

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ МЯГКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МЕХАТРОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Р.Н. АБУТАЛИПОВ, А.У. ЗАММОЕВ

Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

Аннотация. Поиск методов и техники реализации конвейера материального воплощения симуляции для перехода от моделирования к прототипированию объектов бионаноробототехники – одна из актуальных проблем в области исследований БНРТ, решение которой может быть получено в результате разработки биоинтегрированных технологий мягкой робототехники. С целью подготовки технологической базы экспериментальных исследований в данной области выполнена разработка элементов технологии прототипирования мягких полимерных мехатронных конструкций мягкой робототехники, в общем виде представлена базовая технологическая схема физического прототипирования МПМК и экспериментально отработаны ее основные элементы, получен первый пробный образец МПМК.

Ключевые слова: бионаноробототехника, мягкая робототехника, мягкие роботы, мехатроника, биоинженерные системы, технология, виртуальное прототипирование, физическое прототипирование, мягкая полимерная мехатронная конструкция

Статья поступила в редакцию 16.12.2021

Принята к публикации 21.01.2022

Для цитирования. Абуталипов Р.Н., Заммоев А.У. Разработка элементов технологии экспериментального прототипирования мягких полимерных мехатронных конструкций // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 1 (105). С. 12–24. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-12-24

В работе [1] предложена концепция специального производственного унифицированного технологического цикла (СПУТЦ) как конвейера материального воплощения симуляции для перехода от моделирования к прототипированию объектов БНРТ и соответствующая схема организации процессов создания объектов БНРТ в эволюционном развитии технологического базиса.

Масштабируемый конвейер для проектирования реконфигурируемых организмов [2, 3] рассматривается как условный образец универсального конвейера эволюционного проектирования объектов БНРТ, который может также использоваться для синтеза исследовательских гипотез при познавательном-целевом моделировании.

Успехи зарубежных исследователей в области разработки бионических и биоинженерных конструкций позволяют рассматривать примеры мягкой робототехники на основе вокселей в качестве относительно простой экспериментальной модели реализации СПУТЦ для оценки возможности и перспективности создания объектов БНРТ в эволюционном развитии технологического базиса.

На этапе концептуального проектирования предложенной расширенной версии схемы конвейера воксельные конструкции мягкой робототехники [4, 5] рассматриваются как частный случай более широкого понимания данного класса мягкой робототехники, для которого дадим предварительно название – мягкие полимерные мехатронные конструкции.

Мягкая полимерная мехатронная конструкция (МПК) – изделие, способное выполнять управляемые функции движения и взаимодействия с окружающей средой, в т.ч. с обратной связью через сенсорные элементы. Состоит преимущественно из мягких полимерных материалов в композиции со встраиваемыми элементами микромеханики и микроэлектроники (такими как сенсоры, актюаторы, контроллеры и преобразователи), а также гибкими накопителями энергии и средствами коммуникаций электрических сигналов, механических усилий, движения и давления воздуха или жидкости и т.п.

К МПК можно отнести многочисленные экспериментальные разработки в области мягкой робототехники и биоробототехники. Так, в работе [6] сообщается о разработке и производстве конструкции биобота – использующей скелетные мышцы в качестве двигателя молекулярной машины, которой можно управлять и регулировать с помощью внешних сигналов. Моделирование и имитация использовались для изучения влияния изменения параметров конструкции на функциональную реакцию. Представленная в [6] биотехнологическая система на основе стереолитографической 3D-печати поддерживает интеграцию различных строительных материалов и различных типов клеток.

Мягкие роботы, как и МПК, могут быть формально представлены в виде доменной структуры и описываться с помощью параметризуемых графов. Это позволяет применить соответствующие вычислительные методы симуляции при их эволюционном проектировании. Получаемые в результате виртуальные прототипы представляются в виде описывающего их набора данных информационных моделей, достаточных для их физической реализации (3D-модели, схемы, алгоритмы и т. д.).

Таким образом, воксельные конструкции мягких роботов по устройству и принципу работы, как они представлены в работах [2–5], рассматриваются здесь как исходный концепт-проект для развития МПК.

Набор программно-аппаратных элементов для моделирования виртуальных прототипов БНРТ-устройств и систем, представленный ранее в функциональной модели аппаратной платформы для имитационного моделирования (симуляции) поведения бионаносистемы [7], можно использовать для симуляции поведения МПК на этапе эволюционного моделирования. Правила выполнения имитации процесса поведения МПК аппаратной платформой могут быть формализованы интеллектуальной экспертной системой в информационной модели рабочей среды набором продукционных правил и использованы одновременно с другими средствами виртуального моделирования иммерсивных сред.

