

УДК: 62-272.22; 620.173.2; 623.4

DOI: 10.53816/23061456_2022_11–12_139

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО
ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

**RESEARCH OF THE STRESS-STRAIN STATE OF ELASTIC ELEMENTS
UNDER DYNAMIC CYCLIC LOADING**

Канд. техн. наук А.Н. Скворцов

Ph.D. A.N. Skvortsov

ИжГТУ им. М.Т. Калашникова

В статье рассмотрено проведение исследований упругого элемента — винтовой цилиндрической пружины — опытной конструкции возвратной пружины пистолета Ярыгина. В результате проведения комплекса конструкторско-технологических исследований разработана и изготовлена опытная конструкция пружины, проведены статические и динамические циклические испытания. Полученные результаты позволили подтвердить благоприятное влияние напряженно-деформированного состояния по аналогии с эффектом «автоскрепление» для стволов стрелково-пушечного вооружения. Данные по осадке и результаты конечно-элементного моделирования позволили получить диаграмму усталостной прочности материала пружины. Результаты исследований могут быть положены в основу методики испытаний упругих элементов на примере винтовых цилиндрических пружин стрелкового оружия, испытывающих значительные динамические нагрузки при эксплуатации.

Ключевые слова: пружина, динамические циклические испытания, усталостная прочность, напряженно-деформированное состояние.

The article considers the research of an elastic element — a helical coil spring — an experimental design of the return spring of the Yarygin pistol. As a result of a complex of design and technological studies, an experimental spring design was developed and manufactured, static and dynamic cyclic tests were carried out. The results obtained made it possible to confirm the favorable effect of the stress-strain state, by analogy with the “auto-bonding” effect for the barrels of small arms and cannon weapons. Settlement data and finite element modeling results provided a diagram of the fatigue strength of the spring material. The results of the research can be used as the basis for testing methods for elastic elements, using the example of helical cylindrical springs of small arms that experience significant dynamic loads during operation.

Keywords: spring, dynamic cyclic testing, fatigue strength, stress-strain state.

Введение

В конструкциях машин и механизмов используются различные упругие элементы: вин-

товые пружины, рессоры, торсионы. В зависимости от прикладываемых к ним нагрузок, конструкции упругих элементов, степени ответственности применяются различные нормативные

документы, в которых указываются требования к материалу.

Как правило, данные требования получены из накопленного эмпирического опыта, что делает конструкции неоптимизированными с точки зрения материалоемкости. Учет напряженно-деформированного состояния конструкции в условиях эксплуатации в большинстве случаев нормативной документацией не предусмотрен.

Использование высокопроизводительной вычислительной техники и программного обеспечения конечно-элементного анализа может позволить определить напряженно-деформированное состояние в процессе эксплуатации или при проведении испытаний деталей или специально подготовленных образцов.

Испытания могут быть статические, динамические или циклические. В зависимости от вида испытаний различают характеристики материала. С точки зрения конструкционной прочности характеристики можно отнести:

- к статическим: $\sigma_b, \sigma_r, \sigma_{0,2}, \delta, \psi$;
- к динамическим: KCV, KCV ;
- к циклическим: $\sigma_{-1}, \sigma_m, \sigma_a, R_m$.

В случае упругих элементов-винтовых цилиндрических пружин нормативная документация регламентирует [1, 2]:

- по конструкции: виды, классы, разряды;
- по требованиям к материалу: механическим свойствам марок и классов;
- по способу изготовления и качеству отделки поверхности;
- по точности изготовления;
- по назначению и т.д.

Учет напряженно-деформированного состояния (НДС) явным образом не предусмотрен, но в требованиях к технологии производства указываются операции термической обработки, статического заневоливания (под нагрузкой на срок), динамического заневоливания (отбивка на копрах или стендах), циклического нагружения по различным схемам [3], в том числе проведение испытаний в соответствии с техническими требованиями рабочих чертежей.

При проведении работ нужно отметить, что основная часть нормативной документации относится к винтовым пружинам, имеющим цилиндрическую форму с постоянным шагом и круглым сечением проволоки. Для других конст-

рукций аналитический расчет пружин также возможен [4], но не регламентирован.

