

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМЕ
ИЗМЕРЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

Коробейников А. Г.^{1,2}, Перечесова А.Д., Калапышина И.И.,

Леваненко В.А., Гатчин Ю.А., Федосовский М.Е., Поляков В.И.

¹ *СПбФ ИЗМИРАН, СПб, Университетская наб, д.5, лит. Б,
office@izmiran.spb.ru*

² *Университет ИТМО, СПб, Кронверкский проспект, д.49, od@mail.ifmo.ru*

Прогресс в различных отраслях техники связан с ростом технических требований к измерительным приборам и датчикам. Ответственную роль в таких приборах играют упругие элементы. В СПбФ ИЗМИРАН упругий торсионный подвес магниточувствительного элемента магнитостатического вариометра, входящего в состав геофизического комплекса GI-MTS-1, изготавливают из полимерного материала: трех микрофиламентов арамидных нитей диаметром 0,016 мм. Для обеспечения работоспособности высокоточного оборудования и его усовершенствования, необходимым является знание физико-механических характеристик упругого элемента.

Опыт проведения экспериментов российских и зарубежных коллег (ГОСТ, ASTM) указывает, что эксперименты на растяжение образцов с микронными толщинами целесообразно производить, используя дополнительные фиксирующие элементы. Были проведены испытания 1 филамента арамидной нити с использованием трех вариантов дополнительной фиксации: пленка с акриловым клеем, БФ-2, двухкомпонентный эпоксидный клей с TiO₂. В результате был выбран оптимальный вариант фиксации с помощью БФ-2, минимизирующий эффект внутреннего соскальзывания нитей в зажиме, соответственно, были достигнуты более точные и стабильные результаты испытания. Получены параметры необходимые для расчетов на ANSYS WorkBench.

Как известно из теории упругости физико-механические характеристики зависят от структуры образцов. Исследуемый торсионный подвес может быть

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

изготовлен с разной плотностью плетения. Для определения оптимальных характеристик плетеных микрофиламентных арамидных торсионов целесообразно применять современные методы аналитического исследования, реализованные в пакете ANSYS WorkBench.

На текущем этапе работы создана расчетная модель в среде ANSYS WorkBench, получен результат для торсиона с плотностью плетения 7 узлов/мм.

Введение

Прогресс в различных отраслях техники связан с ростом технических требований к измерительным приборам и датчикам. Ответственную роль в таких приборах играют упругие элементы. Они используются в различных целях: для создания определенного натяга между деталями, аккумуляции механической энергии, как элементы передачи движения, упругие опоры, амортизаторы и так далее. Особенно ответственна роль упругих элементов в измерительных приборах, если непосредственно от них зависит способность чувствительного элемента, реагировать на изменения измеряемой величины. В этих случаях точность и надежность работы прибора во многом зависит от качества упругого элемента. И хотя упругие элементы являются простыми механическими деталями, и многие виды упругих элементов известны и широко применяются в течение многих десятков лет, их рабочие характеристики часто не удовлетворяют современным требованиям, что тормозит создание приборов высоких классов точности.

В современном мире требования к датчикам и другим приборам предъявляют высокие, в первую очередь к их метрологическим характеристикам и показателям надежности, это обстоятельство приводит к необходимости повышения качества упругих элементов, что в свою очередь требует постановки и решения ряда новых задач [1].

В настоящее время в Санкт-Петербургском филиале ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (СПбФ ИЗМИРАН) упругий торсионный подвес магниточувствительного элемента (МЧЭ) магнитостатического вариометра (ТМ), входящего в состав геофизического комплекса GI-MTS-1 [2], изготавливают из трех микрофиламентов арамидных нитей диаметром 0,016 мм. Главным достоинством ТМ с таким МЧЭ является регистрация магнитных полей и их вариаций в диапазоне частот 0...15 Гц со среднеквадратичным уровнем шумов не превышающим $1 [nTл/\sqrt{Гц}]$. Данные торсионные подвесы обладают свойствами упругой анизотропии. В свою очередь использование таких торсионных подвесов (рис. 1, в, г) при изготовлении МЧЭ приборов позволяет: снизить модуль кручения (повысить чувствительность), повысить устойчивость к изменению климатических факторов, повысить временную стабильность (уменьшить температурный дрейф нуля), повысить устойчивость к динамическим нагрузкам [3, 4].

