МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Кафедра «Теоретическая механика»

Работа допущена к защите

Зав. кафедрой, д.ф.-м.н., проф.

_____ **А. М. Кривцов**

"__"_____

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени

МАГИСТРА

Тема:

РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ СРЕД И РАЗРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ КОНСТРУКЦИЙ

Направление: 01.04.03 – Механика и математическое моделирование

Выполнил студент гр. 63604/1 _____ Д. Дзенушко

Руководитель, д.ф.-м.н., проф. _____ А. М. Кривцов

Консультант по вопросам охраны труда: _____

Санкт-Петербург

2016

Содержание

1. Введение 3

2. Стержневые модели связи 5

3. Гиперболоидная модель связи 7

4. Модель связи на базе стальных витых пружин 12

5. Модель связи на базе пружины специального сечения 16

6. Экспериментальная установка 20

6.1. Система перемещения 20

6.2. Система измерения нагрузок 25

6.3. Спецификация установки 27

6.4. Разработка платы коммутации управляющей электроники 29

6.5. Изготовление экспериментального стенда 29

6.6. Интерфейс управления экспериментальным стендом 30

7. Проведение эксперимента 32

8. Создание конструкции на базе разработанной модели связи 38

9. Заключение 40

10. Список литературы 41

Приложение 1. Безопасность жизнедеятельности при разработке стенда, содержащего систему с электрифицированными узлами управления и рабочего места оператора ЭВМ 42

1. Введение

В последнее время большой интерес вызывают углеродные материалы, обладающие специфичными свойствами. Существует множество возможностей применения этих свойств на практике, например использование фуллеренов для улучшения свойств смазок, создание высокопрочных нитей с включением углеродных нанотрубок, различные композитные материалы, уже применяемые в авиа и автомобилестроении [1]. Для их изучения часто применяют методы компьютерного моделирования, с использованием механических моделей. В то же время интересна возможность проведения натурного эксперимента в данной области. Для этого требуется создание модели, которая бы позволила описать свойства микроструктур за счет проведения эксперимента на мезоуровне, что так же может применяться для демонстрации и визуализации различных явлений. Для создания подобной модели требуется разработка своего рода конструктора, со свойствами, близкими к свойствам углеродных микроструктур. Конструктор должен состоять из упругих элементов, имитирующих межатомные связи и соединительных элементов, имитирующих сами атомы углерода. В данной работе рассматривается возможность создания упругих соединительных элементов, близких по параметрам к межатомной связи в углеродных структурах. В качестве параметра выбрано отношение сдвиговой жесткости к продольной (1), известное из [2], [3].

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{1}{2} \tag{1}$$

Производилась проверка использования для данной цели гиперболоидных конструкций [3], которые применяются в архитектуре с конца 19 века. Эти конструкции впервые были применены В. Г. Шуховым в 1896 году при постройке башен для крупнейшей дореволюционной Всероссийской промышленной и художественной выставки в Нижнем Новгороде. Вторым подходом к выполнению данного соотношения являлось применение пружин в качестве упругих соединительных элементов. В работе рассмотрено применение витых пружин с прутком круглого, прямоугольного и трапецеидального сечений. Их свойства были рассчитаны путем моделирования методом конечных элементов и измерены на разработанном экспериментальном стенде.

Проектирование 3D моделей и расчет методом конечных элементов производились в САПР SolidWorks . Для изготовления прототипов применялась технология 3D печати методом послойного наплавления. В качестве оборудования применялись 3D принтер

Makerbot Replicator Dual, станок лазерной резки StepDir и лазерный гравер Epilog Mini. В качестве контроллера экспериментальной установки использовался Arduino совместимый контроллер на базе чипа ATmega 32U4 . Проектирование платы установки производилось в пакете Sprint-Layout. Для программирования контроллера экспериментального стенда использовалась среда Arduino IDE.

Целью данной работы является разработка и изготовление упругих элементов имитирующих межатомную связь в углеродных структурах для создания конструктора, который мог бы быть использован для проведения натурных экспериментов в области механики дискретных сред.

2. Стержневые модели связи

В [4] предложен подход, позволяющий связать дискретное описание взаимодействия частиц, моделирующих атомы решетки, и континуальное описание с помощью классической теории стержней. Для рассмотренных стержневых моделей получены выражения, описывающие продольную и сдвиговую жесткости стержней.

При использовании модели Бернулли-Эйлера в [4] получена продольная жесткость

$$C_1 = \frac{E\pi d^2}{4l}, \tag{2}$$

где C_1-продольная жесткость, E- модуль Юнга, d- диаметр стержня, l- длина стержня. Для сдвиговой жесткости в [4] получено

$$C_2 = \frac{3}{16}\frac{E\pi d^4}{l^3}, \tag{3}$$

где C_2- Сдвиговая жесткость. При этом подставив данные жесткости в (1) получим параметры стержня для выполнения требуемого соотношения.

$$d = \sqrt{\frac{2}{3}}l \tag{4}$$

Таким образом видим, что данная модель не подходит для использования в качестве требуемой модели связи, поскольку для выполнения соотношения (1) длина стержня должна быть сопоставима с диаметром, что не укладывается в рамки модели, где длина считается значительно больше диаметра.

Рассмотрим предложенную в [4] модель Тимошенко описания стержня, для нее получены жесткости

$$C_1 = \frac{E\pi d^2}{4l}\ ,\ C_2 = \frac{3}{16}\frac{E\pi^3 d^4}{16\pi^2 l^3 + 18d^2(1-\nu)l}\ , \tag{5}$$

где ν - коэффициент Пуассона материала стержня. Подставим в (1), в результате получим, что для выполнения соотношения необходимым условием является

$$\nu \leq -0.18, \tag{6}$$

то есть материал должен обладать отрицательным коэффициентом Пуассона. Такие материалы существуют в природе, но являются редкими, в связи с этим создание

конструкции на базе подобного стержня будет крайне сложным, поскольку требует применение специфичных материалов.

Так же в [4] рассмотрена модель толстого стержня. Для нее получено

$$C_1 = \frac{E\pi d^2}{4l}\frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}\ ,\ C_2 = \frac{E\pi d^2}{8l(1+\nu)}. \tag{7}$$

Подставив в (1), получим, что рассматриваемое соотношение жесткостей зависит только от параметров материала. Для выполнения (1) необходимо, чтобы коэффициент Пуассона $\nu = 0$. Таким образом, при создании данной модели связи, потребуется применение крайне специфичного материала.

Поскольку при применении стержневых моделей требуется использование специфичных материалов для создания механической модели связи, были рассмотрены другие модели.

3. Гиперболоидная модель связи

Как известно из [3] в качестве механической модели может быть использована гиперболоидная модель. Для нее удается добиться желаемого соотношения продольной и сдвиговой жесткости посредством задания определенной геометрии. Соотношение жесткостей имеет вид

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{1-\cos\gamma}{4}\frac{b^2}{a^2}, \tag{8}$$

где C_2 - сдвиговая жесткость, C_1 – продольная жесткость, γ - угол скручивания верхнего кольца гиперболоида относительно нижнего, b - высота гиперболоида, a - диаметр верхнего и нижнего колец. Таким образом, для выполнения соотношения (1) удобно принять (9).

$$\boldsymbol{\gamma = \frac{\pi}{2}} \tag{9}$$

Тогда получим соотношение между диаметром колец и высотой гиперболоида (10).

$$\boldsymbol{b = \sqrt{2}a} \tag{10}$$

Таким образом удается определить геометрию связи, позволяющую добиться требуемого соотношения. Основываясь на этом, была составлена трехмерная модель, которая представлена на рисунке 1.

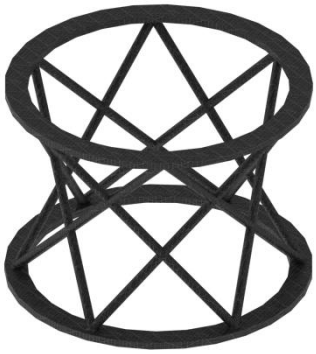


Рисунок 1. Трехмерная модель гиперболоидной связи

Данная модель была изготовлена методом FDM 3D печати [5], принципиальная схема показана на рисунке 2.

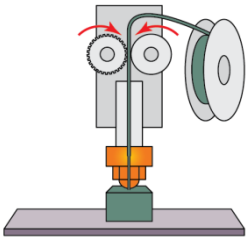


Рисунок 2 Принципиальная схема работы FDM 3D принтера

В результате был изготовлен образец гиперболоидной связи, показанный на рисунке 3.

Рисунок 3 Изготовленный образец гиперболоидной связи

Полученная модель обладает рядом недостатков. В конструкции присутствуют нависающие элементы, поэтому при изготовлении на 3D принтере требуются подпорки, требующие механического удаления после печати, что делает деталь сложной в изготовлении.

В целях оптимизации метода изготовления было решено проверить возможность создания оболочечной модели гиперболоида, обладающего схожей геометрией. В связи с этим была составлена трехмерная модель и изготовлен ряд образцов. Для возможности задания больших деформаций было решено использовать эластичные материалы, такие как Ninja-Flex и нейлон.

При использовании Ninja-Flex происходило изгибание прутка в механизме подачи, что показано на рисунке 4.

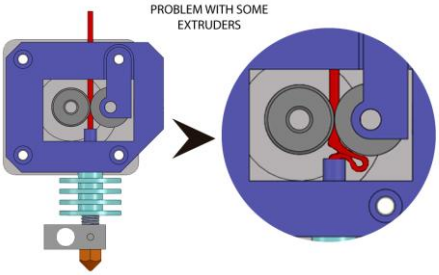


Рисунок 4 Замятие прутка в механизме подачи 3D принтера

Для устранения данной проблемы была произведена модернизация механизма подачи, показанная на рисунке 5.

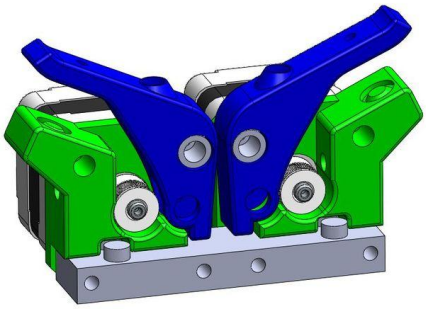


Рисунок 5 Модификация механизма подачи пластика для использования гибких материалов

При этом было необходимо снизить скорость печати на 70% по сравнению с обычными материалами, такими как ABS или PLA пластики. После подбора параметров печати удалось изготовить образцы из Ninja-Flex и нейлона (Рисунок 6).

