

УДК 621.7.015

Механико-математическая оценка влияния механических свойств проволоки на износостойкость винтовых цилиндрических пружин сжатия

Н.А. Землянушнов, Н.Ю. Землянушнова

Северо-Кавказский федеральный университет,
ул. Пушкина, 1, г. Ставрополь 355017, Россия

Поступила в редакцию 17.03.2025.

Распространенным дефектом пружин является уменьшение их износостойкости вследствие изменения механических свойств проволоки по длине, в частности величины предела текучести, в том числе при трении в процессе эксплуатации пружины. По представленной математической модели напряженно-деформированного состояния пружины исследовано влияние изменения предела текучести проволоки на износостойкость пружины при контактном заневоливании. Построен график зависимости остаточной деформации пружины от предела текучести её материала для разных диаметров проволоки. Рассеивание значений предела текучести пружинной проволоки в мотке согласно ГОСТ 9389 «Проволока стальная углеродистая пружинная» может составлять до 200—250 МПа. Установлено, что при этом рассеивание деформации изготовленных пружин составит 11,76 % и превысит допустимые значения. Для пружин первой группы точности допустимые отклонения на рассеивание деформации $\pm 5\%$, для пружин второй группы точности — $\pm 10\%$. Получен график влияния изменения предела текучести проволоки по длине на рассеивание деформации пружины для нагрузки $140F_3$ (F_3 — сила сжатия пружины до соприкосновения витков). Используя представленную методику и учитывая рассеивание деформации пружины в зависимости от изменения предела текучести проволоки по длине, в том числе вследствие трения при эксплуатации, можно значительно уменьшить процент брака при изготовлении и повысить износостойкость винтовых цилиндрических пружин сжатия.

Ключевые слова: износостойкость, механические свойства, винтовая пружина, напряжённо-деформированное состояние, упрочнение, контактное заневоливание, трение, деформация, рассеивание.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-270-279

Адрес для переписки:

Н.А. Землянушнов
Северо-Кавказский федеральный университет,
ул. Пушкина, 1, г. Ставрополь, 355017, Россия
e-mail: nikita3535@mail.ru

Для цитирования:

Н.А. Землянушнов, Н.Ю. Землянушнова.
Механико-математическая оценка влияния механических свойств проволоки на износостойкость винтовых цилиндрических пружин сжатия.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 3. — С. 270—279.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-270-279

Address for correspondence:

N.A. Zemlyanushnov
North Caucasus Federal University,
Pushkin Street, 1, Stavropol 355017, Russia
e-mail: nikita3535@mail.ru

For citation:

N.A. Zemlyanushnov and N.Y. Zemlyanushnova.
[Mechanical and Mathematical Evaluation of Wire Mechanical Properties Influence on Helical Cylindrical Compression Springs Wear Resistance].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 3, pp. 270—279 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-270-279

Mechanical and Mathematical Evaluation of Wire Mechanical Properties Influence on Helical Cylindrical Compression Springs Wear Resistance

N.A. Zemlyanushnov and N.Y. Zemlyanushnova

North Caucasus Federal University,
Pushkin Street, 1, Stavropol 355017, Russia

Received 17.03.2025.

Abstract

A common defect of springs is a decrease in their wear resistance due to changes in the mechanical properties of the wire along its length, particularly the yield strength, including during friction during operation of the spring. According to the springs stress-strain state presented mathematical model, the wire yield strength changes effect on springs wear resistance during contact hardening is investigated. The residual springs deformation dependence graph on the yield strength of its material for different wire diameters is constructed. Dispersion of the spring wire yield strength in the coil according to state standards 9389 “Carbon steel spring wire” can be up to 200—250 MPa. It is established that in this case, the manufactured springs deformation dispersion will amount to 11.76 % and exceed the permissible values. For first precision group springs, the permissible deviations for deformation dispersion are $\pm 5\%$, for second precision group springs — $\pm 10\%$. The wire change in the yield strength effect graph along the length on the dispersion of spring deformation for a load of $140F_3$ (F_3 is spring compression force when coils come into contact) is constructed. Using the presented technique and taking into account the dispersion of spring deformation depending on the change in the wire along the length yield strength, including due to friction during operation, it is possible to significantly reduce the percentage of defects in the manufacture and increase helical cylindrical compression springs wear resistance.

