента, реагирующего на импульс давления, авторы работы [20] модифицировали процесс FDM-печати сенсора из поливинилиденфторида (ПВДФ), для чего приложили между столом и соплом постоянное напряжение 6 кВ. В результате фазовый кристаллический состав матрицы изменился: количество полимера в α-фазе уменьшалось, одновременно образовалось до 35 % (по массе) β-фазы. Этот прием позволил получать из ПВДФ цилиндрические образцы, демонстрировавшие пьезоэффект, который использовали для прямого преобразования импульса давления в электрическое напряжение.

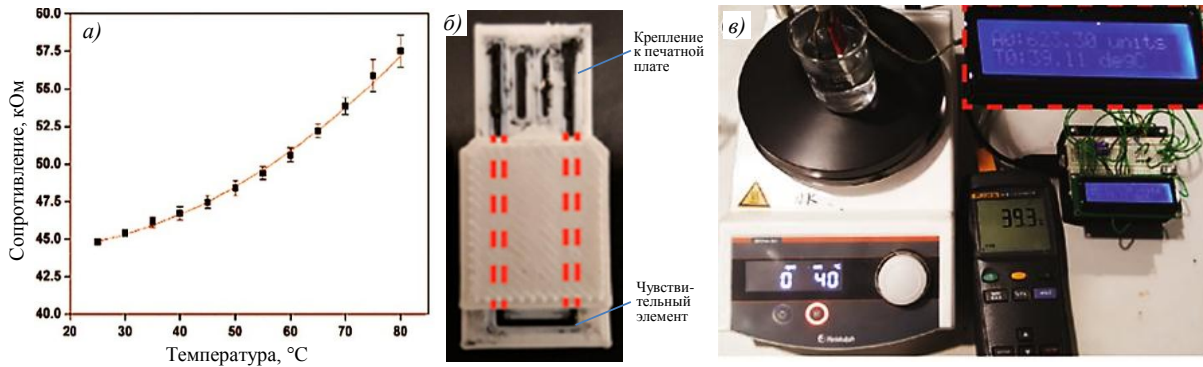


Рис. 3. Зависимость электрического сопротивления от температуры (а), напечатанный сенсор для измерения температуры (б) и калибровка сенсора (в)

Примером удачного использования преимуществ FDM-печати для изготовления составных сенсоров может служить работа [21], в которой использован пьезорезистивный композит на основе поликапролактона, наполненного 15 % (по массе) аморфного углерода. На основе разработанного композита изготовлены: перчатки, реагирующие на изгиб пальцев (рис. 4, а); емкостные датчики уровня (рис. 4, б) и тактильные емкостные сенсоры (рис. 4, в).

В работе [22] продемонстрирован другой подход к созданию емкостных датчиков на основе активного элемента из медных проволок и сеток, интегрированных в пластину из полифениленсульфона, отпечатанных с использованием FDM-принтера. Для изготовления сенсоров активный элемент разогревали с помощью ультразвукового воздействия и вдавливали в матрицу. Датчики использованы для индикации загрязнения дистиллированной воды.

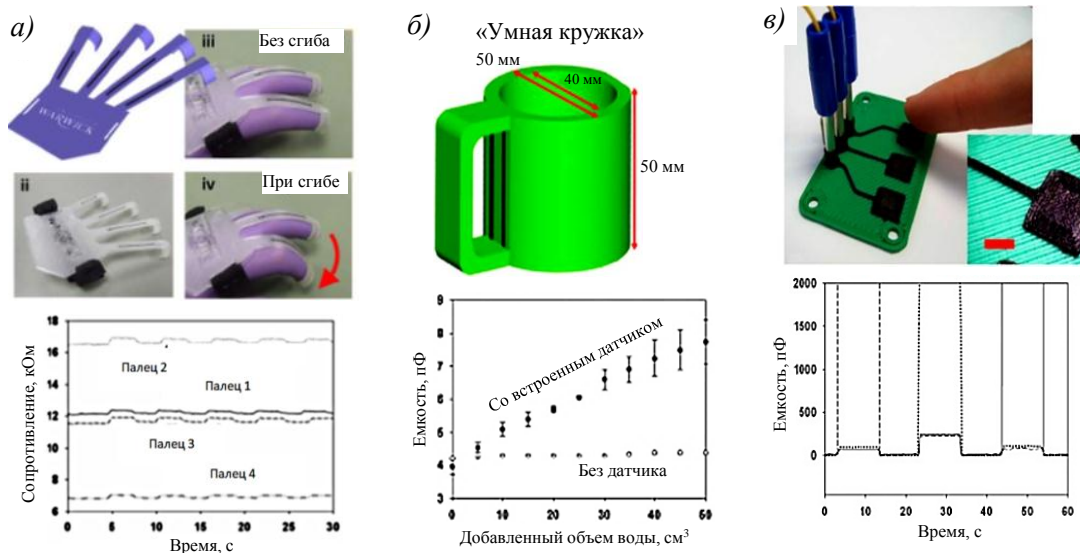


Рис. 4. Сенсоры, изготовленные способом FDM-печати

В работе [23] пьезорезистивный элемент из ТПУ, модифицированного УНТ, напечатан в едином технологическом цикле на одной из поверхностей прямоугольной балки из ТПУ. С использованием конструкции из трех взаимно перпендикулярных балок авторы работы изготовили сенсор, который измерял силы, приложенные в трех различных направлениях (рис. 5).

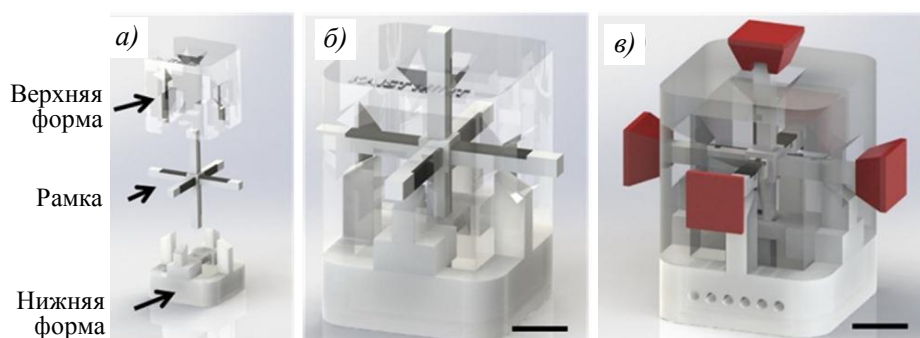


Рис. 5. Трехосный датчик измерения силы

Технология FDM-печати легко позволяет интегрировать волоконные брэгговские решетки в полимерную матрицу [24]. С помощью напечатанной цилиндрической таблетки, которая содержала волоконный датчик и преобразовывала напряжения вертикального сжатия в растягивающие напряжения, авторы работы [25] получили датчик для измерения импульсов давления.

На основе композита капролактона с магнитными частицами авторы работы [26] изготовили магнитный датчик вращения, который успешно опробован в составе серийного счетчика расхода воды.

Использование FDM-печати для изготовления актуаторов

Свойство изменения геометрической формы конструкции для получения максимальной эффективности ее использования в условиях изменяющегося воздействия внешних факторов является одной из характерных черт «умных» материалов.

Использование адаптивного крыла, по сравнению с обычным, обеспечивает прямое управление подъемной силой и позволяет дополнительно получить выигрыш в аэродинамическом качестве на различных режимах полета летательного аппарата [27]. Применение адаптивных лопастей в ветроэнергетике увеличивает коэффициент использования энергии ветра на 25–40 % [28]. Внедрение адаптивных элементов в конструкцию концентраторов солнечной энергии минимизирует затраты энергии на слежение за положением солнца [29, 30]. По мнению авторов работ [31, 32], использование адаптивных конструкций для затенения окон здания позволяет на 43 % снизить затраты энергии для кондиционирования внутренних помещений и температуру в них – на 4,8 °С.

Традиционные способы управления формой поверхности (разбиение на фрагменты и изменение кривизны с помощью систем сенсоров и электромеханических, пневмо- или гидроактуаторов*) приводят к увеличению массы и усложнению самих конструкций. Поэтому в настоящее время актуальным является поиск новых путей решения подобных задач.