На этапе физического прототипирования отобранные в процессе симуляции виртуальные прототипы реализуются по технологическому регламенту СПУТЦ, разрабатываемому на этапе детализации технологии прототипирования конвейерной схемы, следующем после этапа концептуального проектирования и предшествующем этапам эволюционного моделирования и физического прототипирования.

Таким образом, оценка возможности экспериментальной проверки методов и техники реализации конвейера материального воплощения симуляции для перехода от моделирования к прототипированию на примере решения прикладных задач эволюционного проектирования и прототипирования МПК требует детализации технологии прототипирования МПК для конвейерной схемы. Для решения этой задачи необходимо разработать базовые элементы технологии физического прототипирования МПК.

БАЗОВАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ФИЗИЧЕСКОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ МПК

В качестве исходной информации для прототипирования МПК выступают рабочая конструкторская документация с общим описанием элементной базы, устройства и принципа работы МПК, электронные 3D-модели элементов МПК и образцы топологии МПК и ее интерфейсов в форматах представления, достаточных для разработки технологической последовательности сборки МПК.

На данный момент рассматривается наиболее простой класс МПМК, образующих **поликуб** из **вокселей** – полых кубиков из мягкого полимерного материала – двух типов: *соединительных* – замкнутых пассивных кубиков, выполняющих функцию несущей конструкции, и *сократительных* – активных кубиков, соединенных с внешними пневмоактуаторами, создающими избыточное или отрицательное давление внутри кубика, придающими вокселю наряду с функцией несущей конструкции функцию источника механических напряжений, особым образом деформирующими конструкцию поликуба в зависимости от его топологии.

Внешним пневмоактуатором в самом простом исполнении может быть приводимый вручную пневмоцилиндр, в качестве которого используется шприц для инъекций (без иглы), его соединение с вокселем поликуба осуществляется с помощью силиконовой трубочки через вклеиваемый в стенку вокселя пластиковый коннектор. В дальнейшем будет реализован электромеханический привод поршня пневмоактуатора.

Электронные 3D-модели элементов МПМК разрабатывались с учетом возможности их изготовления доступными методами и средствами прототипирования МПМК.

По исходной технологии [2–5] предусматривается отдельное изготовление вокселя из двух деталей: стакана и крышки (рис. 1). Такое разделение обусловлено следующими важными с точки зрения технологии изготовления аспектами:

- требование наличия у вокселя внутренней полости, вследствие чего у вокселя имеется характеристика толщины стенки;

- требование наличия хотя бы одной грани с возможностью создания пространства для свободного доступа к смежным граням, контактирующим с формой, что упрощает отделение детали от нее по сравнению с полностью замкнутой формой, требующей разрушения деталей формы и препятствующей деформации детали;

- необходимость выполнения вырезки отверстия в стенке куба для создания сообщающихся внутренних полостей между склеенными вместе вокселями поликубической сборки для связи с пневмоактуатором или также для создания единой замкнутой пневмокамеры из множества примыкающих друг к другу вокселей. Саму процедуру вырезки отверстия удобно выполнять до склеивания стакана и крышки в цельную конструкцию вокселя, например, с помощью пробивного дырокола.

Воксель образуется в результате соединения стакана и крышки методом склеивания клеевой композицией, соответствующей используемому для изготовления вокселей полимерному материалу. Для склеивания деталей из силикона рекомендуется клей Sil-Poxy.

Изначально предполагалось апробировать воксели с размером ребра кубика 10–30 мм и толщиной стенки 1–1,5 мм, однако ввиду высокой трудоемкости производства вокселей без хорошо отработанной технологии было принято начать апробацию вокселей с размером ребра кубика 15 мм и толщиной стенки 1,5 мм.

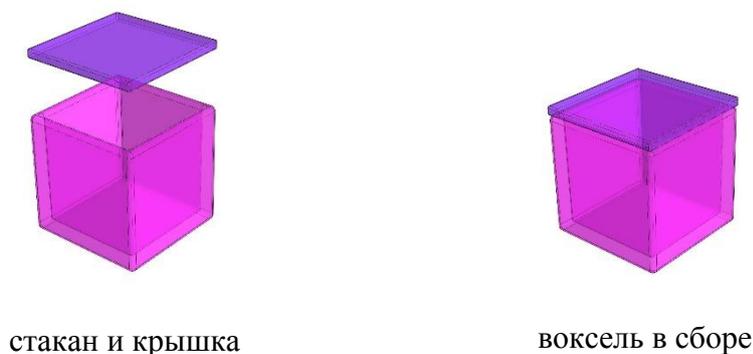


Рис. 1. 3D-модель конструкции вокселя

Для разработки технологической последовательности сборки МПМК необходимо иметь образцы топологии МПМК и ее интерфейсов в достаточной для этой цели форме представления.

