Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Кафедра теоретической и прикладной механики

Выпускная квалификационная работа

Исследование напряжений в элементе из материала с эффектом памяти формы

Выполнил: студент гр. 4-33
Вербицкий В.О.
Научный руководитель: к.т.н., доцент
Ноздрин М.А.

Иваново 2018

Введение

Эффект памяти формы материалов – уникальное явление. Изучение памяти формы остается востребованным и в настоящее время. Создано большое количество конструкций и приборов, в состав которых входят детали из материала с памятью формы. Одной из таких конструкций является двигатель Гинеля , в котором используются пружины из материала с эффектом памяти формы.

Задачи работы

Объектом исследования в работе являются пружины из материала с эффектом памяти формы , которые входят в часть элементов в двигателе Гинеля.

Задачи:

1. проведение эксперементов с двигателем для определения его параметров;

2. расчет крутящего момента для разных параметров двигателя Гинеля;

3. аналитический расчет усталостной прочности пружин с ЭПФ;

4.численное моделирование пружины в программе SolidWorks:

- исследование модели при статическом нагружении;
- исследование модели в области многоцикловой усталости.

Постановка задачи расчетов пружин с ЭПФ

•Геометрия области представляет собой винтовую пружину , работающую на растяжение и сжатие (рисунок 1);

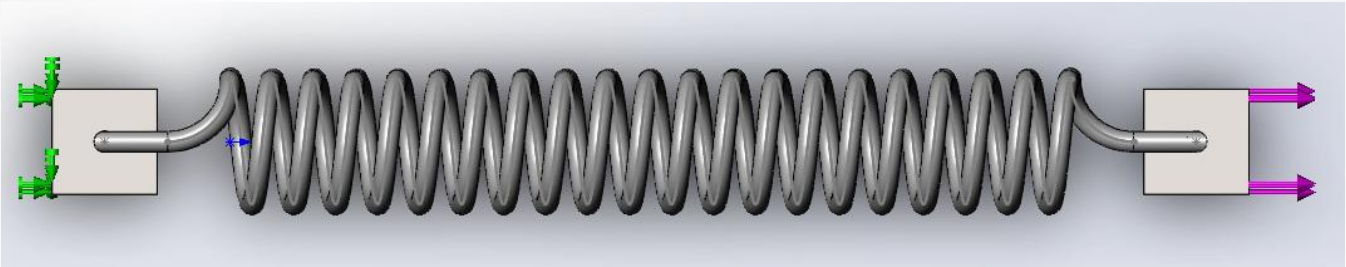


Рисунок 1 - Геометрия области

- количество витков в пружине : n=21;
- диаметр проволоки : d=0.001 м;
- наружный диаметр пружины: D=0.006 м;
- коэффициент жесткости пружины : k=555 Н/м;
- длина пружины : l=0.034 м;
- материал пружины- сплав нитинол.
- кинематические граничные условия :

один конец пружины жестко закреплен;

- силы , действующие на пружину:

сила упругости прикладывается к свободному концу пружины;

- допустимый коэффициент запаса усталостной прочности [n]=2;

Нитинол

Эффект памяти формы – явление возврата к первоначальной форме при нагреве , которое наблюдается у некоторых материалов после предварительной деформации.

Никелид титана (нитинол) представляет собой соединение составов с 55% никеля и 45% титана.

Свойства нитинола:

1. сильная коррозионностойкость;
2. высокая степень:
- прочности;
- запоминания и восстановления формы;
- поглощения энергии вибрации, которая зависит от напряжений в материале;
- уровень деформаций в пределах 8% абсолютно восстановим;
- хорошая биологическая совместимость;
3. нитинол в 10 раз эластичнее любого материала.

Минусы нитинола:

1. сложность выдержки пропорций элементов;
2. переработка;
3. сварка и обработка металла;
4. большая стоимость.

ЭПФ широко применяют в медицине, стоматологии , космическом строительстве, изготовлении двигателей, изготовлении тепловых сигнализаций.