Описание исследования

В рамках проведения совместных работ по исследованию конструкции возвратной пружины пистолета Ярыгина (ПЯ), выполняемых с АО «Ижевский механический завод» [5], были:

- проведены натурные испытания стрельбой штатными боеприпасами подготовленного образца с регистрацией движения подвижных частей;

- на основе выполненного аналитического обзора и проведенного патентного поиска разработано несколько альтернативных конструкций пружины, выполнен выбор оптимальной с точки зрения технологичности и материалоемкости;

- разработана новая схема циклических динамических испытаний, для которой изготовлено лабораторное испытательное оборудование с использованием электромеханического привода (перфоратора)/отбойного молотка. Проведенные испытания показали принципиальную возможность реализации. Защищена патентом РФ [6].

Для определения реальных скоростей подвижных элементов в процессе выстрела и регистрации динамических циклических испытаний использована высокоскоростная камера [7]. Распознавание изображений осуществлялось в программном комплексе с открытым кодом «Tracker» лицензия GNU General Public License as published by the Free Software Foundation проект Open Source Physics (OSP) Java framework.

Опытная конструкция отличается сечением витка, чертеж опытной пружины приведен на рис. 1, в качестве заготовки использована лента Г-ЗП-ВТ-ВШ-0,8x1,3 ГОСТ 21997-76, У9А производства АО «Белорецкий металлургический комбинат» («БМК»). Предел прочности по результатам испытаний на растяжение:

- АО «БМК» — 2500 МПа;
- АО «Ижевский механический завод» («ИМЗ») — 2450 МПа.

Изменение формы сечения позволило при обеспечении требуемых габаритных размеров при соприкосновении витков ~ 25 мм увеличить количество витков, что привело:

- к изменению длины пружины в свободном состоянии $L_0 = 155 \pm 3$ мм;