Топология МПМК экспериментальной модели формализуется массивом данных, описывающих следующие параметры проектного пространства воксельной конструкции:

- координаты вокселя;
- тип вокселя – соединительный или сократительный;
- массив типов интерфейса для всех 6 граней вокселя в принятой системе координат.

Данный массив предполагается автоматически генерировать на этапе виртуального прототипирования методами эволюционного моделирования с применением генетического алгоритма. Для пробных конструкций можно воспользоваться примерами схем [2–5].

Обработкой массива с учетом требований технологии прототипирования можем получить список деталей с указанием их количества, технологическую карту производства или непосредственно управляющую программу для оборудования 3D-печати.

Опишем основные этапы технологии прототипирования МПМК, представленные на рис. 2.

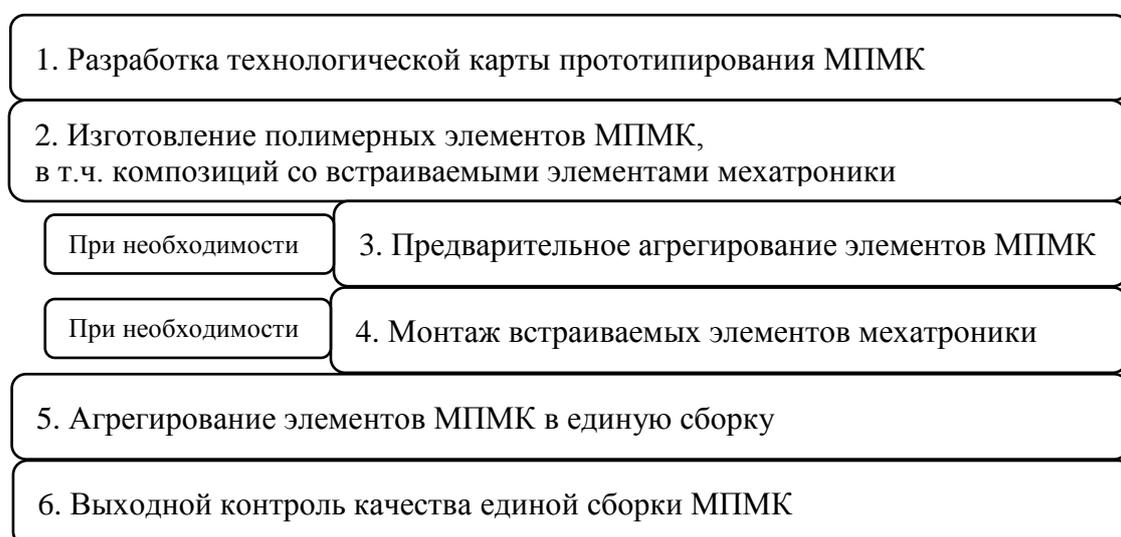


Рис. 2. Основные этапы технологии прототипирования МПМК

Этап 1. Разработка технологической карты прототипирования МПМК

С учетом производственных возможностей (требуемых материалов и оснастки, технологического оборудования) вручную или с применением алгоритмов автоматизации подготовки технологической документации по электронным 3D-моделям и спецификациям конструкции генерируется технологическая карта прототипирования МПМК, которая должна содержать следующую информацию:

1. Последовательность технологических процессов.
2. Основные материалы сырья.
3. Вспомогательные материалы.
4. Инструменты.
5. Приспособления.
6. Технологическое оборудование.

Этап 2. Изготовление полимерных элементов МПМК

Возможна реализация этапа в следующих вариантах технологического процесса:

Вариант А (базовый)

1. Проектирование конструкции формы.
2. Подготовка материалов и оснастки для изготовления форм.
3. Изготовление деталей форм элементов МПМК.
4. Сборка форм (в т. ч. при необходимости с использованием встраиваемых элементов мехатроники).
5. Подготовка полимерного материала.
6. Заполнение формы полимерным материалом.
7. Выдержка времени полимеризации.
8. Извлечение элементов МПМК из формы.
9. Механическое удаление заусенцев.
10. Визуальный контроль качества элементов МПМК и выбраковка.