Рисунок 6 Образец связи из Ninja-Flex

Не смотря на оптимизацию конструкции, ее серийное изготовление представляет проблему. На изготовление одной связи уходит около 30 минут, что не позволяет в короткие сроки изготовить достаточное количество элементов для создания сложных структур. Также при 3D печати деталь получается неоднородной в силу используемой технологии [5] и это может сказаться на повторяемости свойств. В связи с этим была рассмотрена возможность изготовления связи методом литья из двухкомпонентных материалов. Для этого была разработана форма для отливки (Рисунок 7).

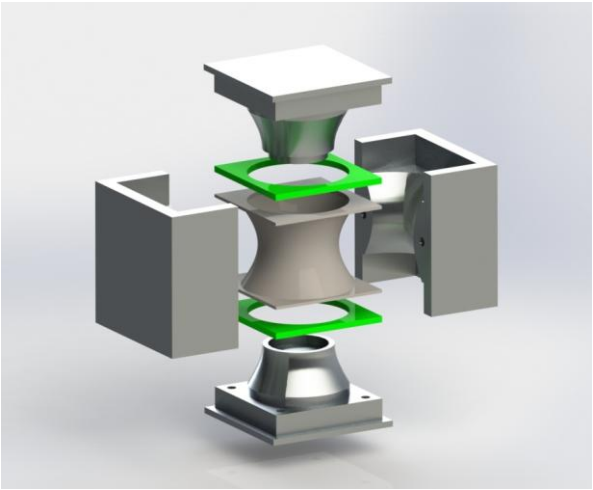


Рисунок 7 Форма для отливки гиперболоидной связи

Форма была так же напечатана на 3D принтере и в нее была произведена пробная отливка из двухкомпонентного силикона, результат показан на рисунке 8.

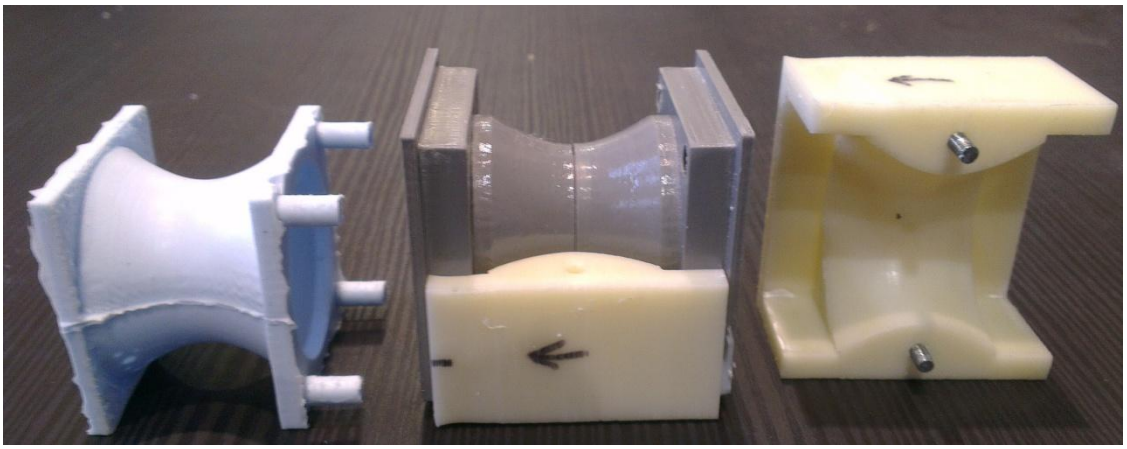


Рисунок 8 Пробная отливка из силикона

При испытаниях было выявлено, что при больших нагрузках происходит потеря устойчивости, что не позволяет использовать данный упругий элемент для случаев больших деформаций (Рисунок 9).

Рисунок 9 Потеря устойчивости образца при больших деформациях

Также данная модель обладает низкой добротностью, что накладывает ограничения на использование для моделирования колебательных процессов. В связи с этими недостатками было решено рассмотреть альтернативные модели связи.

4. Модель связи на базе стальных витых пружин

В связи с проблемами, возникающими при реализации гиперболоидной модели, был рассмотрен вариант использования стальных витых пружин для обеспечения заданного соотношения. На первый взгляд они обладают рядом преимуществ, поскольку изготовлены из однородного материала и обладают высокой добротностью. При этом заметно компактнее гиперболоидной модели (Рисунок 10).

Рисунок 10 Сравнение размеров гиперболоидной модели и модели на базе витых пружин

Для определения геометрических параметров пружины для выполнения заданного соотношения жесткостей в работе [6] были произведены расчеты продольной и сдвиговой жесткостей пружины в зависимости от ее геометрии. Для продольной жесткости получено выражение

$$C_1 = \frac{G r_w^4 h}{4R^3 L}, \tag{11}$$

где C_1 – продольная жесткость пружины, h – расстояние между витками пружины, L – длина пружины, R – радиус витья пружины, G – модуль сдвига, E – модуль Юнга, r_w – радиус прутка, из которого свита пружина. При этом данные результаты совпадают с формулой (12), приведенной в [7], используемой в расчетах деталей машин

$$C_1 = \frac{G d_D^4}{8 d_F^3 n}. \tag{12}$$

Так же в работе [6] получена аналогичная зависимость для сдвиговой жесткости, имеющая вид (7).

$$C_2 = \frac{E r_W^4 h}{4 R^3 L} \tag{13}$$

Проверим возможность получить требуемое соотношение жесткостей.

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{E}{G} = \frac{1}{2} \tag{14}$$

Запишем соотношение между модулем Юнга и модулем сдвига

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \tag{15}$$

где ν - коэффициент Пуассона используемого материала. Отсюда получим условие, при котором удастся удовлетворить соотношению (1).

$$\nu = -\frac{3}{4} \tag{16}$$

Из полученного условия видно, что для выполнения соотношения пружина должна быть изготовлена из материала с отрицательным коэффициентом Пуассона. Такие материалы встречаются в природе, минимальное значение достигается у лития $\nu = -0.54$, но этого не достаточно для данной задачи. И использование таких специфичных материалов делает задачу изготовления такой связи крайне сложной. При расчетах в работе [6] рассматривался чистый сдвиг, в то время как в реальности так же происходит изгиб. При этом изгибная жесткость пружины на порядок ниже сдвиговой и это оказывает заметное влияние на результат. В связи с этим было решено провести моделирование деформации пружины методом конечных элементов в пакете SolidWorks Simulation.

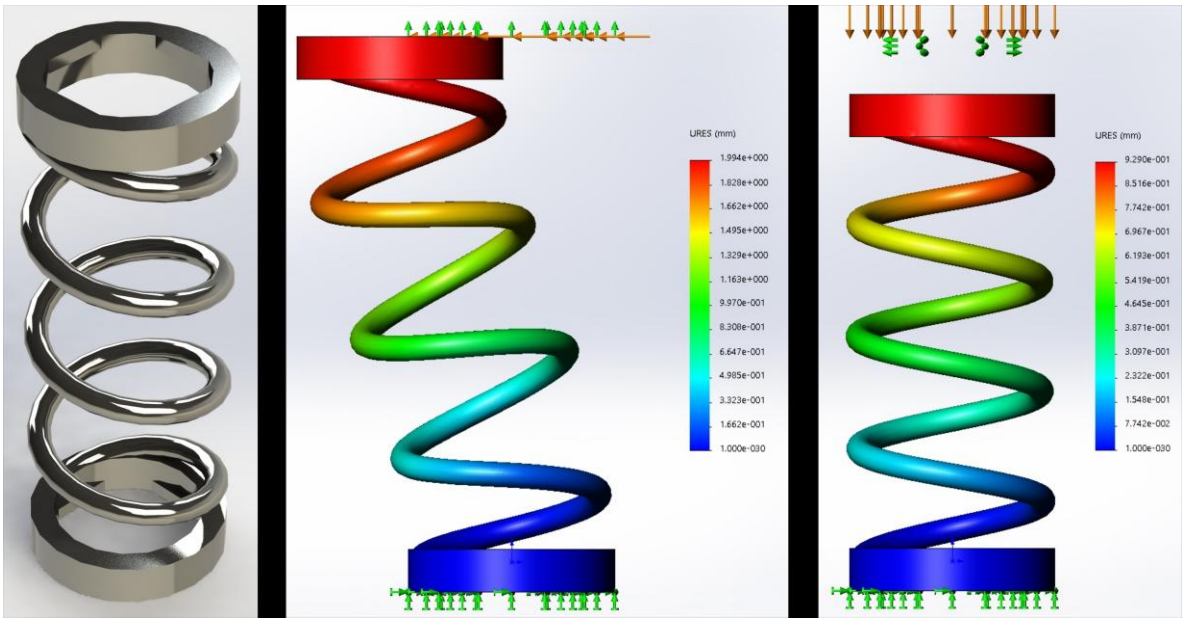


Рисунок 11 3D модель, деформированное состояние при сдвиге, деформированное состояние при сжатии

При расчетах рассматривалась пружина, свитая из прутка круглого сечения диаметром 1.75мм, из предположения, что ее можно изготовить из прутка, используемого для 3D принтеров в качестве расходного материала. Диаметр пружины составлял 13мм по образующей. Шаг витья составляет 9мм, а высота 33.25мм. На концах пружины установлены крепежные кольца. Чертеж показан на рисунке 12.

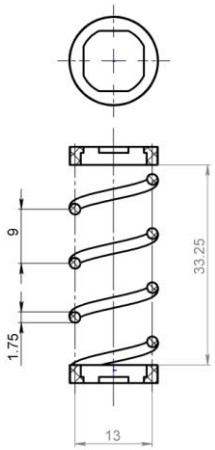


Рисунок 12 Чертеж исследуемой пружины

В качестве материала при расчетах брался ABS пластик, обладающий модулем Юнга, равным $2.0e^{12}$ Н/м^2, модулем сдвига $318.9e^{6}$ Н/м^2, коэффициентом Пуассона 0.394. Размер сетки составлял 0.5мм при использовании стандартной ячейки формы тетраэдра.

Для задачи о сжатии в качестве граничных условий были выбраны заделка на нижнем конце, ползуны вдоль крепления верхней части и нагрузка в 0.1Н, приложенная к плоскости верхнего крепления. Граничные условия при сжатии обозначены на рисунке 11 справа.

Для задачи о сдвиге на нижнем конце так же заделка, на верхнем ползун вдоль плоскости крепления и сдвиговая нагрузка в 0.1Н приложена к верхней горизонтальной поверхности. Граничные условия обозначены на рисунке 11 по центру.