Экспериментальные определения параметров двигателя Гинеля

В экспериментальных исследованиях определяем наилучшее межосевое расстояние по критерию более плавного вращения колеса двигателя.

Рисунок 2 – Физическая модель двигателя с межосевым расстоянием 2 см

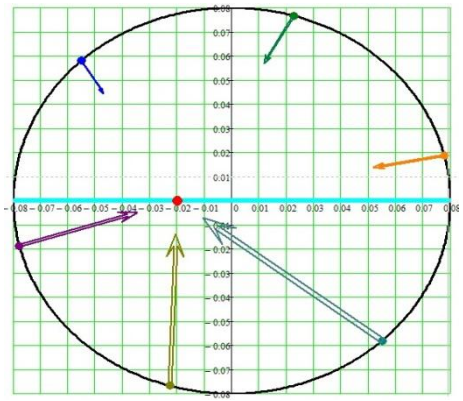


Рисунок 3 – Динамическая модель двигателя с межосевым расстоянием 2 см

Рисунок 3 – Физическая модель двигателя с межосевым расстоянием 5 см

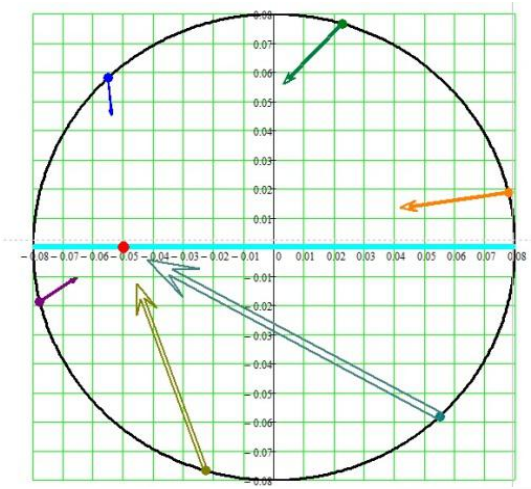


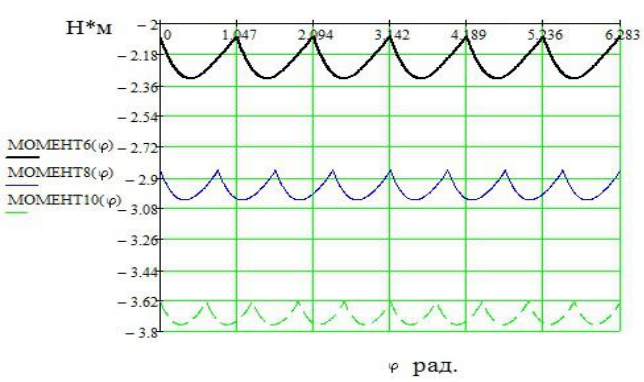
Рисунок 4 – Динамическая модель двигателя с межосевым расстоянием 5 см

Рисунок 5 – Экспериментальная установка

Результаты испытаний

Эксперимент с двигателем Гинеля показал, что при межосевом расстоянии 2 см, колесо двигателя вращается более плавно , с меньшем количеством рывков . При межосевом расстоянии 5 см, наблюдается большое количество рывков ,а также в пружине в месте максимального напряжения (180°) возникают большие деформации (растяжение пружины практически до прямой линии). С межосевым расстоянием 2 см колесо двигателя вращается со скоростью 3.3 об/мин, при межосевом расстоянии равным 5 см скорость колеса составляет 5 об/мин.