Вариант Б (перспективный 3D-печатный).

1. Подготовка материалов и оснастки для 3D-печати элементов МПМК.
2. 3D-печать элементов МПМК.
3. Извлечение элементов МПМК из оснастки.
4. Механическое удаление заусенцев.
5. Визуальный контроль качества элементов МПМК и выбраковка.

Этап 3. Предварительное агрегирование элементов МПМК

Если технологической картой предусматривается выполнение этого процесса, то он включает следующую последовательность операций:

1. Подготовка материалов и оснастки.
2. Нанесение клея на поверхность базовой детали.
3. Установка и фиксация агрегируемой детали.
4. Удаление избытка клея.
5. Замазывание стыков клеем.
6. Выдержка времени полимеризации клея.
7. Извлечение сборки элементов МПМК из оснастки.
8. Механическое удаление заусенцев.
9. Визуальный контроль качества сборки элементов МПМК и выбраковка.
10. Цикл операций с п. 2 повторяется для требуемого количества клеевых соединений.

Этап 4. Монтаж встраиваемых элементов мехатроники

Если технологической картой предусматривается выполнение этого процесса, то он включает следующую последовательность операций:

1. Подготовка материалов и оснастки.
2. Нанесение клея на поверхности базовой детали и встраиваемых элементов.
3. Установка и фиксация встраиваемых элементов.
4. Удаление избытка клея.
5. Замазывание стыков клеем.
6. Выдержка времени полимеризации клея.
7. Извлечение сборки элементов МПМК из оснастки.
8. Механическое удаление заусенцев.
9. Визуальный контроль качества сборки элементов МПМК и выбраковка.
10. Цикл операций с п. 2 повторяется для требуемого количества клеевых соединений.

Этап 5. Агрегирование элементов МПМК в единую сборку

Процесс включает следующую последовательность операций:

1. Подготовка материалов и оснастки.
2. Нанесение клея на поверхности базовой детали и встраиваемых элементов.
3. Установка и фиксация встраиваемых элементов.
4. Удаление избытка клея.
5. Замазывание стыков клеем.
6. Выдержка времени полимеризации клея.
7. Извлечение сборки элементов МПМК из оснастки.
8. Механическое удаление заусенцев.
9. Визуальный контроль качества сборки элементов МПМК и выбраковка.
10. Цикл операций с п. 2 повторяется для требуемого количества клеевых соединений.

Этап 6. Выходной контроль качества единой сборки МПМК

Процесс включает следующую последовательность операций:

1. Установка МПМК на испытательный стенд.
2. Подключение МПМК через интерфейсы к устройствам испытательного стенда: трубопроводам пневмоактуаторов, тягам сервоприводов, электрическим кабелям, к блоку электроники.
3. Проверка работоспособности по принятой схеме тестирования.
4. Анализ результатов тестирования и принятие решения о выбраковке.

Условия апробации технологии прототипирования вокселей МПМК

В качестве основного полимерного материала для экспериментальной апробации элементов технологии прототипирования вокселей для МПМК по описанной выше базовой технологической последовательности изготовления деталей был выбран силикон. Апробация выполнялась с использованием двух вариантов материала: силиконовый герметик (Момент Гермент для окон и стекол) и двухкомпонентный жидкий силикон. Склеивание изготовленных силиконовых элементов осуществлялось с помощью клея Sil-Poxy.

Для изготовления элементов форм использовались: листовая акрил толщиной 2 и 4 мм, стекло толщиной 3 мм, пластик листовая (винипласт) толщиной 4 мм, пластик для 3D-печати PLA 1,75 мм.

Детали форм изготавливали методами механической резки (нож-резак, ножовка по металлу), резкой на лазерном станке с ЧПУ, аддитивной печатью на 3D-принтере, склеиванием (применялись клеи – рохурол, Космофен на основе цианакрилатов).

Для облегчения отделения силикона от формы апробированы силиконовая смазка на основе полидеметилсилоксана (нанесение ватной палочкой) и восковая разделительная смазка Вс-М (нанесение распылением аэрозоля).

