

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИСКУССТВЕННОЙ МЫШЦЫ  
ИЗ НЕЙЛОНОВОЙ ЛЕСКИ ДЛЯ РОБОТОВ НА БАЗЕ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ**

**Давыдов Эльдар Александрович**

*учебный мастер, лаборант кафедры  
Машиноведения и инженерной графики,*

*Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева – КАИ*

*Казань, Россия*

*E-mail: permskychel@yandex.ru*

**Крымова Виктория Николаевна**

*педагог дополнительного образования,*

*Городской центр детского технического  
творчества им. В. П. Чкалова,*

*Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А. Н. Туполева – КАИ,*

*Казань, Россия*

*E-mail: vikulka\_18\_01@mail.ru*

**Хабибуллин Фаниль Фаргатович**

*кандидат технических наук, доцент,*

*Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А. Н. Туполева – КАИ*

*Казань, Россия*

*E-mail: fanil\_arisk@mail.ru*

*Предмет исследования: два вида искусственных мышц, изготовленных методом вторичной спирализации из нейлоновой лески диаметрами поперечного сечения 1.2 миллиметра и 0.5 миллиметра, которые можно применить при изготовлении роботов на базе рычажных механизмов, а также в других механизмах и системах в качестве движителей.*

*Цель исследования: выделить преимущества и недостатки каждого из видов искусственных мышц полученных вторичной спирализацией из нейлоновой лески разного диаметра.*

*Методы и объекты исследования: в статье был проанализирован способ изготовления искусственной мышцы. Экспериментально найден способ измерения максимально возможного поднимаемого веса груза. Подобраны экспериментальным методом рабочие температурные режимы для искусственной мышцы из нейлоновой лески и достаточные веса грузов для удачного функционирования искусственной мышцы из нейлоновой лески различных диаметров поперечного сечения.*

*Результаты исследования: проведены и проанализированы результаты испытаний на растяжение. Вычислена численная разница поднимаемого веса относительно собственной массы спирали.*

*Ключевые слова: искусственные мышцы, нейлон, растяжение, движитель, леска.*

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL MUSCLES MADE OF NYLON FISHING LINE FOR ROBOTS BASED ON LEVER MECHANISMS

**Eldar A. Davydov**

*Training Master, Laboratory Assistant,  
Department of Mechanical Engineering and Engineering Graphics,  
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,  
Kazan, Russia  
E-mail: permskychel@yandex.ru*

**Victoria N. Krymova**

*Additional Teacher of Education,  
Chkalov City Center for Children's Technical Creativity;  
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,  
Kazan, Russia  
E-mail: vikulka\_18\_01@mail.ru*

**Fanil F. Khabibullin**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,  
Kazan, Russia  
E-mail: fanil\_arsk@mail.ru*

*Subject of research: two types of artificial muscles made by secondary spiralization from nylon fishing line with cross-sectional diameters of 1.2 millimeters and 0.5 millimeters, which can be used in the manufacture of robots based on lever mechanisms, as well as in other mechanisms and systems as propellers.*

*Purpose of research: to highlight the advantages and disadvantages of each type of artificial muscles obtained by secondary spiralization from nylon fishing line of different diameters.*

*Methods and objects of research: the article analyzed the method of manufacturing an artificial muscle. A method of measuring the maximum possible lifting weight of the load has been experimentally found. The operating temperature conditions for an artificial muscle made of nylon fishing line and sufficient weights of loads for the successful functioning of an artificial muscle made of nylon fishing line of various cross-sectional diameters were selected by an experimental method.*

*Results of research: the results of tensile tests were carried out and analyzed. The numerical difference of the lifted weight relative to the proper mass of the spiral is calculated.*

*Keywords: artificial muscles, nylon, stretching, mover, fishing line.*

---

### Введение

В процессе современной модернизации производства человечество стремится к повышению КПД устройств, механизмов и производств. Это достигается разными способами. Например, создание более новых и инновационных устройств, которые вымещают собой старые образцы оборудования и устройств. С течением времени человек научился создавать такие системы и устройства, которые могут в полной мере выполнять функции органов живых существ. Так, в робототехнике, бионике и на множестве устройств используют движители различных видов. Но даже такие устройства как, например, гидравлическая и пневматическая системы имеют ряд недостатков, включающие в себя большие габариты и огромное количество дополнительных систем, необходимых для полноценного и безотказного функ-

ционирования. Прогресс не стоит на месте, и ученые создают новые системы и механизмы, которые с легкостью могут выполнять функции вышеперечисленных устройств. К таким устройствам можно отнести и искусственные мышцы.