С этой точки зрения работы в области 4D-печати актуаторов с использованием аддитивных технологий, которые не только позволяют создавать поверхности сложной формы, но и «программируют» изменения геометрических характеристик образца при воздействии внешних факторов, являются наиболее перспективными [33, 34].

В качестве основных материалов для 4D-печати используют полимеры с памятью формы (*shape memory polymer – SMP*) – полимерные функциональные материалы, которые изменяют свою геометрическую форму при воздействии внешнего фактора – тепла, света, насыщения влагой, воздействия растворителей и т. д. [35, 36]. Для обозначения таких материалов в отечественной научно-технической литературе также используется термин – полимеры с эффектом памяти формы (ЭПФ) [37].

*Актуатор – функциональный элемент системы автоматического управления, который воздействует на объект управления.

Рассмотрим работу термостимулируемого ЭФП (рис. 6, б) [35]. Вначале необходимо нагреть полимер с ЭФП до температуры переключения T_s , которая больше температуры стеклования T_g , затем задать первоначальную деформацию (создать предварительно напряженное состояние путем ориентации макромолекул) и охладить материал в деформированном состоянии, т. е. «заморозить» ориентированное состояние.

Последующий нагрев системы до температуры T_s размораживает релаксационные процессы, приводящие к достижению полимерными цепями термодинамического равновесия и восстановлению исходной геометрической формы материала. Описанная система не является реверсивной, поэтому для повторения цикла необходимо вновь деформировать (заново программировать) нагретый полимер.

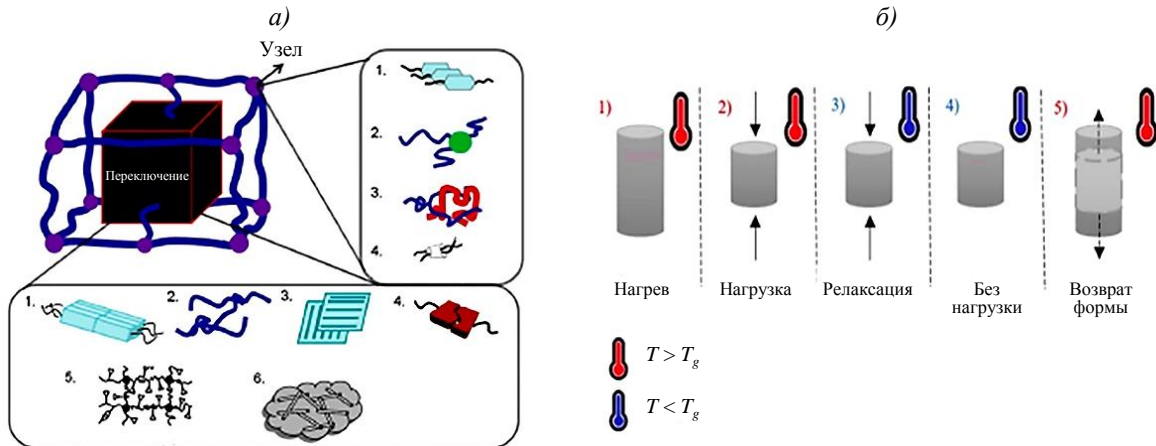


Рис. 6. Архитектура (а) [38] и цикл работы (б) [35] нереверсивного полимера с эффектом памяти формы

Согласно работе [38], в достаточно общем виде нереверсивный полимер с ЭФП состоит из двух подсистем (рис. 6, а):

- гибкого каркаса, предотвращающего процессы текучести материала;
- переключателя – спускового механизма, приводящего в действие упругие силы, которые возвращают материал в исходное состояние.

В качестве гибкого каркаса полимерной матрицы могут быть использованы физические и химические сшивки, взаимопроникающие сетки или супрамолекулярные комплексы. Силами, которые изменяют форму, являются упругие силы, возникающие при релаксации ориентированного состояния макромолекул. В качестве переключателя используют процессы кристаллизации, стеклования, переходы между фазами в жидкокристаллическом состоянии, разрушение водородных связей и т. д.

Один из первых экспериментов в области разработки 4D-материалов описан авторами работ [39, 40], которые изготовили композит, состоящий из эластомерной матрицы с температурой стеклования $T_{g0} = -5 \text{ } ^\circ\text{C}$, в которую были интегрированы дорожки из полимера с ЭФП (фотоотверждаемая композиция на основе полиуретана) с $T_{g1} = 47 \text{ } ^\circ\text{C}$ (рис. 7). Сшивание полиуретана происходило во время печати за счет ультрафиолетового излучения головки принтера.

Пластину с дорожками растягивали при температуре T_{g1} и охлаждали в растянутом состоянии. После этого ее соединяли с полосой из чистой матрицы. Для более эффективной визуализации изгиба к концам полосы присоединяли две жесткие панели. При нагреве происходила релаксация ориентированного состояния полимера с ЭФП, длина дорожек уменьшалась и за счет адгезионного контакта деформация сжатия переходила

в деформацию изгиба композита. Регулирование угла изгиба актуатора θ осуществляли путем изменения длины активного элемента и его первоначальной деформации.

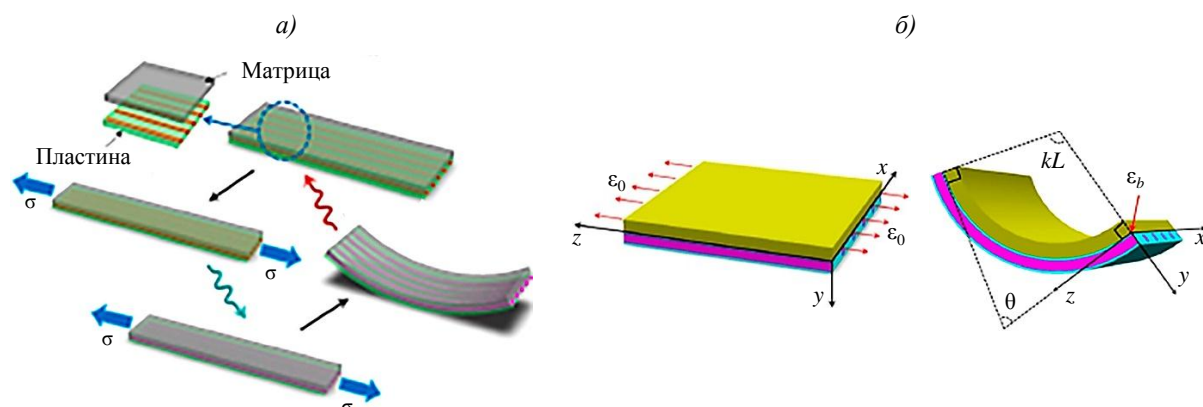


Рис. 7. Принципиальная схема и программирование актуатора (а) и реализация его изгиба (б)

Авторы работы [41] использовали ряд аналогичных актуаторов с различной рабочей температурой для последовательной трансформации нагреваемой полосы в коробчатую спираль (рис. 8).

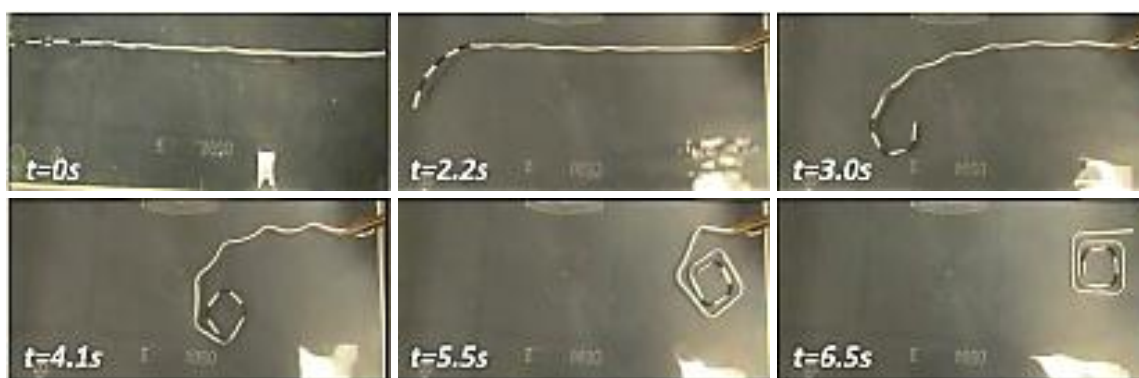


Рис. 8. Последовательная трансформация прямой полосы в коробчатую спираль

Помимо нагрева аналогичные актуаторы могут управляться светом [42] и электрическим сигналом [43].