В процессе изготовления необходимы следующие инструменты и расходные материалы:

1. Шпатель пластиковый.
2. Палочка пластиковая.
3. Скальпель.
4. Нож канцелярский.
5. Ножницы.
6. Вспомогательные материалы и инструменты.
7. Стальные канцелярские прищепки для бумаг.
8. Двухсторонний скотч с мягким пористым основанием толщиной 0,5 мм.
9. Линейка стальная.
10. Перчатки виниловые.
11. Салфетки.
12. Ватные палочки.
13. Изопропиловый спирт.

АПРОБАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ МПМК

В связи с особенностями конструкции вокселя возникает необходимость разработки формы с достаточной технологичностью, позволяющей выполнять мелкосерийное производство деталей вокселя без высоких трудозатрат.

В процессе отработки способов изготовления силиконовых деталей вокселя и элементов формы были рассмотрены следующие варианты:

1. В глухую ячейку (по аналогии с исходной технологией).
2. В сквозную ячейку на плоском основании.
3. В ячейку с пуансоном на основании.

По технологии, используемой в качестве исходного образца, для изготовления крышек вокселя допускается их вырезание из подготовленного листового силиконового материала или заливка в ограниченные бордюрами выемки высотой, равной заданной толщине стенок вокселя.

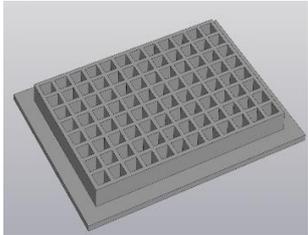
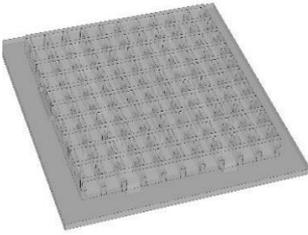
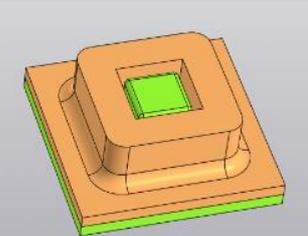
В таблице 1 представлены разработанные варианты форм для изготовления деталей вокселя, а в таблице 2 – результаты их практической апробации.

Варианты С1 и С2 в начале исследования рассматривались как исходные прототипы для конструирования формы.

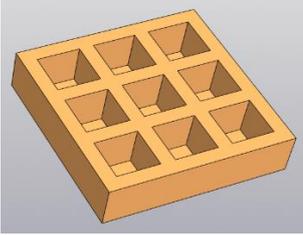
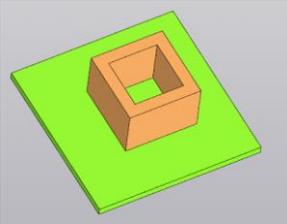
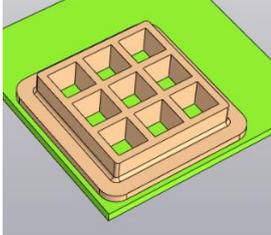
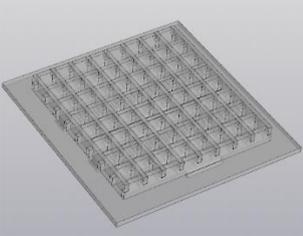
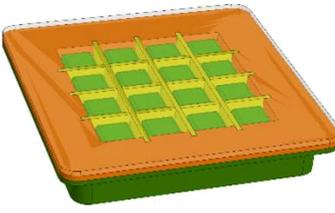
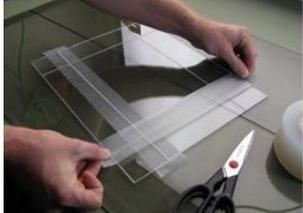
В конструкции форм по вариантам С1 и С2 предусмотрены буртики шириной 10 и 15 мм для крепления на ротационном столе с помощью канцелярских прищепок, а в остальных вариантах форм буртики используются для удержания деталей в сборе.

Таблица 1

ВАРИАНТЫ ФОРМ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ВОКСЕЛЯ ПОЛИКУБИЧЕСКОЙ МПМК

Вариант	Характеристики	3D-модель
С1	3D-печатная форма Количество ячеек: 96 (8x12) Тип ячейки: глухая Длина ребра кубика ячейки: 10 мм Ожидаемая толщина стенки вокселя: 1 мм Материал формы: пластик PLA Способ изготовления деталей формы: 3D-печать	
С2	Форма с деталями из листового акрила Количество ячеек: матрица 10x10 Тип ячейки: глухая Длина ребра кубика ячейки: 10 мм Ожидаемая толщина стенки вокселя: 1 мм Материал формы: листовый акрил толщиной 4 мм Способ изготовления деталей формы: склеивание деталей из листового акрила, вырезанных на станке лазерной резки (клей - рохурол или цианакрилат)	
С3	3D-печатная форма одиночной ячейки с пуансоном Количество ячеек: 1 Тип ячейки: глухая с пуансоном Длина ребра кубика ячейки: 15 мм Ожидаемая толщина стенки вокселя: 1,5 мм Материал формы: пластик PLA Способ изготовления деталей формы: 3D-печать	