В недавнем времени было разработано устройство, а именно – искусственные мышцы из нейлоновой лески, которые в полной мере смогут выполнять функции двигателей в механизмах, и, возможно, станут заменой некоторых систем, таких как пневматика, гидравлика, а также, возможно, в будущем будут выполнять роль мышц живых существ в имплантах различных уровней. Тем не менее, данное устройство требует исследований и доработок.

При выполнении данной работы главной целью являлось выделить преимущества и недостатки каждого из видов искусственных мышц из нейлоновой лески. Для этого было необходимо изготовить экспериментальные образцы, найти способ для фиксации образцов и замера максимального веса, который может передвинуть та или иная конфигурация искусственной мышцы; провести испытания на растяжение, выбрать температурный режим и провести эксперимент.

### **Результаты и обсуждение**

#### *Из чего состоят искусственные мышцы*

Множество искусственно созданных человеком устройств и механизмов копируют механизмы работы систем, зафиксированных в природе. Но, несмотря на это, принцип работы искусственных мышц из нейлоновой проволоки значительно отличается от принципа работы скелетных мышц. Искусственные мышцы рассматриваемого вида состоят из нейлоновой лески и работают на принципе её вторичной спирализации.

Нейлон – это искусственно получаемое прочное волокно на основе полиамида, выделяющееся особой прочностью, несложностью в уходе. Это полностью искусственный материал, который ценится за легкость и устойчивость к повреждениям. По некоторым характеристикам нейлон превосходит многие материалы, например, эластичность и прочность. Также материал является приоритетным при выборе в различных ситуациях. Оценка нейлона подтверждает уникальные свойства материала, такие как практичность, универсальность, функциональность. Нейлон обладает такой особенностью: он плохо выдерживает высокие температуры, под их воздействием нейлон плавится и деформируется [1, 2].

Как сказано выше, нейлон обладает высокой эластичностью и другими свойствами, которые позволяют изготовить из него искусственные мышцы. Такие мышцы работают благодаря вторичной спирализации. Принцип образования вторичной спирализации состоит в том, что один конец нейлоновой лески жестко закрепляют в зажим, который вращается вокруг продольной оси самой лески, а на второй конец этой же лески жестко закрепляется груз с фиксатором осевого кручения, который предотвращает кручение свободного конца лески вокруг своей оси, и под действием силы тяжести притягивает его к полу создавая натяжение.

Когда угол скрутки волокон переходит грань в  $45^\circ$ , леска начинает претерпевать вторичную спирализацию, постепенно образуя витки спирали. Как было сказано выше – нельзя позволять закрученной спирали раскрутиться, иначе искусственная мышца работать не будет. Нейлон претерпевает такую сильную пластическую деформацию, что даже после снятия вращающего усилия спираль почти не раскручивается обратно и остаётся закрученной, но без скручивающих напряжений. Это лишь один из всевозможных способов, который может обеспечить получение структуры вторичной спирализации нейлоновой лески [3, 4].

#### *Механизм работы искусственных мышц*

Основным механизмом работы искусственных мышц из нейлона является анизотропия. Сокращение нейлоновой спирали при повышении температуры связано с изменением направления волокон в структуре закрученной лески. Это происходит потому, что в то время, когда при изготовлении лески расплавленный материал пропускается через фильеру, длинные полимерные молекулы ориентируются вдоль её продольной оси. Нагруженные по-

лимерные волокна при нагреве, увеличивая энтропию системы, сокращаются. То есть, при нагреве нейлоновой лески, закрученные под  $45^\circ$  волокна сокращаются, что приводит к раскручиванию лески и спираль так же сокращается. При увеличении температуры закрученный нейлон стремится вернуть свою форму в исходное состояние, но так как на этот момент закручена и на нее действуют скручивающие напряжения, то расстояние между каждыми двумя рядом стоящими витками уменьшается, тем самым приводя спираль к сжатию, а систему – в движение [3, 4].

При дальнейшем охлаждении происходит обратный процесс. Он происходит значительно быстрее и эффективнее, если на спираль действуют растягивающие напряжения подвешенного на свободный конец веса груза.