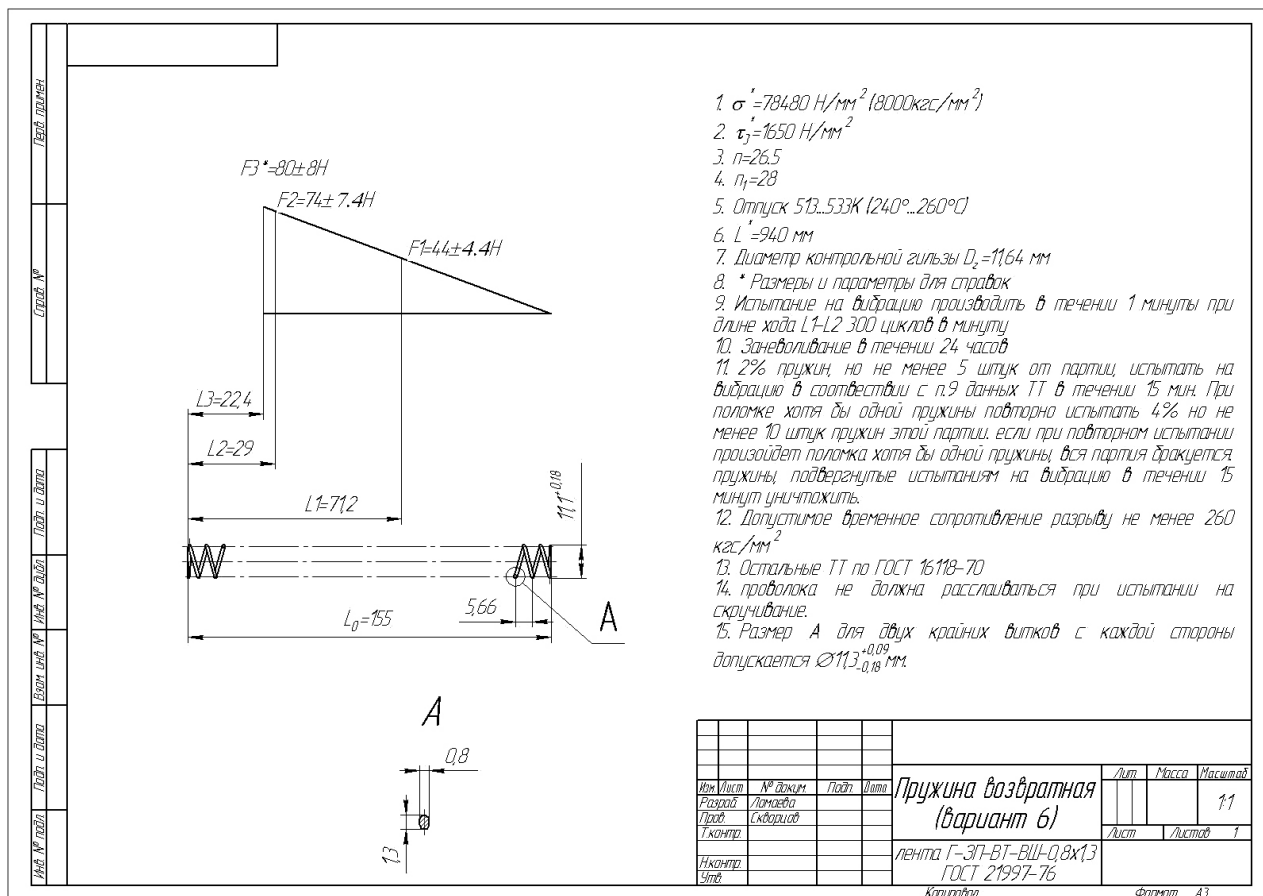


Рис. 1. Чертеж опытной возвратной пружины пистолета Ярыгина

– к увеличению силы пружины при предварительной деформации $F_1 = 44 \text{ Н}$;

– к незначительному увеличению силы пружины при рабочей деформации $F_2 = 74 \text{ Н}$.

Для определения значений усилий были проведены статические испытания на сжатие опытных пружин с использованием электромеханической испытательной машины УТС-111.2-50 с регистрацией в программном комплексе «Испытание пружин» ООО «Тест-системы», использовалась верхняя зона. Для устранения погрешности измерения усилий, вызванных консольным изгибом при прямом нагружении, был разработан, изготовлен и применен реверсор (рис. 2).

Для практической реализации разработанной схемы динамических циклических испытаний была разработана и изготовлена необходимая технологическая оснастка и лабораторное испытательное оборудование. Узел нагружения испытательного оборудования последовательно был реализован в виде:

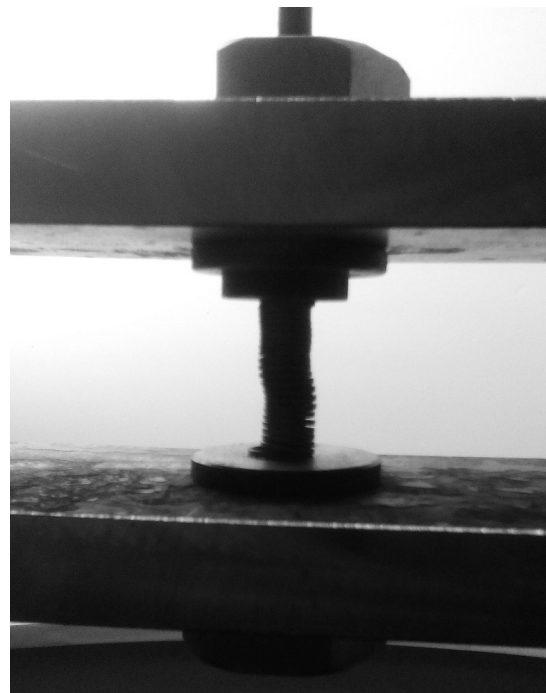


Рис. 2. Опытная пружина при проведении статических испытаний

– электромеханического: перфоратор Kress 900 PSH-plus /отбойный молоток Stanley STHM10K;

– пневматического с использованием пневмоцилиндра двухстороннего действия;

– пневматического с использованием пневмоцилиндра одностороннего действия.

В случае пневматического узла нагружения была использована электронная схема управления. Для обеспечения работоспособности ударно-разгонного устройства пневмоцилиндр был доработан, просверлены 2 дополнительных отверстия в передней части, нарезана резьба и установлены пневмоглушители модели 2931 с проходным сечением 1/4". Пневмоглушители предназначены для предотвращения попадания посторонних предметов в полость пневмоцилиндра в процессе испытаний. Для подачи сжатого воздуха при рабочем ходе и выпуска при обратном использован клапан быстрого выхлопа EAQ5000. Подача сжатого воздуха осуществлялась из ресивера емкостью 200 литров через пневмораспределитель EVS7-8-FG-S-3CVO по трубопроводу с диаметром условного прохода 14 мм. Пропускная способность пневмораспределителя заявлена до 53 нл/с (нормальных литров в секунду). Перед проведением испытаний и в ходе проведения испытаний необходимое давление в ресивере обеспечивалось компрессором.

Управление работой пневмораспределителя EVS7-8-FG-S-3CVO осуществлялось контроллером Zelio SR3 B261BD питанием через блок питания OMRON S8VK-C06024 от сети 220 В.