Продолжение таблицы 1

Вариант	Характеристики	3D-модель
С4	<p>3D-печатная форма матрица 3x3 с глухими ячейками Количество ячеек: матрица 3x3 Тип ячейки: глухая Длина ребра кубика ячейки: 15 мм Ожидаемая толщина стенки вокселя: 1,5 мм Материал формы: пластик PLA Способ изготовления деталей формы: 3D-печать</p>	
С5	<p>3D-печатная форма для одиночной сквозной ячейки Количество ячеек: 1 Тип ячейки: сквозная Длина ребра кубика ячейки: 15 мм Ожидаемая толщина стенки вокселя: 1,5 мм Материал формы: ячейка - пластик PLA, основание - листовой акрил, пластик или стекло Способ изготовления деталей формы: ячейка - 3D-печать, основание - вырезка из листового материала</p>	
С6	<p>3D-печатная форма матрица 3x3 со сквозными ячейками Количество ячеек: матрица 3x3 Тип ячейки: сквозная Длина ребра кубика ячейки: 15 мм Ожидаемая толщина стенки вокселя: 1,5 мм Материал формы: ячейка - пластик PLA, основание - листовой акрил, пластик или стекло Способ изготовления деталей формы: ячейка - 3D-печать, основание - вырезка из листового материала</p>	
С7	<p>Форма с деталями из листового акрила для кубика 15 мм Количество ячеек: матрица 8x8 Тип ячейки: глухая Длина ребра кубика ячейки: 15 мм Ожидаемая толщина стенки вокселя: 1,5 мм Материал формы: листовой акрил толщиной 4 мм Способ изготовления деталей формы: склеивание деталей из листового акрила, вырезанных на станке лазерной резки (клей - рохурол или цианакрилат)</p>	
С8	<p>3D-печатная форма матрица 3x3 с пуансонами и съемными перегородками Количество ячеек: матрица 3x3 Тип ячейки: глухая с пуансоном Длина ребра кубика ячейки: 15 мм Ожидаемая толщина стенки вокселя: 1,5 мм Материал формы: пластик PLA Способ изготовления деталей формы: ячейка - 3D-печать</p>	
К1	<p>Форма для изготовления листа с оклейкой бордюра Количество ячеек: зависит от площади листа Толщина листа: 1 или 1,5 мм Материал формы: листовой акрил, пластик или стекло, двухсторонний скотч (скотч в 2-3 слоя) Способ изготовления деталей формы: наклеивание на основание полос бордюров из двухстороннего скотча</p>	

Продолжение таблицы 1

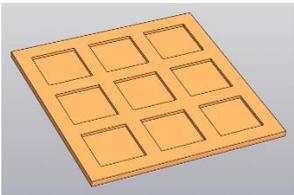
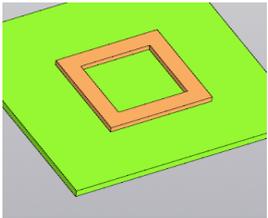
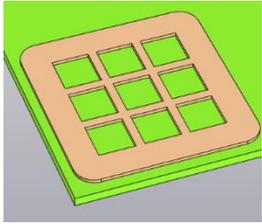
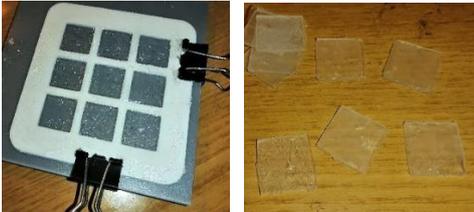
Вариант	Характеристики	3D-модель
К2	Форма для изготовления крышек Количество ячеек: 9 (3x3) Длина ребра кубика ячейки: 15 мм Толщина крышки: 1,5 мм Материал формы: пластик PLA Способ изготовления деталей формы: 3D-печать	
К3	Форма для изготовления крышек на основании одиночная Количество ячеек: 1 Длина ребра кубика ячейки: 15 мм Толщина крышки: 1,5 мм Материал формы: бордюр - пластик PLA, основание - листовой акрил, пластик или стекло Способ изготовления деталей формы: ячейка - 3D-печать, основание - вырезка из листового материала	
К4	Форма матрицы для группового изготовления крышек на основании Количество ячеек: 9 (3x3) Длина ребра кубика ячейки: 15 мм Толщина крышки: 1,5 мм Материал формы: бордюр - пластик PLA, основание - листовой акрил, пластик или стекло Способ изготовления деталей формы: ячейка - 3D-печать, основание - вырезка из листового материала	

