

Received: 21.12.2025

Revised: 14.02.2026



Accepted: 20.02.2026

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.1.061-078

STUDYING THE MAGNETIC LEAKAGE FIELD OF THE LOCAL RESIDUAL MAGNETIZATION OF A STRUCTURAL STEEL

S. M. Kulak

*Industrial University of Tyumen,
38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russia*

 <https://orcid.org/0000-0002-5970-8893>  kulaksm@tyuiu.ru

Email: kulaksm@tyuiu.ru

Address for correspondence: ul. Melnikaite, 70, room 317, Tyumen, 625027, Russia
Tel.: +7 (982) 924-7897

One of the factors determining the reliability of steel structures is their stress-strain state. The method of magnetoelastic demagnetization of steel (*magnetoelastic memory*) can be used to monitor the stress-strain state. This method involves an irreversible change in the local residual magnetization of steel or, as a consequence, a change in the magnetic leakage field of local residual magnetization on the steel surface, which is induced by elastic deformation. Monitoring the stress-strain state of steel structures by *magnetoelastic memory* involves their local magnetization. The results of measuring the strength of the magnetic leakage field of local residual magnetization can be affected by the magnetization method, the magnitude of the magnetizing field, temporal changes in residual magnetization, relaxation processes in the steel, and mechanical stresses. Therefore, it is relevant to study various methods of local magnetization of steel and temporal changes in its residual magnetization at constant temperature and mechanical stress. The temporal stability of the magnetic leakage fields of local residual magnetization on the surface of the St3 structural steel is studied under and without mechanical loading. It is shown that the rate of demagnetization of loaded specimens magnetized by single- and double-pole devices is by factors of ~3.5 and 5 lower than that of unloaded ones. Within the 365 days of studying the stability of the local residual magnetization of the St3 steel, the largest changes in its magnetic leakage field (~7 to 8%) were observed in the specimens with unipolar magnetization, whereas the smallest changes (~2 to 3%) occurred in the specimens magnetized by an E-shaped electromagnet.

Keywords: stress-strain state, magnetic testing methods, magnetoelastic memory of steel, local residual magnetization of steel, temporary stability of residual magnetization

Acknowledgment

I would like to express my sincere appreciation to Ms. Daria A. Naumova for her assistance in conducting the research.

References

1. GOST 18353–79. (In Russian).
2. *Nerazrushayushchiy kontrol: spravochnik v 7 t.*, ed. V.V. Klyuev. T. 6: Klyuev, V.V., Muzhitskiy, V.F., Gorkunov, E.S., and Shcherbinin, V.E. *Magnitnye metody kontrolya* [Nondestructive Testing: A Handbook in 7 vols., Magnetic Testing Methods, vol. 6]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 2004, 832 p. (In Russian).

3. Gorkunov, E.S., Zadvorkin, S.M., Mushnikov, A.N., Smirnov, S.V., and Yakushenko, E.I. Effect of mechanical stresses on the magnetic characteristics of pipe steel. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2014, 55, 530–538. DOI: 10.1134/S002189441403016X.
4. Zhukov, S.V., Zhukov, V.S., and Kopitsa, N.N. RF Patent No. 2195636, Byull. Izobret. No. 36, 2002. (In Russian).
5. Zhukov, S.V. and Kopitsa, N.N. Studying mechanical stress fields in metal structures by Komplex-2 devices. In: *Spetsialnye problemy transporta* [Special Problems of Transport, Russian Transport Academy: Collection of Scientific Papers]. VTU Publ., St. Petersburg, 1998, 3, 214–222.
6. Novikov, V.F., Yatsenko, T.A., and Bakharev, M.S. Coercive force as a function of uniaxial stresses (part 2). *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2002, 38, 231–237. DOI: 10.1023/A:1020901319055.
7. Deordiev, G.I. and Biktashev, T.Kh. Magnetostriction method of measuring stresses in components of metallic structures. *Soviet Journal of Nondestructive Testing—USSR*, 1977, 3, 83–91.
8. Aginei, R.V., Teplinskii, Yu.A., and Kuzbozhev, A.S. Evaluation of the stressed state of steel pipelines from the anisotropy in the magnetic properties of a metal. *Kontrol. Diagnostika*, 2004, 8, 22–24. (In Russian).
9. Gorkunov, E.S. and Mushnikov, A.N. Magnetic methods of evaluating elastic stresses in ferromagnetic steels (review). *Kontrol. Diagnostika*, 2020, 23, 12 (270), 4–23. (In Russian). DOI: 10.14489/td.2020.12.pp.004-023.
10. Mushnikov, A.N. and Mitropolskaya, S.Yu. Effect of mechanical stresses on the magnetic characteristics of pipeline steels of different classes. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2016, 4, 57–70. DOI: 10.17804/2410-9908.2016.4.057-070. Available at: http://dream-journal.org/issues/2016-4/2016-4_89.html
11. Filinov, V.V. *Pribory i metody kontrolya tekhnologicheskikh napryazhenii na osnove ispolzovaniya magnitnykh i akusticheskikh shumov peremagnichivaniya* [Devices and Methods for Testing Technological Stresses Based on the Use of Magnetic and Acoustic Noises of Magnetization Reversal: A Handbook]. MGAPI Publ., Moscow, 2000, 80 p. (In Russian).
12. Filinov, V.V., Kuznetsov, A.N., and Arakelov, P.G. Monitoring stressed state of pipelines by magnetic parameters of metal. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, 53 (1), 51–61. DOI: 10.1134/S1061830917010065.
13. Kulak, S.M., Novikov, V.F., and Maltsev, V.S. Testing mechanical stresses of bearing steel I-beams of automobile overpass using magnetic and tensometric methods. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2022, 58, 186–194. DOI: 10.1134/S1061830922030044.
14. Kulak, S.M., Novikov, V.F., and Baranov, A.V. Control of mechanical stresses of high-pressure container walls by magnetoelastic method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 154, 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/154/1/012004.
15. Kulak, S.M., Novikov, V.F., Probotyuk, V.V., Vatsenkov, S.M., and Fursov, E.S. Magnetic testing of stressed state of hydrotested gas-separator wall. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, 55 (3), 225–232. DOI: 10.1134/S0130308219030072.
16. Novikov, V.F., Kulak, S.M., and Andreev, V.O. About control of the stressed-deformed state of steel bridge structures (bridge) by the method of magnetoelastic demagnetization. *Stroitel'naya Mekhanika i Raschet Sooruzheniy*, 2020, 4 (291), 3–7. (In Russian). DOI: 10.37538/0039-2383.2020.4.3.7.
17. Novikov, V.F., Kulak, S.M., and Parakhin, A.S. Determination of the steel axial stresses in memory mode by the exponential law of magnetoelastic demagnetization. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2021, 87 (6), 54–62. (In Russian). DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-6-54-62.
18. Gorkunov, E.S., Zadvorkin, S.M., Mushnikov, A.N., and Povolotskaya, A.M., Studying magnetoelastic effects in ferromagnetic structural materials. In: *Navy and Shipbuilding Nowadays NSN'2019, X International Conference*, Saint-Petersburg, Russia, July 11–12, 2019: Proceedings. Krylov State Research Centre Publ., Moscow, 2019, pp. 26–35.