Стадии предварительного программирования актуатора возможно избежать, если использовать двухслойную конструкцию, один из слоев которой представляет собой полимер с ЭПФ, а во втором (низкомодульный эластомер) – создано напряженное состояние путем изменения технологических режимов печати (интенсивность ультрафиолетового излучения, продолжительность печати, температура) [44]. В исходном состоянии напряжения в эластомере компенсируют за счет высокомодульного слоя из полимера с ЭПФ, двухслойная пластина имеет плоскую форму. При нагревании модуль первого слоя уменьшается, и существующие напряжения изменяют форму актуатора.

Использование трехслойной конструкции, в которой слой из эластомерной матрицы заключен между пластинами с дорожками из полимера с ЭПФ с различными температурами стеклования (T_{g1} и T_{g2}), позволило авторам работы [45] изготовить актуатор, который при нагреве до температуры $T_{g1} < T < T_{g2}$ максимально изгибался, а при дальнейшем прогреве до температуры $> T_{g2}$ вновь выпрямлялся (рис. 9).

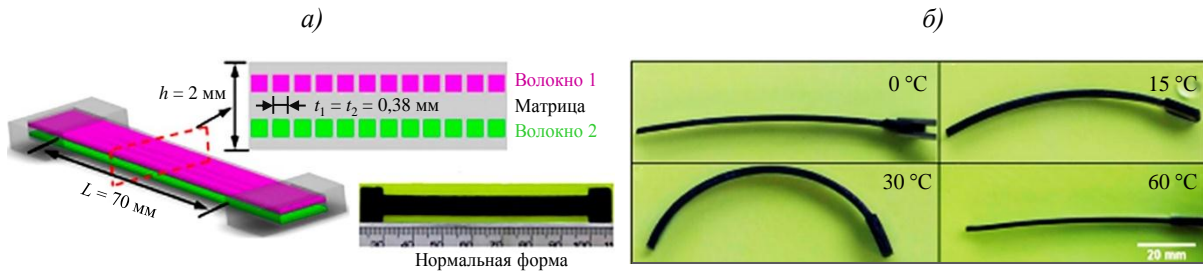


Рис. 9. Принципиальная схема трехслойного актуатора (а), изменение изгиба актуатора (б) при различной температуре

Для создания реверсивного актуатора (обратимость изменения формы при окончании воздействия управляющего фактора) авторы работы [46] использовали многослойную конструкцию, которая состоит из полимера с ЭПФ, гидрогеля и эластичного материала с перфорацией (рис. 10).

После первоначального экспонирования в холодной воде при температуре 3 °С пластина приобретает небольшой изгиб. Дальнейшее экспонирование композиции в воде с температурой $>T_g$, приводит к быстрому (~ 10 с) изгибу конструкции. После извлечения из воды и нагрева пластина выпрямляется.

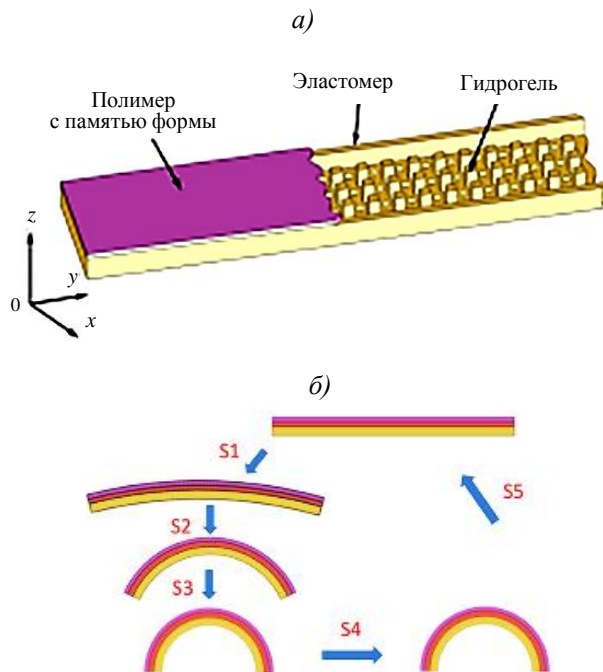


Рис. 10. Принципиальная схема реверсивного актуатора и порядок его работы

В работе [47] предложен другой тип реверсивного актуатора, который представляет собой комбинацию низко модульного эластомера и полосы шитого полимерного жидкого кристалла [48, 49], между которыми вставлен тонкослойный омический нагреватель из серебра (рис. 11).

Как видно из представленных данных, переход из нематической фазы в изотропную фазу при нагреве до температуры $>T_i$ приводит к уменьшению геометрической длины полоски полимерного жидкого кристалла (относительная деформация уменьшается на 40%). Одновременно величина ее модуля упругости уменьшается

практически на два порядка. Переход является полностью обратимым при уменьшении температуры. На рис. 11 показана возможность обратимого деформирования плоскости, разбитой на фрагменты, которые соединены полосками из полимерного жидкого кристалла.

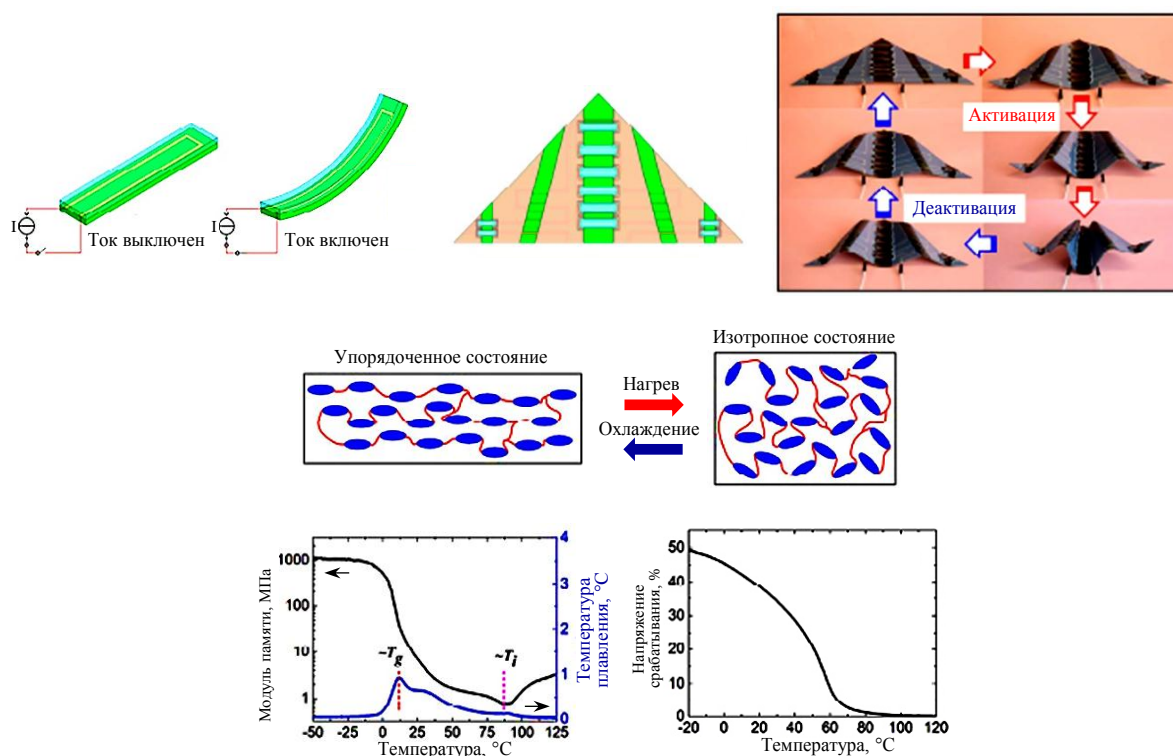


Рис. 11. Принципиальная схема и демонстрация работы обратимого актуатора на основе полимерного жидкого кристалла

По сравнению с исполнительными устройствами, которые описаны ранее, актуаторы, изготовленные способом FDM-печати, имеют ряд особенностей, связанных со спецификой технологического процесса послойного наплавления.