Таблица 2

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ ВАРИАНТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ВОКСЕЛЯ

Вариант теста	Характеристики	Оценка	Фото
1	Вариант формы: С4 Материал разделителя: силиконовая смазка Рабочий материал: силиконовый герметик	Стаканы невозможно извлечь без разрушения, высокая адгезия к форме, толщина неравномерная - 0,5-2 мм, наличие пузырьков воздуха	
2	Вариант формы: К2 Материал разделителя: силиконовая смазка Рабочий материал: силиконовый герметик	Крышки невозможно извлечь без разрушения, высокая адгезия к форме, толщина 1,5 мм близка к равномерной, наличие пузырьков воздуха	
3	Вариант формы: К3 Материал разделителя: восковая смазка Рабочий материал: силиконовый герметик	Крышка отделена без разрушения, нет адгезии к форме, толщина 1,5 мм близка к равномерной, наличие единичных маленьких пузырьков воздуха	

Продолжение таблицы 2

Вариант теста	Характеристики	Оценка	Фото
4	Вариант формы: С5 Материал разделителя: восковая смазка Рабочий материал: силиконовый герметик	Стакан отделился без разрушения, нет адгезии к форме, толщина стенки неравномерная - 1-2 мм, наличие пузырьков воздуха	
5	Вариант формы: С3 Материал разделителя: восковая смазка Рабочий материал: силиконовый герметик	Стакан отделился без разрушения, нет адгезии к форме, незаполненность у оснований, толщина стенки равномерная – 1,5 мм, наличие пузырьков воздуха	
6	Вариант формы: К4 Материал разделителя: восковая смазка Рабочий материал: силиконовый герметик	Крышки отделились без разрушения, нет адгезии к форме, толщина стенки равномерная – 1,5 мм, незначительное количество мелких пузырьков воздуха	
7	Вариант формы: С6 Материал разделителя: восковая смазка Рабочий материал: силиконовый герметик	Стаканы отделились без разрушения, слабая адгезия к форме, толщина стенки равномерная – 1,5 мм, незначительное количество мелких пузырьков воздуха	
8	Вариант формы: С8 Материал разделителя: восковая смазка Рабочий материал: жидкий силикон	Стаканы отделились без разрушения, слабая адгезия к форме, толщина стенки равномерная – 1,5 мм, незначительное количество пузырьков	

В качестве рабочей версии технологии прототипирования вокселей выбран вариант по тесту № 8 с формами для детали стакана по варианту С8, для крышки – по варианту К4. В результате получают детали достаточного качества при приемлемых затратах труда. По этой версии технологии было изготовлено необходимое количество деталей и собран первый пробный образец поликубической МПМК (рис. 3).

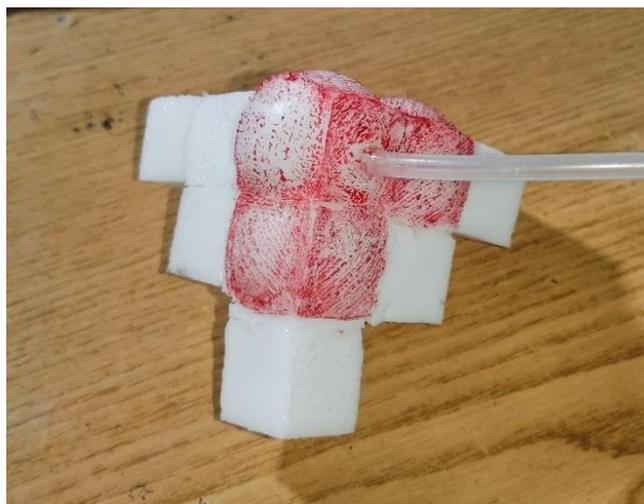


Рис. 3. Пробный образец поликубической МПМК

ВЫВОДЫ

Экспериментальную проверку методов и техники реализации конвейера материального воплощения симуляции для перехода от моделирования к прототипированию предложено выполнить при решении прикладных задач эволюционного проектирования и прототипирования мягких роботов, описываемых как мягкие полимерные мехатронные конструкции (МПМК).