19. Bolshakov, V.N., Gorbash, V.G., and Olenovich, T.V. Effect of mechanical stresses on local remanence. *Izv. AN BSSR. Ser. Fiz. Tekh. Nauk*, 1980, 1, 109–112. (In Russian).
20. Ives, C.A., Staples, S.G.H., Vo, C.K., Cowell, D.M.J., Freear, S., and Varcoe, B.T.H. Toward using the Villari effect for non-destructive evaluation of steel structures. *Journal of Applied Physics*, 2023, 134, 065101. DOI: 10.1063/5.0147736.
21. Gorkunov, E.S., Novikov, V.F., Nichipuruk, A.P., Nassonov, V.V., Kadrov, A.V., and Tatlybaeva, I.N. Resistance of residual magnetization of heat-treated steel products to elastic deformations. *Soviet Journal of Nondestructive Testing*, 1991, 27 (2), 138–145.
22. Novikov, V.F., Sorokina, S.V., Kudryashov, M.E., Zakharov, V.A., and Ulyanov, A.I. The influence of biaxial elastic deformation on the coercive force and local remanent magnetization of construction steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, 46 (7), 520–526. DOI: 10.1134/S1061830910070065.
23. Novikov, V.F., Radchenko, A.V., Ustinov, V.P., and Mimeev, M.S. Magnetoelastic testing of the stress-strain state of steel structures under conditions of the North. *Akademicheskii Zhurnal Zapadnoy Sibiri*, 2014, 10, 3 (52), 140–144. (In Russian).
24. Zagidulin, T.R., Zagidulin, R.V., and Gorchakov, R.K. Stress-strain state of metal evaluating magnetic technique practice in technical diagnostics and forensic inspection of steel parts and constructions. *Kontrol. Diagnostika*, 2015, 3, 54–61. (In Russian). DOI: 10.14489/Td.2015.03.
25. Zagidulin, T.R. and Zagidulin, R.V. Metal structures stressed and strained state magnetic inspection by IN-02 the scanning metal strain indicator. *Neftegazovoe Delo*, 2017, 15 (4), 143–149. (In Russian).
26. Novikov, V.F., Dolgikh, E.V., and Butorin, N.A. A memory sensor of mechanical stress. In: *Elektrometriya* [Scientific and Practical Seminar on Electrometry: Proceedings]. LDNTP Publ., Leningrad, 1981, pp. 80–83. (In Russian).
27. Mirosnikov, V.V. and Zavalnyuk, O.P. Investigation of the possibilities of controlling elastic stresses by the magnitude of the residual magnetization of the metal. *Vestnik NTU KhPI*, 2013, 34 (1007), 12–17. (In Russian).
28. Kostin, V.N., Tsarkova, T.P., Nichipuruk, A.P., Loskutov, V.E., Lopatin, V.V., and Kostin, K.V. Irreversible changes in the magnetization as indicators of stressed-strained state of ferromagnetic objects. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, 45, 786–796. DOI: 10.1134/S1061830909110059.
29. Kuleev, V.G., Bida, G.V., and Atangulova, L.V. On the possibility of using of dependence of residual magnetizing from elastic stresses for nondestructive testing these stresses in steel ferromagnetic structures. *Defektoskopiya*, 2000, 12, 7–19. (In Russian).
30. Gorkunov, E.S. Various states of remanent magnetization and their resistance to external influences. On the question of the “method of magnetic memory”. *Defektoskopiya*, 2014, 11, 3–21. (In Russian).
31. Yanovsky, B.M. *Zemnoy magnetizm* [Terrestrial Magnetism]. LGU Publ., Leningrad, 1978, 591 p. (In Russian).
32. Kostin, V.N. and Sazhina, E.Yu. Influence of climate-range temperature on magnetic properties of steels of various composition. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, 55, 756–760. DOI: 10.1134/S1061830919100061.
33. Vonsovsky, S.V. and Shur, Ya.S. *Ferromagnetizm* [Ferromagnetism]. Gostekhizdat Publ., Moscow–Leningrad, 1948, 816 p. (In Russian).
34. Krinchik, G.S. *Fizika magnitnykh yavleniy* [Physics of Magnetic Phenomena]. MGU Publ., Moscow, 1985, 336 c.
35. Novikov, V.F., Fedorov, B.V., and Izosimov, V.A. Stability of residual magnetized state of tool steels. *Defektoskopiya*, 1995, 2, 68–71. (In Russian).
36. Matyuk, V.F. Instruments of magnetic structurescopy based on the local monopolar pulse magnetization. *Nerazrushayushchiy Kontrol i Diagnostika*, 2012, 2, 29–64. (In Russian).

37. Förster, F. and Zizelmann, G. Die schnelle zerstörungsfreie Bestimmung der Blechanisotropie mit dem Restpunktpolverfahren. *Z. Metallkunde*, 1954, 45, 245–249.
38. Fedorishchev, E.E., Fridman, L.A., Tabachnik, V.P., and Chernova, G.S. Normal component of the residual magnetic field above the surface of a massive body. *Defektoskopiya*, 1982, 2, 23–29. (In Russian).
39. Tomilov, G.S. Magnetic evaluation of the structure and hardness of steel articles by measurements of the local field of residual magnetization. *Defektoskopiya*, 1966, 4, 70–78. (In Russian).
40. Novikov, V.F. *Fizicheskie osnovy metodov nerazrushayushchego kontrolya kachestva izdeliy* [The Physics of Nondestructive Testing of Product Quality]. TIU Publ., Tyumen, 2018, 105 p. (In Russian).

Подана в журнал: 21.12.2025



УДК 620.179.14, 537.624.3

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.1.061-078

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РАССЕЙЯНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

С. М. Кулак

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тюменский индустриальный университет»,
ул. Володарского, 38, г. Тюмень, 625000, Россия*

 <https://orcid.org/0000-0002-5970-8893>  kulaksm@tyuiu.ru

Электронная почта: kulaksm@tyuiu.ru

Адрес для переписки: ул. Мельникайте, д. 70, ауд. 317, г. Тюмень, 625027, Россия
Тел.: +7 (982) 924-78-97

Одним из факторов, определяющих надежность стальных конструкций, является их напряженно-деформированное состояние. Для контроля напряженно-деформированного состояния может быть использован метод магнитоупругого размагничивания стали (магнитоупругой «памяти»), заключающийся в необратимом изменении ее локальной остаточной намагниченности или, как следствие, в изменении магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности на поверхности стали, вызванном упругой деформацией. Контроль напряженно-деформированного состояния стальных конструкций методом магнитоупругой «памяти» предполагает их локальное намагничивание. На результаты измерения напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности могут влиять способ намагничивания, уровень намагничивающего поля, временные изменения остаточной намагниченности, релаксационные процессы в стали и механические напряжения. Поэтому актуальным является исследование различных способов локального намагничивания стали и временных изменений ее остаточной намагниченности при постоянной температуре и постоянном механическом напряжении. Исследована временная стабильность магнитных полей рассеяния локальной остаточной намагниченности на поверхности конструкционной стали Ст3 в условиях постоянной температуры при наличии и отсутствии механических нагрузок. Показано, что скорость размагничивания нагруженных образцов, намагниченных одно- и двухполюсными устройствами, в ~3,5 и 5 раз меньше, чем ненагруженных. За 365 дней исследований стабильности локальной остаточной намагниченности стали Ст3 наибольшие изменения ее магнитного поля рассеяния (~7–8 %) наблюдались у образцов с однополюсным намагничиванием, а наименьшие (~2–3 %) – у образцов, намагниченных Ш-образным электромагнитом.

Ключевые слова: напряжённо-деформированное состояние, магнитные методы контроля, магнитоупругая память стали, локальная остаточная намагниченность стали, временная стабильность остаточной намагниченности

1. Введение

Магнитные методы неразрушающего контроля применяются для изучения механических свойств изделий из ферромагнитных сталей, их структурно-фазового состава, напряженно-деформированного состояния благодаря простоте, высокой производительности и достаточной точности [1, 2]. В основу этих методов неразрушающего контроля положено воздействие на сталь магнитного поля и измерение одного или нескольких параметров, характеризующих маг-

нитные свойства материала и зависящих от его структуры, механических свойств и напряжений. Разработка магнитных методов оценки напряжений в элементах стальных конструкций является одной из актуальных задач неразрушающего контроля [3]. Существующие магнитные методы контроля механических напряжений основаны на магнитоупругом и магнитострикционном эффектах, измерении анизотропии магнитной проницаемости и коэрцитивной силы [4–9], продольной и поперечной магнитострикции [10], скачков Баркгаузена [11, 12]. Для контроля механических напряжений в деталях и металлоконструкциях используется метод магнитоупругой памяти (МУП) (или метод магнитоупругого размагничивания), основанный на магнитоупругом эффекте, обратном магнитострикции [13–25].

