

Оригинальное исследование

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-632289>

EDN: VIQZDR



Неразрушающий контроль состояния винтовой цилиндрической пружины сжатия

Р.В. Павлюк, А.В. Захарин, П.А. Лебедев

Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При эксплуатации пружин происходит их циклическое нагружение «сжатие-растяжение», в результате которого наступает постепенное снижение упругих свойств и работоспособности, образуются микротрещины, и происходит разрушение пружин. Причем, если это пружины клапанного механизма ДВС, то они подвергаются нагреву, что усиливает процессы потери упругости и разрушения. На практике контроль пружины зачастую сводится к её внешнему осмотру, оценке геометрических параметров и динамическому испытанию. Последнее требует наличия дорогостоящего оборудования и продолжительного времени на само испытание.

Цель исследований — совершенствование метода неразрушающего контроля для определения состояния винтовой цилиндрической пружины посредством нового технического решения на уровне патентоспособности.

Методы. Наличие микротрещин и их рост в ходе циклического нагружения приводит к изменению микроформы поперечного сечения витка пружины, что влияет на электротехнические свойства, в частности, на её электрическое сопротивление. Поэтому оценка работоспособности пружины сводится к определению числа и объёма микротрещин. Измерение микрогеометрии пружины может быть достигнуто при помощи высокочувствительного микроомметра с ценой деления не менее 10^{-6} Ом. В рабочих витках пружины, особенно на «внутреннем волокне витков» [12], возникают наибольшие касательные напряжения в процессе её работы. Следовательно, внутреннее волокно рабочих витков пружины более подвержено образованию микротрещин.

Результаты. Для реализации предлагаемого неразрушающего контроля состояния винтовой цилиндрической пружины необходимо устройство, включающее микроомметр-измеритель и силовую конструкцию механического типа для её растяжения и сжатия. Контроль на растяжение и сжатие пружины осуществляется динамометром. Клеммы от микроомметра для измерения сопротивления закрепляются на испытуемых витках пружины. Определение величины сопротивления новой пружины и последующий контроль в процессе эксплуатации позволит выявлять неисправный элемент на более ранней стадии и установить целесообразность восстановления пружины.

Заключение. Предложенное техническое решение упрощает проведение контроля состояния всей пружины без её разрушения, снижает время контроля её состояния в целом, уменьшает энергоёмкость данного процесса.

Ключевые слова: пружина; неразрушающий контроль; сопротивление; устройство; микротрещины; упругость; циклическое нагружение.

Как цитировать:

Павлюк Р.В., Захарин А.В., Лебедев П.А. Неразрушающий контроль состояния винтовой цилиндрической пружины сжатия // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 2. С. 116–121. DOI: 10.17816/0321-4443-632289 EDN: VIQZDR

Original Study Article

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-632289>

EDN: VIQZDR

Non-destructive Inspection of the State of a Helical Cylindrical Compression Spring

Roman V. Pavlyuk, Anton V. Zakharin, Pavel A. Lebedev

Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: When springs are used, they undergo “compression-decompression” cyclic loading, resulting in a gradual decrease in elastic properties and performance, formation of microcracks, and the springs destruction. Moreover, if these are the springs of the valve mechanism of the internal combustion engine, then they are subject to heating, which intensifies the processes of loss of elasticity and destruction. In practice, spring control often comes down to its external inspection, assessment of geometric parameters and dynamic testing. The latter requires expensive equipment and a long period for the test itself.

AIM: Improvement of the non-destructive inspection method for determining the state of a coil spring using a new technical solution at the level of patentability.

METHODS: The presence of microcracks and their growth during cyclic loading leads to a change in the microshape of the cross-section of the spring coil, which affects the electrical properties, in particular, its electrical resistance. Therefore, assessing the performance of a spring comes down to determining the number and volume of microcracks. Measuring the microgeometry of the spring can be achieved using a highly sensitive microohmmeter with a division value of at least 10^{-6} Ohms. In the working coils of the spring, especially on the “inner fiber of the coils” [1], the greatest tangential stresses arise during its operation. Consequently, the inner fiber of the working coils of the spring is more susceptible to the formation of microcracks.

RESULTS: To implement the proposed non-destructive inspection of the state of a helical coil spring, a device, including a microohmmeter and a mechanical type power structure for its tension and compression, is required. The tension and compression of the spring is monitored using a dynamometer. The terminals from the microohmmeter for measuring resistance are fixed on the spring coils under test. Determining the resistance value of a new spring and subsequent monitoring during operation will make it possible to identify a faulty element at an earlier stage and to determine the feasibility of restoring the spring.