Для обеспечения работоспособности высокоточного оборудования и его усовершенствования, необходимым является знание физико-механических характеристик упругого элемента. Как известно, многослойные пружины, канаты, тросы, нити представляют собой объекты механики деформируемого твердого тела, которые моделируются как спирально-анизотропные стержни (САС) [5-9].

Было установлено, что торсион обладает свойствами упругой спиральной анизотропии, соответственно физико-механические характеристики зависят от структуры образцов торсионов. Исследуемый торсионный подвес может быть изготовлен с разной плотностью плетения. Для определения оптимальных характеристик плетеных микрофиламентных арамидных торсионов целесообразно применять современные методы аналитического исследования, реализованные в пакете ANSYS WorkBench. Данные для моделирования необходимо получить экспериментально.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы – обозначить проблему определения оптимальных характеристик плетеных микрофиламентных арамидных торсионов, обосновать целесообразность применения современных методов аналитического исследования, реализованных в пакете ANSYS WorkBench и SolidWorks. Выбрать оптимальный вариант дополнительной фиксации образца в зажиме для проведения испытаний на растяжение образцов филаментов арамидных нитей. Получить экспериментально параметры необходимые для расчетов на ANSYS WorkBench, далее исследовать арамидный плетеный торсион в среде ANSYS WorkBench.

Объект исследования

Упругий торсионный подвес представляет собой САС в виде косы. Плотность плетения – 7 узлов/мм. Огибающая поперечного сечения упругого торсионного подвеса представляет собой эллипс с большей осью, равной 0,046 мм, и меньшей осью – 0,033 мм; рабочая длина подвеса – 100 мм. На рисунке 1 приведены фотографии, полученные с помощью микроскопа Meiji Techno IM7200. Оптическое исследование структуры образцов торсионов производилось в лаборатории «Электронной микроскопии и физико-технологических исследований» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (СПбПУ) [11].

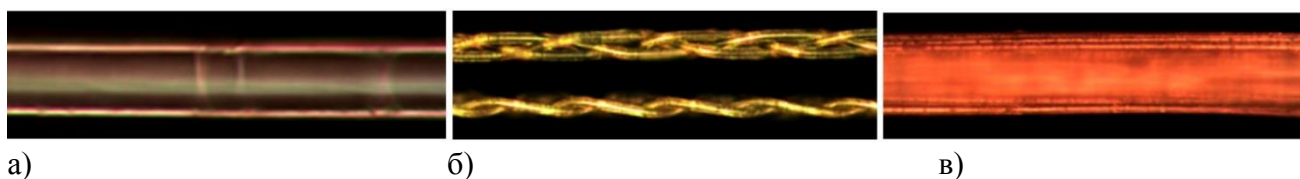


Рис. 1. Фотографии одного микрофиламента арамидных нитей (x400, а), торсиона в двух проекциях (x160, б) и нить линейной плотности 6,3 текс (x80, в)

Экспериментальное оборудование и программное обеспечение

Экспериментальное определение физико-механических характеристик арамидных нитей проведено с помощью испытательной машины AGS500NX

SHIMADZU (SHIMADZU CORPORATION, Япония. Оформление отчетов и обработка данных производятся с помощью программного обеспечения для проведения испытаний материалов «TRAPEZIUM LITE X» (SHIMADZU CORPORATION, Япония). Учитывая малые размеры образцов, для проведения испытаний были спроектированы и изготовлены специальные захваты с диаметром кнехта менее 20 мм [11].