Расчет крутящего момента для разных параметров двигателя Гинеля



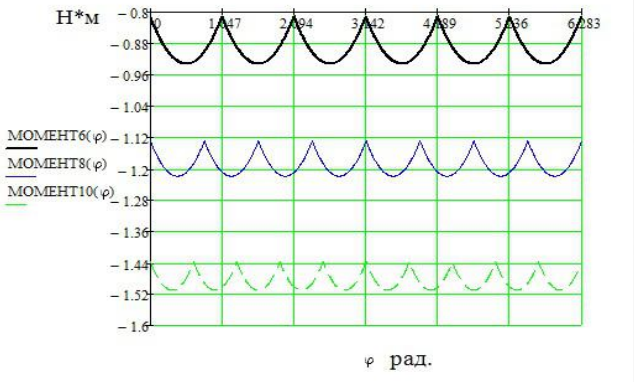


Рисунок 6- Графики моментов с межосевым расстоянием 5 и 2 см для 6,8,10 пружин

Межосевое расстояние равное 5 см	
Количество пружин	Момент
6 пружин	2.321 Н*м
8 пружин	3.031 Н*м
10 пружин	3.761 Н*м
Межосевое расстояние равное 2 см	
Количество пружин	Момент
6 пружин	0.93 Н*м
8 пружин	1.21 Н*м
10 пружин	1.51 Н*м

Аналитический расчет усталостной прочности элемента с ЭПФ

Для расчета используем формулы из теории сопротивления материалов.

Максимальное касательное напряжение:

$$\tau_i = k * \frac{(8D * P_{i\,max})}{\pi * d^3}$$

Межосевое расстояние равное 2 см		
Длина пружины в зависимости от угла поворота (см)	Максимальная сила (Н)	Максимальное напряжение (МПа)
4.6 (0°)	6.7	110.6
5.4 (60°)	11.1	184.3
6.7 (120°)	18.3	304.2
7.7 (180°)	23.7	396.3
7.1 (240°)	20.5	341
5.6 (300°)	12.2	202.7

Межосевое расстояние равное 5 см		
Длина пружины в зависимости от угла поворота (см)	Максимальная сила (Н)	Максимальное напряжение (МПа)
3.5 (0°)	0.6	9.96
5 (60°)	8.8	146.2
8.6 (120°)	28.8	478.3
10.2 (180°)	37.7	626.1
9 (240°)	31.1	516.5
6.1 (300°)	15	249.1

Аналитический расчет усталостной прочности элемента с ЭПФ

Для проверки на сопротивление усталости пружины используются следующие формулы:

$\tau_{max} = \tau_4$- максимальное напряжение цикла

$\tau_{min} = \tau_1$- минимальное напряжение цикла

$\tau_m = \frac{\tau_{max}+\tau_{min}}{2}$ - среднее напряжение цикла

$\tau_a = \frac{\tau_{max}-\tau_{min}}{2}$ - амплитуда цикла

$r = \frac{\tau_{min}}{\tau_{max}}$ - коэффициент асимметрии цикла

При отсутствии экспериментальных данных пределы выносливости определяем по пределу прочности:

$\sigma_{-1} = 900 * 10^{-6}$Па – предел усталости по нормальным напряжениям

$\tau_{-1} = 0.6 * \sigma_{-1}$ - предел усталости по касательным напряжениям

$\tau_0 = 1.7 * \tau_{-1}$ - предел относительной усталости по касательным напряжениям

$\psi_{\boldsymbol{\tau}} = \frac{2\tau_{-1}}{\tau_0} - 1$ – коэффициент чувствительности цикла

$n_{\tau 2} = \frac{\tau_{-1}}{K_\tau * \tau_a + \psi_\tau * \tau_m}$ - коэффициент запаса усталостной прочности

По результатам расчета получены два фактических коэффициента запаса по усталостной прочности . Для межосевого расстояния 2 см - $\boldsymbol{n_{\tau 2} = 2.879 > [n]}$ и для межосевого расстояния 5 см - $\boldsymbol{n_{\tau 5} = 1.483 < [n]}$.