Рассмотрим два вида спиралей, полученных методом вторичной спирализации из двух видов нейлоновой лески диаметрами 1.2 миллиметра и 0.5 миллиметра, а также вычислим максимально возможный вес груза, передвигаемый искусственными мышцами.

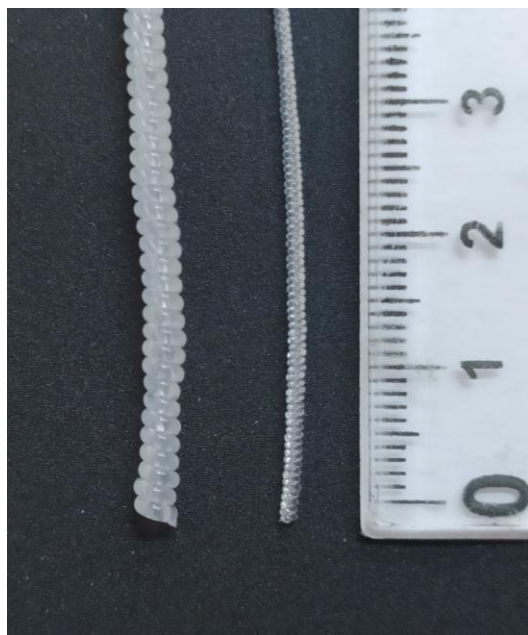


Рисунок 1 – Образцы, полученные посредством вторичной спирализации нейлоновой лески диаметром 1.2 мм и 0.5 мм

#### *Изготовление экспериментальных образцов*

На основе вышеуказанных теоретических данных было выполнено изготовление спирали из нейлоновой лески на вертикально установленном штативе. Было решено изначально для проведения эксперимента использовать нейлоновую леску диаметром поперечного сечения 1.2 мм. Так как леска из нейлона обладает рядом свойств, в которые включена упругость, то зафиксировать леску такого диаметра, завязав на одном из её концов петлю с узлом, было трудно, поэтому фиксация проводилась металлическими зажимами для бумаги (рис. 2). Для этого из металлических зажимов убирались ручки, и на их места вставлялась леска, как показано на рисунке 2. Таким образом, данный способ фиксации не позволяет леске вращаться вокруг своей продольной оси при закреплении, так как корпус металлического зажима играет роль рычага и жесткого фиксатора. Один конец лески, который вставлен в металлический зажим для бумаги, фиксировался на вертикальном штативе посредством плотного зажатия металлического фиксатора между двумя плоскостями, а на второй (свободный) конец лески подвешивался груз массой 375 грамм.