Поскольку шитые полимеры невозможно экструдировать, то в качестве полимеров с ЭПФ для FDM-актуаторов используют частично кристаллические полимерные матрицы (например – полилактид (ПЛА)) или термоэластопласты (например – полиуретан).

Макромолекулы термоэластопластов построены как линейные блок-сополимеры, в которых жесткие и эластичные блоки соединены химическими связями. Наличие химических связей между блоками препятствует макрорасслаиванию, в результате чего возникает коллоидная структура, когда в эластичной матрице, образованной блоками одного полимера, оказываются диспергированными частицы (домены) другого – жесткого полимера. Домены образуют мягкий каркас, который предотвращает текучесть матрицы. Система получает способность течь только тогда, когда повышение температуры приведет к размягчению и деформации доменов твердого полимера [50]. В частично кристаллических матрицах в интервале между температурой стеклования T_g и температурой кристаллизации T_c полимер находится в высокоэластичном низкокомодульном состоянии, а гибкий каркас образован кристаллитами. Катализатором механизма движения макромолекул как для ТПУ, так и для ПЛА является процесс «растекловывания». Свойства полимеров с ЭПФ для FDM-печати приведены в таблице.

Свойства полимеров с эффектом памяти формы для FDM-печати

Свойства	Значения свойств для материала на основе	
	полиуретана марки DiAPLEX MM-4520 [51, 52]	полилактида (экспериментальный образец) производства Harbin Institute of Technology [53]
Плотность г/см ³	1,2	–
Температура плавления T_m , °C	205–215	168
Температура стеклования T_g , °C	45	64
Температура кристаллизации T_c , °C	–	111
Модуль памяти, МПа, при температуре:		
$>T_g$	1660	–
$<T_g$	3,3	–

Уникальной особенностью FDM-печати является возможность получения полимеров с ЭПФ в напряженном состоянии. Нагрев полимерной матрицы $>T_g$ приводит к ее усадке. Возникающая при этом деформация определяется заложенными на стадии печати термоупругими напряжениями и может регулироваться путем изменения технологических режимов печати – скорости движения и температуры сопла, температурного режима изготовления детали.

Авторы работы [52] использовали способ FDM-печати для изготовления актуатора из ТПУ марки DiAPLEX MM-4520. Модификация принтера и выбор оптимальных технологических параметров получения филамента и печати позволили с достаточно высокой точностью изготовить детали сложной формы. Нагрев плоских деталей более температуры стеклования ТПУ ($T_g = 45$ °C) приводил к их изгибу, что позволило изготовить «закрывающийся» цветок и простейший полимерный захват (рис. 12).

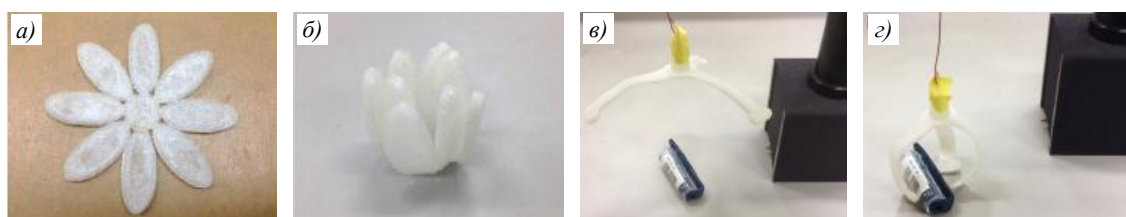


Рис. 12. Фотографии работы актуаторов сложной геометрической формы при температурах меньше (а, в) и больше (б, з) температуры стеклования

В работе [54] исследовано влияние технологических режимов процесса печати на функциональные характеристики актуатора – изгиб прямоугольной балки, изготовленной из ТПУ, после ее прогрева при температуре $>T_g$. Показано, что изгиб первоначально прямой балки увеличивается при возрастании скорости движения сопла и уменьшается при возрастании начальной температуры расплава. Таким образом, регулируя скорость движения сопла и его температуру, можно обеспечить получение необходимой формы детали после ее прогрева.

В качестве механизма, обеспечивающего изменение геометрического размера образца, полученного способом FDM-печати, возможно использовать релаксацию ориентированного состояния макромолекул, которое возникает при движении сопла принтера (усадка) [55]. Так, авторы работы [56] использовали усадку различным образом ориентированных напечатанных слоев ПЛА для придания плоской пластине изгиба в заданном направлении. Выяснено, что с возрастанием температуры сопла принтера величина изгиба уменьшается, что, по-видимому, связано с возрастанием скорости протекания релаксационных процессов с увеличением температуры. Это дало возможность

регулировать величину изгиба в различных направлениях. Использование ориентированных полос ПЛА в качестве петли с регулируемым изгибом для соединения плоских фрагментов позволяет «собирать» плоские поверхности разверток в объемные фигуры.

Наиболее простой вариант актуатора, который изготовлен способом FDM-печати, представлен авторами в работе [53]. Из ПЛА изготовлена сложная поверхность, известная как оригами Миуры-ори – схема жесткого складывания, которая использовалась для развертывания больших установок солнечных батарей на космических спутниках (рис. 13). После нагрева до температуры $T_{g1} < T < T_c$ ПЛА переходит в высокоэластичное состояние. Под действием внешней нагрузки оригами складывается. На сгибах оригами происходит растягивание макромолекул. Последующее охлаждение до температуры $< T_g$ фиксирует сложенную форму. Нагрев приводит к релаксации ориентированного состояния и раскрытию оригами.

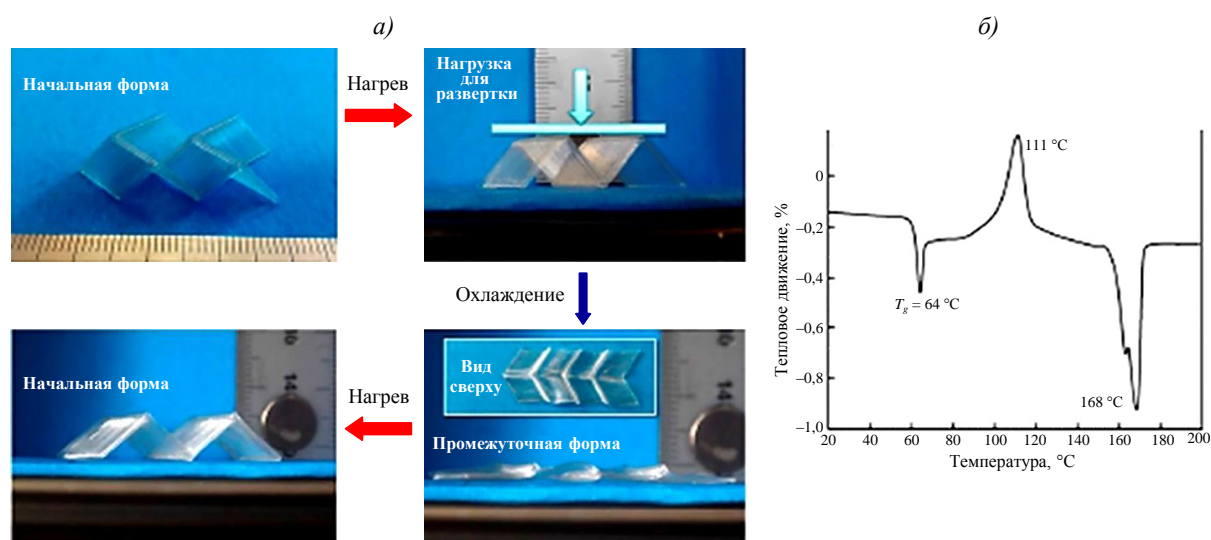


Рис. 13. Оригами Миура-ори и схема работы актуатора (а), а также кривая дифференциальной сканирующей калориметрии для полилактоида (б)

В качестве полимеров с ЭПФ могут быть также использованы электропроводящие наноконкомпозиты ТПУ с многосленными УНТ. Свойства актуатора из этого материала описаны в работе [57]. Актуатор представлял собой П-образную пластину размером $50 \times 15 \times 1$ мм (рис. 14, а). К свободным концам актуатора присоединяли источник питания с напряжением 36 В. Предварительно пластину актуатора изгибали при температуре $> T_g$ ($T_g = 35$ °С). После подачи напряжения пластину актуатора нагревалась и выпрямлялась (рис. 14, б). Время отклика на управляющий сигнал определяется электрическим сопротивлением наноконкомпозита и варьируется от 42 до 320 с. Авторы работы [58] рассмотрели возможность использования таких актуаторов в качестве элементов для гибкой электроники (рис. 14, в).