Численное моделирование пружины в программе SolidWorks

Основные характеристики нитинола :

$E = 7 * 10^{10}$ Па – модуль Юнга

$\nu = 0.33$ – коэффициент Пуассона

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{7 * 10^{10}}{2(1+0.33)} = 2.6 \cdot 10^{10} \text{ Па} - \text{модуль сдвига}$$

$\rho = 6450 \ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность

$\sigma_{\text{в}} = 9 * 10^{8}$ Па – предел прочности

$\sigma_{\text{т}} = 195 * 10^{6}$ Па – предел текучести

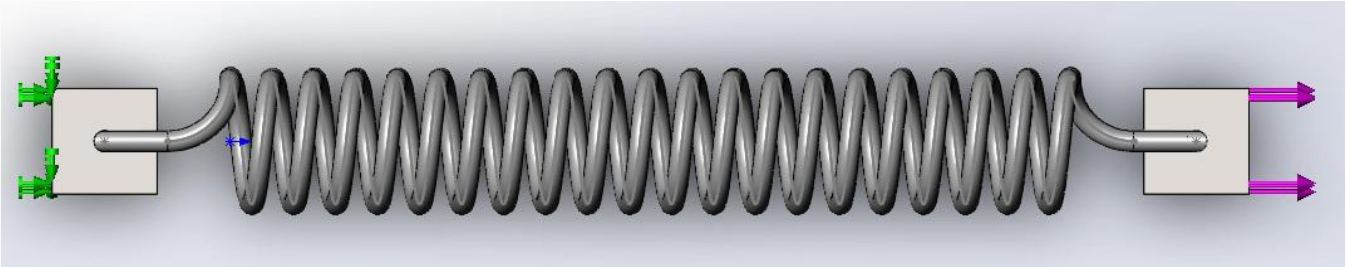


Рисунок 7 - Созданная модель и граничные условия

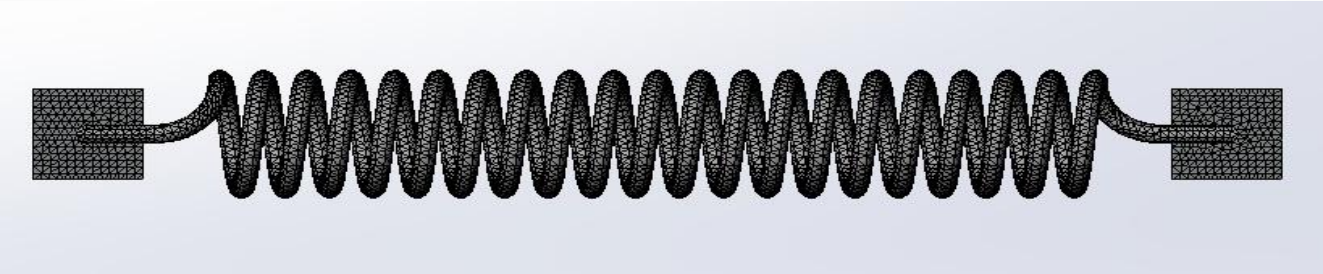


Рисунок 8 - Конечно-элементная сетка модели

Исследование модели в области многоцикловой усталости

Статический анализ с минимальным (2 см) и максимальным (5см) межосевым расстоянием. Полученные результаты выводятся в виде картины распределения напряжений по Мизесу.