После расчетов было получено, что при сжатии перемещения верхнего крепления составило 0.93мм, а при сдвиге 1.93мм, таким образом можно понять соотношение жесткостей

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{\Delta l_1 F_2}{F_1 \Delta l_2} = \frac{0.93 \cdot 0.1}{0.1 \cdot 1.93} = 0.48\ , \qquad (17)$$

где Δl_1- перемещения при сжатии, Δl_2 - перемещения при сдвиге, а F_1 и F_2 приложенные нагрузки соответственно. Как видно из (17) удалось получить соотношение, отклоняющееся от (1) на 3.6%, что достаточно близко. Таким образом, при использовании метода конечных элементов удалось учесть тот факт, что при сдвиге происходит изгиб витков пружины и это позволяет добиться требуемого соотношения с достаточной точностью.

5. Модель связи на базе пружины специального сечения

Поскольку изготовление пружины методом витья не представляется возможным, была рассмотрена возможность отливки. Для упрощения формы для отливки удобно брать сечение пружины в форме трапеции. В связи с этим было решено проверить влияние формы сечения прутка, из которого свита пружина, на соотношение продольной и сдвиговой жесткостей. Была составлена трехмерная модель такой пружины, которая показана на рисунке 13.

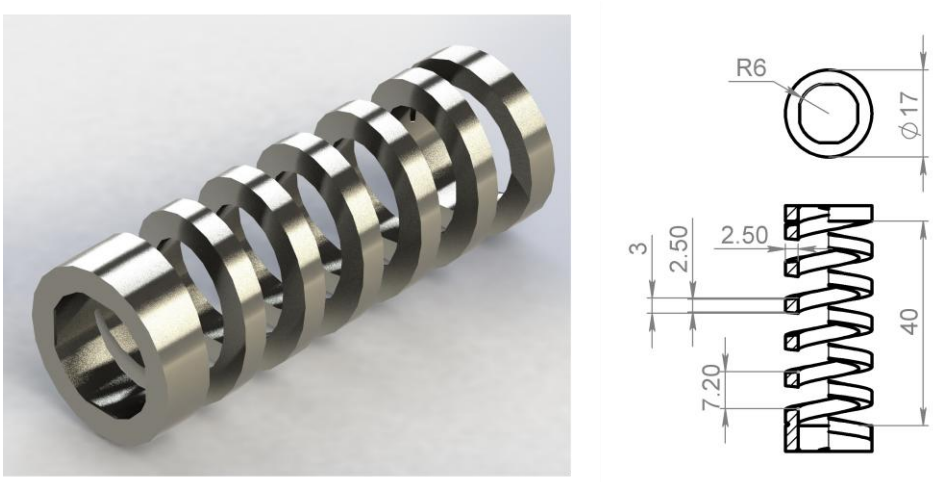


Рисунок 13 Модель пружины специального сечения

При этом ожидается, что соотношение между сторонами сечения прутка будет влиять на соотношение продольной и сдвиговой жесткостей пружины. В связи с этим проведен ряд численных экспериментов по определению влияния формы сечения на искомое соотношение.

Для простоты возьмем пруток прямоугольного сечения высоты **a** и ширины **b**. Рассмотрим пружину внутренним радиусом 10мм, шагом витья 12мм и высоты рабочей части 56мм. Для нее проведем расчет жесткостей посредством моделирования методом конечных элементов. Размер ячейки расчетной сетки составляет 0.5мм и форма элементов тетраэдр. Приложенные нагрузки составляют 0.1Н. Геометрия пружины показана на рисунке 14 слева. Граничные условия идентичны случаю с витой пружиной и обозначены на рисунке 14 по центру для сжатия и справа для сдвига.

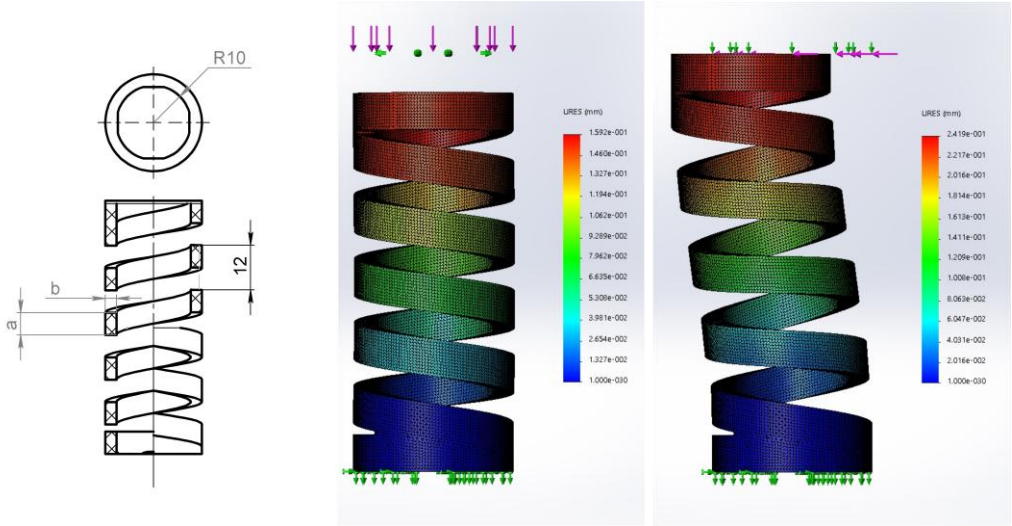


Рисунок 14 Геометрия пружины и деформированные состояния при сжатии и сдвиге

Для определения зависимости соотношения жесткостей от соотношения сторон сечения прутка был проведен ряд численных экспериментов. При этом ширина прутка **b** бралась постоянной, а изменялась его высота **a**. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 Результаты моделирования пружины специального сечения

№ эксперимента	a, мм	b, мм	C_2, Н/мм	C_1, Н/мм	C_2/C_1
1	6.0	3	0.41	0.63	0.65
2	5.5	3	0.35	0.55	0.63
3	4.0	3	0.29	0.47	0.62
4	4.5	3	0.23	0.39	0.59
5	4.0	3	0.18	0.32	0.56
6	3.5	3	0.135	0.245	0.55
7	3.0	3	0.095	0.181	0.52
8	2.5	3	0.061	0.123	0.50
9	2.0	3	0.0340	0.0748	0.45
10	1.5	3	0.0154	0.0380	0.40
11	1.25	3	0.0092	0.0244	0.38
12	1.0	3	0.0048	0.0141	0.34

На основании полученных данных были построены зависимости продольной и поперечной жесткостей от соотношения сторон прутка **b/a**, показанные на рисунке 15.

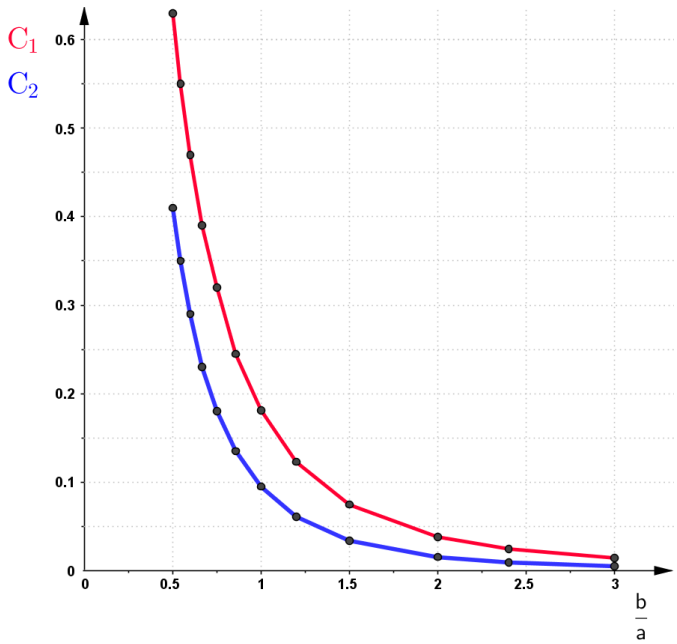


Рисунок 15 График зависимости жесткостей пружины от соотношения сторон прутка

Для определения необходимой геометрии прутка для выполнения требуемого соотношения удобно построить графики зависимости $\mathbf{C_1}$ и $\mathbf{2C_2}$ от **a**. Тогда точка их пересечения даст необходимое значение высоты прутка при заданной ширине.

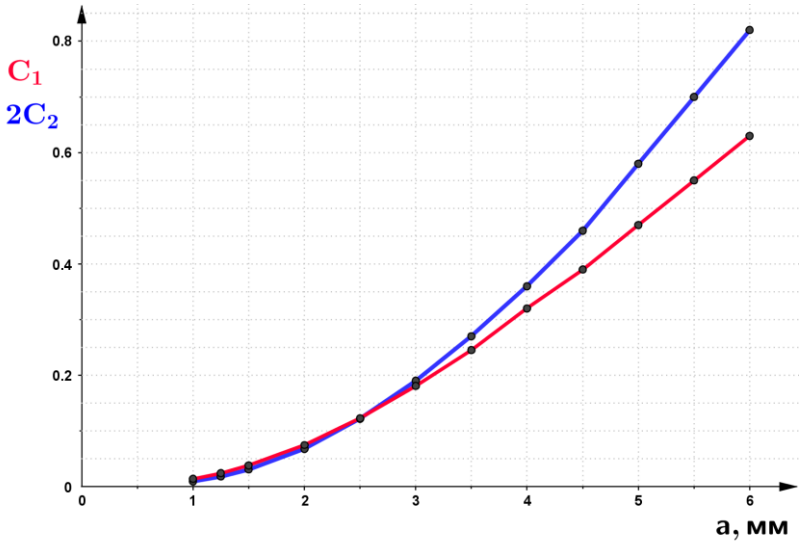


Рисунок 16 График зависимости C_1 и $2C_2$ от высоты прутка a

Из графика видно, что точка пересечения находится вблизи значения a=2.5мм. Такой метод можно использовать, когда требуется определить геометрию пружины. Был построен график зависимости соотношения жесткостей от соотношения сторон прутка **b/a**. График представлен на рисунке 17.