Одним из факторов, который определяет область использования актуаторов, является время его отклика на управляющий сигнал. Скорость срабатывания описанных ранее устройств зависит от интенсивности теплообмена материала с окружающей средой. Данный процесс может быть ускорен путем изготовления исполнительного устройства в виде многослойной сетчатой конструкции (рис. 15) [59]. С использованием данного принципа авторы работы [60] создали актуатор с временем срабатывания 0,03 с. Кроме того, сетчатые конструкции сочетают малую объемную плотность и высокий уровень восстановления (до 98 %) исходной формы [61].

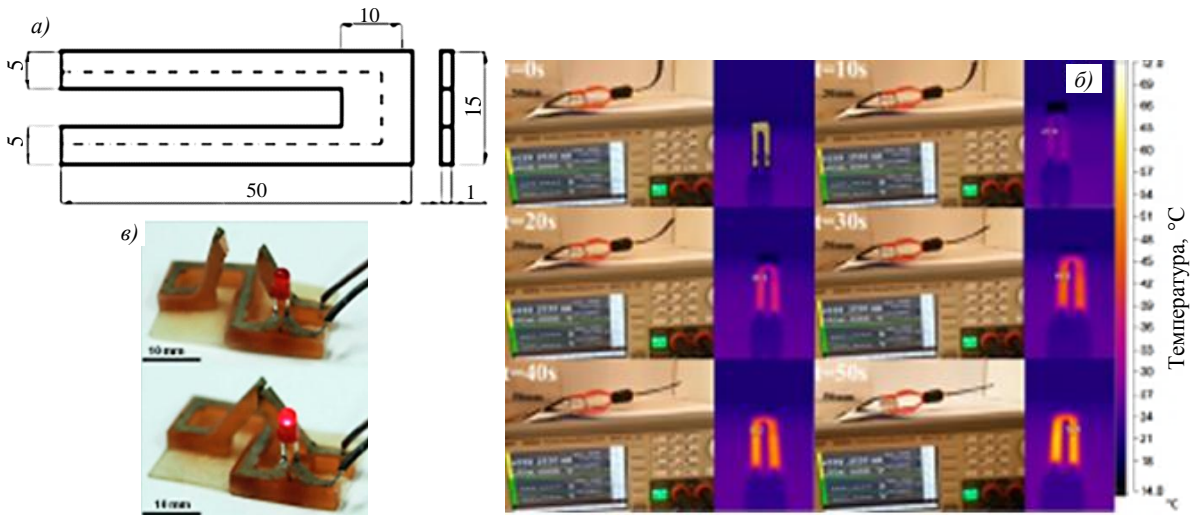


Рис. 14. Чертеж актуатора (а) и демонстрация его работы (б), а также переключатель для гибкой электроники (в)

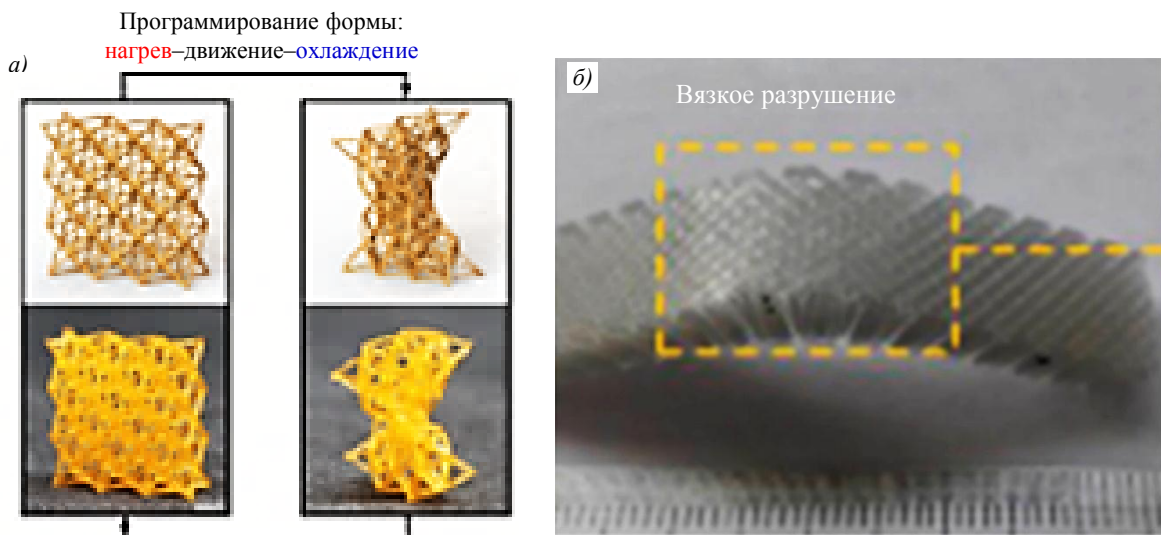


Рис. 15. Восстановление формы сетчатых конструкций из полимеров с эффектом памяти формы (а) и фотография изгиба сетчатой конструкции (б)

Не менее важной задачей в области разработки FDM-актуаторов является обеспечение их реверсивности. Ранее показана возможность изготовления реверсивных актуаторов на основе сшитых полимеров. Однако использовать данный подход невозможно, так как такие матрицы не перерабатываются способом экструзии. Авторам данной работы не удалось найти в научно-технической литературе сведений об изготовлении полностью полимерных реверсивных актуаторов, изготовленных способом FDM-печати. Поэтому рассмотрим ряд технических решений, которые могут быть положены в основу такой разработки.

В ряде работ [62–64] рассмотрены схемы реверсивных актуаторов, в которых используют композит «нитинол + полимер с ЭПФ». Авторы работы [62] использовали FDM-печать для интегрирования проволоки нитинола (сплав с памятью формы) между полосками полиамида 12 и гибкого полилактида. Композит нагрели до температуры 70 °С и изогнули в форме арки. При нагреве больше температуры фазового перехода

нитинол «вспоминает» первоначальную форму и раздвигает концы арки. Одновременно в полиамиде возникают упругие силы, препятствующие увеличению расстояния. При охлаждении возникшие силы вновь возвращают композит в исходное состояние. При анализе работы данного актуатора необходимо учитывать, что при охлаждении для сжатия нитинола необходимо прикладывать меньшее усилие по сравнению с тем, которое развивается сплавом при его нагреве.

Заключения

В настоящее время активно исследуются сферы использования сочетания уникальных возможностей 3D-печати и свойств полимерных матриц, наполненных частицами и волокнами нано- и микроразмера, для получения новых материалов различного функционального назначения. Достигнут прогресс в области печати сенсоров различного назначения: выбраны материалы, разработан концептуальный облик изделий и исследованы их характеристики. Достаточно полно исследованы пьезорезистивные датчики, полученные способом FDM-печати. Одним из недостатков таких сенсоров, который существенно ограничивает их применение, является нелинейный характер отклика при увеличении деформации. Вероятно, в ближайшее время этот недостаток будет исправлен путем выбора геометрической формы активного элемента и оптимизации топологии проводящих сетей. Работа датчиков давления, индуктивности магнитных датчиков вращения продемонстрирована на уровне образцов-демонстраторов, что не позволяет сделать вывод о перспективности их применения.