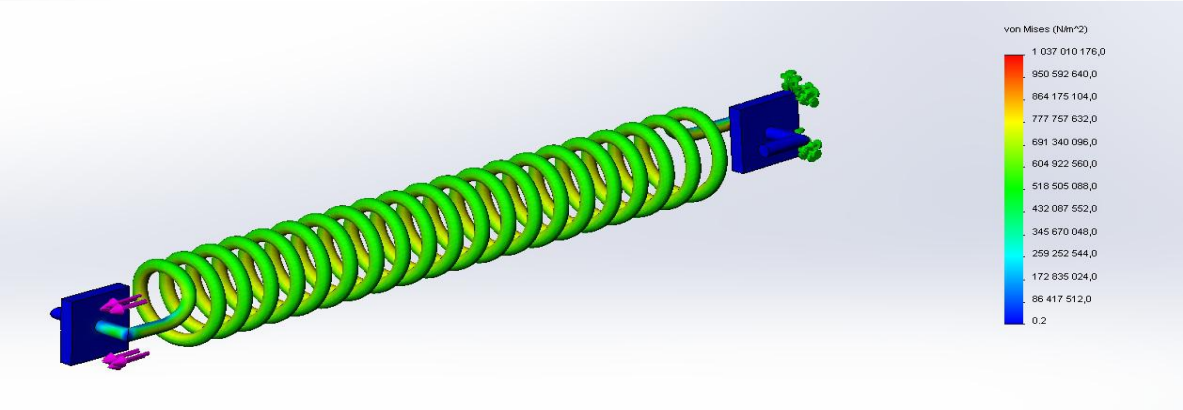


Рисунок 9 - Распределение напряжений по Мизесу с минимальным межосевым расстоянием

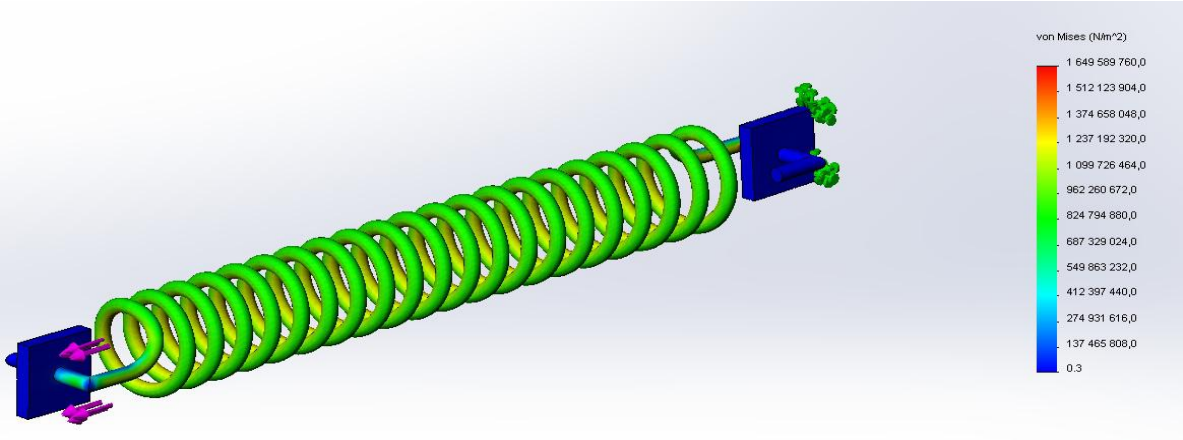


Рисунок 10 - Распределение напряжений по Мизесу с максимальным межосевым расстоянием

Исследование модели в области многоцикловой усталости

Проведенное статическое исследование позволяет определить максимальные напряжения, возникающие в модели при заданном нами типе нагружения. Максимальное значение используется программой для создания кривой усталости материала. Для многоциклового исследования установлено 10^6 циклов повторений изменяющейся нагрузки.