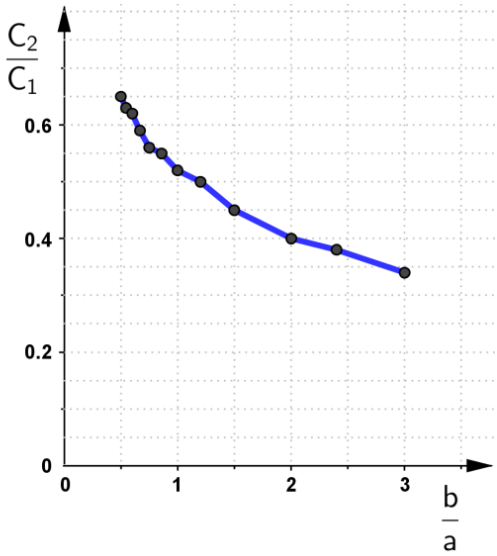


Рисунок 17 График зависимости соотношения жесткостей пружины от соотношения сторон прутка

Из графика видно, что интересующее нас соотношение заметно зависит от профиля прутка, из которого свита пружина.

Таким образом, задавая определенное соотношение сторон прутка можно влиять на соотношение продольной и поперечной жесткостей. Данный факт может быть использован для создания пружин с заданными параметрами. Такие пружины могут использоваться в качестве конструкционных элементов, когда требуется разрешать перемещения только вдоль одной оси, при высокой жесткости по другой. На таком принципе построены пружинные муфты, используемые в станкостроении для соединения вала двигателя с ходовым винтом. Данный способ соединения позволяет допускать некоторую несоосность двигателя и ходового винта.

6. Экспериментальная установка

6.1. Система перемещения

Для проверки полученных данных было решено разработать стенд для измерения продольной и поперечной жесткостей. При проектировании преследовалась цель создать устройство, которое позволит быстро и с высокой точностью проводить измерение жесткостей и может быть переведено из режима сжатия в режим проведения сдвига при минимальной модификации самой установки. Принцип работы построен на создании заданной деформации измеряемого объекта и последующем измерении силы реакции опоры.

Для задания деформации объекта требуется создать систему точного перемещения по одной оси. Для этого используется ходовой винт. При создании станков используются разные типы ходовых винтов. По классам их можно разделить на ШВП (шарико-винтовая передача), трапецеидальные винты и метрические винты. [8] Типы ходовых винтов представлены на рисунке 18.

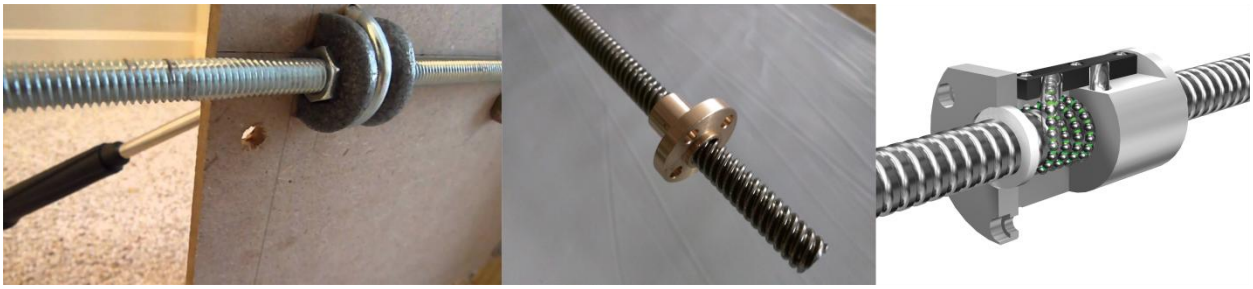


Рисунок 18 Слева на право: резьбовая шпилька, трапецеидальный винт, ШВП

Самой низкой точностью обладают метрические винты (резьбовые шпильки), ввиду качества их изготовления, поскольку их основное назначение заключается в соединении деталей, а не использовании в системах линейного перемещения. Так же резьба имеет треугольный профиль, что создает большое трение в передаче, но в случае использования по прямому назначению препятствует раскручиванию гайки. Но за счет своей низкой стоимости они широко используются при создании самодельных станков, где не возникает больших нагрузок и точность их изготовления достаточна для данных целей.

Следующим вариантом являются трапецеидальные ходовые винты. От шпилек они отличаются профилем резьбы (трапеция) и качеством изготовления, поскольку применяются для систем линейного перемещения в станках и позволяют выдерживать

большие нагрузки. Они обладают недостатком в виде люфта, поэтому используются, когда точное перемещение необходимо только в одном направлении (вперед или назад) или в предварительно нагруженных в одном направлении системах, но существуют модификации ходовых гаек, в которые встроена распирающая пружина, позволяющая убрать зазор в резьбе. Так же при вращении создается относительно большое сопротивление для двигателя, что вызвано трением скольжения в резьбе.

В современных промышленных станках для перемещения используются ШВП, которые обладают рядом преимуществ, по сравнению с ранее описанными системами [9]. Во первых, внутри ходовой гайки встроены циркулирующие шарики, поэтому гайка является своего рода шариковым подшипником. Это позволяет снизить нагрузки на двигатель при перемещении сильно нагруженных осей. При этом данные винты выполняются с высокой точностью и проходят закалку, что позволяет значительно увеличить их срок службы и позволяет им выдерживать большие нагрузки.

Ввиду своей относительно низкой стоимости, удобства в применении и при этом достаточно высоком качестве изготовления, для использования в стенде был выбран трапецеидальный винт стандарта TR8 диаметром 8мм и с шагом резьбы 2мм. За счет малого шага резьбы удается добиться высокой точности перемещения.

Для вращения ходового вала используется биполярный шаговый двигатель типоразмера Nema 17, обладающий максимальным крутящим моментом в 4 кг·см и угловым перемещением 1.8°/шаг (200 шагов на оборот). Использование шагового двигателя обосновано его возможностью вращения на заданный угол без использования энкодера для определения положения вала.

Шаговый электродвигатель — это синхронный бесколлекторный электродвигатель с несколькими обмотками, в котором ток, подаваемый в одну из обмоток статора, вызывает фиксацию ротора [10]. Последовательная активация обмоток двигателя вызывает дискретные угловые перемещения (шаги) ротора, как показано на рисунке 19.

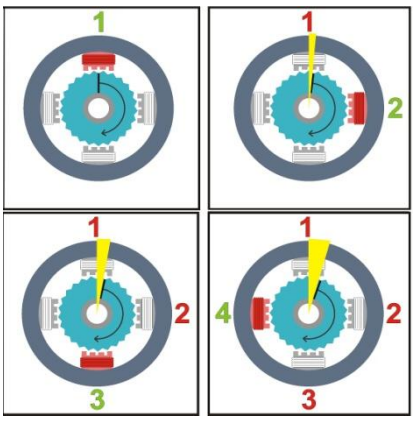


Рисунок 19 Принцип работы шагового двигателя

Шаговые двигатели, имеют высокую надежность и большой срок службы, что позволяет использовать их в индустриальных применениях. При увеличении скорости двигателя, уменьшается вращающийся момент. Шаговые двигатели создают больше вибрации, чем другие типы двигателей, поскольку дискретный шаг имеет тенденцию резко перемещать ротор от одного положения к другому. За счет этого шаговый двигатель во время работы создает шум. Вибрация может быть очень сильная, что может привести к снижению крутящего момента. Это связано с тем, что вал находится в магнитном поле и ведет себя как пружина. Шаговые двигатели работают без обратной связи, то есть не используют энкодеры для определения положения [11].

Шаговые двигатели получили широкое распространение в станкостроении и системах автоматизации. Главным преимуществом данных двигателей является точность. При подаче потенциалов на обмотки двигатель повернется строго на определенный угол, при этом они заметно дешевле сервоприводов. Также они обладают достаточно высоким крутящим моментом [12].

Для управления шаговым двигателем применяется специальный драйвер A4988 [13], который подает напряжение на обмотки двигателя. Управление драйвером осуществляется через STEP, DIR контакты. При подаче сигнала на STEP разъем двигатель осуществляет один шаг, при подаче напряжения на DIR разъем меняется направление вращения ротора. Так же на драйвере реализован режим микрошагов, при использовании которого можно уменьшить дискретность вращения ротора. Управление режимами микрошагов осуществляется посредством подачи напряжения на контакты MS1, MS2, MS3. При подаче на все контакты логической единицы (5В) применяется режим микрошага 1/16. В таком случае дискретизация составляет 3200 шагов на оборот, вместо 200, при использовании полного шага. Таким образом, удается увеличить точность

перемещений и снизить вибрацию двигателя. Схема подключения драйвера показана на рисунке 20.

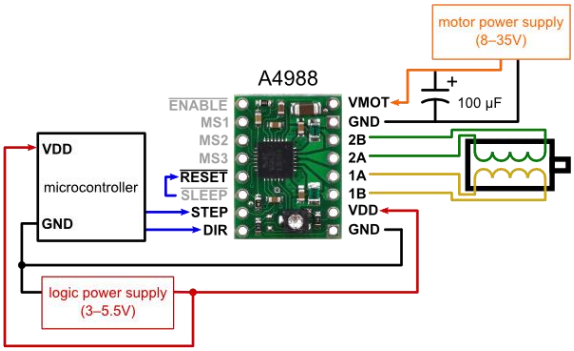


Рисунок 20 Схема подключения драйвера ШД A4988

Для проведения эксперимента требуется знать перемещение с высокой точностью не в шагах двигателя, а в миллиметрах, поэтому производится калибровка системы. Для пересчета шагов, которые делает шаговый двигатель, в миллиметры используется пропорциональный параметр Step/mm (шагов на миллиметр) [10]. Он обозначает количество шагов, которые должен совершить шаговый двигатель для перемещения системы на один миллиметр и рассчитывается по формуле

$$Step / mm = \frac{N}{P}\frac{1}{M}, \tag{18}$$

где N – количество полных шагов на оборот двигателя (200 шагов), P – шаг резьбы ходового винта в миллиметрах, M – режим микрошагов используемого драйвера. Таким образом, в случае данной установки, для перемещения на один миллиметр двигателю потребуется сделать 1600 шагов, что позволяет перемещать нагружающую пластину с разрешением 0.625 микрон. Этой точности с избытком хватает для проведения подобных экспериментов.

Для проведения качественных измерений конструкция должна обладать высокой жесткостью по сравнению с измеряемым объектом. Чтобы обеспечить прямолинейное перемещение требуются направляющие, по которым будет перемещаться нагружающая пластина. При выборе направляющих рассматривалось несколько вариантов: стальные шлифованные направляющие круглого сечения, направляющие круглого сечения с крепежной планкой серии SBR и рельсовые направляющие серии MGN. Варианты представлены на рисунке 21.