Суть метода МУП заключается в том, что в процессе механического нагружения магнитострикционный материал, находящийся в остаточном намагниченном состоянии, необратимо изменяет свою локальную намагниченность. По величине этого необратимого изменения намагниченности материала и определяют, какая действовала на него внешняя нагрузка. Метод дает возможность в режиме запоминания регистрировать по изменению магнитного поля рассеяния H локальной остаточной намагниченности (ЛОН), измеренного на поверхности остаточной намагниченной стали, величину максимального (пикового) напряжения, испытываемого ею.

Важным этапом реализации метода МУП при контроле механических напряжений в стали является локальное намагничивание контролируемого объекта. При этом точность контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) стальной конструкции и достоверность полученных результатов будут зависеть от способа намагничивания, временной стабильности магнитного поля рассеяния ЛОН стали и его чувствительности к воздействию внешних факторов: механических напряжений, внешнего магнитного поля, температуры окружающей среды. Преимуществом метода МУП в сравнении с другими магнитными методами, применяемыми для этих целей, является возможность «запоминания» максимальных напряжений, испытываемых конструкцией. Это дает возможность применения метода МУП на объектах, периодически испытывающих в процессе работы динамические нагрузки (например, мосты, стадионы, театры, рельсы, высотные краны и т. д.).

В работе [26] было показано, что магнитный поток в остаточной намагниченной образце изменяется при приложении напряжений примерно так же, как и деформация. В этой же работе предложен термин «магнитоупругая память».

Монотонное и однозначное изменение остаточной намагниченности M_r стали при возрастании действующих на нее упругих напряжений позволяет использовать этот параметр для оценки их величины [27–29], а также применять это явление для создания запоминающих датчиков, фиксирующих максимальную величину действовавших в элементах конструкций напряжений, в которых перед механическим нагружением создается намагниченная зона (локальная намагниченность). При этом нужно иметь в виду, что из-за небольших значений коэрцитивной силы H_c конструкционных сталей на стабильности их остаточной намагниченности могут сказаться время выдержки, внешнее размагничивающее поле, нагрев и др. Намагниченность стали зависит не только от величины намагничивающего поля, но и от таких факторов, как температура, механические напряжения, время [26, 30, 31].

В то же время диагностика НДС стальных деталей и конструкций может выполняться при самых различных температурах контролируемых объектов (северные и южные регионы страны) [32]. Как известно [33, 34], температура может оказывать значительное влияние на магнитные свойства стали, а эти свойства, в свою очередь, могут измеряться и анализироваться как диагностические параметры состояния ферромагнитных объектов.

В работе [35] отмечается необходимость учета влияния температуры на изменение остаточной намагниченности и ее магнитоупругую чувствительность. Были проведены измерения стабильности остаточной намагниченности на образцах из стали Р9К5 в температурном интервале от -55 до $+45$ °С. При этом было установлено, что охлаждение до -55 °С не изменяет остаточную намагниченность, тогда как нагрев снижает ее на 2–3 %. Затрону-

тые проблемы (магнитоупругое сползание намагниченности, ее стабилизация, влияние на эффект МУП нагрева и охлаждения и т. д.) являются малоизученными. Однако перспективность МУП для контроля механических напряжений, возможность создания элементов, запоминающих силовые воздействия, делают необходимым детальное изучение влияния указанных факторов на МУП как факторов, отражающихся на точности измерения силового воздействия.

Чем более мягким в магнитном отношении является материал конструкции, тем сильнее будет влияние перечисленных факторов на величину остаточной намагниченности. При одновременном действии температуры и внешнего магнитного поля в случае охлаждения элементов конструкций или отдельных деталей даже в слабом магнитном поле возникает очень большая термоостаточная намагниченность, очень устойчивая к последующим внешним воздействиям. Все отмеченные выше факторы могут вносить свой вклад в состояние остаточной намагниченности, которую используют как параметр контроля и регистрируют с помощью магнитометрических приборов в методе МУП [30].

Конструкционные стали обладают относительно малым значением коэрцитивной силы H_c , поэтому актуальным является исследование стабильности локальной остаточной намагниченности конструкционной стали в условиях постоянной температуры окружающей среды и постоянного уровня механического нагружения. Изучение магнитных релаксационных процессов в стали, находящейся в этих условиях, позволит повысить точность контроля НДС методом МУП и, как следствие, оценивать остаточный ресурс стальных конструкций, предупреждать аварийные отказы в их работе.

Знание распределения магнитного поля рассеяния вдоль поверхности локально намагниченной стали также является весьма актуальной задачей при исследовании напряженно-деформированного состояния стальных конструкций методом магнитоупругого размагничивания. Характер распределения магнитного поля рассеяния остаточной намагниченности вдоль поверхности ферромагнитной стали определяется способом намагничивания, ее размерами, магнитными свойствами материала и значением внешнего поля, в котором производилось намагничивание.

Цель работы – исследование магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности конструкционной стали, создаваемой разными способами, и его временной стабильности.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- изучение различных способов и отработка методики намагничивания исследуемых образцов;
- исследование распределения напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН, создаваемой разными способами на поверхности пластинчатых образцов;
- исследование временных изменений локальной остаточной намагниченности стали в условиях постоянной температуры окружающей среды и постоянного напряженного состояния;
- определение временной стабильности локальной остаточной намагниченности, создаваемой в конструкционной стали разными способами, и ее магнитоупругой чувствительности к механическим напряжениям.

Приборы, предназначенные для локального намагничивания стали, различаются по типу источника намагничивающего поля, конфигурации магнитных полюсов и их количества, по измеряемой компоненте напряженности поля H_T остаточной намагниченности. В качестве источника намагничивающего поля (намагничивающего элемента) используют постоянный магнит, электромагнит или соленоид [36].

В работе [37] описывается намагничивание стальных листовых образцов, различающихся по коэрцитивной силе, сильным стержневым постоянным магнитом. В результате наблюдается практически линейная зависимость между тангенциальной составляющей H_{Tt} и H_c .

В исследовании [38] подобный эксперимент проводится с электромагнитом со стрежневым сердечником для нормальной составляющей остаточной намагниченности H_m в центре намагничивающего участка. Исследование показало, что связь между H_m и H_c нелинейная, и эта нелинейность тем больше, чем больше H_c и чем меньше магнитная индукция B .

Измерение нормальной составляющей остаточной намагниченности H_m вблизи поверхности образца против среднего полюса Ш-образного электромагнита после его удаления от поверхности описывается в работе [39]. Результатом измерений стало то, что линейная связь между H_m и H_c будет только в том случае, если намагничивающее поле велико. При слабом поле скорость изменения H_m относительно H_c уменьшается и наблюдается нелинейная зависимость.

2. Материал и методика

Временные изменения локальной остаточной намагниченности стали, находящейся в нагруженном и ненагруженном состояниях, исследовали при разных способах намагничивания в условиях постоянной температуры окружающей среды (24–28 °С) на шести пластинчатых образцах размером 500 × 200 × 3 мм, изготовленных из стали Ст3 в состоянии поставки. Сталь марки Ст3 широко применяется при изготовлении различных конструкций и относится к классу магнитомягких ($H_c \sim 690$ А/м). Каждому образцу присваивался порядковый номер от 1 до 6. По два образца локально намагничивали одним, двумя или тремя магнитными полюсами.

Локальное намагничивание образцов проводили тремя разными типами устройств: однополюсное намагничивание дисковым магнитом SmCo₅ (диаметром 30 мм) контактом одного полюса с поверхностью образца через магнитопровод в форме диска из стали Ст20; двухполюсное намагничивание Н-образным устройством на основе дискового магнита SmCo₅ (диаметром 30 мм) контактом двух полюсов с поверхностью образца через магнитопроводы в форме диска из стали Ст20 диаметром 50 мм; трехполюсное намагничивание электромагнитом Ш-образной формы и обмоткой на средней ножке магнитопровода. Индукция магнитного поля, измеренного вблизи полюсов каждого устройства, составила 130, 40 и 30 мТл соответственно.