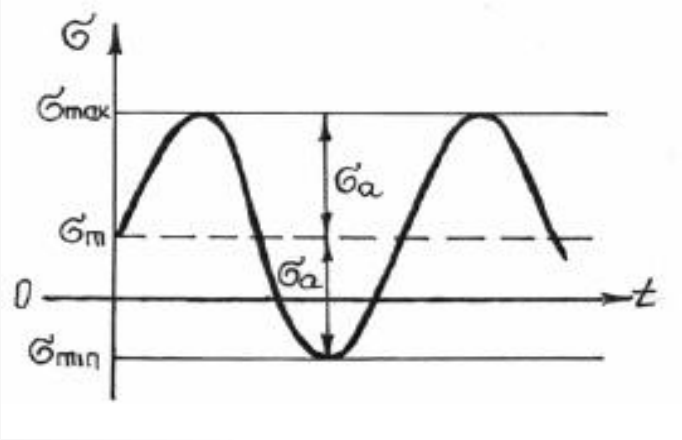


Рисунок 11 – Вид многоциклового нагружения

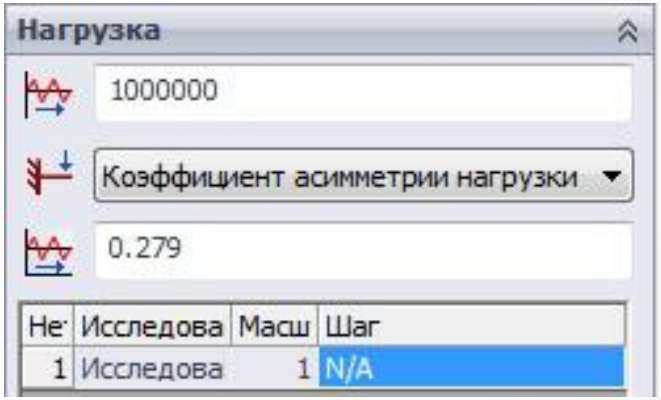
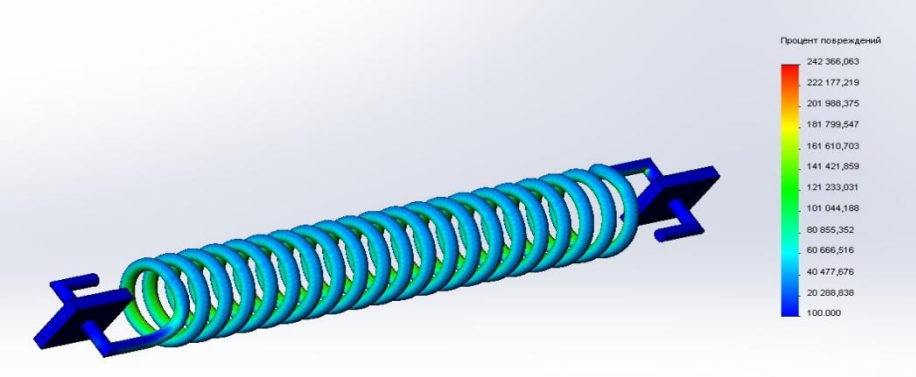


Рисунок 12 - Нагрузка

Исследование модели в области многоцикловой усталости



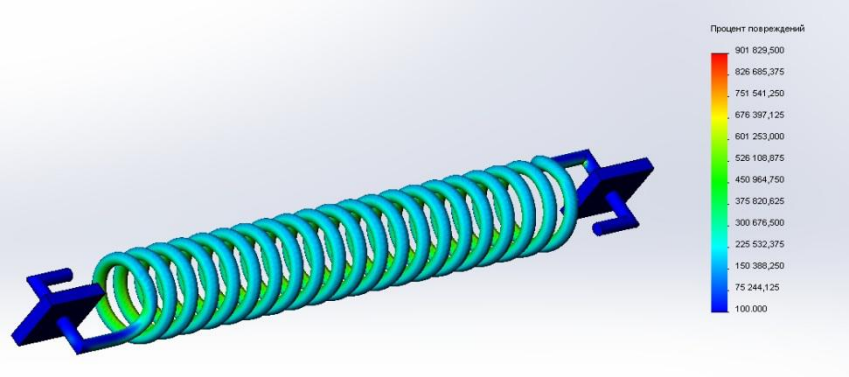
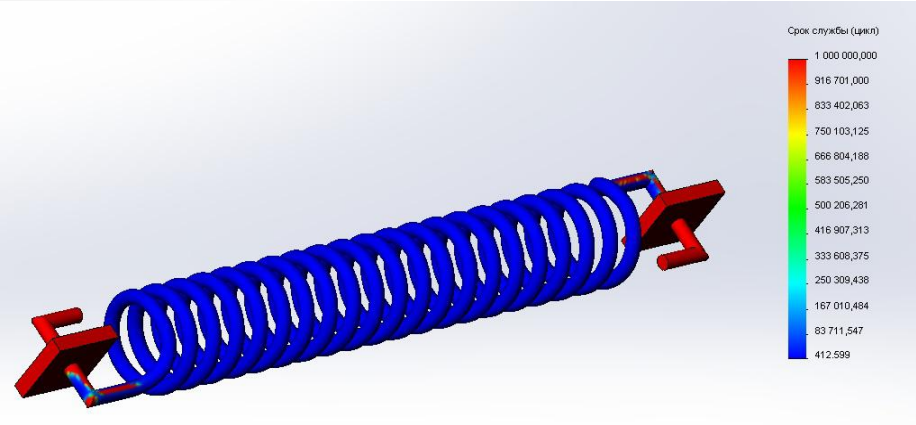