Дано определение МПМК и описан подход к представлению мягких роботов для симуляции при виртуальном прототипировании.

В общем виде разработана базовая технологическая схема физического прототипирования МПМК и экспериментально отработаны ее основные элементы, которые позволили создать первый пробный образец МПМК.

Полученных результатов достаточно для дальнейшей разработки подробного технологического регламента физического прототипирования МПМК конвейерной схемы виртуального проектирования, моделирования и прототипирования мягких роботов.

Развиваемая технологическая база может стать основой для систем конструирования мягких и гибридных роботов широкого спектра практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Zammoev A.U., Abutalipov R.N.* Search for methods and study of the possibilities of using modern technologies of virtual prototyping and design of bioengineering systems in the design of bionanodevices and systems of bionanorobotics. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN* [News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS]. 2020. No. 6(98). Pp. 34–42. DOI 10.35330/1991-6639-2020-6-98-34-42. (In Russian)

2. *Kriegman S., Blackiston D., Levin M. et al.* A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117. No. 4. Pp. 1853–1859.

3. *Kriegman S., Blackiston D., Levin M. et al.* Supplementary information for «A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms» [Электронный ресурс]. URL: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1910837117

4. *Walker S., Shah D., Levin M. et al.* Automated shapeshifting for function recovery in damaged robots. arXiv preprint arXiv:1905.09264. 2019.

5. Kriegman S., Nasab A.M., Shah D. et al. Scalable sim-to-real transfer of soft robot designs 2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). IEEE, 2020. Pp. 359–366.

6. Cvetkovic C., Raman R., Chan V. et al. Three-dimensionally printed biological machines powered by skeletal muscle. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. Vol. 111. № 28. Pp. 10125–10130. DOI:10.1073.1401577111.

7. Zammoev A.U. Development of hardware platform for simulation of bionanosystems and their properties when designing of nanomechatronic devices and systems. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN* [News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS]. 2018. No. 6-2(86). Pp. 165–170. (In Russian)

Информация об авторах

Абуталипов Ренат Надельшаевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. совместной лаборатории Института информатики и проблем регионального управления – филиала Кабардино-Балкарского научного центра РАН и НПО «Андроидная техника» «Бионаноробототехника»;

360000, Россия, Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;
bnt_nat_2016@mail.ru

Заммоев Аслан Узенирович, канд. техн. наук, зав. совместной лабораторией Института информатики и проблем регионального управления – филиала Кабардино-Балкарского научного центра РАН и НПО «Андроидная техника» «Бионаноробототехника»;

360000, Россия, Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;
zammoev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7966-3557>

MSC 68W50; 92-10; 92C75

Original article

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY ELEMENTS FOR EXPERIMENTAL PROTOTYPING OF SOFT POLYMER MECHATRONIC DESIGNS

R.N. ABUTALIPOV, A.U. ZAMMOEV

Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street

Annotation. The search for methods and techniques for implementing the line of the material embodiment of simulation for the transition from modeling to prototyping objects of bionanorobotics (BNRT) is one of the actual problems in the field of BNRT research, the solution of which can be obtained as a result of the development of biointegrated soft robotics technologies. In order to prepare a technological base for experimental research in this area, the elements of prototyping technology for soft polymer mechatronic designs (SPMD) of soft robotics have been developed. In general, the basic technological scheme of physical prototyping of the SPMD is presented. Its main elements have been experimentally worked out. The first test specimen of the SPMD was obtained.

Keywords: bionanorobotics, soft robotics, mechatronics, bioengineering systems, technology, virtual prototyping, physical prototyping, soft polymer mechatronic designs

The article was submitted 16.12.2021

Accepted for publication 21.01.2022

For citation. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Development of technology elements for experimental prototyping of soft polymer mechatronic designs. News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS. 2022. No. 1 (105). Pp. 12–24. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-12-24

Information about the authors

Abutalipov Renat Nadelshaevich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the joint laboratory “Bionanorobotics”, Institute of Computer Science and Regional Management Problems – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and Scientific-Production Association “Android Technics”;

360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;
bnt_nat_2016@mail.ru

Zammoev Aslan Uzeyrovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the joint laboratory “Bionanorobotics”, Institute of Computer Science and Regional Management Problems – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and Scientific-Production Association “Android Technics”;

360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;
zammoev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7966-3557>