Способы намагничивания каждого образца и условия их испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исследуемые образцы и способы их намагничивания

№ образца	Способ намагничивания	Условия испытаний (механическое нагружение)
1	Однополюсное намагничивание постоянным магнитом	Отсутствует
2	Однополюсное намагничивание постоянным магнитом	Напряжения растяжения $\sigma \sim 60$ МПа = const
3	Двухполюсное намагничивание Н-образным устройством на основе постоянного магнита	отсутствует
4	Двухполюсное намагничивание Н-образным устройством на основе постоянного магнита	Напряжения растяжения $\sigma \sim 60$ МПа = const
5	Трехполюсное намагничивание Ш-образным электромагнитом	Отсутствует
6	Трехполюсное намагничивание Ш-образным электромагнитом	Напряжения растяжения $\sigma \sim 60$ МПа = const

Образцы делили на две равные группы. Первая группа образцов в количестве 3 штук в процессе исследования временной стабильности магнитного поля рассеяния ЛОН, создаваемой разными способами, не подвергалась механическим нагрузкам. Вторая группа из трех образцов подвергалась однократному деформированию консольным изгибом одинакового уровня. При этом образцы № 1, 2 локально намагничивались в центре с помощью однополюсного устройства. Образцы № 3, 4 намагничивались в виде двух полос N и S после прокатывания Н-образного устройства поперек их наибольшей оси. Магнитным полем импульса тока Ш-образного электромагнита производили намагничивание образцов № 5, 6. Все образцы располагались горизонтально для исключения влияния вертикальной составляющей магнитного поля Земли на результаты измерения тангенциальной составляющей H_t поля рассеяния ЛОН (рис. 1). Для обеспечения точности позиционирования датчиков магнитометра на поверхности образцов в местах пиковых (экстремальных) значений нормальной и тангенциальной составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН, показанных на рис. 2, при каждом измерении использовали шаблоны геометрических профилей соответствующих намагничивающих устройств.

Образцы под номерами 1, 3, 5 находились на плоской немагнитной поверхности стола в ненагруженном состоянии, а образцы 2, 4, 6 консольно крепились одним концом так, чтобы их центр приходился на край стола, и они при этом испытывали минимальные деформации изгиба от распределенного воздействия собственного веса (рис. 1). Величину локальной остаточной намагниченности стальных образцов оценивали по значению измеряемых феррозондовым магнитометром ИКНМ-2ФП тангенциальной H_t и нормальной H_n составляющих напряженности магнитного поля рассеяния на их поверхности [40]. Для получения наибольшей точности таких измерений датчики магнитометра следовало располагать в местах экстремальных значений H_t и H_n при каждом способе намагничивания, поэтому предварительно на этих образцах проводилось исследование распределения составляющих H_t и H_n вдоль линии поверхности, проходящей через область ЛОН (рис. 2, 3). Локальное намагничивание всех образцов в их геометрическом центре каждым применяемым способом и первоначальное измерение нормальной H_n и тангенциальной H_t составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН магнитометром ИКНМ-2ФП производилось 30 ноября 2022 года и продолжалось до 17 апреля 2023 года с интервалом в 3–10 дней. Магнитометр ИКНМ-2ФП снабжен двумя феррозондовыми датчиками магнитного поля, которые для измерения H_t располагались горизонтально на поверхности образцов на одной линии встречно друг другу так, чтобы ось этих датчиков была перпендикулярна направлению горизонтальной составляющей магнитного поля Земли. При измерении H_n оба датчика были перпендикулярны поверхности образцов. В этом случае можно минимизировать влияние внешнего магнитного поля на поле рассеяния создаваемой в образце ЛОН. Места расположения датчиков на поверхности образцов при измерении H_t и H_n показаны на рис. 2 (соответственно, τ и η). Усреднение H_t и H_n производилось по значениям показаний двух феррозондовых датчиков.

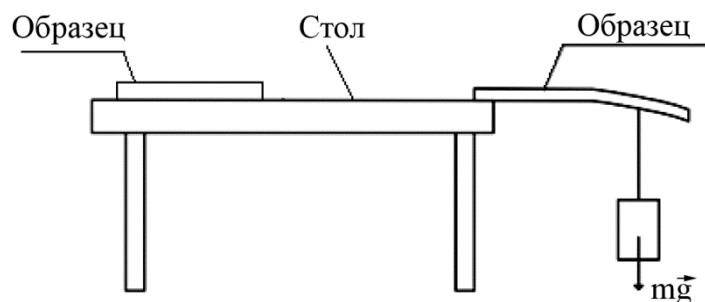


Рис. 1. Схематичное изображение нагруженного (консольный изгиб) и ненагруженного образцов

17 апреля 2023 года образцы № 2, 4, 6, закрепленные консольно одним концом, нагружались изгибом за счет дополнительного веса ($P = mg = 20H$), прикладываемого к их свободному концу и создающего неоднородное растяжение вдоль их оси. При этом линия деформации растяжения в каждом нагружаемом образце была перпендикулярна магнитному моменту стали, формируемому локальным намагничиванием. Далее продолжались измерения H_t и H_n поля ЛОН всех шести образцов до 1 декабря 2023 года. В итоге общее время исследований составило 365 суток.

3. Результаты и обсуждение

Схемы одно- и многополюсного локального намагничивания, силовых линий магнитного поля рассеяния ЛОН и места измерения тангенциальной H_t и нормальной H_n составляющих напряженности магнитного поля рассеяния на поверхности исследуемых образцов представлены на рис. 2.