Микронные размеры и достаточно плотное плетение торсиона приводит к значительным техническим сложностям и высоким временным затратам при их изготовлении, поэтому для определения оптимальных характеристик плетеных микрофиламентных арамидных торсионов целесообразно применять современные методы аналитического исследования, реализованные в пакете ANSYS WorkBench и SolidWorks.

Для аналитического исследования плетеного торсиона была создана 3-D модель в программе SolidWorks, которая соответствует геометрическому строению исследуемого образца. Для создания расчетной модели и построения конечной и элементной сетки в исследовании применялись средства среды ANSYS WorkBench и модуль Explicit Dynamics, который имитирует реакции конструкции к нагрузкам. Это позволяет создать командный файл, содержащий всю информацию о модели для дальнейшего расчета, и предоставляет возможность учесть нагрузки и разрушения, а также деформации материала. Выбранный метод решения позволяет учесть геометрию нелинейного контакта и структурные проблемы при исследовании торсиона из полимерных материалов в форме косы.

Для проведения испытаний ANSYS Workbench необходимо добавить в библиотеку материалов физико-механические параметры одного филамента арамидной нити (коэффициент Пуассона, Модуль Юнга и др.). Для моделирования были использованы параметры, полученные в результате испытаний на растяжение одного филамента арамидной нити [10].

Результаты экспериментов на растяжение и моделирования на ANSYS

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыт проведения экспериментов российских и зарубежных коллег (ГОСТ, ASTM) указывает, что эксперименты на растяжение образцов с микронными толщинами целесообразно производить, используя дополнительные фиксирующие элементы [11, 12].