Продемонстрированы возможности использования полимерных материалов с памятью формы для изготовления актуаторов, изготовленных способом 3D-печати. Отмечено, что уникальность такого способа изготовления актуаторов связана с возможностью закладывать необходимую для работы устройства эпюру напряжений в ходе технологического процесса печати. В научно-технической литературе очень редко встречаются сведения о реверсивных полимерных актуаторах, возвращающихся в исходное состояние при окончании воздействия управляющего фактора.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // *Металлы Евразии*. 2017. № 1. С. 2–6.
2. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // *Инновации*. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
3. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
4. Павлюк Б.Ф. Основные направления в области разработки полимерных функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392.
5. Терехов И.В., Шленский В.А., Куршев Е.В., Лонский С.Л., Дятлов В.А. Исследование факторов, влияющих на образование эпоксисодержащих микрокапсул для самовосстанавливающихся композиций // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 27–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-27-34.
6. Elinson V.M., Shchur P.A., Uvarov S.I. Formation of antimicrobial carbon and fluorocarbon coatings using predictive modeling of their properties // *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. 2021. Vol. 4. P. 17–23. DOI: 10.1615/HighTempMatProc. 2021041784.
7. Перов Н.С. Конструирование полимерных материалов на молекулярных принципах. II. Молекулярная подвижность в сложных сшитых системах // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 4 (49). С. 30–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-30-36.

8. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Кудрявцева А.Н. Применение бисмалеимидного связующего марки ВСТ-57 для получения теплостойких размеростабильных оснасток из полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 32–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-32-40.
9. Кондрашов С.В., Пыхтин А.А., Ларионов С.А. Функциональные материалы, полученные способом FDM-печати (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 3 (97). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-44-57.
10. Все о датчиках, сенсорах, средствах измерения. URL: <https://osensorax.ru> (дата обращения: 25.09.2021).
11. Khosravani M.R., Reinicke T. Applications of additive manufacturing in fabrication of sensors – A review // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. Vol. 111916.
12. Christ J.F., Hohimer C.J., Aliheidari N. et al. 3D printing of highly elastic strain sensors using polyurethane/multiwall carbon nanotube composites // *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. 2017. Vol. 10168. P. 101680E.
13. Xiang D., Zhang X., Li Y. et al. Enhanced performance of 3D printed highly elastic strain sensors of carbon nanotube/thermoplastic polyurethane nanocomposites via non-covalent interactions // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 176. P. 107250.
14. Beckwith T.G., Marangoni R.D., Lienhard J.H. *Mechanical measurements*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995. Vol. 5. 345 p.
15. Xiang D., Zhang X., Harkin-Jones E. et al. Synergistic effects of hybrid conductive nanofillers on the performance of 3D printed highly elastic strain sensors // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020. Vol. 129. P. 105730.
16. Lin L., Liu S., Zhang Q. et al. Towards tunable sensitivity of electrical property to strain for conductive polymer composites based on thermoplastic elastomer // *ACS applied materials & interfaces*. 2013. Vol. 5. No. 12. P. 5815–5824.
17. Taherkhani B., Azizkhani M.B., Kadkhodapour J. et al. Highly sensitive, piezoresistive, silicone/carbon fiber-based auxetic sensor for low strain values // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. Vol. 305. P. 111939.
18. Ali M.M., Maddipatla D., Narakathu B.B. et al. Printed strain sensor based on silver nanowire/silver flake composite on flexible and stretchable TPU substrate // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018. Vol. 274. P. 109–115.
19. Kwok S.W., Goh K.H.H., Tan Z.D. et al. Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors // *Applied Materials Today*. 2017. Vol. 9. P. 167–175.
20. Tarbuttona J., Leb T., Helfrich G. et al. Phase transformation and shock sensor response of additively manufactured piezoelectric PVDF // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 10. P. 982–989.
21. Leigh S.J., Bradley R.J., Purssell C.P. et al. A simple, low-cost conductive composite material for 3D printing of electronic sensors // *PloS one*. 2012. Vol. 7. No. 11. P. e49365.
22. Shemelya C., Cedillos F., Aguilera E. et al. Encapsulated copper wire and copper mesh capacitive sensing for 3D printing applications // *IEEE Sensors Journal*. 2014. Vol. 15. No. 2. P. 1280–1286.
23. Kim K., Park J., Suh J.H. et al. 3D printing of multiaxial force sensors using carbon nanotube (CNT)/thermoplastic polyurethane (TPU) filaments // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2017. Vol. 263. P. 493–500.
24. Yang Y., Hong C., Abro Z.A. et al. A new Fiber Bragg Grating sensor based circumferential strain sensor fabricated using 3D printing method // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. Vol. 295. P. 663–670.
25. Hong C., Yuan Y., Yang Y. et al. A simple FBG pressure sensor fabricated using fused deposition modelling process // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. Vol. 285. P. 269–274.
26. Leigh S.J., Purssell C.P., Billson D.R. et al. Using a magnetite/thermoplastic composite in 3D printing of direct replacements for commercially available flow sensors // *Smart materials and structures*. 2014. Vol. 23. No. 9. P. 095039.
27. Булат П. На пути к пятому и шестому поколению. Часть VI // *Отвага: военно-патриотический сайт*. URL: <http://otvaga2004.ru/kaleydoskop/kaleydoskop-air/5-6-pokoleniye-6/> (дата обращения: 25.09.2021).

28. Ларионова А.В., Чумак П.И. Ход проектирования и изготовления малогабаритной ВЭУ. Российская цивилизация: прошлое, настоящее и будущее Р76 // Сб. науч. тр. III науч.-практ. конф. Ставрополь: Мир данных, 2010. С. 356–358.
29. Согоконь А.Б. Зачем нужен концентратор солнечной энергии? Или на что способен солнечный концентратор? // Науч.-практ. конф. «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий» (Новосибирск, 19–20 марта 2013 г.). Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2013. С. 19–20.
30. Momeni F., Ni J. Nature-inspired smart solar concentrators by 4D printing // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 122. P. 35–44.
31. Bacha C.B., Bourbia F. Effect of kinetic facades on energy efficiency in office buildings-hot dry climates // 11th Conference on advanced building skins. 2016. Vol. 1. P. 458–468.
32. Yi H., Kim D., Kim Y. et al. 3D-printed attachable kinetic shading device with alternate actuation: Use of shape-memory alloy (SMA) for climate-adaptive responsive architecture // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 114. P. 103151.
33. Joshi S., Rawat K., Karunakaran C. et al. 4D printing of materials for the future: opportunities and challenges // *Applied Materials Today*. 2020. Vol. 18. P. 100490.
34. Zolfagharian A., Kouzani A.Z., Khoo S.Y. et al. Evolution of 3D printed soft actuators // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016. Vol. 250. P. 258–272.
35. Pinho A.C., Buga C.S., Piedade A.P. The chemistry behind 4D printing // *Applied Materials Today*. 2020. Vol. 19. P. 100611.
36. Hu J., Zhu Y., Huang H. et al. Recent advances in shape-memory polymers: Structure, mechanism, functionality, modeling and applications // *Progress in Polymer Science*. 2012. Vol. 37. No. 12. P. 1720–1763.
37. Белошенко В.А., Варюхин В.Н., Возняк Ю.В. Эффект памяти формы в полимерах // *Успехи химии*. 2005. Т. 74. № 3. С. 285–306.
38. Hu J., Chen S. A review of actively moving polymers in textile applications // *Journal of Materials Chemistry*. 2010. Vol. 20. No. 17. P. 3346–3355.
39. Ge Q., Dunn C.K., Qi H.J. et al. Active origami by 4D printing // *Smart Materials and Structures*. 2014. Vol. 23. No. 9. P. 094007.
40. Ge Q., Qi H.J., Dunn M.L. Active materials by four-dimension printing // *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 103. No. 13. P. 131901.
41. Yu K., Ritchie A., Mao Y. et al. Controlled sequential shape changing components by 3D printing of shape memory polymer multimaterials // *Procedia Iutam*. 2015. Vol. 12. No. 1. P. 193–203.
42. Liu Y., Boyles J.K., Genzer J. et al. Self-folding of polymer sheets using local light absorption // *Soft matter*. 2012. Vol. 8. No. 6. P. 1764–1769.
43. Akbari S., Sakhaei A.H., Kowsari K. et al. Enhanced multimaterial 4D printing with active hinges // *Smart Materials and Structures*. 2018. Vol. 27. No. 6. P. 065027.
44. Ding Z., Yuan C., Peng X. et al. Direct 4D printing via active composite materials // *Science advances*. 2017. Vol. 3. No. 4. P. e1602890.
45. Wu J., Yuan C., Ding Z. et al. Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers // *Scientific reports*. 2016. Vol. 6. P. 24224.
46. Mao Y., Ding Z., Yuan C. et al. 3D printed reversible shape changing components with stimuli responsive materials // *Scientific reports*. 2016. Vol. 6. No. 1. P. 1–13.
47. Yuan C., Roach D.J., Dunn C.K. et al. 3D printed reversible shape changing soft actuators assisted by liquid crystal elastomers // *Soft Matter*. 2017. Vol. 13. No. 33. P. 5558–5568.
48. Beyer P., Terentjev E.M., Zentel R. Monodomain liquid crystal main chain elastomers by photocrosslinking // *Macromolecular rapid communications*. 2007. Vol. 28. No. 14. P. 1485–1490.
49. Ahir S.V., Tajbakhsh A.R., Terentjev E.M. Self assembled shape memory fibers of triblock liquid crystal polymers // *Advanced Functional Materials*. 2006. Vol. 16. No. 4. P. 556–560.
50. Термоэластопласты // *Основы технологии переработки пластмасс* / под ред. В.Н. Кулезнева и В.К. Гусева. М.: Химия, 2004. URL: mplast.by/encyklopedia/termoelastoplastyi/ (дата обращения: 25.09.2021).
51. Shape Memory Polymer. URL: <http://www2.smp techno.com/en/smp/> (дата обращения: 25.09.2021).