Рисунок 21 Типы направляющих для систем линейного перемещения

Стальные направляющие круглого сечения широко применяются при создании систем линейного перемещения средней точности, поскольку обладают низкой стоимостью и простой в установке. По сравнению с ними направляющие серии SBR оснащены крепежной планкой, что позволяет устанавливать их на плоские поверхности, так же в каретках реализован регулируемый преднатяг, что позволяет при правильной калибровке убрать люфты и добиться высокой точности. Направляющие этой серии часто применяются в малых фрезерных станках, где возникают большие нагрузки на оси и требуется высокая точность. В то же время в промышленных станках, где требуется высокая надежность и качество изготовления компонентов, применяются рельсовые направляющие. MGN серия применяется в слабонагруженных узлах, где требуется высокая точность перемещений, поэтому для подобных рельс существует несколько исполнений кареток: взаимозаменяемые (без преднатяга) и невзаимозаменяемые (с преднатягом). Взаимозаменяемые каретки обладают меньшим классом точности, но при этом могут быть легко заменены на новые без замены самой рельсы. С другой стороны, невзаимозаменяемые индивидуально подгоняются под рельсу и обладают большей точностью и выдерживают большие нагрузки.

При создании установки были выбраны стальные полированные направляющие круглого сечения диаметром 12 мм совместно с фланцевыми линейными подшипниками LMFL12UU. Данные направляющие обладают достаточной точностью для данной задачи, поскольку в системе не возникает высоких нагрузок и обеспечивают строго прямое перемещение нагружающей пластины.

Таким образом проведен обзор существующих решений по созданию систем линейного перемещения и была скомпонована требуемая система.

6.2. Система измерения нагрузок

Для определения сил реакции, возникающих при деформации образца, требуется устройство, позволяющее с высокой точностью измерять усилие давления образца на основание. Для этого было решено применить датчик давления. Для качественного определения нагрузок часто применяются резистивные датчики давления, представляющие из себя тензометрический датчик, представленный на рисунке 22.

Рисунок 22 Тензорезистивный датчик нагрузки

Данный тензорезистивный датчик изготовлен из тонкой пленки, на которую нанесены дорожки методом напыления. Таким образом, при деформации датчика, происходит растяжение дорожек, соответственно уменьшается их сечение и сопротивление датчика возрастает. Для проводимых измерений не достаточно качественного определения нагрузок, требуется их точное измерение. Как было замечено в [6] зависимость сопротивления датчика от нагрузки не линейна, что требует экспериментальное построение кривой зависимости сопротивления от прикладываемой нагрузки и в дальнейшем использование ее для определения сил реакции. В связи со сложностью применения данного тензорезистивного датчика было решено воспользоваться комбинированным датчиком нагрузки. Подобные датчики применяются в электронных весах и позволяют измерять нагрузку с высокой точностью. За счет специальной формы корпуса показания датчика линейно зависят от нагрузки, что значительно упрощает процесс калибровки. Датчик состоит из алюминиевого бруска со специальным вырезом, на который наклеены четыре тензорезистора. Таким образом, при приложении нагрузки два терзорезистора работают на растяжение, а другие на сжатие, при этом применяются разные тензорезисторы. Для измерения сжатия дорожки шире и короче, для растяжения тоньше и длиннее. Принципиальная схема показана на рисунке 23.

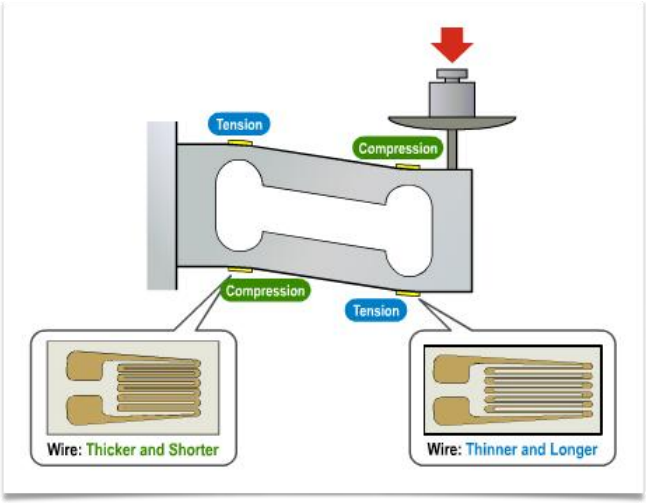


Рисунок 23 Принципиальная схема работы датчика нагрузки

Большинство подобных датчиков работают одинаково, различаясь лишь размером и диапазоном измеряемых нагрузок. Поскольку изменение сопротивления достаточно мало, применяется усилитель, такой как HX711. Для увеличения сигнала используется мостовой способ подключения тензорезисторов, показанный на рисунке 24.

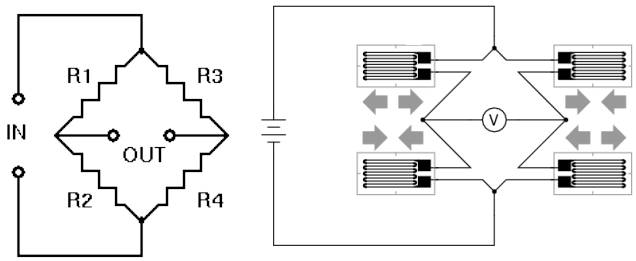


Рисунок 24 Мостовая схема подключения датчика давления

В результате использования такого способа подключения мы измеряем не изменение сопротивления отдельного тензорезистора, а величину относительного изменения сопротивлений тензодатчиков, работающих на сжатие и на растяжение, тогда удается получить достаточный сигнал для усилителя. В качестве усилителя применяется HX711, схема подключения которого показана на рисунке 25.

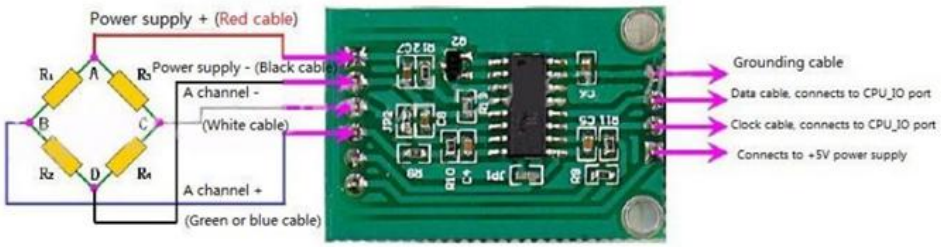


Рисунок 25 Схема подключения датчика к усилителю HX711

Передача данных от усилителя к микроконтроллеру осуществляется через разъемы CLOCK и DATA. Для считывания используется специальная библиотека, позволяющая удобно взаимодействовать с подобной конфигурацией.

6.3. Спецификация установки

Был спроектирован стенд для измерения продольной и сдвиговой жесткостей. Внутри корпуса расположены направляющие, по которым перемещается нагружающая пластина, на которой установлен уголок с конусом и специальным крепежным разъемом. Конус применяется для установки образца при проведении сжатия, а в разъем вставляется крепление образца для проведения сдвига. Напротив пластины установлен датчик давления, описанный ранее, на котором закреплен ответный уголок. Шаговый двигатель соединяется с ходовым винтом через гибкую спиральную муфту, а на другом конце винт закреплен в подшипнике. Трехмерная модель испытательного стенда представлена на рисунке 26

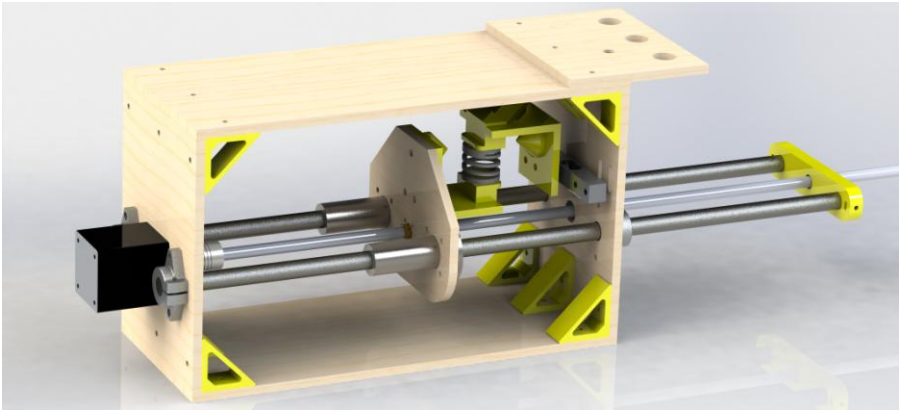
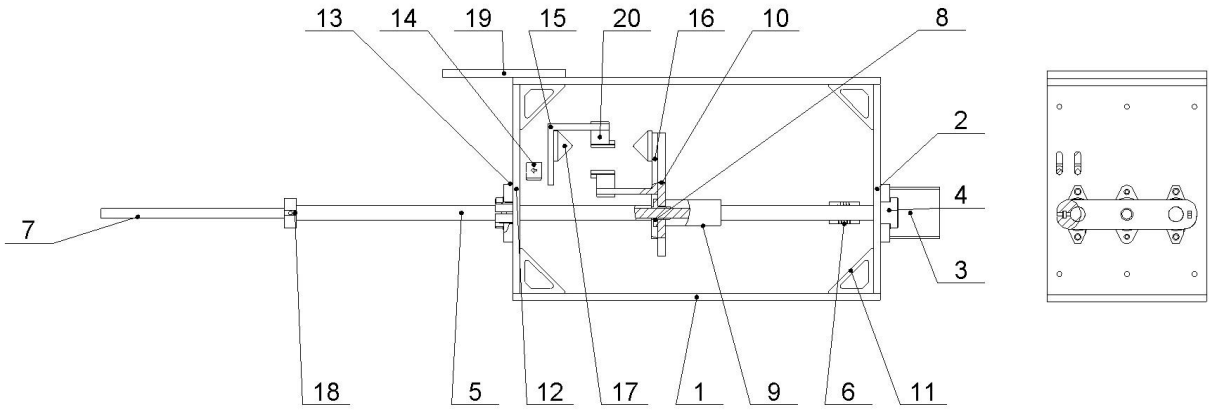


Рисунок 26 Трехмерная модель испытательного стенда

Направляющие закреплены в обжимных наконечниках, и предусмотрены зазоры для точного выставления их параллельно друг другу. Датчик крепится к пазам на корпусе, что позволяет измерять на сдвиг образцы различной длины. Разъем для установки креплений образцов выполнен в виде паза с направляющей, что позволяет быстро менять крепления без разбора установки. Схема измерительной установки с указанием составляющих элементов показана на рисунке 27.