Keywords: wear resistance, mechanical properties, helical spring, stress-strain state, hardening, contact hardening, friction, deformation, dispersion.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-270-279

Адрес для переписки:

Н.А. Землянушнов
Северо-Кавказский федеральный университет,
ул. Пушкина, 1, г. Ставрополь, 355017, Россия
e-mail: nikita3535@mail.ru

Для цитирования:

Н.А. Землянушнов, Н.Ю. Землянушнова.
Механико-математическая оценка влияния механических свойств проволоки на износостойкость винтовых цилиндрических пружин сжатия.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 3. — С. 270–279.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-270-279

Address for correspondence:

N.A. Zemlyanushnov
North Caucasus Federal University,
Pushkin Street, 1, Stavropol 355017, Russia
e-mail: nikita3535@mail.ru

For citation:

N.A. Zemlyanushnov and N.Y. Zemlyanushnova.
[Mechanical and Mathematical Evaluation of Wire Mechanical Properties Influence on Helical Cylindrical Compression Springs Wear Resistance].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 3, pp. 270–279 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-270-279

Список использованных источников

1. **Ali Yetgin, Aptullah Karakaş, Bülent Acar, and Emre Özasan.** Failure Analysis of a Helical Compression Spring with Relatively Low Spring Index // *Engineering Failure Analysis*. — 2024 (165), 108798. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108798>
2. **Cabal Miguel Rodriguez, Noreña Luis Grisales, Montoya Oscar Danilo, Hincapie Diego, and Caicedo Brandon Cortes.** Optimal Design of Helical Springs Using Metaheuristic Techniques // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. — 2024, no. 11, 2595—2605. <https://doi.org/10.18280/mmep.111001>
3. **Eren Arslan and Kenan Genel.** Failure analysis of automotive helical spring // *Engineering Failure Analysis*. — 2023 (153), 107569. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107569>
4. **Estela Ruiz, Diego Ferreño, Miguel Cuartas, Borja Arroyo, Isidro A. Carrascal, Isaac Rivas, and Federico Gutiérrez-Solana.** Application of Machine Learning Algorithms for the Optimization of the Fabrication Process of Steel Springs to Improve Their Fatigue Performance // *International Journal of Fatigue*. — 2022 (159), 106785. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106785>
5. **Hans Bounghomba, Philippe Moreau, Tarik Sadat, Lola Lilensten, Mirentxu Dubar, and Laurent Dubar.** Investigation of the Impact of AISI D2 Tool Steel Wear and Lubrication Type on the Evolution of the Friction Coefficient During Cold Winding Process // *Wear*. — 2024 (542–543), 205272. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205272>
6. **Li Lei, Qiufa Xu, Haiying Yang, Yang Ying, Zuhao Cao, Dizi Guo, and Vincent Ji.** Design and Rate Control of Large Titanium Alloy Springs for Aerospace Applications // *Aerospace*. — 2024 (11), 514. <https://doi.org/10.3390/aerospace11070514>
7. **Янь Ч., Ли С., Жавнер М.В.** Способ и устройство для определения внутреннего трения пружинного аккумулятора // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. — 2024 (26), 40—46. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-26-40-46. EDN: GUJZGV
8. **Белков Е.Г.** Технология изготовления и упрочнения пружин: монография. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. — 2013. ISBN: 978-5-696-04466-8. EDN: RSSWPS
9. **Jingwen Hu, Xun Chen, and Yashun Wang.** Stress Relaxation Mechanism and Life Evaluation of Titanium Alloy Springs under Long-Term Thermo-Mechanical Coupling Conditions // *Materials Today Communications*. — 2024 (38), 108472. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108472>
10. **Yang Liu, Zefeng Wen, Xingwen Wu, Bo Peng, Yabo Zhou, Gongquan Tao.** Investigation of Fatigue Durability and Influencing Factors of Coil Springs: A Case Study for Metro Vehicles // *International Journal of Fatigue*. — 2024 (187), 108469.

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108469>

11. **Кухарь В.Д., Коротков В.А., Яковлев С.С. [и др.]** Экспериментальное исследование процесса рифления локальным пластическим деформированием // *Вестник машиностроения*. — 2024 (103), № 1, 55—57. DOI: 10.36652/0042-4633-2024-103-1-55-57. EDN: ZMNHZM
12. **Bo Xia, Bin Wang, Peng Zhang, Chuanxi Ren, Qiqiang Duan, Xiaowu Li, and Zhefeng Zhang.** Improving the High-Cycle Fatigue Life of a High-Strength Spring Steel for Automobiles by Suitable Shot Peening and Heat Treatment // *International Journal of Fatigue*. — 2022 (161), 106891. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106891>
13. **Землянушнова Н.Ю.** Расчёт винтовых цилиндрических пружин сжатия при контактном заневоливании: монография — Ставрополь: АГРУС. — 2008. EDN: POKLYF
14. **Землянушнов Н.А., Землянушнова Н.Ю.** К повышению износостойкости винтовых цилиндрических пружин сжатия, работающих с контактом витков // *Трение и износ*. — 2024 (45), № 3, 237—245. DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-3-237-245. EDN: EFLTUE
15. **Пономарёв С.Д., Андреева Л.Е.** Расчёт упругих элементов машин и приборов. — М.: Машиностроение. — 1980