52. Yang Y., Chen Y., Wei Y. et al. 3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 84. No. 9–12. P. 2079–2095.
53. Liu Y., Zhang W., Zhang F. et al. Shape memory behavior and recovery force of 4D printed laminated Miura-origami structures subjected to compressive loading // *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 153. P. 233–242.
54. Bodaghi M., Damanpack A.R., Liao W.H. Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing // *Materials & Design*. 2017. Vol. 135. P. 26–36.
55. Кондрашов С.В., Пыхтин А.А., Ларионов С.А. и др. Влияние режимов получения на структуру и свойства образцов полиэтилена, изготовленных способом FDM-печати // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2021. № 2. P. 30–36.
56. Van Manen T., Janbaz S., Zadpoor A.A. Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers // *Materials horizons*. 2017. Vol. 4. No. 6. P. 1064–1069.
57. Ly S.T., Kim J.Y. 4D printing-fused deposition modeling printing with thermal-responsive shape memory polymers // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2017. Vol. 4. No. 3. P. 267–272.
58. Zarek M., Layani M., Cooperstein I. et al. 3D printing of shape memory polymers for flexible electronic devices // *Advanced Materials*. 2016. Vol. 28. No. 22. P. 4449–4454.
59. Liu Y., Zhang W., Zhang F. et al. Microstructural design for enhanced shape memory behavior of 4D printed composites based on carbon nanotube/poly(lactic acid) filament // *Composites Science and Technology*. 2019. Vol. 181. P. 107692.
60. Song S.H., Lee J.Y., Rodrigue H. et al. 35 Hz shape memory alloy actuator with bending-twisting mode // *Scientific reports*. 2016. Vol. 6. P. 21118.
61. Yang C., Boorugu M., Dopp A. et al. 4D printing reconfigurable, deployable and mechanically tunable metamaterials // *Materials Horizons*. 2019. Vol. 6. No. 6. P. 1244–1250.
62. Kang M., Pyo Y., Young Jang J. et al. Design of a shape memory composite (SMC) using 4D printing technology // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018. Vol. 283. P. 187–195.
63. Akbari S., Sakhaei A.H., Panjwani S. et al. Multimaterial 3D printed soft actuators powered by shape memory alloy wires // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. Vol. 290. P. 177–189.
64. Umedachi T., Trimmer B.A. Design of a 3D-printed soft robot with posture and steering control // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2014. P. 2874–2879.

References

1. Kablov E.N. Present and future of additive technologies. *Metally Evrazii*, 2017, no. 1, pp. 2–6.
2. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
3. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
4. Pavlyuk B.Ph. The main directions in the field of development of polymeric functional materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392.
5. Terekhov I.V., Shlenskiy V.A., Kurshev E.V., Lonskiy S.L., Dyatlov V.A. Researches of factors affecting the formation of epoxy-containing microcapsules for the self-healing compositions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 27–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-27-34.
6. Elinson V.M., Shchur P.A., Uvarov S.I. Formation of antimicrobial carbon and fluorocarbon coatings using predictive modeling of their properties. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 2021, vol. 4, pp. 17–23. DOI: 10.1615/HighTempMatProc. 2021041784.
7. Perov N.S. Design of polymeric materials on the molecular principles. II. The molecular mobility in the cross-linked complex systems. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 30–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-30-36.

8. Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Gurevich Ya.M., Kudryavtseva A.N. Application of bismaleimide VST-57 binder for obtaining heat-resistant dimensionally stable molds from polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 32–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-32-40.
9. Kondrashov S.V., Pykhtin A.A., Larionov S.A. FDM-printed functional materials (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 04. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: September 4, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-44-57.
10. *All about sensors, measuring instruments*. Available at: <https://osensorax.ru> (accessed: September 25, 2021).
11. Khosravani M.R., Reinicke T. Applications of additive manufacturing in fabrication of sensors – A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, vol. 111916.
12. Christ J.F., Hohimer C.J., Aliheidari N. et al. 3D printing of highly elastic strain sensors using polyurethane/multiwall carbon nanotube composites. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 2017, vol. 10168, pp. 101680E.
13. Xiang D., Zhang X., Li Y. et al. Enhanced performance of 3D printed highly elastic strain sensors of carbon nanotube/thermoplastic polyurethane nanocomposites via non-covalent interactions. *Composites Part B: Engineering*, 2019, vol. 176, pp. 107250.
14. Beckwith T.G., Marangoni R.D., Lienhard J.H. Mechanical measurements. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995, vol. 5, 345 p.
15. Xiang D., Zhang X., Harkin-Jones E. et al. Synergistic effects of hybrid conductive nanofillers on the performance of 3D printed highly elastic strain sensors. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, vol. 129, pp. 105730.
16. Lin L., Liu S., Zhang Q. et al. Towards tunable sensitivity of electrical property to strain for conductive polymer composites based on thermoplastic elastomer. *ACS applied materials & interfaces*, 2013, vol. 5, no. 12, pp. 5815–5824.
17. Taherkhani B., Azizkhani M.B., Kadkhodapour J. et al. Highly sensitive, piezoresistive, silicone/carbon fiber-based auxetic sensor for low strain values. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, vol. 305, pp. 111939.
18. Ali M.M., Maddipatla D., Narakathu B.B. et al. Printed strain sensor based on silver nanowire/silver flake composite on flexible and stretchable TPU substrate. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, vol. 274, pp. 109–115.
19. Kwok S.W., Goh K.H.H., Tan Z.D. et al. Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors. *Applied Materials Today*, 2017, vol. 9, pp. 167–175.
20. Tarbuttona J., Leb T., Helfrich G. et al. Phase transformation and shock sensor response of additively manufactured piezoelectric PVDF. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 10, pp. 982–989.
21. Leigh S.J., Bradley R.J., Purcell C.P. et al. A simple, low-cost conductive composite material for 3D printing of electronic sensors. *PLoS one*, 2012, vol. 7, no. 11, pp. e49365.
22. Shemelya C., Cedillos F., Aguilera E. et al. Encapsulated copper wire and copper mesh capacitive sensing for 3D printing applications. *IEEE Sensors Journal*, 2014, vol. 15, no. 2, pp. 1280–1286.
23. Kim K., Park J., Suh J.H. et al. 3D printing of multi-axial force sensors using carbon nanotube (CNT)/thermoplastic polyurethane (TPU) filaments. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, vol. 263, pp. 493–500.
24. Yang Y., Hong C., Abro Z.A. et al. A new Fiber Bragg Grating sensor based circumferential strain sensor fabricated using 3D printing method. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, vol. 295, pp. 663–670.
25. Hong C., Yuan Y., Yang Y. et al. A simple FBG pressure sensor fabricated using fused deposition modelling process. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, vol. 285, pp. 269–274.
26. Leigh S.J., Purcell C.P., Billson D.R. et al. Using a magnetite/thermoplastic composite in 3D printing of direct replacements for commercially available flow sensors. *Smart materials and structures*, 2014, vol. 23, no. 9, pp. 095039.
27. Bulat P. *On the way to the fifth and sixth generation. Part VI*. Available at: <http://otvaga2004.ru/kaleydoskop/kaleydoskop-air/5-6-pokoleniye-6/> (accessed: September 25, 2021).

