

УДК 687.022

## Разработка и исследование испытательной установки для оценки износостойкости металлизированных ортогональных 3D-тканей

**Константинов К. А., маг.,  
Саликова Е. В., к. т. н, доц.**

Костромской государственный  
университет, г. Кострома,  
Российская Федерация

*Реферат.* В статье представлен комплексный подход к исследованию износостойкости инновационных металлизированных 3D-тканей с ортогональной структурой, используемых в аэрокосмической, автомобильной и электронной промышленности. Для учета специфики сочетания металлического покрытия с объемной текстильной архитектурой разработана специализированная автоматизированная испытательная установка, обеспечивающая циклическое механическое воздействие и измерение изменений электропроводности образцов. Полученные результаты демонстрируют зависимость роста электрического сопротивления ткани от количества циклов деформации, что свидетельствует о процессе усталостного разрушения и деградации материала.

*Ключевые слова:* 3D-ткань, металлизированные композиты, ортогональная структура, износостойкость, автоматизированные испытания, электрическое сопротивление, усталостное разрушение.

Современная текстильная промышленность активно интегрирует трехмерные текстильные структуры (3D-ткани), обладающие уникальной объемной архитектурой, обеспечивающей высокую амортизацию, воздухопроницаемость и удельную прочность. Особенно перспективны ортогональные 3D-ткани, в которых нити расположены взаимно перпендикулярно вдоль осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , формируя жесткий каркас без традиционного переплетения в плоскости [1]. Металлизация таких структур, например, нанесение медного покрытия, расширяет функциональные возможности материалов, позволяя использовать их в аэрокосмической технике, электронике и автомобилестроении для защиты от электромагнитных помех, повышения прочности и улучшения рабочих характеристик.

Однако традиционные методы оценки износостойкости не учитывают комплексное влияние объемной структуры и металлического покрытия, что требует разработки специализированных испытательных методик.

Объектом исследования являлись образцы пятислойной ткани, размером  $10 \times 5 \times 1$  см (рис. 1).



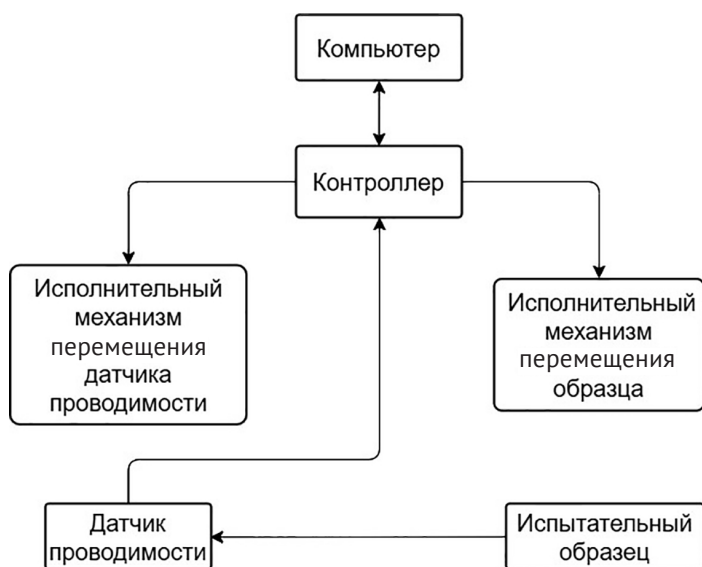
**Рисунок 1 – Исследуемый образец**

Для придания электропроводящих свойств образцы подвергались многократной пропитке раствором медного купороса ( $CuSO_4$ ) с последующей сушкой при контролируемой температуре. Контроль качества включал визуальный осмотр и измерение начального электрического сопро-

тивления (0–1 Ом). Образцы хранились в герметичных пакетах при температуре  $23 \pm 2$  °C и влажности  $45 \pm 5$  %.

Для оценки износостойкости металлизированных ортогональных 3D-тканей разработана автоматизированная установка (рис. 2), включающая:

- контроллер, управляющий процессом испытаний и сбором данных;
- два исполнительных механизма (шаговые двигатели): первый осуществляет циклическое изгибание образца с углом  $45^\circ$ , второй перемещает по направляющим датчик проводимости к испытываемому образцу;
- кондуктометрический датчик измеряет электрическое сопротивление испытуемого образца и передает данные на контроллер для архивирования данных и дальнейшего анализа;
- компьютер для загрузки управляющей программы в контроллер, обработки и визуализации данных испытаний.