В ходе испытаний использовались следующие параметры:

– время цикла 0,4 с;

– время открытия быстродействующего клапана 0,1 с;

– давление сжатого воздуха в ресивере: 0,4; 0,5; 0,6 МПа, что позволило обеспечить воспроизводимость нагружения и достичь скорости нагружения пружины 3; 3,35; 3,86 м/с соответственно.

Запись перемещений подвижных элементов осуществлялась на высокоскоростную камеру с последующей обработкой в программном комплексе «Tracker».

Реализованные динамические циклические испытания в соответствии с техническими требованиями чертежа п. 9, 11 по количеству циклов нагружения и полученная осадка представлены в табл. 1.

Для определения напряженного состояния пружины при L_1, L_2 в зависимости от высоты в свободном состоянии, с учетом осадки, было проведено конечно-элементное моделирование в ANSYS (лицензия — номер пользователя 607281). Модуль Static Structural, модель пружины — балка (Line Body) с сечением пользователя (Cross Section) соответствующим сечению ленты Г-ЗП-ВТ-ВШ-0,8x1,3 ГОСТ 21997-76, модель материала — упругое состояние.

Параметры пружины без осадки:

– наружный диаметр, $D_2 = 11,1$ мм;

– количество рабочих витков, $n_{\text{раб}} = 26,5$;

– количество опорных витков, $n_{\text{оп}} = 1,5$;

– высота в свободном состоянии, $L_0 = 155,8$ мм.

Результаты моделирования и соответствующие значения максимальных напряжений для условий циклического нагружения по синусоидальному закону приведены в табл. 2.

Полученные значения напряжений $\sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{min}}$ значительно выше полученного при испытаниях на растяжение σ_b , что позволяет сделать заключение о влиянии напряженно-деформированного состояния материала на процесс нагружения [8].

Характер распределения остаточных напряжений в пружине после операции заневоливания аналогичен состоянию «автоскрепление» при изготовлении высоконагруженных стволов стрелково-пушечного вооружения т.е. в наиболее нагруженной зоне пружины (внутренняя поверхность витка) формируются сжимающие остаточные напряжения благоприятно влияющие на эксплуатационные характеристики [9].

Таблица 1

Осадка опытной пружины

Кол-во циклов	300 (п. 9)	500	1000	2000 (п. 11)
Осадка, мм	3	4	6	10

Результаты конечно-элементного моделирования циклического нагружения

Кол-во циклов	0	300 (п. 9)	500	1000	2000 (п. 11)
$\sigma_{\text{экв}}$, при L_1 (σ_{min}), МПа	2000	1929	1892	1849	1775
$\sigma_{\text{экв}}$, при L_2 (σ_{max}), МПа	3070	2991	2963	2911	2804
σ_m , МПа	2535	2460	2427	2380	2289
σ_a , МПа	535	531	535,5	531	514,5
R_m	0,65	0,645	0,64	0,63	0,63

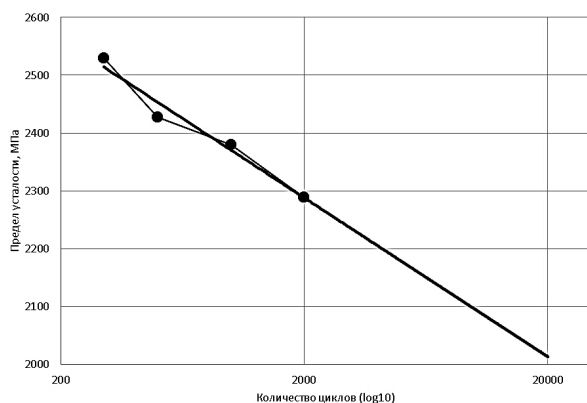


Рис. 3. Диаграмма выносливости

Исходя из предположения линейного характера зависимости предела выносливости от количества циклов (\log_{10}) и с учетом справочных данных для стали У10 [10] методом наименьших квадратов было получено для малоциклового усталости (2×10^5) уравнение регрессии (коэффициент детерминации $R^2 = 0,9659$):

$$\sigma_r = -274,76 \cdot \log(N) + 3194,7.$$

Соответствующая диаграмма выносливости от количества циклов (\log_{10}) приведена на рис. 3

Для сопоставления полученных результатов и проводимых на АО «ИМЗ» контрольных испытаний «на вибрацию» целесообразно испытать партии опытных пружин на предприятии с регистрацией изменения осадки и значений усилий при l_1/l_2 от количества циклов нагружения, что может быть положено в основу методики циклических динамических испытаний упругих элементов оружия.