28. Larionova A.V., Chumak P.I. *Progress in the design and manufacture of small-sized wind turbines. Russian civilization: past, present and future P76*. Collection Scientific works of III Scientific-Practical Conf. Stavropol: Mir dannykh, 2010, pp. 356–358.
29. Sogokon A.B. Why do you need a solar energy concentrator? Or what is a solar concentrator capable of?. *Scientific-practical conf. "Energy and resource efficiency of low-rise residential buildings"* (Novosibirsk, March 19–20, 2013). Novosibirsk: Institute of Thermal Physics SB RAS, 2013, pp. 19–20.
30. Momeni F., Ni J. Nature-inspired smart solar concentrators by 4D printing. *Renewable Energy*, 2018, vol. 122, pp. 35–44.
31. Bacha C.B., Bourbia F. Effect of kinetic facades on energy efficiency in office buildings-hot dry climates. *11th Conference on advanced building skins*, 2016, vol. 1, pp. 458–468.
32. Yi H., Kim D., Kim Y. et al. 3D-printed attachable kinetic shading device with alternate actuation: Use of shape-memory alloy (SMA) for climate-adaptive responsive architecture. *Automation in Construction*, 2020, vol. 114, pp. 103151.
33. Joshi S., Rawat K., Karunakaran C. et al. 4D printing of materials for the future: opportunities and challenges. *Applied Materials Today*, 2020, vol. 18, pp. 100490.
34. Zolfagharian A., Kouzani A.Z., Khoo S.Y. et al. Evolution of 3D printed soft actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, vol. 250, pp. 258–272.
35. Pinho A.C., Buga C.S., Piedade A.P. The chemistry behind 4D printing. *Applied Materials Today*, 2020, vol. 19, pp. 100611.
36. Hu J., Zhu Y., Huang H. et al. Recent advances in shape-memory polymers: Structure, mechanism, functionality, modeling and applications. *Progress in Polymer Science*, 2012, vol. 37, no. 12, pp. 1720–1763.
37. Beloshenko V.A., Varyukhin V.N., Vozniak Yu.V. *Shape memory effect in polymers. Uspekhi khimii*, 2005, vol. 74, no. 3, pp. 285–306.
38. Hu J., Chen S. A review of actively moving polymers in textile applications. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, vol. 20, no. 17, pp. 3346–3355.
39. Ge Q., Dunn C.K., Qi H.J. et al. Active origami by 4D printing. *Smart Materials and Structures*, 2014, vol. 23, no. 9, pp. 094007.
40. Ge Q., Qi H.J., Dunn M.L. Active materials by four-dimension printing. *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 103, no. 13, pp. 131901.
41. Yu K., Ritchie A., Mao Y. et al. Controlled sequential shape changing components by 3D printing of shape memory polymer multimaterials. *Procedia Iutam*, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 193–203.
42. Liu Y., Boyles J.K., Genzer J. et al. Self-folding of polymer sheets using local light absorption. *Soft matter*, 2012, vol. 8, no. 6, pp. 1764–1769.
43. Akbari S., Sakhaei A.H., Kowsari K. et al. Enhanced multimaterial 4D printing with active hinges. *Smart Materials and Structures*, 2018, vol. 27, no. 6, pp. 065027.
44. Ding Z., Yuan C., Peng X. et al. Direct 4D printing via active composite materials. *Science advances*, 2017, vol. 3, no. 4, pp. e1602890.
45. Wu J., Yuan C., Ding Z. et al. Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers. *Scientific reports*, 2016, vol. 6, pp. 24224.
46. Mao Y., Ding Z., Yuan C. et al. 3D printed reversible shape changing components with stimuli responsive materials. *Scientific reports*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 1–13.
47. Yuan C., Roach D.J., Dunn C.K. et al. 3D printed reversible shape changing soft actuators assisted by liquid crystal elastomers. *Soft Matter*, 2017, vol. 13, no. 33, pp. 5558–5568.
48. Beyer P., Terentjev E.M., Zentel R. Monodomain liquid crystal main chain elastomers by photocrosslinking. *Macromolecular rapid communications*, 2007, vol. 28, no. 14, pp. 1485–1490.
49. Ahir S.V., Tajbakhsh A.R., Terentjev E.M. Self assembled shape memory fibers of triblock liquid crystal polymers. *Advanced Functional Materials*, 2006, vol. 16, no. 4, pp. 556–560.
50. Thermoplastic elastomers. *Fundamentals of plastics processing technology*. Ed. V.N. Kuleznev and V.K. Gusev. Moscow: Khimiya, 2004. Available at: mplast.by/encyklopedia/termoelastoplastyi/ (accessed: September 25, 2021).
51. *Shape Memory Polymer*. Available at: <http://www2.smp techno.com/en/smp/> (accessed: September 25, 2021).

52. Yang Y., Chen Y., Wei Y. et al. 3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 84, no. 9–12, pp. 2079–2095.
53. Liu Y., Zhang W., Zhang F. et al. Shape memory behavior and recovery force of 4D printed laminated Miura-origami structures subjected to compressive loading. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 153, pp. 233–242.
54. Bodaghi M., Damanpack A.R., Liao W.H. Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing. *Materials & Design*, 2017, vol. 135, pp. 26–36.
55. Kondrashov S.V., Pykhtin A.A., Larionov S.A. et al. Influence of production modes on the structure and properties of polyethylene samples produced by FDM-printing. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2021, no. 2, pp. 30–36.
56. Van Manen T., Janbaz S., Zadpoor A.A. Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers. *Materials horizons*, 2017, vol. 4, no. 6, pp. 1064–1069.
57. Ly S.T., Kim J.Y. 4D printing-fused deposition modeling printing with thermal-responsive shape memory polymers. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2017, vol. 4, no. 3, pp. 267–272.
58. Zarek M., Layani M., Cooperstein I. et al. 3D printing of shape memory polymers for flexible electronic devices. *Advanced Materials*, 2016, vol. 28, no. 22, pp. 4449–4454.
59. Liu Y., Zhang W., Zhang F. et al. Microstructural design for enhanced shape memory behavior of 4D printed composites based on carbon nanotube/poly(lactic acid) filament. *Composites Science and Technology*, 2019, vol. 181, pp. 107692.
60. Song S.H., Lee J.Y., Rodrigue H. et al. 35 Hz shape memory alloy actuator with bending-twisting mode. *Scientific reports*, 2016, vol. 6, pp. 21118.
61. Yang C., Boorugu M., Dopp A. et al. 4D printing reconfigurable, deployable and mechanically tunable metamaterials. *Materials Horizons*, 2019, vol. 6, no. 6, pp. 1244–1250.
62. Kang M., Pyo Y., Young Jang J. et al. Design of a shape memory composite (SMC) using 4D printing technology. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, vol. 283, pp. 187–195.
63. Akbari S., Sakhaei A.H., Panjwani S. et al. Multimaterial 3D printed soft actuators powered by shape memory alloy wires. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, vol. 290, pp. 177–189.
64. Umedachi T., Trimmer B.A. Design of a 3D-printed soft robot with posture and steering control. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014, pp. 2874–2879.

Информация об авторах

Каблов Евгений Николаевич, генеральный директор, академик РАН, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кондрашов Станислав Владимирович, заместитель начальника лаборатории по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мельников Андрей Андреевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Щур Павел Александрович, инженер, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», mai@mai.ru

Information about the authors

Evgeny N. Kablov, Director General, Academician of Russian Academy of Sciences, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Stanislav V. Kondrashov, Deputy Head of Laboratory for Science, Doctor of Technical Sciences, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey A. Melnikov, Leading Researcher, Ph.D., NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Pavel A. Schur, Engineer, Moscow Aviation Institute (National Research University), mai@mai.ru

Статья поступила в редакцию 19.11.2021; одобрена и принята к публикации 19.11.2021.

The article was submitted 19.11.2021; approved and accepted for publication 19.11.2021.