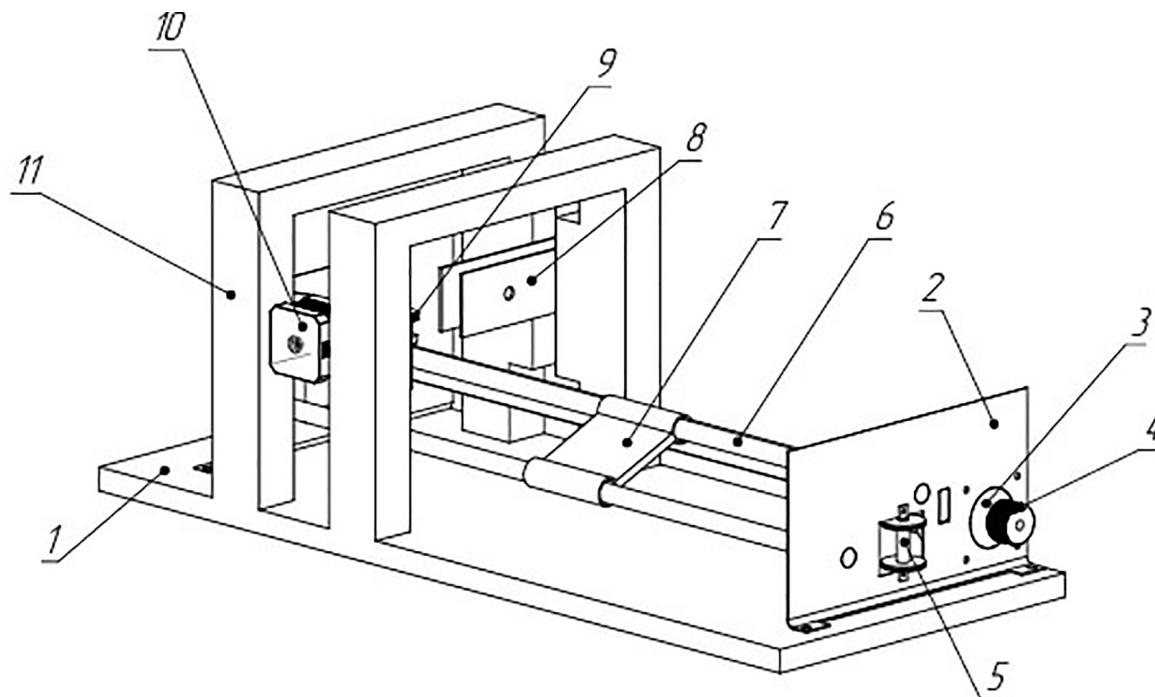
**Рисунок 2 – Структурная схема системы управления испытательной установки**

На рисунке 2 представлена структурная схема системы управления испытательной установки.

Конструкция испытательной установки для оценки износостойкости металлизированных ортогональных 3D-тканей приведена на рисунке 3.

В основе разработки управляющей программы лежит интеграция прецизионных механических компонентов с высокоточным измерительным контуром, управляемая микроконтроллерной платформой Arduino Uno. Аппарат-

ная конфигурация включает два независимых канала управления шаговыми двигателями NEMA 17 через специализированные драйверы A4988, формирующие импульсы с точностью до 1 микросекунды, и измерительный тракт на базе 10-битного АЦП с эталонным резистором 10 кОм.