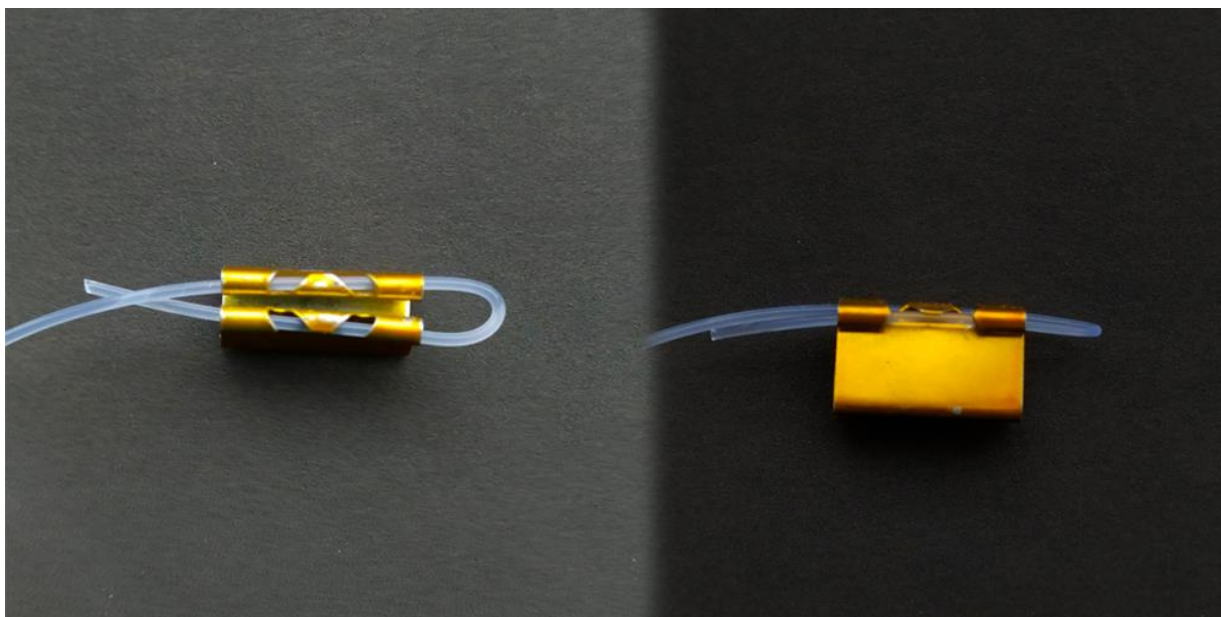


Рисунок 2 – Фиксирование конца лески в металлическом зажиме для бумаги

Необходимый вес груза выбирался исходя из степени напряжённости спирали. Для закручивания был выбран груз массой 375 грамм, который будет достаточен и не приведет к разрыву лески при натяжении.

Далее производилось вращение груза вокруг продольной оси лески до тех пор, пока не образуется вторичная закрутка, а после – необходимое количество витков спирали. От подвешиваемого груза появлялись растягивающие напряжения в леске, которые одновременно с вращением одного конца лески вокруг своей продольной оси провоцировали её к скручиванию по механизму вторичной спирализации (рис. 1), а не сверхспирализации (рис. 3). Для ускорения процесса образования мышцы было принято решение использовать ручную электрическую дрель для вращения лески вокруг её продольной оси [5, 6].



Рисунок 3 – Леска, закрученная путем сверхспирализации

#### *Используемый способ замера максимальной подъемной силы*

Для получения более точных результатов необходимо найти такой способ замера, который будет достаточно простым, но при этом будет отображать достаточно точные результаты экспериментов.

Для этого было принято решение проводить замеры максимально возможной массы, поднимаемой исследуемой мышцей электронными весами с возможностью обнуления массы

тары на весах. Это поможет получить достаточные результаты замеров. Цена деления таких весов равна 1 грамму.

На весы укладывается груз выбранной массы для каждого вида спиралей. После этого свободный конец спирали фиксируется за груз, а также от вращения вокруг своей продольной с небольшим натягом. Обнуляется счетчик массы так, чтобы с установленным грузом на весы в состоянии покоя они показывали 0 грамм. После этого при сокращении искусственной мышцы, она будет приподнимать груз от поверхности весов, которые, в свою очередь, будут показывать изменения приложенной к ним массы в обратном направлении (со знаком минус). Таким образом, мы с легкостью можем измерить максимально возможный вес, который сможет передвинуть искусственная мышца из нейлоновой лески.

*Испытания спирали из лески с диаметром поперечного сечения 1.2 мм*

После образования вторичной спирализации витки спирали плотно прижимаются друг к другу. В таком случае при подвешивании груза с очень маленьким весом нагрузка на спираль будет недостаточной, и расстояние между витками спирали не увеличится, поэтому растяжения спирали (при нагружении) и сжатия при нагреве не будет. По этой причине для проверки силы искусственной мышцы при нагреве путем постепенного увеличения веса подвешиваемого груза было установлено, что достаточной нагрузкой для закрутки и эксперимента будет достаточен груз массой 900 грамм, при котором между витками спирали будет некоторое расстояние для предоставления свободного хода мышцы и её сокращения, и не будет происходить разрыв нейлоновой лески.

Для того чтобы появилась реакция мышцы, необходимо повысить её температуру. Для нагрева мышцы использовался паяльный фен марки Weller с возможностью изменения температуры воздуха, а также его скорости на выходе из сопла. Сопло фена имеет диаметр 7 мм, поэтому будем считать, что такой нагрев является локальным, а именно – производится только в одном небольшом месте, а не распространяется на поверхность всей спирали.