CONCLUSION: The proposed technical solution simplifies monitoring the state of the entire spring without destroying it, reduces the time for monitoring its state as a whole, and reduces the energy intensity of this process.

Keywords: spring; non-destructive inspection; resistance; device; microcracks; elasticity; cyclic loading.

To cite this article:

Pavlyuk RV, Zakharin AV, Lebedev PA. Non-destructive Inspection of the State of a Helical Cylindrical Compression Spring. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(2):116–121. DOI: 10.17816/0321-4443-632289 EDN: VIQZDR

Submitted: 20.05.2024

Accepted: 22.03.2025

Published online: 12.04.2025

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении широко распространены различные узлы и механизмы, в которых рабочим элементом является винтовая пружина. В основном это цилиндрические пружины сжатия.

При эксплуатации пружин происходит их циклическое нагружение «сжатие-растяжение», в результате которого наступает постепенное снижение упругих свойств и работоспособности, образуются микротрещины, и происходит разрушение пружин [1–5]. Причем, если это пружины клапанного механизма ДВС, то они подвергаются нагреву, что усиливает процессы потери упругости и разрушения, т.е. после определенного количества циклов работы пружины необходимо проконтролировать её упругие свойства, работоспособность и наличие опасных микротрещин.

На практике контроль пружины зачастую сводится к её — внешнему осмотру, оценке геометрических параметров и динамическому испытанию. Последнее требует наличия дорогостоящего оборудования и продолжительного времени на само испытание.

Выделяют два основных признака потери работоспособности пружины: разрушение одного из витков и деформирование пружины (осадка) [6, 7]. Обнаружение первого признака происходит в основном визуально и дальнейшая эксплуатация пружины невозможна. Вторым признаком возникает по причине появления пластических деформаций и микротрещин в материале пружины и требует для его выявления наличия специализированного оборудования. Пружина при этом дефекте может быть восстановлена на некоторый период времени посредством растяжения и последующего контактного заневоливания [8–10], если число микротрещин небольшое.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Совершенствование метода неразрушающего контроля для определения состояния винтовой цилиндрической пружины посредством нового технического решения на уровне патентоспособности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наличие микротрещин и их рост в ходе циклического нагружения приводит к изменению микроформы поперечного сечения витка пружины, что влияет на электротехнические свойства пружины, в частности, на её электрическое сопротивление.

Поэтому определение работоспособности пружины сводится к определению числа и объема микротрещин.

Измерение микрогеометрии пружины может быть проведено при помощи высокочувствительного микрометра с ценой деления не менее 10^{-6} Ом.

Пружина состоит из трёх частей — верхней и нижней опорных неподвижных и средней рабочей подвижной.

Опорные части выполнены из клинообразно отшлифованного витка с меньшим или нулевым шагом для лучшего контактирования пружины с рабочей плоской частью опоры. В опорной части пружины возникают, в основном, местные контактные напряжения, т.е. данная часть практически не работает, и её можно исключить из исследований по изменению сопротивления.

В рабочих витках пружины, особенно на «внутреннем волокне витков» [12], возникают наибольшие касательные напряжения в процессе ее работы. Следовательно, внутреннее волокно рабочих витков пружины более подвержено образованию микротрещин.

Так если при осадке пружины количество микротрещин минимально, то изменение сопротивления по виткам не будет обнаружено и целесообразно ее восстановить различными технологиями и эксплуатировать далее. При обнаружении значительного изменения сопротивления по виткам можно судить о наличии большого количества микротрещин и ее восстановление будет не рационально даже при минимальной осадке и визуальной целостности витков [11].

Для реализации данного метода необходимо провести измерения электрического сопротивления в рабочих витках новой пружины в ненапряженном состоянии, при растяжении и сжатии. В ходе измерений устанавливается величина сопротивления пружины, и она должна быть постоянна при всех силовых воздействиях. Это говорит о целостности витков пружины и отсутствии в них микротрещин. Затем измеряется изношенная пружина, и сравниваются полученные значения, по которым можно судить о ее качестве и пригодности к восстановлению. Также изменение значений сопротивления изношенной пружины в ненагруженном состоянии и при растяжении и сжатии напрямую указывает об ее износе. Указанная процедура является методом интегрального неразрушающего контроля технического состояния пружины. Для более точного определения значений следует проводить трехкратное измерение сопротивления пружины. Анализ состояния пружины можно делать как всей в целом, так и каждого витка в отдельности, что позволит дифференцировать значения сопротивления и узнать место концентрации и развития микротрещин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для реализации предлагаемого метода неразрушающего контроля состояния винтовой цилиндрической пружины необходимо устройство, включающее микроомметр-измеритель и силовую конструкцию механического типа для её растяжения и сжатия [13].