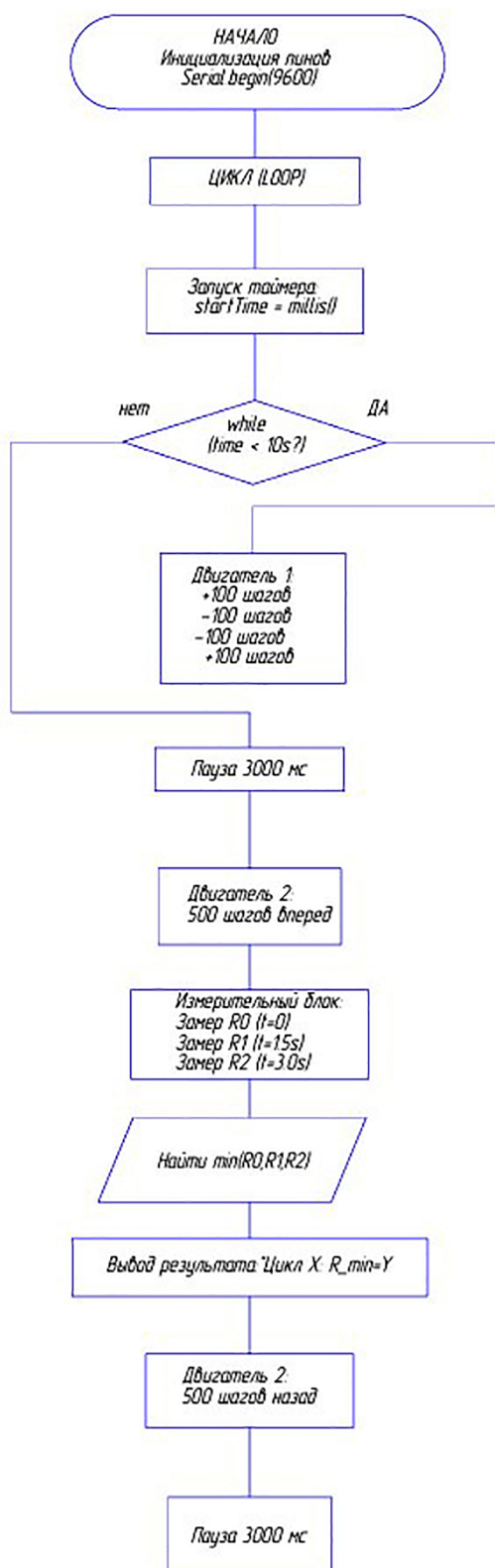


- 1 – основание; 2 – боковая пластина; 3 – шаговый двигатель для перемещения каретки с датчиком проводимости вдоль направляющих; 4 – катушка с тросом механизма перемещения;  
 5 – катушка для изменения угла натяжения троса; 6 – направляющие; 7 – каретка;  
 8, 9 – зажимы для фиксирования исследуемого образца;  
 10 – шаговый двигатель для изгиба исследуемого образца; 11 – каркас

**Рисунок 3 – Испытательная установка**

Ключевым функциональным элементом является алгоритм циклического воздействия на образцы ткани, где первый двигатель выполняет программируемые механические воздействия в течение строго контролируемых 10-секундных интервалов. После каждой фазы воздействия система инициирует 3-секундную паузу, необходимую для стабилизации образца, за которой следует операция линейного позиционирования вторым двигателем. Наиболее критичным компонентом системы выступит блок измерения электрического сопротивления, активируемый в специально выделенном 3-секундном диагностическом окне.

В рамках измерительного цикла реализуется трехточечный забор данных с дискретностью 1,5 секунды (старт, середина, завершение окна измерений). Каждое измерение включает аналоговое считывание напряжения с делителя, преобразование в цифровое значение через АЦП и расчет сопротивления по оптимизированной формуле  $R = ADC \times 10 + 44 \text{ Ом}$ . Особое внимание уделено обработке граничных условий: значе-



**Рисунок 4 – Алгоритм управляющей программы**

ние АЦП 0 будет интерпретироваться как короткое замыкание (0 Ом), а 1023 – как обрыв цепи (9,9 МОм). Полученные три значения сопротивления автоматически анализируются с выделением минимального показателя, который вместе с порядковым номером цикла выводится через последовательный интерфейс.

Для управления двигателями разработана импульсная схема с фиксированными параметрами: длительность HIGH-состояния 1000 мкс, пауза между импульсами 1000 мкс, что обеспечит частоту шагов 500 Гц. Обратное позиционирование второго двигателя будет выполняться ровно через 500 шагов после прямого перемещения. Временная логика системы построена на функциях `millis()` и `micros()` с реализацией неблокирующих задержек, гарантирующих синхронность операций. Всего за полный цикл продолжительностью 16 секунд первый двигатель выполнит 400 шагов (4 группы по 100 шагов с реверсом направления), второй – 1000 шагов (500 вперед + 500 назад), будет проведено 3 измерения сопротивления с фиксацией минимального значения.