ПОЗИЦИЯ	ОБОЗНАЧЕНИЕ	К-ВО
1	Основание	2
2	Крепление двигателя	1
3	Шаговый двигатель Nema 17	1
4	Опора SHF12	4
5	Направляющая 12мм	2
6	Переходная муфта 5-8мм	1
7	Ходовой винт TR8	1
8	Гайка TR8	1
9	Линейный подшипник LMF12UU	2
10	Пресс	1
11	Уголок	12
12	Упорная пластина	1
13	Корпусной подшипник KFL08	1
14	Датчик давления 5KG	1
15	Упорный уголок	1
16	Нагружающий уголок	1
17	Упорный конус	2
18	Крепление винта	1
19	Панел управления	1
20	Крепление образца	2

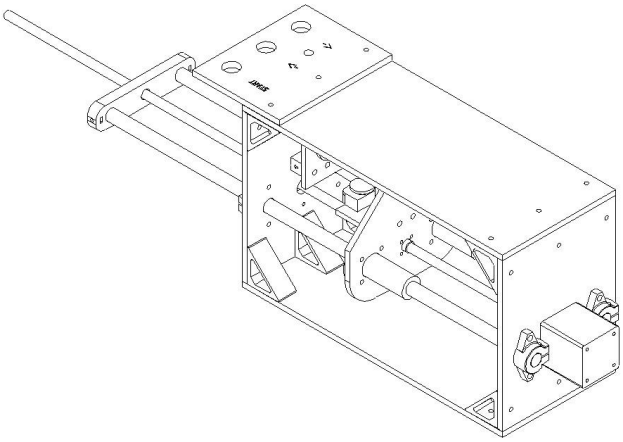


Рисунок 27 Спецификация измерительной установки

Разработанный стенд позволяет выполнять как продольное нагружение образца, так и проводить сдвиг с повторяемостью до 10 микрометров и нагрузкой до 200Н. При этом установленный датчик способен измерять возникающие нагрузки до 50Н с

точностью до 0.005Н. Таким образом обладает достаточной точностью для измерения продольной и сдвиговой жесткостей образцов.

6.4. Разработка платы коммутации управляющей электроники

Для повышения надежности разрабатываемого экспериментального стенда и удобства его сборки была разработана плата, осуществляющая коммутирование контроллера, драйвера шагового двигателя, усилителя и кнопок управления. Чертеж платы представлен на рисунке 28.

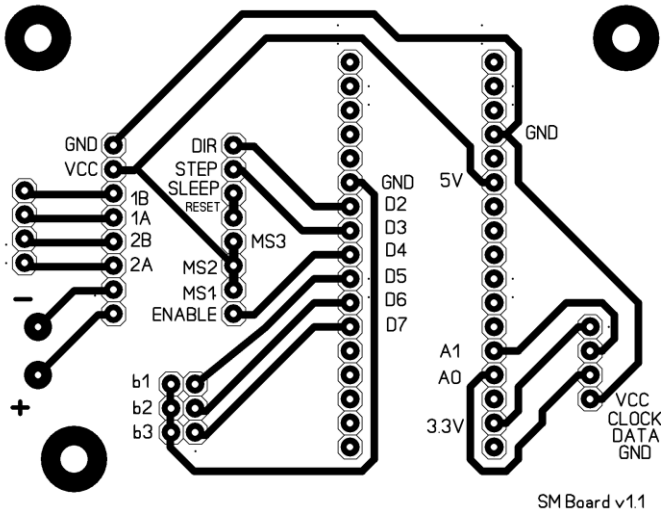


Рисунок 28 Схема платы коммутации

Плата рассчитана на управление одним шаговым двигателем в постоянном режиме микрошагов 1/16 с возможностью отключения двигателя. К ней можно подключить один усилитель, к которому подключается датчик давления. Предусмотрена возможность подключения трех кнопок для осуществления ручного управления установкой.

6.5. Изготовление экспериментального стенда

Корпус стенда изготовлен из фанеры толщиной 6мм на станке лазерной резки. Соединительные элементы корпуса были напечатаны на 3D принтере из ABS пластика. После сборки корпуса в него были установлены направляющие и нагружающая пластина. Затем был установлен двигатель и ходовой винт, после чего была проведена калибровка осей, для обеспечения их параллельности и предотвращения изгиба ходового винта. После

этого был установлен датчик давления с крепежным уголком. Для питания установки использован блок питания 12В 120Вт, чего достаточно для питания всей электроники. Плата управления и блок питания размещены на верхней поверхности установки. Для крепления кнопок управления к конструкции добавлена панель управления с маркировкой назначения кнопок. В собранном виде установка показана на рисунке 29.

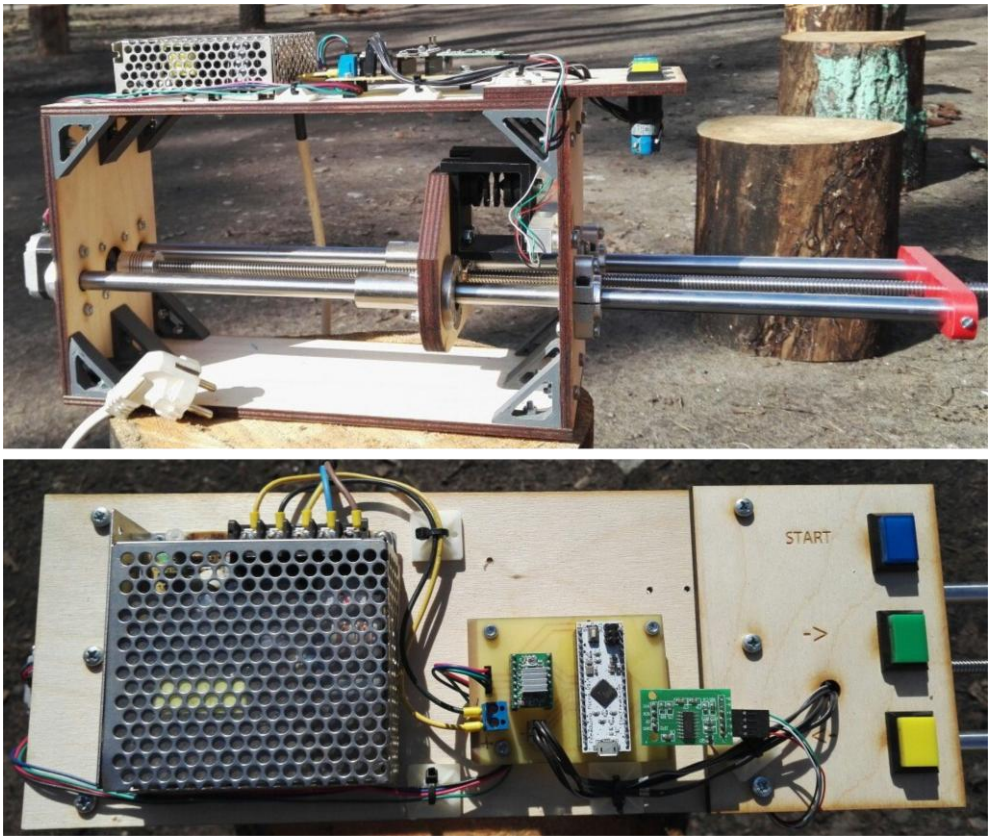


Рисунок 29 Изготовленный экспериментальный стенд

Плата коммутации была изготовлена путем нанесения краски на фольгированный текстолит, затем необходимые участки были очищены от краски путем гравировки на лазерном станке. После этого медь с этих участков была удалена путем травления в растворе хлорного железа.

6.6. Интерфейс управления экспериментальным стендом

На панели управления установкой расположены три кнопки. Две для перемещения нагружающей пластины вперед и назад и кнопка старта измерения. Для контроллера была написана программа, в которой реализовано перемещение на заданное расстояние в

миллиметрах с заданной скоростью мм/с. Когда не проводится измерение, двигатель отключен, что дает возможность перемещения нагружающей пластины вручную для точной установки образца. При нажатии кнопки запуска процесса измерения нагружающая пластина начинает перемещаться в сторону датчика с заданным шагом. При этом в точках остановки производится считывание силы реакции. Данные о текущей координате и значение жесткости отправляется на компьютер через последовательный COM порт.

Для получения точных данных проводилась калибровка установки, рассчитано точное количество шагов шагового двигателя, необходимое для перемещения на один миллиметр и измерено фактическое перемещение, расхождение составило 0.1мм на 100мм перемещения. Таким образом погрешность перемещения составляет 0.1%. Для калибровки датчика давления установка была установлена вертикально. На датчик устанавливался объект известной массы и считывались показания. Таким образом был точно вычислен коэффициент пропорциональности. При проведении многих измерений одного и того же объекта расхождение составляло до 0.5г. Таким образом погрешность датчика составляет 0.005Н.

Для обработки полученных данных была написана программа на языке Processing, которая считывает данные с COM порта и строит на основании них график зависимости измеряемой жесткости от деформации образца.

7. Проведение эксперимента

Для проверки результатов, полученных методом конечных элементов, был проведен ряд экспериментов с использованием разработанного измерительного стенда. Во время испытания происходит постепенная деформация образца и измеряются силы реакции. На основании получаемых данных по формуле

$$C = \frac{F_r}{\Delta x} \tag{19}$$

можно получить коэффициент жесткости C измеряемого образца. Где F_r – возникающая сила реакции в Ньютонах, а Δx – перемещение нагружающей пластины в миллиметрах.

В качестве теста проводилось измерение стальной пружины из прутка круглого сечения диаметром 0.7мм. Диаметр витья составляет 8мм, шаг витья 2.5мм, длина пружины 35мм. В результате измерения получена жесткость C_1=0.36 Н/мм. График зависимости жесткости от перемещения нагружающей пластины представлен на рисунке 30.