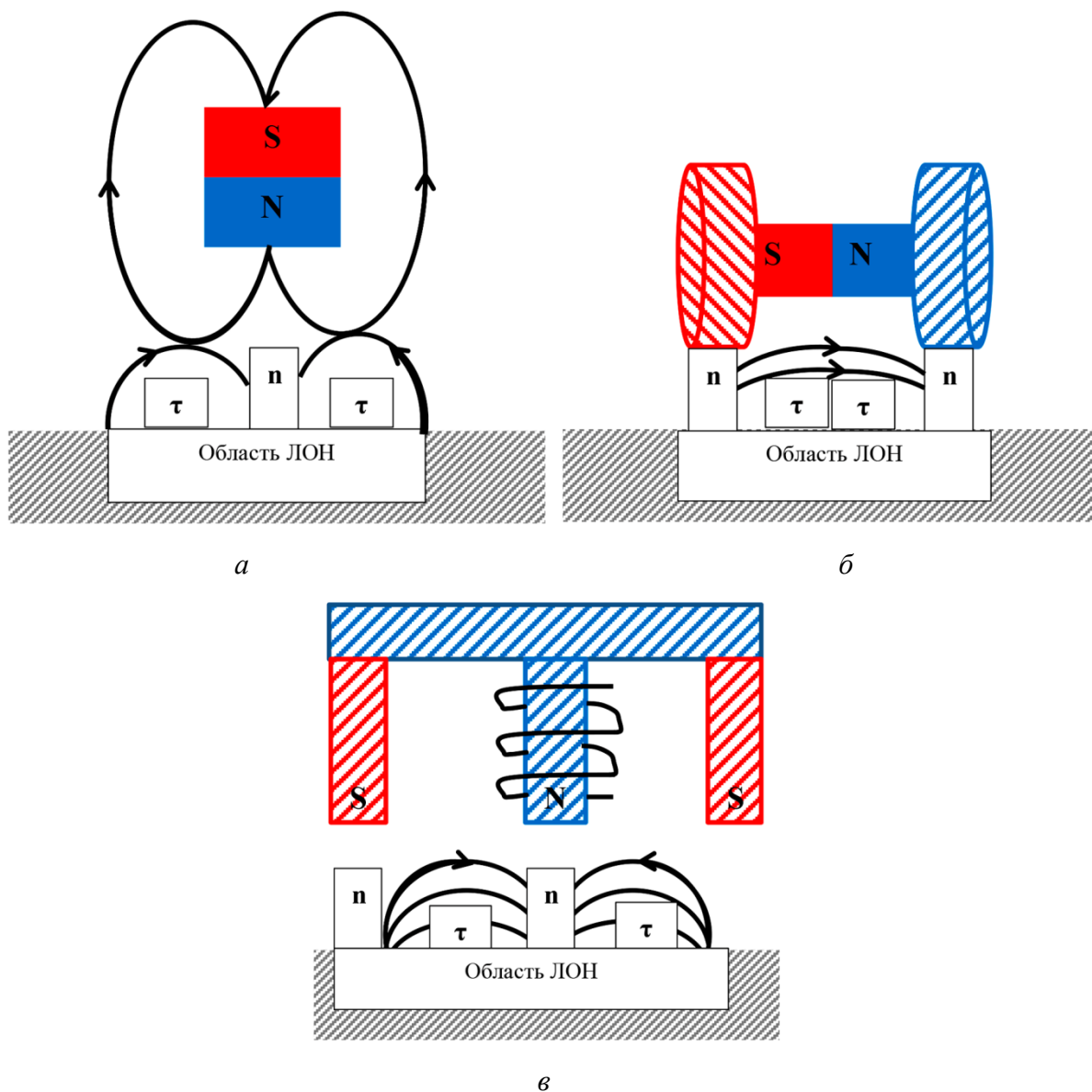


Рис. 2. Схема одно- (а), двух- (б) и трехполюсного (в) локального намагничивания образцов и соответствующие картины силовых линий магнитного поля рассеяния на поверхности; места расположения датчиков для измерения нормальной (n) и тангенциальной (τ) составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН

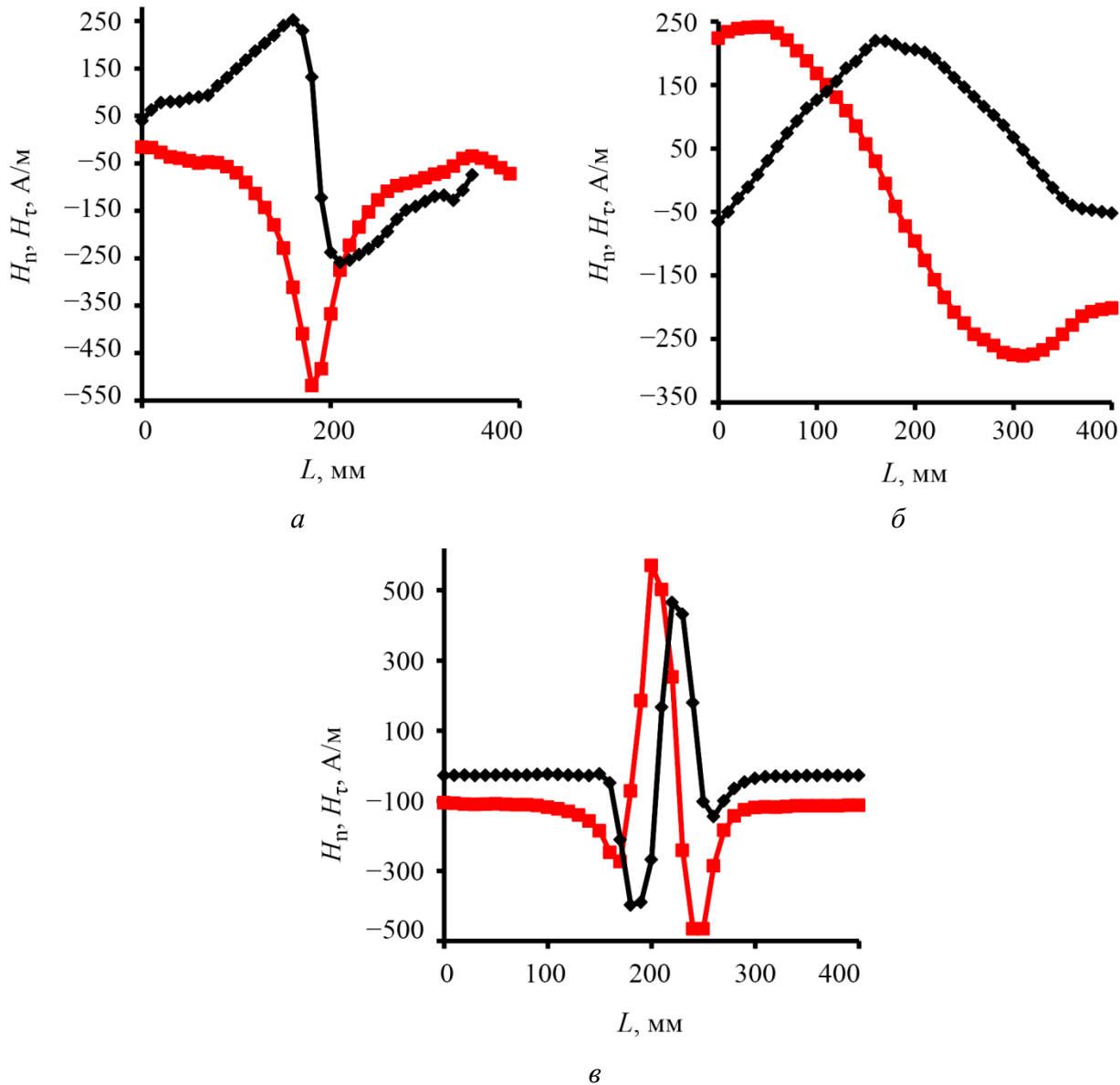


Рис. 3. Распределение нормальной H_n (■) и тангенциальной H_t (◆) составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН вдоль поверхности образца, намагниченного одним (а), двумя (б), тремя (в) полюсами

На рис. 3 показано распределение величин H_t и H_n вдоль поверхности образцов, локально намагниченных в центре разными способами.

Линии магнитного поля рассеяния в местах входа в сталь и выхода из нее образуют зоны магнитных полюсов S и N. В этих зонах выражена неоднородность магнитного поля, что вносит неоднозначность в результаты контроля механических напряжений, так как их образование не связано с деформацией стали. Наиболее равномерное намагничивание стали наблюдается в области максимальных значений H_t и H_n .

Как видно из рис. 2 а и 3 а, при однополюсном намагничивании стали на ее поверхности формируются два экстремума тангенциальной составляющей ($H_t = 240$ и -237 А/м) противоположного знака и один экстремум нормальной составляющей ($H_n = 518$ А/м) напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН. В этих точках образцов № 1, 2 вдоль поверхности и нормально к ней располагались датчики феррозондового магнитометра. При таком намагничивании и измерении будет минимальным влияние внешнего магнитного поля на тангенциальную составляющую H_t при соответствующем расположении пары датчиков на поверхности образца

вдоль одной линии встречно друг другу и усреднении результатов. На рис. 2 выделено положение феррозондовых датчиков в местах экстремумов тангенциальной составляющей τ поля рассеяния ЛОН, создаваемой каждым способом намагничивания.

При двухполюсном намагничивании стали Н-образным устройством (рис. 2 б) формируется магнитный диполь с двумя экстремумами нормальной ($H_n = 240$ и -275 А/м) и одним экстремумом тангенциальной ($H_\tau = 220$ А/м) составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН на ее поверхности (рис. 3 б).

Распределение нормальной H_n и тангенциальной H_τ составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН, создаваемой трехполюсным Ш-образным электромагнитом (рис. 2 в) на поверхности стального образца, показано на рис. 3 в. Здесь можно выделить два экстремума $H_\tau = -397$ и 432 А/м и три экстремума $H_n = -275$ А/м, 570 А/м, -465 А/м.

Таким образом, двух- и трехполюсное локальное намагничивание стальных конструкций при контроле НДС методом МУП приводит к образованию в стали магнитных диполей.

На рис. 4 показаны результаты проведенных в течение календарного года исследований временной стабильности остаточной намагниченности стали Ст3, находящейся при постоянной температуре окружающей среды и отсутствии механических нагрузок в виде зависимостей нормальной H_n и тангенциальной H_τ составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН, создаваемой одно-, двух- и трехполюсным намагничиванием, от времени наблюдения. На рис. 5 приведены аналогичные зависимости для стальных образцов, которые спустя 138 суток после намагничивания были в этой области однократно нагружены консольно до $\sigma \sim 60$ МПа. Следует отметить, что составляющие H_n и H_τ в процессе всего периода наблюдений изменяются как возрастают, так и убывают. Поэтому для количественной оценки и сравнительного анализа результатов исследования временной стабильности ЛОН определялись такие величины, как среднее значение $\langle H_n \rangle$ и $\langle H_\tau \rangle$, среднее квадратичное отклонение δ_n и δ_τ от этих величин, скорость изменения δH_n и δH_τ (табл. 2).