Силовая конструкция состоит из рамы 7, включающей в себя горизонтальную опорную плиту 8, на которой жёстко закреплены вертикальные стойки 9 и 10 и два симметрично поперечных элемента — верхний 11 и средний 12, между которыми закрепляется испытываемая пружина 1.

Данные элементы выполнены с возможностью перемещения вдоль оси вертикальных стоек для фиксации и сжатия-растяжения разных типоразмеров пружин. Элементы разделяют раму на верхнюю и нижнюю части (рис. 1).

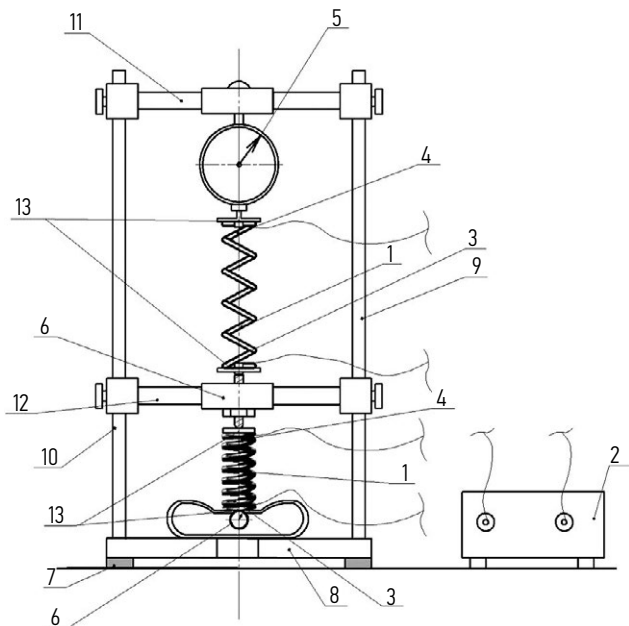


Рис. 1. Схема устройства для неразрушающего контроля состояния винтовой цилиндрической пружины: 1 — цилиндрическая пружина; 2 — микроомметр; 3 и 4 — клеммы; 5 — динамометр на растяжение; 6 — динамометр на сжатие; 7 — рама; 8 — опорная плита; 9 и 10 — вертикальные стойки; 11 — верхний поперечный элемент; 12 — средний поперечный элемент; 13 — диэлектрические прокладки.

Fig. 1. Scheme of a device for non-destructive inspection of the state of a helical coil spring: 1: cylindrical spring; 2: microohmmeter; 3 and 4: terminals; 5: tensile dynamometer; 6: compression dynamometer; 7: frame; 8: base plate; 9 and 10: vertical racks; 11: upper transverse element; 12: middle transverse element; 13: dielectric spacers.

Контроль на растяжение пружины осуществляется динамометром 5, закреплённым в верхней части, а на сжатие динамометром 6, соответственно, в нижней части.

Причём между поперечными элементами и основанием рамы установлены диэлектрические прокладки 13, которые выполнены с учетом возможности их временного закрепления на опорных витках испытуемой пружины. Клеммы от микроомметра для измерения сопротивления закрепляются на испытуемых витках пружины.

Измерение электрического сопротивления в пружине осуществляется следующим образом. Сначала замеры проводят в ненагруженном состоянии пружины, полученному значению сопротивления присваивается значение R_1 . Затем пружину растягивают статически прикладываемой нагрузкой P в разработанном устройстве и получают значение R_2 . Далее пружину статически сжимают такой же, как и при растяжении прикладываемой нагрузкой P и определяют значение сопротивления R_3 .

После замеров, полученных трех значений сопротивлений, происходит их сравнение. В случае если все три значения сопротивления приблизительно равны $R_1 \sim R_2 \sim R_3$, то можно судить о целостности пружины и отсутствии микротрещин, что определяет ее дальнейшее восстановление или использование. Но при получении значений существенно отличающихся друг от друга $R_1 \neq R_2$ или $R_1 \neq R_3$, можно судить об износе пружины и наличии микротрещин, следовательно, о её непригодности для восстановления и эксплуатации в механизмах.