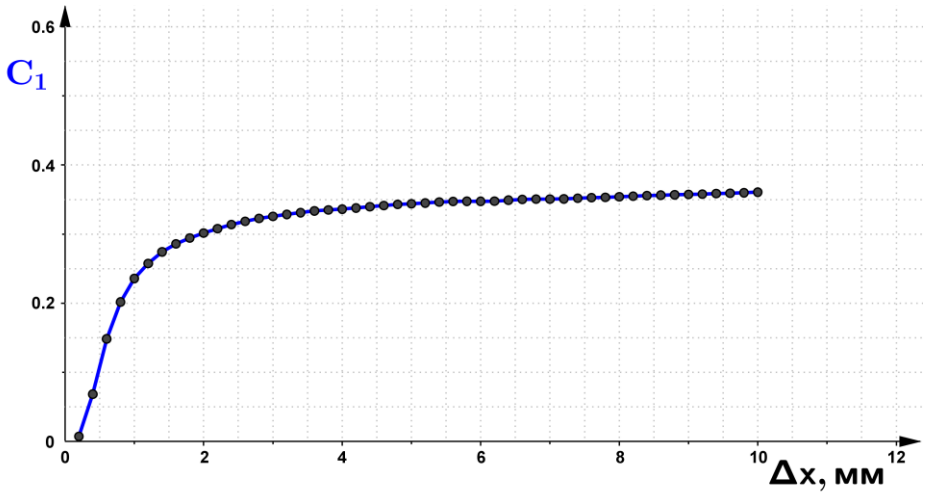


Рисунок 30 Экспериментальные данные зависимости продольной жесткости стальной витой пружины от перемещения нагружающей пластины

Из графика видно, что коэффициент жесткости является не постоянным. Это ярко выражено при малых деформациях до 2мм для данной пружины. При росте деформации наблюдается линейный рост коэффициента жесткости.

Для проверки получаемых данных проведем расчет жесткости по формуле (11). Параметры материала возьмем для рессорно-пружинной стали 65Г ГОСТ 14959-79. Модуль сдвига для данной стали G=84000МПа. Подставим в формулу имеющиеся данные

$$C_1 = \frac{G r_w^4 h}{4R^3\,L} = \frac{84\cdot10^9\cdot\left(0.35\cdot10^{-3}\right)^4\cdot2.5\cdot10^{-3}}{4\cdot(4\cdot10^{-3})^3\cdot35\cdot10^{-3}} = 352\ \text{Н/м} = 0.352\text{Н/мм} \qquad (20)$$

Отклонение экспериментальных данных от аналитических составляет 2.3%, что говорит о достаточно точном проведении эксперимента. Проведем сравнение полученных данных с расчетом проведенным методом конечных элементов. Размер ячейки при расчетах составлял 0.2мм, нагрузка 0.1Н. Деформированное состояние пружины показано на рисунке 31.

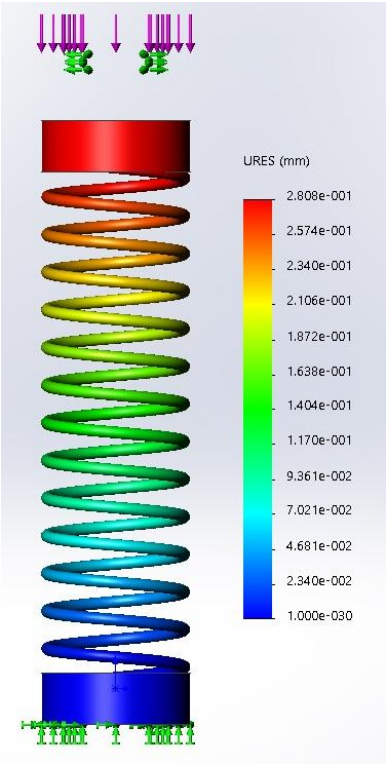


Рисунок 31 Деформированное состояние при сжатии стальной витой пружины при расчете методом конечных элементов

При расчете получено значение жесткости C_1=0.356 Н/мм, отклонение от экспериментальных данных составляет 1.1%, что позволяет использовать метод конечных элементов для данных расчетов.

Проведем аналогичную проверку измерений сдвиговой жесткости. Сначала проведем расчет методом конечных элементов, при размере ячейки 0.2мм и сдвиговой нагрузке 0.1Н. На рисунке 32 показано деформированное состояние при сдвиге.

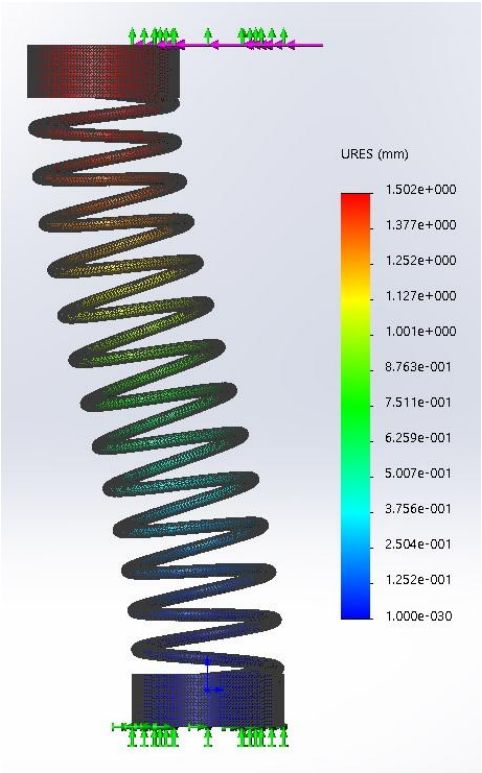


Рисунок 32 Деформированное состояние при сдвиге стальной витой пружины при расчете методом конечных элементов

В результате расчета получено значение сдвиговой жесткости C_2=0.067 Н/мм. Затем проведем эксперимент. На рисунке 33 показан график зависимости сдвиговой жесткости C_2 от перемещения нагружающей пластины.

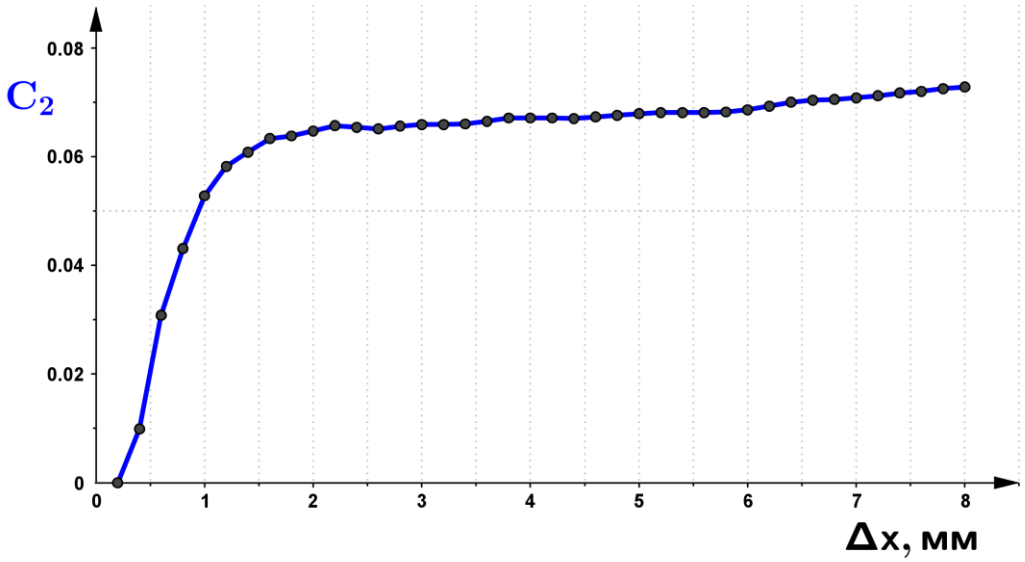


Рисунок 33 Экспериментальные данные зависимости сдвиговой жесткости стальной витой пружины от перемещения нагружающей пластины

При этом в результате эксперимента было получено значении сдвиговой жесткости C_2=0.073 Н/мм. Отклонение экспериментальных данных от полученных методом конечных элементов составляет 9%. Как видно на графике, присутствуют некоторые колебания, они вызваны недостаточной жесткостью закрепления образца, при нагружении образца происходит небольшое проскальзывание пружины в зоне закрепления. Этим же объясняется рост отклонения результатов.

В результате для исследованной стальной витой пружины получены значения продольной и сдвиговой жесткостей. Их соотношение составляет C_2/C_1=0.20, что не соответствует требуемому соотношению, но говорит о возможности получения сдвиговой жесткости меньше продольной, даже в пять раз.

Теперь рассмотрим пружину специального сечения. Чертеж представлен на рисунке 34.

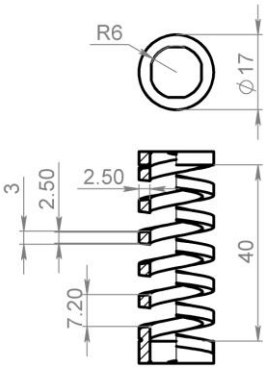


Рисунок 34 Чертеж исследуемой пружины специального сечения

В качестве сечения прутка была взята трапеция, поскольку при изготовлении подобных пружин предполагается отливка из пластика. Если брать пруток прямоугольного сечения, то при отливке будет невозможно извлечь деталь из заливной формы. Проведем расчет данной пружины методом конечных элементов. При расчете в качестве материала берется ABS пластик, размер сетки 0.5мм, прикладываемая нагрузка 0.1Н. Результат расчета представлен на рисунке 35.

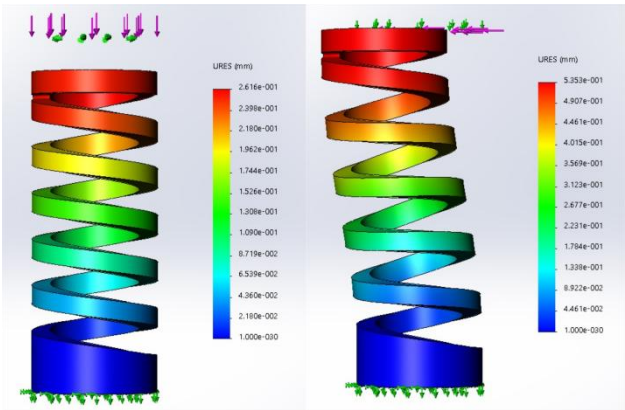


Рисунок 35 Результат расчета исследуемой пружины специального сечения методом конечных элементов

В результате расчета были получены значения продольной и сдвиговой жесткостей для данной пружины. Продольная жесткость C_1=0.38 Н/мм, а сдвиговая C_2=0.19 Н/мм. Таким образом, интересуемое соотношение для данной пружины составляет C_2/C_1=0.50, что соответствует требуемому. Проведем исследование реального образца. Образец был изготовлен из ABS пластика путем 3D печати методом послойного наплавления. При измерении продольная жесткость составила C_1=0.35 Н/мм, а сдвиговая C_2=0.17 Н/мм. В

результате для продольной жесткости отклонение от результата, полученного при моделировании составило 8.6%, а для сдвиговой 8.7%. В результате интересующее соотношение равно C_2/C_1=0.49 и отклоняется от желаемого на 1%. Разница объясняется неоднородностью напечатанного образца в виду используемой технологии и неточностью его геометрии, поскольку при печати подобных деталей наносится дополнительный материал поддержек, препятствующий провисанию наклонных элементов. Некоторое количество подпирающего материала остается на образце и это сказывается на экспериментально получаемых данных.