Рисунок 13 - Процент повреждения детали с минимальным и максимальным межосевым расстоянием



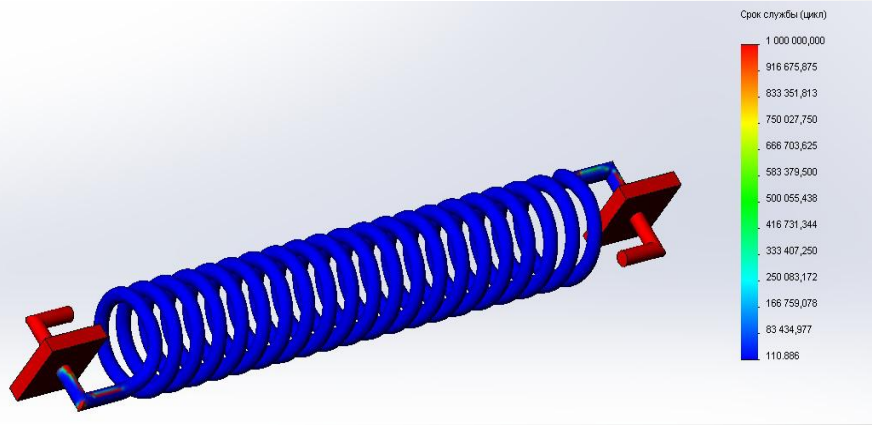


Рисунок 14 – Срок службы детали с минимальным и максимальным межосевым расстоянием

Выводы

1. Эксперимент с двигателем Гинеля показал, что при межосевом расстоянии 2 см, колесо двигателя вращается более плавно , с меньшем количеством рывков . При межосевом расстоянии 5 см, наблюдается большое количество рывков ,а также в пружине в месте максимального напряжения (180°) возникают большие деформации (растяжение пружины практически до прямой линии). С межосевым расстоянием 2 см колесо двигателя вращается со скоростью 3.3 об/мин, при межосевом расстоянии равным 5 см скорость колеса составляет 5 об/мин.

2. Расчет крутящего момента показал, что при изменении межосевого расстояния с максимального на минимальное происходит уменьшение крутящего момента с 2.321 Н*м до 0.93 Н*м для 6 пружин, с 3.031 Н*м до 1.21 Н*м для 8 пружин и с 3.761 Н*м до 1.51 Н*м для 10 пружин, что приводит к снижению скорости вращения колеса двигателя. При добавление дополнительных пружин крутящий момент увеличивается.

3. По результатам аналитического расчета усталостной прочности пружины получены два фактических коэффициента запаса усталостной прочности. Для межосевого расстояния 2 см n=2.879>[n] для межосевого расстояния 5 см n=1.483<[n].

4.По результатам численного моделирования в SolidWorks пружины с минимальным межосевым расстоянием 2 см выдерживают 413 тысяч циклов нагружения , а с максимальным - 111 тысяч циклов нагружения.

5. Оптимальному режиму работы лабораторного стенда « двигатель Гинеля» соответствует :

количество пружин 10 штук ,т.к. увеличивается крутящий момент, движения двигателя более плавное;

межосевое расстояние равное 2 см, с таким расстоянием колесо двигателя вращается плавно и пружины выдерживают большее количество циклов нагружения , чем при межосевом расстоянии 5см.