Как видно из рис. 4 и 5, для всех способов намагничивания величина H_n превышает H_τ с наибольшим отличием при однополюсном способе.

Также оценивались величины магнитоупругой чувствительности (Λ_τ и Λ_n) тангенциальной и нормальной составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН стали Ст3 к упругим напряжениям растяжения σ при консольном изгибе, численно равные относительно изменению δH_τ и δH_n , вызванному приращением σ на единицу (табл. 2).

При воздействии на сталь, находящуюся в остаточном намагниченном состоянии, упругих деформаций, обусловленных действием внешней силы, происходит смещение доменных границ или вращение векторов намагниченности, в результате чего сталь приобретает новое магнитное состояние, соответствующее минимуму свободной энергии. В случае действия упругих деформаций смещение доменных границ будет вызвано магнитоупругим взаимодействием областей спонтанной намагниченности с полем действующих напряжений, которое под влиянием внутреннего размагничивающего поля приведет в первую очередь к смещению 90-градусных границ. Размагничивание стали, вызванное преимущественным смещением 90-градусных доменных границ, должно отражаться на устойчивости состояния ее остаточной намагниченности к действию упругих деформаций.

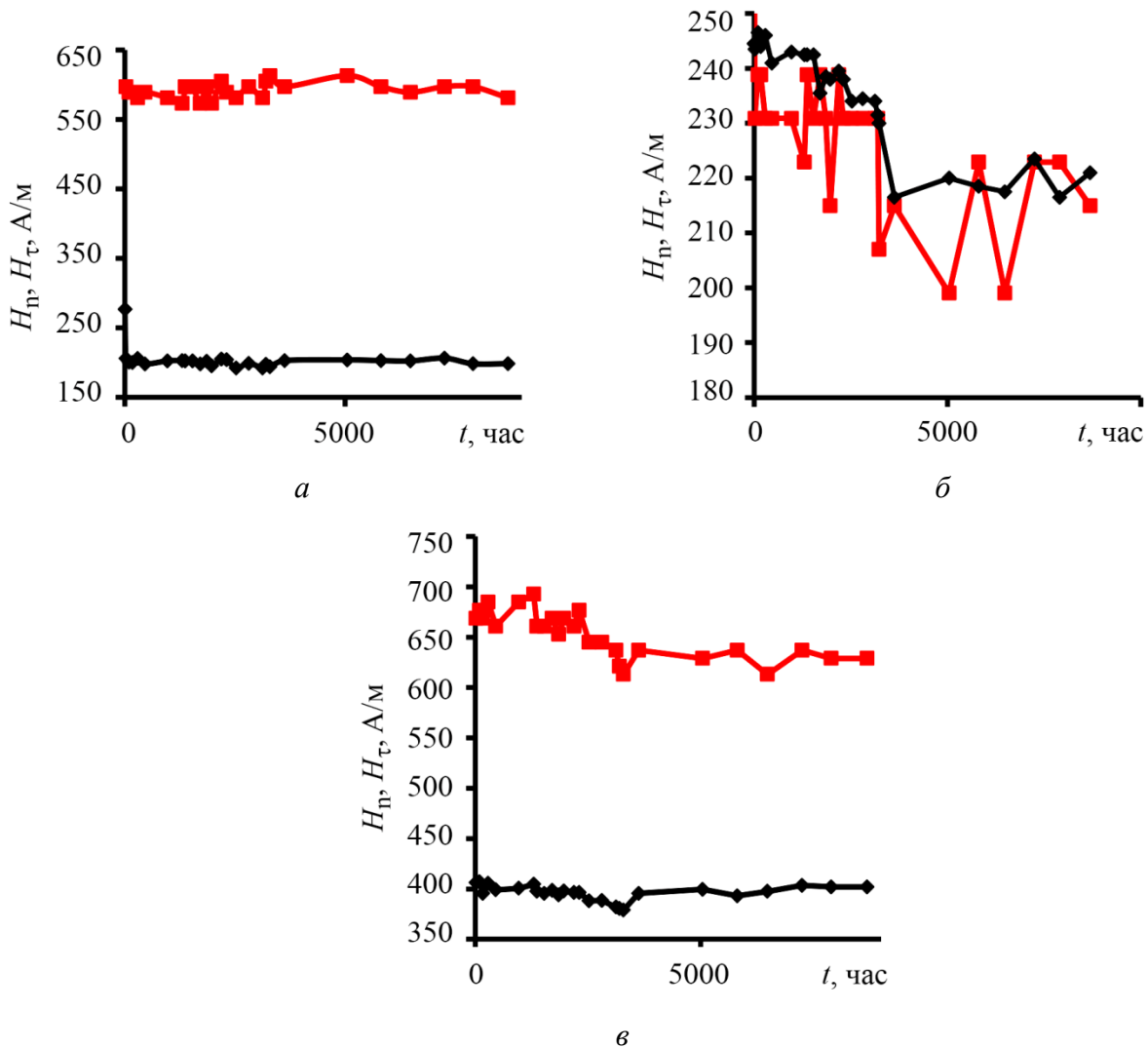


Рис. 4. Зависимость нормальной H_n (■) и тангенциальной H_τ (◆) составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН, создаваемой одно- (а), двух- (б), трехполюсным (в) намагничиванием механически не нагруженных образцов № 1, 3, 5 соответственно

Как видно из табл. 2, все образцы, изготовленные из одного листа, размагничиваются с различной скоростью. Это может быть вызвано вариациями химического состава и структуры стали, уровнем намагничивающего поля, а также конфигурацией локальной остаточной намагниченности и магнитной текстуры, формируемой в ней одноосной неоднородной деформацией. Изменение структурных свойств сталей тесно связано с изменением их магнитной текстуры [12]. При этом скорость снижения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН при всех способах намагничивания превышает скорость изменения нормальной составляющей либо сопоставима с ней. По скорости размагничивания стали можно оценивать быстроту протекания релаксационных процессов в ней.

Следует отметить более высокую временную стабильность ЛОН всех образцов в нагруженном состоянии, независимо от способа намагничивания, хотя механическое нагружение стали может привести к перераспределению примесных атомов углерода и азота вдоль линии дислокаций и, как следствие, к движению междоменных границ и ее размагничиванию. Для образцов, не подвергавшихся механическим нагрузкам, наблюдаются большие изменения тангенциальной составляющей магнитного поля рассеяния ЛОН по сравнению с нормальной составляющей.