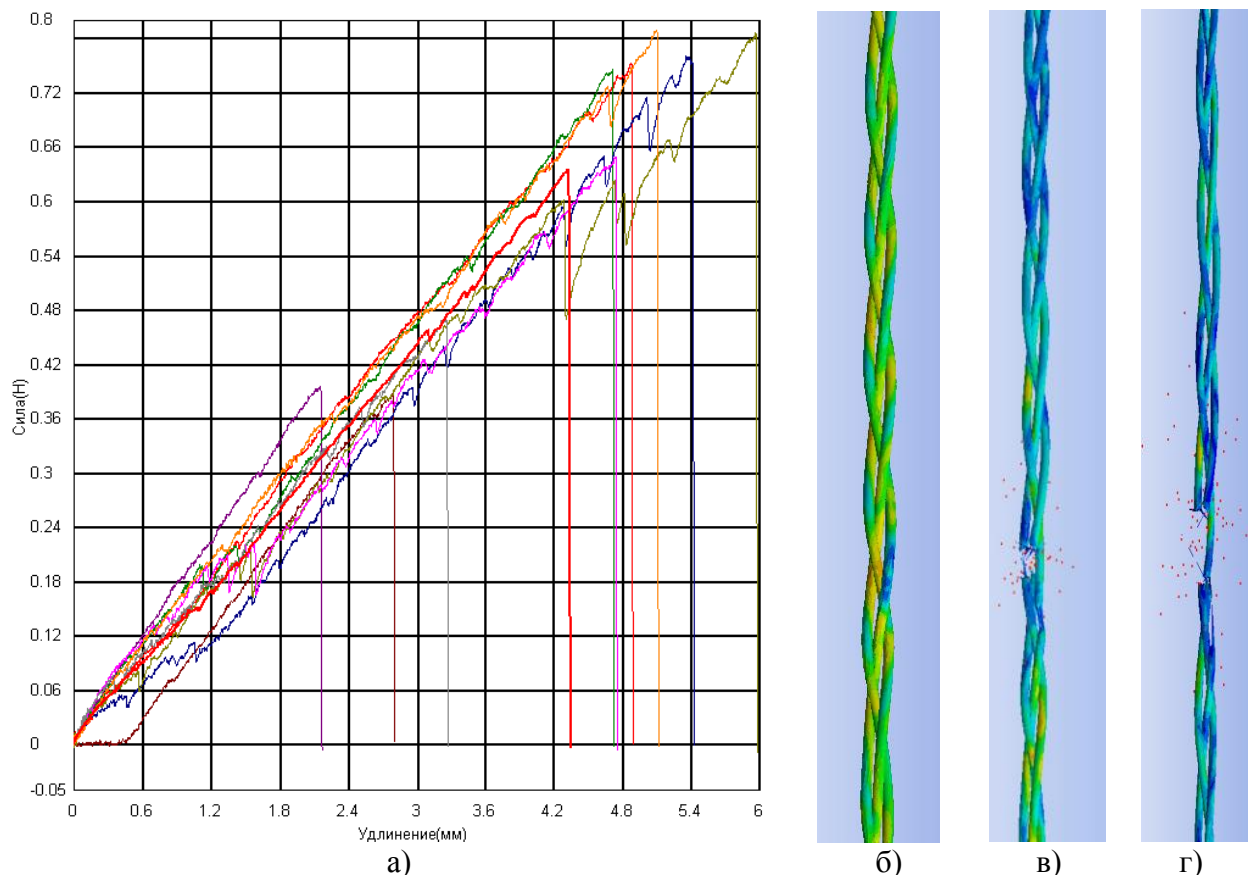


Рис. 2. Результаты испытаний на растяжение 1 филамента арамидной нити (дополнительная фиксация пленки с акриловым клеем) (а), моделирование разрыва 3-D модели плетеного торсиона в программе ANSYS: деформированное состояние в начальной стадии (б), начало разрыва плетеного торсиона (в), полный разрыв (г)

Были проведены испытания на растяжение 1 филамента арамидной нити с использованием трех вариантов дополнительной фиксации: пленка с акриловым клеем, БФ-2, двухкомпонентный эпоксидный клей с TiO_2 . На рис. 2(а) представлен результат испытаний на растяжение 1 филамента арамидной нити с применением дополнительной фиксации «пленка с акриловым клеем», данный вариант фиксации наглядно демонстрирует проскальзывание филамента арамидной нити в зажиме, явный разброс результатов. В результате проведения испытаний выбран оптимальный вариант фиксации с помощью БФ-2, минимизирующий эффект внутреннего соскальзывания нитей в зажиме, были до-

стигнуты более точные и стабильные результаты испытания, получены параметры необходимые для расчетов на ANSYS WorkBench. Для моделирования были использованы экспериментальные данные с графиков, на которых аппроксимированная кривая показала результат: сила – 0,72 Н, удлинение – 3,1 мм (при базе измерения 50 мм).

На рисунке 2 (б) – (г) представлена эволюция процесса деформации арамидного плетеного торсиона из полимерных материалов с плотностью плетения 7 узлов/мм в среде ANSYS WorkBench. Деформированное состояние на начальной стадии (рис. 2б) локализовано в области отмеченной синим цветом, за непродолжительное время первоначальная зона критической деформации увеличивается, образуются новые очаги на длине всего образца, начинают разрушаться арамидные волокна (рис. 2в), а по площади торсиона распространяется область напряженного состояния, переходя к полному разрыву испытуемого образца (рис. 2г).

Исследование арамидного плетеного торсиона в среде ANSYS WorkBench позволило оценить критическую силу, после которой начинается необратимые пластические деформации образца с последующем разрывом, сила составила $F = 1,21-1,38$ (Н), что соответствует предварительным экспериментальным данным, полученным ранее для арамидного плетеного торсиона из полимерных материалов с плотностью плетения 7 узлов/мм [6].