Заключение

Комплексное конструкторско-технологическое исследование, проведенные совместно с

АО «ИМЗ», позволили разработать конструкцию опытной пружины отличающуюся повышенными эксплуатационными характеристиками. Проведенные статические и динамические циклические испытания подтвердили правильность теоретических положений.

В результате динамических циклических испытаний с использованием разработанного и изготовленного испытательного оборудования были получены экспериментальные данные по осадке. Проведенное конечно-элементное моделирование позволило определить напряженное состояние и построить диаграмму предела усталости. Различие предела выносливости и значений максимальных напряжений выявило влияние внутренних остаточных напряжений, напряженно-деформированное состояние пружин и их распределение по аналогии с «автоскреплением» для стволов стрелково-пушечного вооружения. Является целесообразным проведение циклических испытаний опытных пружин в соответствии с требованиями чертежа возвратной пружины ПЯ, их сопоставление с полученными результатами, что может быть положено в основу методики циклических динамических испытаний упругих элементов оружия.

Литература

- ГОСТ 13764-86. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Классификация. — М.: Стандартинформ, 2007. 7 с.
- ГОСТ 14963-78. Проволока стальная легированная пружинная. Технические условия. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 26 с.
- ГОСТ 25.507-85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы

испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования. 199 с.

4. Конструирование и технология изготовления пружин. Межвузовский сборник научных трудов. — Устинов: УМИ, 1986. 180 с.

5. Исследование конструкции, технологических возможностей повышения надежности возвратной пружины пистолета Ярыгина: отчет о НИР. ИжГТУ им. М.Т. Калашникова; рук. Скворцов А.Н.; исполн.: Чирков Д.В., Домбрачев А.Н., Ломаева Т.В. и др. — Ижевск, 2020. 60 с.

6. Патент РФ № 2705918/06.05.2019. Скворцов А.Н. Способ динамических испытаний винтовых пружин сжатия и устройство для его осуществления. Опубликовано 12.11.2019. Бюл. № 32.

7. Чирков Д.В., Федорова Е.А. Использование высокоскоростной видеосъемки при проведении испытаний стрелкового оружия. — Ижевск: Из-во УИР ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2022. 132 с.

8. Землянушнова Н.Ю. Расчет винтовых цилиндрических пружин сжатия при контактном закреплении. — Ставрополь: АГРУС, 2008. 136 с.

9. Технологические остаточные напряжения. Под ред. А.В. Подзее. — М.: Машиностроение, 1973. 216 с.

10. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. Справочник. — М.: Metallurgy, 1978. 304 с.

References

1. GOST 13764-86. Cylindrical helical compression and tension springs made of round-

section steel. Classification. — М.: Standartinform, 2007. 7 p.

2. GOST 14963-78. Alloy steel spring wire. Technical conditions. — М.: ИПК Publishing House of Standards, 2003. 26 p.

3. GOST 25.507-85. Calculations and strength tests in mechanical engineering. Methods of fatigue testing under operational loading conditions. General requirements. 199 p.

4. Design and manufacturing technology of springs. Interuniversity collection of scientific papers. — Ustinov: UMI, 1986. 180 p.

5. Study of the design, technological possibilities for improving the reliability of the return spring of the Yarygin pistol: a report on research. IzhGTU named after M.T. Kalashnikov; hands Skvortsov A.N.; performer: Chirkov D.V., Dombachev A.N., Lomaeva T.V. and others. — Izhevsk, 2020. 60 p.

6. Patent of the Russian Federation No. 2705918/06.05.2019. Skvortsov A.N. Method for dynamic testing of helical compression springs and device for its implementation. Published on 11/12/2019. Bull. No. 32.

7. Chirkov D.V., Fedorova E.A. The use of high-speed video filming when testing small arms. — Izhevsk: IzhGTU named after M.T. Kalashnikov, 2022. 132 p.

8. Zemlyanushnova N.Yu. Calculation of helical cylindrical compression springs with contact captivity. Stavropol: AGRUS, 2008. 136 p.

9. Technological residual stresses. Ed. A.V. Podzeya. — М.: Mashinostroenie, 1973. 216 p.

10. Shkolnik L.M. Fatigue testing technique. Directory. — М.: Metallurgy, 1978. 304 p.