

**Математическое моделирование и прогнозирование упругого возврата при формообразовании спиральных пружин из упрочняющегося материала**

**Научный руководитель – Данилов Владимир Львович**

**Волкова Екатерина Алексеевна**

*Студент (магистр)*

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,  
Робототехника и комплексная автоматизация, Москва, Россия

*E-mail: volkovaea1@student.bmstu.ru*

Спиральные пружины широко применяются в приборостроении и точной механике в качестве чувствительных элементов и накопителей энергии. Их выходные характеристики существенно зависят от точности геометрии, формируемой в процессе изготовления. Традиционная технология навивки ленточной заготовки на сердечник сопряжена с проблемой упругого последействия, или «пружинения»: после снятия нагрузки часть деформации восстанавливается, что приводит к искажению расчетной кривизны пружины [3]. Для обеспечения требуемой точности необходимо еще на этапе проектирования оснастки уметь количественно прогнозировать величину этого эффекта.

Целью настоящей работы является разработка математической модели процесса упруго-пластического изгиба при навивке спиральной пружины, позволяющей оценить остаточную кривизну и компенсировать упругий возврат за счет коррекции параметров навивки.

В рамках исследования решались следующие задачи:

- построение аналитических зависимостей для описания неупругого поведения материала (сплав 36НХТЮ) с использованием различных моделей упрочнения: линейной, степенной и уравнения Рамберга-Осгуда [1];
- вывод выражения для изгибающего момента как функции кривизны на основе теории изгиба стержня;
- определение остаточной кривизны пружины после разгрузки на основе теоремы о разгрузке А.А. Ильюшина [2];
- решение обратной задачи формообразования для нахождения угла навивки, обеспечивающего заданную длину и кривизну готового изделия.

Процесс формообразования моделировался как изгиб заготовки по спирали Архимеда. После снятия нагрузки остаточная кривизна определялась как разность между полной кривизной под нагрузкой и упругой составляющей, соответствующей вычисленному изгибающему моменту. Для оценки угла навивки использовалось выражение для длины дуги спирали в полярных координатах, а полученное нелинейное уравнение решалось численно.

Таким образом, в результате моделирования установлено, что доля упругой деформации может достигать существенных значений, а разработанная математическая модель позволяет скорректировать параметры навивки для компенсации упругого возврата.

**Источники и литература**

- 1) Кузьмин М.А., Лебедев Д.Л., Попов Б.Г. Прочность, жесткость и устойчивость элементов конструкций. Теория и практикум. Упруго-пластические решения и предельное состояние. М., 2008.

- 2) Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. 3-е изд., испр. и доп. М., 2019.
- 3) Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М., 1979.