Рисунок 4 – Фен Weller WHA 300, применяемый для нагрева спирали

Исходная длина лески составляла 1 м, а после скрутки ее длина стала составлять 27 см. То есть при образовании вторичной закрутки рабочая длина сокращается на 63 %. Один конец закрученной спирали надежно фиксировался в металлическом зажиме для бумаги, закрепленном в штативе. С другой стороны, надежно подвешивался груз, зафиксированный от вращения вокруг продольной оси спирали. После этого производился локальный нагрев горячим возду-

хом температурой 120–125°C (выбран такой режим температуры, так как источник тепла не имеет непосредственного соприкосновения со спиралью, и часть тепла теряется на разогрев воздушного потока. В конечном счете, леска спираль локально нагревалась в интервале температур от 80°C до 95°C, что вполне достаточно для работы искусственной мышцы из нейлона) в течение 17 секунд. В это время на весах было зафиксировано изменение массы груза, которое составляло 191 грамм. То есть максимальная нагрузка, которую может поднять одна спираль из нейлоновой лески диаметром 1.2 мм и длиной 27 см – груз массой не более 191 грамма.

При этом собственная масса спирали составляет 2 грамма. Следовательно, мышца из нейлоновой лески с диаметром поперечного сечения 1.2 миллиметра может привести в движение груз, который превышает массу самой мышцы в 80 раз. При необходимости поднятия груза большей массы можно соединить несколько спиралей в один пучок.

*Испытания спирали из лески с диаметром поперечного сечения 0,5 мм*

Следующим этапом были проведены аналогичные эксперименты с нейлоновой леской диаметром 0.5 миллиметра. Так же, как и в варианте со спиралью из нейлоновой лески диаметром 1.2 миллиметра, изготавливаем спираль из нейлоновой лески диаметром 0.5 миллиметра. Так как диаметр используемой лески стал значительно меньше, чем в прошлом эксперименте, то и вес, подвешиваемый на один из концов лески, используемый в качестве натяжителя для закрутки, необходимо использовать меньше, а именно – 260 грамм. Данный вес груза был подобран, как и в прошлом эксперименте, опытным путем. Выбор более маленького веса позволит избежать случаев разрыва лески при образовании вторичной закрутки. Исходная длина нейлоновой лески также составляла 1 метр, но после проведения вторичной спирализации спираль стала длиной 45 сантиметров. Увеличение длины конечной спирали в напряженном состоянии произошло вследствие того, что диаметр поперечного сечения лески значительно меньше предыдущего экспериментального образца и диаметр витков спирали также меньше, чем диаметр витков предыдущей спирали.

В данном случае для нагревания нейлоновой лески также был использован фен марки Weller с возможностью изменения температуры воздуха, а также его скорости на выходе из сопла. Исходя из этого, можно сделать вывод, что нагрев, как и в первом случае, является локальным, а, следовательно, условия испытаний двух спиралей из лески разного диаметра одинаковые.

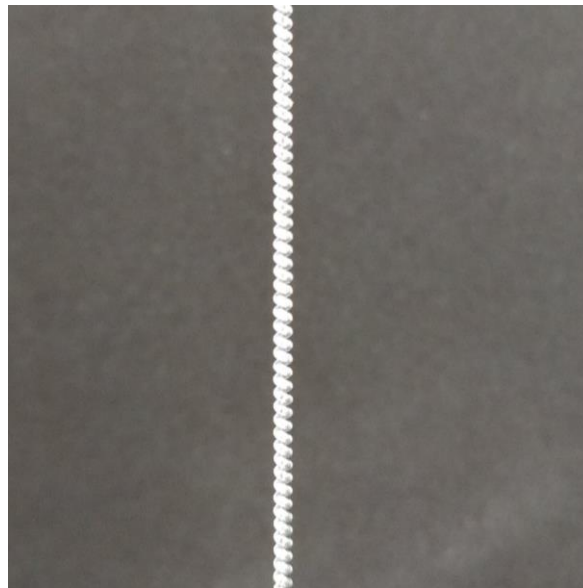


Рисунок 5 – Спираль из лески диаметром 0.5 мм в рабочем растянутом положении

На первых стадиях эксперимента столкнулись с проблемой, которая заключается в том, что рабочая температура сокращения, которая подходит для работы спирали из лески толщиной 1.2 миллиметра не подходит, так как при такой температуре леска теряет форму спирали и растягивается. Для решения этой проблемы было принято решение уменьшить интервалы рабочих температур до 70–80°C. Это позволило избежать проблем с потерей формы спирали при её нагреве.

После того, как посредством вторичной спирализации спираль была закручена, на весы был установлен выбранный груз массой 600 грамм, который крепился к одному из концов нейлоновой спирали. Груз был установлен так, что закрепленная за него нейлоновая спираль находилась в растянутом состоянии. После приведения системы в состояние покоя счетчик весов был обнулён.