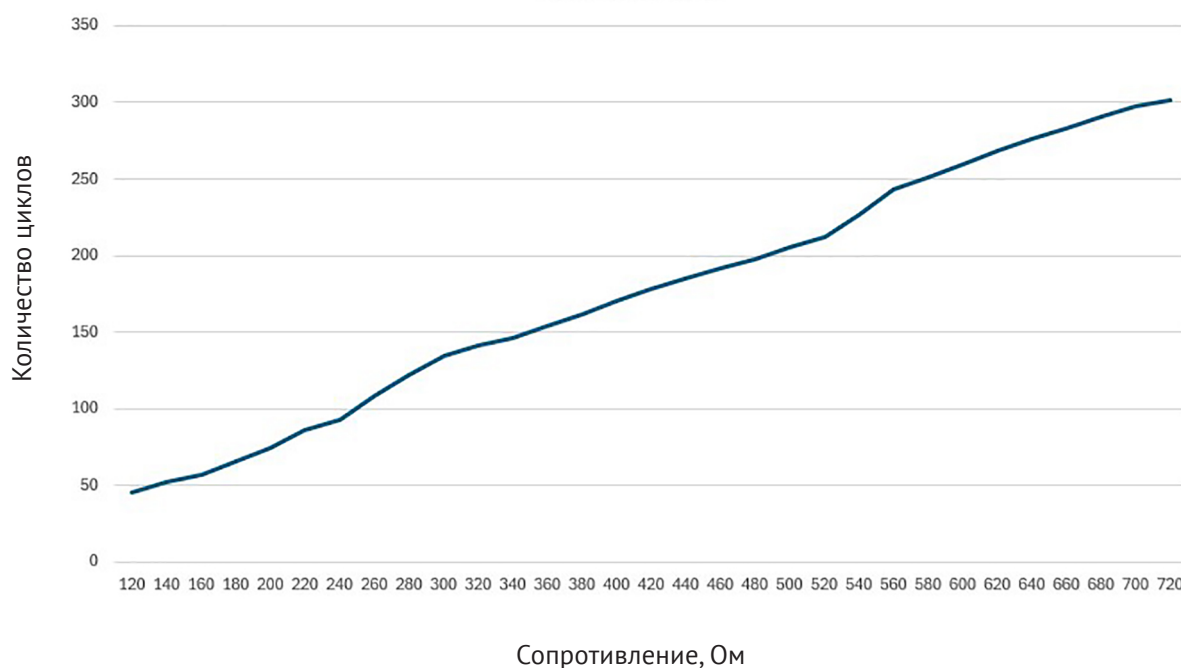
Особенности реализации включают: разделение силовых и измерительных цепей для минимизации помех, расчет теплового режима драйверов при непрерывной работе, калибровку АЦП по опорному напряжению, введение глобального счетчика циклов `experimentCycle` для синхронизации данных. Программный каркас предусматривает расширение для подключения дополнительных датчиков температуры и механического напряжения, что создает основу для будущих модификаций системы.

Алгоритм управляющей программы представлен на рисунке 4.

Испытания металлизирован-

ной ортогональной 3D-ткани проводились на образцах с многократным циклическим изгибом. Результаты показывают монотонный и нелинейный рост электрического сопротивления с увеличением количества циклов, что свидетельствует о постепенной деградации металлического покрытия и структуры ткани. Наблюдается классический признак усталостного разрушения материала – период ускорения роста сопротивления.

Данные усреднялись для повышения надежности и представлены в виде графика зависимости сопротивления от числа циклов (рис. 5).



**Рисунок 5 – Зависимость изменения сопротивления образца металлизированной 3D-ткани от числа циклов изгибов**

Разработанная автоматизированная установка и методика испытаний позволяют эффективно оценивать износостойкость металлизированных ортогональных 3D-тканей с учетом их уникальной структуры и функциональных свойств. Полученные результаты подтверждают значимость комплексного подхода к исследованию и способствуют развитию новых композитных материалов для высокотехнологичных отраслей.

#### Список использованных источников

1. Гречухин, А. П. Рудовский, П. Н. Новый способ формирования 3D-ортогональных тканей, виртуальная реальность и 3D-печать. – URL: [https://ttp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2020/07/384\\_6.pdf](https://ttp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2020/07/384_6.pdf) (дата обращения 10.09.2025). – Текст : электронный.