References

1. **Ali Yetgin, Aptullah Karakaş, Bülent Acar, and Emre Özasan.** Failure Analysis of a Helical Compression Spring with Relatively Low Spring Index // *Engineering Failure Analysis*. — 2024 (165), 108798. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108798>
2. **Cabal Miguel Rodriguez, Noreña Luis Grisales, Montoya Oscar Danilo, Hincapie Diego, and Caicedo Brandon Cortes.** Optimal Design of Helical Springs Using Metaheuristic Techniques // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. — 2024, no. 11, 2595—2605. <https://doi.org/10.18280/mmep.111001>
3. **Eren Arslan and Kenan Genel.** Failure analysis of automotive helical spring // *Engineering Failure Analysis*. — 2023 (153), 107569. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107569>
4. **Estela Ruiz, Diego Ferreño, Miguel Cuartas, Borja Arroyo, Isidro A. Carrascal, Isaac Rivas, and Federico Gutiérrez-Solana.** Application of Machine Learning Algorithms for the Optimization of the Fabrication Process of Steel Springs to Improve Their Fatigue Performance // *International Journal of Fatigue*. — 2022 (159), 106785. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106785>
5. **Hans Bounghomba, Philippe Moreau, Tarik Sadat, Lola Lilensten, Mirentxu Dubar, and Laurent Dubar.** Investigation of the Impact of AISI D2 Tool Steel Wear and Lubrication Type on the Evolution of the Friction Coefficient During Cold Winding Process // *Wear*. — 2024 (542–543), 205272.

- <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205272>
6. **Li Lei, Qiufa Xu, Haiying Yang, Yang Ying, Zuhao Cao, Dizi Guo, and Vincent Ji.** Design and Rate Control of Large Titanium Alloy Springs for Aerospace Applications // *Aerospace*. — 2024 (11), 514. <https://doi.org/10.3390/aerospace11070514>
 7. **Yan Ch., Li S., Zhavner M.V.** Method and apparatus for determining the internal friction of a spring accumulator // *Transport, mining and construction engineering: science and production*. — 2024 (26), 40—46. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-40-46> (in Russian)
 8. **Belkov E.G.** *Texnologiya izgotovleniya i uprochneniya pruzhin. Monografiya (Technology of manufacturing and hardening of springs: monograph)*. — Chelyabinsk: SUSU Publishing Center. — 2013. <https://www.elibrary.ru/rsswps>
 9. **Jingwen Hu, Xun Chen, and Yashun Wang.** Stress Relaxation Mechanism and Life Evaluation of Titanium Alloy Springs under Long-Term Thermo-Mechanical Coupling Conditions // *Materials Today Communications*. — 2024 (38), 108472. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108472>
 10. **Yang Liu, Zefeng Wen, Xingwen Wu, Bo Peng, Yabo Zhou, Gongquan Tao.** Investigation of Fatigue Durability and Influencing Factors of Coil Springs: A Case Study for Metro Vehicles // *International Journal of Fatigue*. — 2024 (187), 108469. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108469>
 11. **Kukhar V.D., Korotkov V.A., Yakovlev S.S. et al.** Corrugation by Local Plastic Deformation // *Russian Engineering Research*. — 2024 (44), 343—345. <https://doi.org/10.3103/S1068798X2470031X>
 12. **Bo Xia, Bin Wang, Peng Zhang, Chuanxi Ren, Qiqiang Duan, Xiaowu Li, and Zhefeng Zhang.** Improving the High-Cycle Fatigue Life of a High-Strength Spring Steel for Automobiles by Suitable Shot Peening and Heat Treatment // *International Journal of Fatigue*. — 2022 (161), 106891. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106891>
 13. **Zemlyanushnova N.Y.** *Raschyot vintovyx cilindricheskix pruzhin szhatiya pri kontaktnom zanevolivanii. Monografiya (Calculation of helical cylindrical compression springs during contact drilling: monograph)*. — Stavropol: AGRUS. — 2008. <https://www.elibrary.ru/poklyf> (in Russian)
 14. **Zemlyanushnov N.A. and Zemlyanushnova N.Y.** To Increase Wear Resistance of Screw Cylindrical Compression Springs Working with Coil Contacts // *J. Frict. Wear*. — 2024 (45), 160—166. <https://doi.org/10.3103/S1068366624700247>
 15. **Ponomarev S.D., Andreeva L.E.** *Raschyot uprugix elementov mashin i priborov (Calculation of elastic elements of machines and devices)*. — Moscow: Mashinostroenie. — 1980 (in Russian)

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.

Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Full text of articles can be purchased from the editorial office.

Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: FWJ@tut.by