Выбранного рабочего веса было достаточно для того, чтобы перевести спираль в напряженное и натянутое состояние, при условии, что не будет происходить её разрушение. В ходе проведения эксперимента было установлено, что максимально возможная масса, поднимаемая нейлоновой мышцей из лески диаметром 0.5 миллиметра, равна 97 граммам, при этом собственная масса спирали составляет 0.92 грамма. Следовательно, мышца из нейлоновой лески диаметром сечения 0.5 миллиметра может привести в движение груз, масса которого превышает массу самой мышцы в 105.5 раз.

#### *Испытания на растяжение*

Было принято решение для более точного сравнения двух видов искусственных мышц провести испытания на их растяжение. Испытания проводились безменом электронным с диапазоном измерения от 0 до 50 кг и с функцией фиксирования значения максимальной нагрузки. Для испытаний на растяжения были использованы новые образцы, полученные способом, указанным выше.

Для проведения замеров один из концов спирали надежно фиксировался на штативе, а со вторым концом надежно соединялся безмен электрический.

Изначально производилось испытание искусственной мышцы из нейлоновой лески с диаметром поперечного сечения 0.5 миллиметра. При постепенном увеличении нагрузки спираль растягивалась. На отметке в 1565 грамм начало происходить разрушение формы спирали (рис. 6). При дальнейшем увеличении спираль продолжала деформироваться, а на отметке в 5920 грамм произошел разрыв лески, хотя заявленная максимальная выдерживаемая этой леской нагрузка равна 7 килограмм.

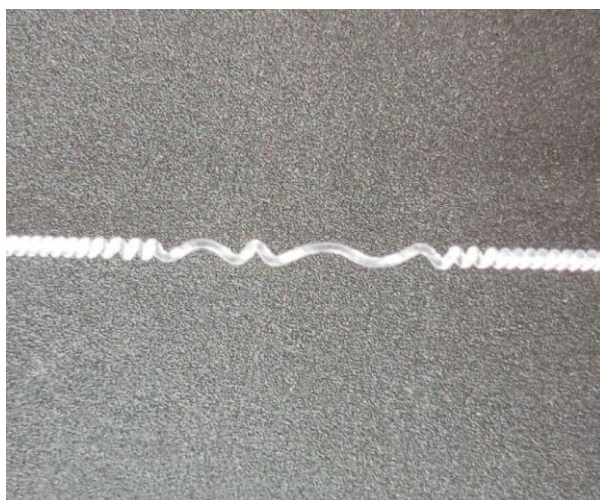


Рисунок 6 – Разрушенная форма спирали из лески диаметром 0.5 мм

Следующим этапом были проведены испытания искусственной мышцы из нейлоновой лески с диаметром поперечного сечения 1.2 миллиметра. Как и в предыдущем испытании при увеличении нагрузки спираль растягивалась, но главное отличие заключается в том, что на отметке в 18200 грамм произошел разрыв лески без предварительного разрушения формы спирали. Заявленная максимальная поднимаемая нагрузка равна 30 килограммам.

Преждевременный разрыв происходит из-за того, что линии скручивания играют роль концентраторов напряжений.

#### *Сравнение*

Как видно из экспериментов, результаты которых представлены выше, каждый тип спирали из нейлоновой лески обладает своими преимуществами и недостатками. Главным преимуществом спирали из нейлоновой лески с диаметром поперечного сечения 1.2 миллиметра является её устойчивость к растягивающим напряжениям, но при этом её рабочая сила в сравнении со своим собственным весом значительно меньше, чем у спирали из нейлоновой лески с диаметром поперечного сечения 0.5 миллиметра. Также одним из недостатков спирали из нейлоновой лески с диаметром поперечного сечения 1.2 миллиметра является то, что для активации её работы необходим больший показатель температуры, а также она обладает габаритами, которые больше, чем у её конкурента.

Основным недостатком искусственной мышцы из нейлоновой лески диаметром 0.5 миллиметров является то, что спираль начинает разрушаться даже при небольших перегрузках. Также можно отметить, что закручивание лески для образования спирали происходит дольше при диаметре поперечного сечения 0.5 миллиметра, чем при диаметре 1.2 миллиметра. Это связано с тем, что из-за более маленького диаметра поперечного сечения лески образуется значительно больше витков, чем при большом диаметре поперечного сечения лески. Из преимуществ можно выделить то, что из искусственных мышц из нейлоновой лески с диаметром поперечного сечения 0.5 миллиметров легче собрать пучок спиралей, а также этот вид спирали передвигает больший вес относительно своей собственной массы.