Заключение

В работе представлен объект исследования, описана проблема определения оптимальных характеристик плетеных микрофиламентных арамидных торсионов, обоснована целесообразность применения современных методов аналитического исследования, реализованных в пакете ANSYS WorkBench и SolidWorks. Продемонстрированы результаты эксперимента на растяжение образцов филаментов арамидных нитей, выбран оптимальный вариант дополнительной фиксации образца в зажиме с помощью БФ-2, минимизирующий

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

эффект внутреннего соскальзывания нитей в зажиме. Получены параметры необходимые для расчетов на ANSYS WorkBench. Представлены результаты исследования арамидного плетеного торсиона в среде ANSYS WorkBench, которые позволили оценить критическую силу, после которой начинается необратимые пластические деформации образца с последующем разрывом. Сила составила $F = 1,21-1,38$ (Н), что соответствует предварительным экспериментальным данным, полученным ранее для арамидного плетеного торсиона из полимерных материалов с плотностью плетения 7 узлов/мм [6].

Литература:

1. Перечесова А.Д., Калапышина И.И., Соловьева Г.А. Метод определения физико-механических параметров арамидных торсионов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - Санкт-Петербург, 2016. Т. 59. № 8. С. 645-650.
2. Копытенко Ю.А., Петрищев М.С., Сергушин П.А, Леваненко В.А., Перечесова А.Д. Устройство для изготовления торсионных подвесов чувствительных элементов приборов // патент РФ № 2519888, МПК D07B3/00, 20.06.2014, Бюл. No 17.
3. Perechosova A.D., Kalapyshina I.I., Nuzhdin K.A. Kinematics and dynamics analysis of different mechanisms using the simmechanics/SIMULINK/MATLAB // 26th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2014 - 2014, pp. 128-135.
4. Перечесова А.Д., Калапышина И.И., Нуждин К.А. Исследования механизмов различного уровня с помощью MATLAB // Известия высших учебных заведений. Машиностроение - 2014. - № 11. - С. 42-55.
5. Мусалимов В.М., Заморуев Г.Б., Перечесова А.Д. Расчет физико-механических характеристик винтовых элементов спирально-анизотропных стержней // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 6. С. 24-30.
6. Perechesova A.D., Soloveva G.A., Kalapyshina I.I. Hough Transform for the Calculation of Twist Angle of Aramid Torsion // WSCG 2015 – Poster Papers Proceedings - 2015, pp. 91-94.
7. Коробейников А.Г. Разработка и анализ математических моделей с использованием MATLAB и MAPLE//СПб: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. – 2010. – 144 стр.

8. Коробейников А. Г., Гришенцев А. Ю. Разработка и исследование многомерных математических моделей с использованием систем компьютерной алгебры. – СПб: НИУ ИТМО, 2014. – 100 с.
9. Коробейников А.Г. Проектирование и исследование математических моделей в средах MATLAB и Maple. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2012. – 160 с.
10. Бруяка В.А., В.Г. Фокин, Я.В.Курвева. Инженерный анализ в Ansys Workbench: Учебное пособие. /.-Самара : Самар. гос. техн.ун-т, 2013. - 148с.: ил.
11. Перечесова А.Д., Калапышина И.И. Выбор метода испытания на растяжение арамидных нитей // Приборы. - М: Союз общественных объединений "Международное научно-техническое общество приборостроителей и метрологов", 2014. - Вып. 172. - № 10. - С. 28-33.
12. Zhu D., Mobasher B., Rajan S.D. Experimental study of dynamic behavior of Kevlar 49 single yarn // Society for Experimental Mechanics – SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics 2010, Volume 1, 2010, P. 542-547. Code 81901.
13. Коробейников А.Г., Перечесова А.Д., Калапышина И.И., Леваненко В.А., Гатчин Ю.А., Федосовский М.Е., Поляков В.И. Применение полимерных материалов при разработке торсионов применяемых в высокочувствительных системах измерения низкочастотных магнитных полей. XXIII Всероссийская конференция "Структура и динамика молекулярных систем". - Йошкар-Ола, 04-08 июля 2016 г.