Кроме того, анализируя данные показатели, можно судить о степени износа пружины λ_p , которая оценивается выражениями $\lambda_p = R_2 - R_1$ или $\lambda_c = R_3 - R_1$. В ходе эксплуатации пружины величина представленных выражений будет только возрастать, и свидетельствовать об износе и разрастании микротрещин.

Для подтверждения предлагаемого метода неразрушающего контроля состояния винтовой цилиндрической пружины проведем эксперимент. Использовать будем пружины клапана марки 240-1007046-A5 двух дизельных двигателей Д-240 с различной наработкой 2000 и 6500 мото-часов, а также одну новую пружину, как эталон (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что после определенной наработки высота пружин разная. Это подтверждает усадку пружин и её возможные повреждения после определённого числа циклов срабатывания.

Статически прикладываемую нагрузку P на сжатие и растяжение возьмём равной величине сжатия внутренних клапанных пружин до рабочей высоты, которая составляет 74 Н. Следует отметить, что данный параметр выбирается для каждой марки пружины индивидуально и согласно паспортным значениям.

Измерим сопротивление новой эталонной пружины мультиметром без учёта сопротивления его проводов.

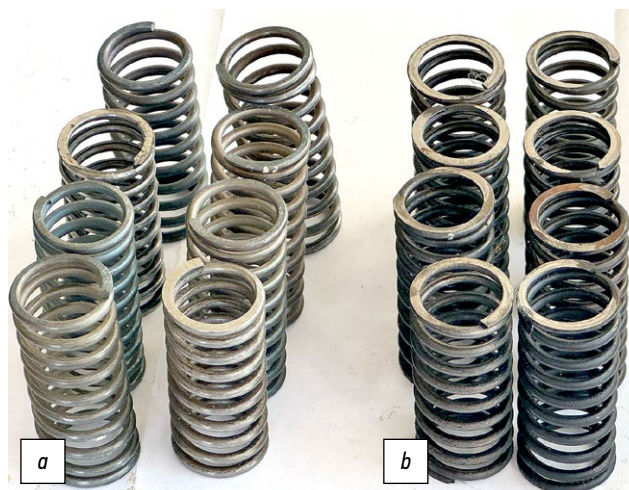


Рис. 2. Пружины клапана внутренние 240-1007046-A5: а — наработка 2000 мото-часов; б — наработка 6500 мото-часов.

Fig. 2. The 240-1007046-A5 internal valve springs: a: after 2000 running hours; b: after 6500 running hours.

При выбранной шкале 200 Ω отображаемое значение составляет 0.9 Ом (рис. 3). Далее измерим все исследуемые пружины без нагрузки, затем при сжатии и растяжении.



Рис. 3. Значение мультиметра.

Fig. 3. Measured value at the multimeter.

В ходе эксперимента установлено, что все пружины с наработкой 2000 мото-часов имели такое же значение сопротивления, как и у новой пружины независимо от прикладываемой нагрузки P на сжатие и растяжение. Исходя из этого можно судить об отсутствии в данных пружинах микротрещин.

В четырех пружинах с наработкой 6500 мото-часов значение сопротивления без нагрузки составило 1.4 Ом. При растяжении данный параметр у них составил 1.8 Ом, а при сжатии 1.5 Ом, соответственно, что свидетельствует об образовании микротрещин. Поэтому восстановление таких нецелесообразно.

У оставшихся четырёх пружин с наработкой 6500 мото-часов значение сопротивления без нагрузки составило 0.9 Ом, а при нагрузке на сжатие и растяжение 1.0–1.1 Ом, что указывает на только возникающие микротрещины. Дальнейшее восстановление таких пружин тоже нежелательно.

В ходе эксперимента подтверждено, что определение величины сопротивления новой пружины и последующий контроль в процессе эксплуатации позволит выявлять неисправный элемент на более ранней стадии и установить целесообразность восстановления пружины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенное техническое решение упрощает проведение контроля состояния всей пружины без её разрушения, снижает время контроля ее состояния в целом, уменьшает энергоёмкость данного процесса.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Р.В. Павлюк — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии; А.В. Захарин — редактирование текста рукописи; П.А. Лебедев — редактирование текста рукописи, создание изображений. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один внешний рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution: R.V. Pavlyuk: search for publications, writing the text of the manuscript, expert opinion, approval of the final version; A.V. Zakharin: editing the text of the manuscript; P.A. Lebedev: editing the text of the manuscript, creating images. Thereby, all authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or non-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: When creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing is not applicable to this work, and no new data has been collected or created.