Несмотря на то, что спираль из нейлоновой лески диаметром поперечного сечения 1.2 миллиметра имеет ряд недостатков перед нейлоновой леской с диаметром поперечного сечения 0.5 миллиметра, она является более прочной, что в некоторых случаях является приоритетным критерием выбора.

### **Заключение и выводы**

В конечном счете, были проведены эксперименты, в результате которых было установлено, какой вес могут передвинуть искусственные мышцы из нейлоновой лески разных диаметров, и во сколько раз он превышает их собственный вес. Спираль из нейлоновой лески с диаметром поперечного сечения 1.2 миллиметра в среднем может поднять груз массой, превышающий свой собственный в 80 раз. Спираль из нейлоновой лески с диаметром поперечного сечения 0,5 миллиметра в среднем может поднять груз массой, превышающий свой собственный в 105,5 раз.

Для каждого вида спирали был подобран свой собственный рабочий вес, а также вес для проведения вторичной закрутки нейлоновой лески. Рабочий вес для искусственной мышцы из нейлоновой лески с диаметром поперечного сечения 1.2 миллиметра равен 900 граммам, а для искусственной мышцы из нейлоновой лески диаметром поперечного сечения 0.5 миллиметра – 600 грамм. Масса груза, используемая для получения вторичной закрутки, отличалась от рабочей, и для спирали из лески с диаметром поперечного сечения 1.2 миллиметра она равна 375 грамм, а для спирали из лески с диаметром поперечного сечения 0.5 миллиметра – 260 грамм.

Был выбран температурный режим для работы при локальном нагреве горячим воздухом, во время которого не будет происходить течения материала. Для спирали из лески с

диаметром поперечного сечения 1.2 миллиметра диапазон рабочих температур варьируется от 120°C до 125°C на выходе, а для спирали из нейлоновой лески с диаметром поперечного сечения 0.5 миллиметра – от 80°C до 95°C.

Также были проведены испытания на растяжения, в результате которых было выявлено, что максимальный вес груза, который могут выдержать спирали из нейлоновой лески диаметрами поперечного сечения 1.2 миллиметра и 0.5 миллиметра, 18200 грамм и 5920 грамм соответственно. При этом у спирали второго типа присутствует момент на отметке в 1565 грамм, при котором она начинает терять свою форму.

### Литература

1. Егоров, С. А. Исследование физико-механических свойств изделий из нейлона, изготовленных методами аддитивных технологий / С. А. Егоров, Т. В. Тарасова. – Текст : непосредственный // XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС – 2018) : Сборник трудов конференции, Москва, 20–23 ноября 2018 года. – Москва : ФГБУН Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, 2019. – С. 20–23. – EDN YWKZED.

2. Захаров, И. А. Исследование способов активизации искусственной мышцы и возможности её применения на практике / И. А. Захаров, Т. С. Попова, И. Н. Устюгова. – Текст : непосредственный // Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний: методы и средства : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Новосибирск, 14–17 ноября 2017 года / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2017. – С. 319–324. – EDN ZTKRAX.

3. Искусственные мышцы из нейлоновой лески // SCFH.RU: ежедн. интернет-изд. 2021. 12 мая. – Текст : электронный. – URL : <https://scfh.ru/papers/iskusstvennye-myshtsy-iz-neylonovoy-leski/> (дата обращения: 6.10.2022).

4. Матюнин, В. И. Искусственные мышцы из нейлоновой лески / В. И. Матюнин, А. И. Щетников. – Текст : непосредственный // Наука из первых рук. – 2015. – Т. 64, № 4. – С. 122–127.

5. Патент № 2563815 С1 Российская Федерация, МПК А61F 2/08, А61L 27/04, А61L 27/14. Искусственная мышца : № 2014119273/15 : заявл. 14.05.2014 : опубл. 20.09.2015 / Д. А. Журавлев. – EDN AXVYGZ.

6. Стерехова, В. С. Разработка искусственной мышцы из нейлона для реабилитационного тренажера / В. С. Стерехова, А. А. Протопопов. – Текст : непосредственный // Молодежь и современные информационные технологии : Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 03–07 декабря 2018 года / Томский политехнический университет. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С. 356–357. – EDN ZBFPWX.