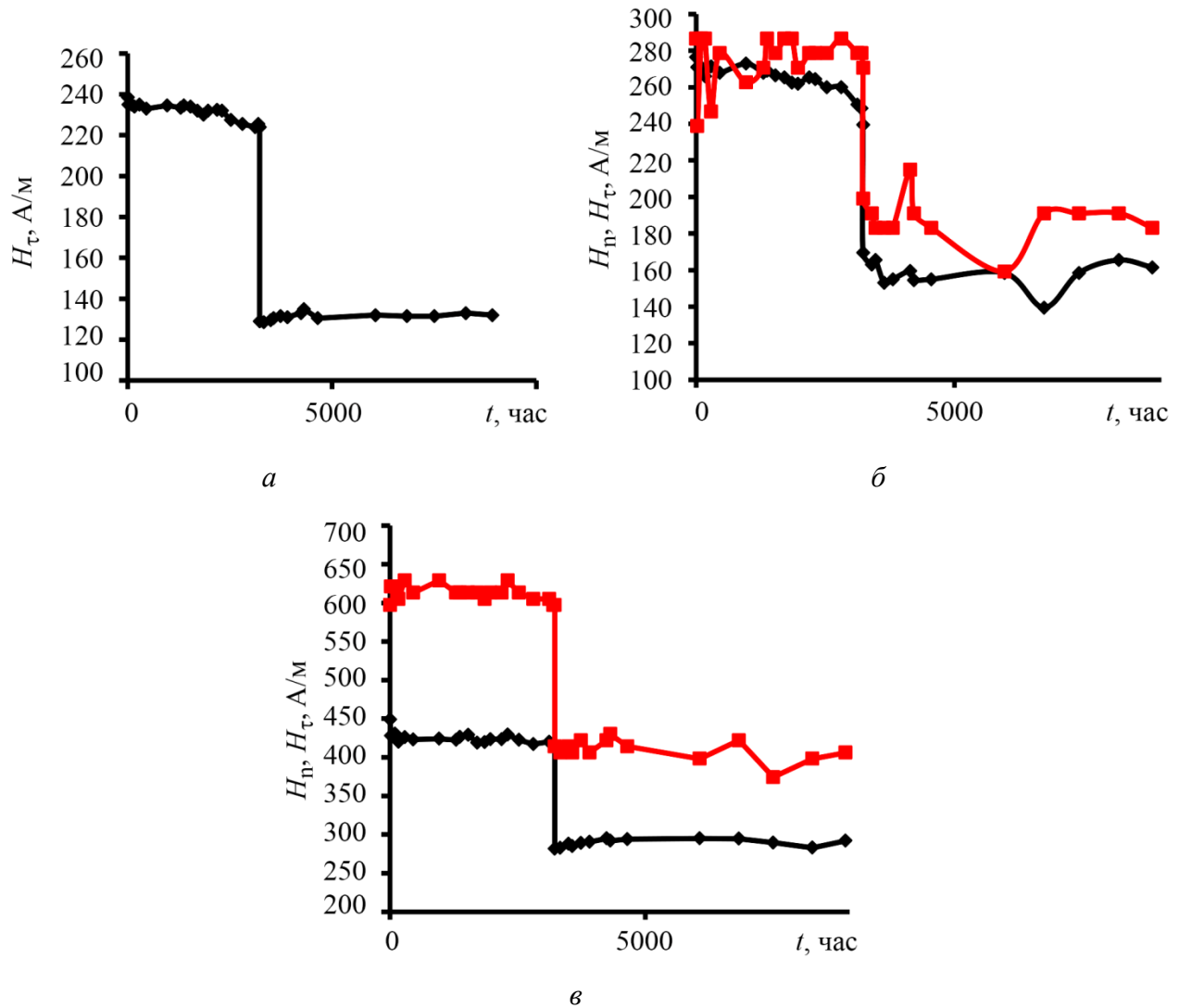


Рис. 5. Зависимость нормальной H_n (■) и тангенциальной H_t (◆) составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН, создаваемой одно- (а), двух- (б), трехполюсным (в) намагничиванием впоследствии однократно механически нагруженных образцов № 2, 4, 6 соответственно

Видно, что за 365 дней наблюдений уменьшение тангенциальной составляющей δH_t напряженности магнитного поля рассеяния ($\sim 7-8\%$) наблюдалось у образцов с однополюсным намагничиванием, при этом наименьшее изменение ($\sim 2-3\%$) – у образцов, намагниченных Ш-образным электромагнитом. Уменьшение δH_n за этот же период составило $\sim 2-3\%$, $\sim 5-6\%$, $\sim 1-2\%$ для одно-, двух- и трехполюсного намагничивания соответственно. На всех образцах через 20 часов после локального намагничивания завершаются релаксационные процессы, и ЛОН стали стабилизироваться.

Таблица 2

Результаты количественной оценки способов намагничивания

№ образца	Скорость изменения δH_n , сут ⁻¹ × 10 ⁻⁵	Скорость изменения δH_τ , сут ⁻¹ × 10 ⁻⁵	Среднее значение $\langle H_n \rangle$, А/м, за время наблюдения	Среднее квадратичное отклонение δ_n , А/м	Среднее значение $\langle H_\tau \rangle$, А/м за время наблюдения	Среднее квадратичное отклонение δ_τ , А/м	Магнитоупругая чувствительность $\Lambda_n \times 10^{-9}$, Па ⁻¹	Магнитоупругая чувствительность $\Lambda_\tau \times 10^{-9}$, Па ⁻¹
1	0,31	1,66	591,82	10,83	203,54	14,92	–	–
2 до консольного изгиба	–	1,43	–	–	231,6	4,04	–	–
2 после консольного изгиба	–	0,4	–	–	131,32	1,65	–	7,1
3	0,8	1,08	227,65	13,92	234,18	9,91	–	–
4 до консольного изгиба	1,73	4,05	275,87	12,9	263,95	8,7	–	–
4 после консольного изгиба	1,43	0,84	186,18	9,125	158,34	7,24	4,4	4,8
5	0,69	1,02	655,52	29,33	398,04	11,19	–	–
6 до консольного изгиба	1,2	1,2	612,26	9,71	424,17	7,19	–	–
6 после консольного изгиба	0,34	0,68	409,46	13,36	289,39	4,6	5,1	5,3

4. Заключение

Опытным путем вдоль поверхности стали Ст3 получено распределение двух составляющих (нормальной и тангенциальной) напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН, создаваемой устройствами с одним, двумя, тремя магнитными полюсами, для каждого из которых определены места их максимальных значений. Показано, что скорость размагничивания нагруженных образцов, намагниченных одно- и двухполюсными устройствами, в ~3,5 и 5 раз меньше, чем ненагруженных. У образцов, намагниченных трехполюсным устройством, эта величина отличается в ~2 раза. За 365 дней исследований стабильности ЛОН стали Ст3 наибольшие изменения ее магнитного поля рассеяния (~7–8 %) наблюдались у образцов с однополюсным намагничиванием, а наименьшие (~2–3 %) – у образцов, намагниченных

Ш-образным электромагнитом. Наибольшей магнитоупругой чувствительностью к упругим напряжениям обладает ЛОН, создаваемая однополюсным намагничиванием. Она превышает чувствительность остаточной намагниченности трех- и двухполюсного намагничивания практически в 1,5 и 2 раза соответственно.

Благодарность

Автор выражает благодарность Наумовой Дарье Александровне, оказавшей помощь в проведении исследований.

Литература

1. ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М. : Издательство стандартов, 1979. – 12 с.
2. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 6 : в 3 кн. Кн. 1 : Магнитные методы контроля / В. В. Клюев, В. Ф. Мужичкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин. – М. : Машиностроение, 2004. – С. 13–375.
3. Effect of mechanical stresses on the magnetic characteristics of pipe steel / E. S. Gorkunov, S. M. Zadvorkin, A. N. Mushnikov, S. V. Smirnov, E. I. Yakushenko // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2014. – Vol. 55. – P. 530–538. – DOI: 10.1134/S002189441403016X.
4. Патент № 2195636 Рос. Федерация. Способ определения механических напряжений и устройство для его осуществления : № 2001106509/28 : заявл. 05.03.2001 : опубл. 27.12.2002 / Жуков С. В., Жуков В. С., Копица Н. Н. – 3 с.
5. Жуков С. В., Копица Н. Н. Исследование полей механических напряжений в металлических конструкциях приборами «Комплекс-2» : сб. науч. трудов отделения «Специальные проблемы транспорта» Российской академии транспорта. – Санкт-Петербург : ВТУ, 1998. – № 3. – С. 214–222.
6. Novikov V. F., Yatsenko T. A., Bakharev M. S. Coercive force as a function of uniaxial stresses (part 2) // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2002. – Vol. 38. – P. 231–237. – DOI: 10.1023/A:1020901319055.
7. Deordiev G. I., Biktashev T. Kh. Magnetostriction method of measuring stresses in components of metallic structures // Soviet Journal of Nondestructive Testing–USSR. – 1977. – No. 3. – P. 83–91.
8. Агинея Р. В., Теплинский Ю. А., Кузьбожев А. С. Оценка напряжённого состояния стальных трубопроводов по анизотропии магнитных свойств металла // Контроль. Диагностика – 2004. – № 8 – С. 22–24.
9. Горкунов Э. С., Мушников А. Н. Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // Контроль. Диагностика. – 2020. – Т. 23. – № 12 (270). – С. 4–23. – DOI: 10.14489/td.2020.12.pp.004-023.
10. Mushnikov A. N., Mitropolskaya S. Yu. Effect of mechanical stresses on the magnetic characteristics of pipeline steels of different classes // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2016. – Iss. 4. – P. 57–70. – DOI: 10.17804/2410-9908.2016.4.057-070. – URL: http://dream-journal.org/issues/2016-4/2016-4_89.html
11. Филинов В. В. Приборы и методы контроля технологических напряжений на основе использования магнитных и акустических шумов перемагничивания : учеб. пособие. – М. : МГАПИ, 2000. – 80 с.
12. Filinov V. V., Kuznetsov A. N., Arakelov P. G. Monitoring stressed state of pipelines by magnetic parameters of metal // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Vol. 53 (1). – P. 51–61. – DOI: 10.1134/S1061830917010065.
13. Kulak S. M., Novikov V. F., Maltsev V. S. Testing mechanical stresses of bearing steel I-beams of automobile overpass using magnetic and tensometric methods // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58. – P. 186–194. – DOI: 10.1134/S1061830922030044.