8. Создание конструкции на базе разработанной модели связи

Поскольку была разработана модель связи соответствующая требуемому соотношению (1) интересно создание на базе нее структуры. Например, для изучения таких структур как фуллерены [14] и графен [15]. Для этого требуется разработать соединительный элемент для связей, имитирующий атом углерода. При этом требуется простота сборки структур из данных элементов. На способ закрепления накладывается требования запрещения поворота связи относительно атома и закрепление должно быть надежным.

При разработке крепления было решено использовать шестигранный паз на связи и соответствующий выступ на соединительном элементе. При этом соединение происходит с небольшим преднатягом, что позволяет надежно соединить элементы конструкции. Была составлена трехмерная модель данного крепления. Модель структуры из шести связей показана на рисунке 36.

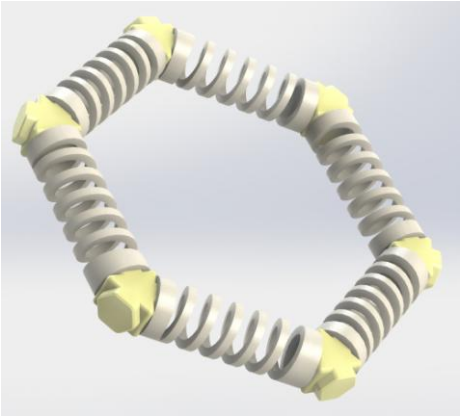


Рисунок 36 Модель структуры из шести связей

Для изготовления упругих элементов была разработана форма для отливки из двухкомпонентного пластика. Форма состоит из шести элементов. Элементы скрепляются болтовым соединением. Предусмотрено два отверстия, одно для заливки пластика, второе для выхода воздуха из формы. Чтобы изготовить долговечную форму ее следует фрезеровать из алюминия, но ввиду сложности данной операции было решено напечатать ее на 3d принтере. Модель формы для отливки показана на рисунке 37.

Рисунок 37 Трехмерная модель формы для отливки упругого элемента

Форма была изготовлена и проведена пробная отливка связи. В результате был получен образец из двухкомпонентного пластика на базе полиуретана. Данный пластик обладает низкой добротностью, поэтому для исследования колебательных процессов полученная связь не подходит. Результат отливки показан на рисунке 38.

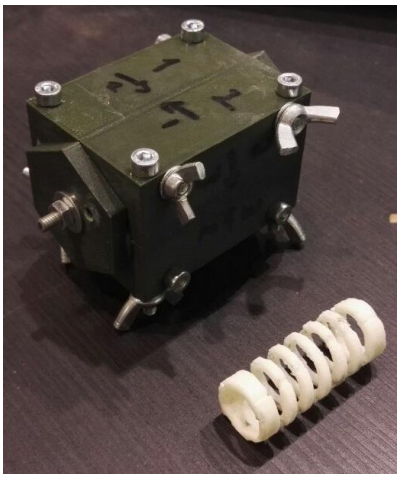


Рисунок 38 Результат пробной отливки в разработанную форму

После полимеризации пластика не возникло проблем с извлечением детали из формы. В результате было показано, что разработанная форма может быть использована для изготовления данной модели связи. При должном изготовлении формы из металла, будет возможно производить отливку из ABS пластика, который обладает высокой надежностью и долговечностью, при этом в данной работе расчеты проводились как раз для этого материала.

9. Заключение

В результате проделанной работы была разработана механическая модель межатомной связи, соответствующая соотношению (1). Её параметры были рассчитаны посредством моделирования методом конечных элементов. Для проверки реальных свойств разработанной модели был разработан и изготовлен экспериментальный стенд для измерения продольной и поперечной жесткостей. При измерении отклонение жесткостей от расчетных составило до 8.7%. При этом отклонение интересующего соотношения от требуемого составило 1%, что позволяет сказать, что в данном случае влияние на соотношение геометрии связи больше, чем влияние материала, из которого она изготовлена. Таким образом при изготовлении данной связи смягчаются требования к используемому материалу, но требуется относительно высокое качество формы для литья. Формы для отливки изготавливаются с очень высокой точностью, поэтому данную модель можно изготавливать серийно. Были разработаны крепления, позволяющие создавать модели углеродных нано-структур для проведения натурных экспериментов.

Была разработана форма для отливки данной связи, состоящая из шести элементов. Форма была изготовлена посредством 3D печати методом послойного наплавления и была проведена пробная отливка. В результате было показано, что разработанная форма при должном изготовлении может быть использована при серийном изготовлении.

В данной работе проведен ряд исследований влияния геометрии связи на соотношение жесткостей (1), в результате получены данные, позволяющие создавать упругие конструкционные элементы с заданной пропорцией продольной и поперечной жесткостей. Такие элементы могу быть применены в качестве опор, когда требуется обеспечить податливость по одной оси и высокую жесткость по другой без применения дополнительных конструкционных элементов.

10. Список литературы

1. **Hugh O. Pierson** *“Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes . Properties, Processing and Applications ”, NOYES PUBLICATIONS , Park Ridge, New Jersey, U.S.A. 1993, с. 198-223*

2. ***И.Е. Беринский*** *“Моделирование межатомных взаимодействий в графене с применением линейной теории стержней”, Мезо-, нано-, биомеханика и механика природных процессов Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, № 4 (2), с. 388–390*

3. **I.E. Berinskii, A.M. Krivtsov** *“A hyperboloid structure as a mechanical model of the carbon bond”*

4. ***И.Е. Беринский, А.М. Кривцов, А.М. Кударова, В.А. Кузькин, О.С. Лобода, С.С. Хакало*** *“Современные проблемы механики. Механические свойства ковалентных кристаллов”, Издательство Политехнического университета, Санкт-Петербург, 2014, с. 49-68*

5. **D. D. Hernandes** *“Factors Affecting Dimensional Precision of Consumer 3D Printing”, International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, vol. 2, 2015*

6. ***Д. Дзенушко*** *“Расчет и конструирование упругих соединительных элементов для моделирования дискретных сред и разработки деталей конструкций”*

7. ***П. Г. Гузенков*** *“Краткий справочник к расчетам деталей машин” Высшая школа, Москва, 1964*

8. ***В.И.Анурьев*** *“Справочник конструктора машиностроителя. Том 2”, «Машиностроение», Москва, 2001, с. 773-780*

9. ***В.О. Варганов, М.В. Аввакумов, М.В. Колычев, В.М. Гребенникова, В.А. Романов*** *“Передача винт-гайка”, Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2015*

10. **D. Alciatore, M. Histand** *“Introduction to Mechantronics and Measurement System”, McGraw-Hill, New York, 2012*

11. **P. Acarnley** *“Stepping motors: A guide to theory and practice”, The institution of engineering and technology, London, UK, 2007*

12. **E. H. Smith** *“Mechanical Engineer’s reference book”, The Bath Press, UK, 1994*

13. **Allegro MicroSystems** *“DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection”, Massachusetts, USA, 2009*

14. **H. W. Kroto**, *J. R. Heath, S. C. O’Brien, R. F. Curl, R. E. Smalley, et al. “C 60: Buckminsterfullerene”, Nature 318 (6042), 1985, с. 162–163*

15. **A. K. Geim, K. S. Novoselov** *“The rise of grapheme”, Nature Materials 6 (3), 2007, с. 183–191*

Приложение 1. Безопасность жизнедеятельности при разработке стенда, содержащего систему с электрифицированными узлами управления и рабочего места оператора ЭВМ

Рассмотрим воздействующие на человека опасные и вредные производственные факторы в соответствии с классификацией, приведенной в ГОСТ 12.0.003-74.

Во-первых, физические опасные и вредные производственные факторы. Движущееся оборудование, подвижные части: опасность травмирования исключена. На установке запрещено располагать какие-либо вещи, для рабочего инструмента имеется специальное место. Повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны: экспериментальный модуль не содержит источников образования пыли и газа. Вытяжная вентиляция лаборатории не допускает превышения предельно допустимой концентрации вредных веществ в соответствии с ГОСТ 12.1.005-88. Повышенная или пониженная температура поверхностей оборудования, материалов: модуль управления – стационарная лабораторная установка, состоящая из монтажной панели, блоков питания, контроллера и кабелей соединения. Устройств, образующих холод, нет. Устройства, вырабатывающие тепло имеют радиаторы (процессор в системном блоке, радиаторы блоков питания, лампа освещения и т.д.). Меры защиты от поражения электрическим током. Важное значение для предотвращения электротравматизма имеет правильная организация обслуживания действующих электроустановок, проведение ремонтных, монтажных и профилактических работ. При этом в лаборатории присутствует защитное заземление. Во время работы оператору запрещается:

- переключать разъемы интерфейсных кабелей периферийных устройств при включенном питании
- загромождать верхние панели устройств посторонними предметами;
- производить частые переключения питания;
- допускать попадание влаги на поверхность электрических приборов.

Требования к рабочему месту при выполнении работ сидя нормируются ГОСТ 12.2.032–78. При организации рабочего места следует обеспечить взаимное расположение всех его элементов в соответствии с эргономическими требованиями, с учетом характера выполняемого оператором исследования, комплексности технических средств, форм организации труда и наиболее оптимального для данного исследования рабочего положения:

Угол поворота монитора регулируется для лучшего обзора выводимых данных. При этом экран должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 600-

700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов. Система управления стендом информирует оператора о ходе испытания путем вывода информации на экран монитора. Протокол испытаний с необходимыми выходными данными распечатывается на принтере. Рекомендуется предусмотреть место для хранения распечатанных протоколов и систематизации снятых данных. Размещение на рабочей поверхности используемого оборудования, производится с учетом его количественных, конструктивных особенностей (размер ВДТ и ПЭВМ, клавиатуры, и др.) и характера выполняемой работы. Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно–поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сидения и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию. Большинство испытательных операций будет проходить в автоматическом режиме под управлением компьютера, что позволит разгрузить оператора. Результаты испытаний фиксируются автоматически, оператор может их распечатать в виде протокола испытаний. В программе предусмотрены блокировки на случай неверных действий оператора или выхода оборудования из строя. При возникновении внештатных ситуаций оборудование будет отключено. Во время начального ввода данных, необходимых для проведения испытания, на экран выводятся подсказки, касающиеся наиболее важных параметров. Экспериментальный стенд соответствует нормативным требованиям безопасности.