Generative AI: Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review: This work was submitted to the journal on its own initiative and reviewed according to the usual procedure. One external reviewer, a member of the editorial board and the scientific editor of the publication participated in the review.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Vodolazskaya NV. Improving the maintenance and repair system by increasing the reliability of the repair equipment used. In: *Problems and prospects for the innovative development of agricultural technologies*. Belgorod: Belgorod State Agrarian University; 2016;2:21–22. (In Russ.) EDN: WEEFRR
2. Vodolazskaya NV, Minasyan AG, Sharaya OA. On the issue of increasing the operational reliability of some types of industrial equipment. *News of the Donbass State Machine-Building Academy*. 2017;1(40):48–53. (In Russ.) EDN: ZJJXFN
3. Vodolazskaya NV, Strebkov SV. *Reliability and operation of technical systems*. Belgorod: Belgorod State Agrarian University; 2017. (In Russ.) EDN: ZUSNZX
4. Vodolazskaya NV. *Technical systems: today and tomorrow*. Donetsk: DonNTU; 2008. (In Russ.) EDN: USYISL
5. Vodolazskaya N. Types and ways of modernization in a context of the international experience. *Virtual Economics*. 2019;2(2-1):81–93. doi: 10.34021/ve.2019.02.01 EDN: ZIJJQT
6. Zemlyanushnova NYu, Lebedev AT, Pavlyuk RV, Doronina NP. *Fundamentals of production and repair of transport and transport-technological machines and equipment*. Stavropol; 2014. (In Russ.) EDN: SOEYSL
7. Znamensky DV, Zemlyanushnova NYu, Fadeev VV. Study of changes in the characteristics of valve springs during operation. *Bulletin of the AIC of Stavropol*. 2014;(2):43–47. (In Russ.) EDN: QMHFHM
8. Zemlyanushnova NYu, Zemlyanushnov NA, Znamensky DV. Method and device for strengthening helical cylindrical compression springs. *Collection of scientific papers world*. 2014;8(1):3–7. (In Russ.) EDN: RZFACF
9. Zemlyanushnova NY, Tebenko YuM, Zemlyanushnov NA. *Restoration of helical cylindrical compression springs*. Stavropol: AGRUS; 2012. (In Russ.) EDN: POKYSD
10. Mkrutumyan VS. Study of the operation of valve springs and the development of a rational method for their restoration [dissertation] Moscow; 1958. (In Russ.)
11. Lebedev AT. *Resource-saving directions for increasing the reliability and efficiency of technological processes in the agro-industrial complex*. Stavropol; 2012. (In Russ.) EDN: PFKQAD
12. Ponomarev SD. Springs, their calculation and design. Moscow: MASHGIZ; 1954. (In Russ.)
13. Patent RUS 2680659 / 25.02.2019. Bull. 6. Lebedev AT, Ochinsky VV, Zakharin AV. Integral electrical method for non-destructive testing of the state of a helical coil spring and a device for its implementation. (In Russ.) EDN: MKDXVC

ОБ АВТОРАХ

* Павлюк Роман Владимирович,

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Технический сервис, стандартизация и метрология»;
адрес: Россия, 355035, Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12;
ORCID: 0000-0002-2739-0200;
eLibrary SPIN: 5892-3171;
e-mail: roman_pavlyuk_v@mail.ru

Захарин Антон Викторович,

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Технический сервис, стандартизация и метрология»;
ORCID: 0000-0002-4128-9846;
eLibrary SPIN: 2191-4350;
e-mail: anton-zaharin@mail.ru

Лебедев Павел Анатольевич,

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Технический сервис, стандартизация и метрология»;
ORCID: 0000-0003-0662-8694;
eLibrary SPIN: 8271-5431;
e-mail: zoya_lebedeva@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Roman V. Pavlyuk,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor,
Assistant Professor of the Technical Service, Standardization and Metrology Department;
address: 12 Zootekhnicheskyy aly, Stavropol, Russia, 355035;
ORCID: 0000-0002-2739-0200;
eLibrary SPIN: 5892-3171;
e-mail: roman_pavlyuk_v@mail.ru

Anton V. Zakharin,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor,
Assistant Professor of the Technical Service, Standardization and Metrology Department;
ORCID: 0000-0002-4128-9846;
eLibrary SPIN: 2191-4350;
e-mail: anton-zaharin@mail.ru

Pavel A. Lebedev,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor,
Assistant Professor of the Technical Service, Standardization and Metrology Department;
ORCID: 0000-0003-0662-8694;
eLibrary SPIN: 8271-5431;
e-mail: zoya_lebedeva@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author