14. Kulak S. M., Novikov V. F., Baranov A. V. Control of mechanical stresses of high-pressure container walls by magnetoelastic method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 154. – 012004. – DOI: 10.1088/1757-899X/154/1/012004.
15. Magnetic testing of stressed state of hydrotested gas-separator wall / S. M. Kulak, V. F. Novikov, V. V. Probotyuk, S. M. Vatsenkov, E. S. Fursov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Vol. 55 (3). – P. 225–232. – DOI: 10.1134/S0130308219030072.
16. Новиков В. Ф., Кулак С. М., Андреев В. О. О контроле напряженно-деформированного состояния стальных мостовых конструкций методом магнитоупругого размагничивания // Строительная механика и расчет сооружений. – 2020. – № 4 (291). – С. 3–7. – DOI: 10.37538/0039-2383.2020.4.3.7.
17. Новиков В. Ф., Кулак С. М., Парахин А. С. Определение осевых напряжений стали в режиме памяти по экспоненциальному закону магнитоупругого размагничивания // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2021. – Т. 87 (6). – С. 54–62. – DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-6-54-62.
18. Studying magnetoelastic effects in ferromagnetic structural materials / E. S. Gorkunov, S. M. Zadvorkin, A. N. Mushnikov, A. M. Povolotskaya // Navy and Shipbuilding Nowadays NSN'2019, Saint-Petersburg, Russia, July 11–12, 2019 : Proceedings of X International Conference. – М. : Krylov State Research Centre, 2019. – P. 26–35.
19. Большаков В. Н., Горбаш В. Г., Оленович Т. В. Влияние механических напряжений на локальную остаточную намагниченность // Изв. АН БССР, сер. физ. тех. наук. – 1980. – № 1. – С. 109–112.
20. Toward using the Villari effect for non-destructive evaluation of steel structures / C. A. Ives, S. G. H. Staples, C. K. Vo, D. M. J. Cowell, S. Freear, B. T. H. Varcoe // Journal of Applied Physics. – 2023. – Vol. 134. – 065101. – DOI: 10.1063/5.0147736.
21. Resistance of residual magnetization of heat-treated steel products to elastic deformations / E. S. Gorkunov, V. F. Novikov, A. P. Nichipuruk, V. V. Nassonov, A. V. Kadrov, I. N. Tatlybaeva // Soviet Journal of Nondestructive Testing. – 1991. – Vol. 27 (2). – P. 138–145.
22. The influence of biaxial elastic deformation on the coercive force and local remanent magnetization of construction steels / V. F. Novikov, S. V. Sorokina, M. E. Kudryashov, V. A. Zakharov, A. I. Ulyanov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2010. – Vol. 46 (7). – P. 520–526. – DOI: 10.1134/S1061830910070065.
23. Контроль магнитоупругим методом напряженно-деформированного состояния стальных металлоконструкций в условиях Севера / В. Ф. Новиков, А. В. Радченко, В. П. Устинов, М. С. Мимеев // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – Т. 10, № 3 (52). – С. 140–144.
24. Загидулин Т. Р., Загидулин Р. В., Горчаков Р. К. Применение магнитного контроля напряженно-деформированного состояния металла при технической диагностике и экспертизе стальных изделий и элементов металлоконструкций // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 3. – С. 54–61. – DOI: 10.14489/Td.2015.03.Pp.054-061.
25. Загидулин Т. Р., Загидулин Р. В. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния металлоконструкций индикатором механического напряжения металла ин-02 сканирующего типа // Нефтегазовое дело. – 2017. – Т. 15 (4). – С. 143–149. – DOI: 10.17122/ngdelo-2017-4-143-149.
26. Новиков В. Ф., Долгих Е. В., Буторин Н. А. Запоминающий датчик ударных механических напряжений // Электротензометрия, 17–18 ноября, 1981 г. : материалы науч.-практ. краткосроч. семинара / под ред. Е. М. Аристова и др. – Ленинград : ЛДНТП, 1981. – С. 80–83.
27. Мирошников В. В., Завальнюк О. П. Исследование возможности контроля упругих напряжений по величине остаточной намагниченности металла // Вісник НТУ «ХП». – 2013. – № 34 (1007). – С. 12–17.

28. Irreversible changes in the magnetization as indicators of stressed-strained state of ferromagnetic objects / V. N. Kostin, T. P. Tsarkova, A. P. Nichipuruk, V. E. Loskutov, V. V. Lopatin, K. V. Kostin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2009. – Vol. 4. – P. 786–796. – DOI: 10.1134/S1061830909110059.
29. Кулеев В. Г., Бида Г. В., Атангулова Л. В. О возможности использования зависимости остаточной намагниченности от упругих напряжений для их неразрушающего контроля в стальных ферромагнитных конструкциях // Дефектоскопия. – 2000. – № 12. – С. 7–19.
30. Горкунов Э. С. Различные состояния остаточной намагниченности и их устойчивость к внешним воздействиям. К вопросу о «методе магнитной памяти» // Дефектоскопия. – 2014. – № 11. – С. 3–21.
31. Яновский Б. М. Земной магнетизм : учеб. пособие для физ. спец. вузов. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1978. – 591 с.
32. Kostin V. N., Sazhina E. Yu. Influence of climate-range temperature on magnetic properties of steels of various composition // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Vol. 55. – P. 756–760. – DOI: 10.1134/S1061830919100061.
33. Вонсовский С. В., Шур Я. С. Ферромагнетизм. – Москва ; Ленинград : Гостехиздат, 1948. – 816 с.
34. Кринчик Г. С. Физика магнитных явлений : учеб. пособие для физ. спец. вузов. – 2-е изд., доп. – М. : МГУ, 1985. – 336 с.
35. Новиков В. Ф., Фёдоров Б. В., Изосимов В. А. Устойчивость остаточно-намагниченного состояния инструментальных сталей // Дефектоскопия. – 1995. – № 2. – С. 68–71.
36. Матюк В. Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального однополярного импульсного намагничивания // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 2. – С. 29–64.
37. Förster F., Zizelmann G. Die schnelle zerstörungsfreie Bestimmung der Blechanisotropie mit dem Restpunktpolverfahren // Z. Metallkunde. – 1954. – 45 (4). – 245–249.
38. Нормальная составляющая остаточного магнитного поля над поверхностью массивного тела / Э. Э. Федорищев, Л. А. Фридман, В. П. Табачник, Г. С. Чернова // Дефектоскопия. – 1982. – № 2. – С. 23–29.
39. Томилов Г. С. Магнитный контроль структуры и твердости стальных деталей по измерениям локального поля остаточной намагниченности // Дефектоскопия. – 1966. – № 4. – С. 70–78.
40. Новиков В. Ф. Физические основы методов неразрушающего контроля качества изделий : учебное пособие. – Тюмень : ТИУ, 2018. – 105 с.