

Received: 02.02.2024

Revised: 24.04.2024



Accepted: 24.05.2024


DOI: 10.17804/2410-9908.2022.4.073-086

STUDYING THE MAGNETOELASTIC PROPERTIES OF A STEEL SHEET UNDER BENDING DEFORMATION

S. M. Kulak^{a,*}, P. V. Pavlov, and V. S. Maltsev^b

Industrial University of Tyumen, 38 Volodarsky St., Tyumen, 625000, Russia

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0002-5970-8893>  kulaksm@tyuiu.ru

^{b)}  coreboxe@gmail.com

*Corresponding author. Email: kulaksm@tyuiu.ru

Address for correspondence: ul. Melnikaite, 70, room 317, Tyumen, 625000, Russia

The possibility of using the method of magnetoelastic demagnetization (magnetoelastic memory) of ferromagnets to control mechanical stresses of extended steel structures is considered. For this purpose, the paper studies the magnetoelastic demagnetization of a large plate sample, previously locally magnetized in the form of an N-S stripe, under pure bending deformation. Under these deformation conditions, zones of tension and compression alternate along the sheet length; consequently, a locally magnetized steel stripe experiences stresses of different magnitudes and signs along its length. It has been revealed that the highest decrease δH in the stray field strength of local remanent magnetization in the form of an N-S stripe is found in steel sheet areas at the apex of the bend, where tensile stresses do not exceed 100 MPa. In the other parts of the sheet, a periodic distribution of lower δH with a wavelength of 20 to 30 cm was revealed, this being comparable to the size of half of its zone with stresses of the same type created during bending. The obtained results of changes in δH were calibrated according to the level of stresses they experienced, and their distribution along the entire length of the bent sheet was obtained. A conclusion is drawn about the applicability of the magnetoelastic memory method to monitoring the stress state of extended steel structures in the memory mode.

Keywords: magnetoelastic memory of metal, mechanical stress, steel structure

References

1. Gorkunov, E.S. and Mushnikov, A.N. Magnetic methods for assessing elastic stresses in ferromagnetic steels (review). *Kontrol. Diagnostika*, 2020, 23 (12), 4–23. (In Russian). DOI: 10.14489/td.2020.12.pp.004-023.
2. 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 stress-strain state of ferromagnetic objects. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, 45 (11), 786–798. DOI: 10.1134/S1061830909110059.
3. Kuleev, V.G., Tsarkova, T.P., and Nichipuruk, A.P. Effect of tensile plastic deformations on the residual magnetization and initial permeability of low-carbon steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2006, 42 (4), 261–271. DOI: 10.1134/S1061830906040073.
4. Mushnikov, A.N. and Mitropolskaya, S.Yu. Influence of mechanical loading on the magnetic characteristics of pipe steels of different classes. *Diagnostics, 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.htmlv

5. Gorkunov, E.S., Zadvorkin, S.M., Smirnov, S.V., Mitropol'skaya, S.Yu., and Vichuzhanin, D.I. Correlation between the stress-strain state parameters and magnetic characteristics of carbon steels. *The Physics of Metals and Metallography*, 2007, 103, 311–316. DOI: 10.1134/S0031918X07030131.
6. Novikov, V.F., Vazhenin, Yu.I., Bakharev, M.S., Kulak, S.M., and Muratov, K.R. *Diagnostika mest povyshennoy razrushaemosti truboprovoda* [Diagnostics of Places of Increased Destruction of the Pipeline]. OOO Nedra–Biznes–Tsentr Publ., Moscow, 2009, 200 p. (In Russian).
7. 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.
8. Novikov, V.F., Ustinov, V.P., Radchenko, A.V., Muratov, K.R., Kulak, S.M., and Sorokina, S.V. On controlling stresses in a complexly loaded steel construction by magnetoelastic demagnetization. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, 52, 357–361. DOI: 10.1134/S1061830916060073.
9. Novikov, V.F., Kulak, S.M., and Andreev, V.O. On the control of the stress-strain state of steel bridge structures by the method of magnetoelastic demagnetization. *Stroitel'naya Mekhanika i Raschet Sooruzheniy*, 2020, 4 (291), 3–7. (In Russian).
10. Novikov, V.F., Kulak, S.M., and Parakhin, A.S. Determination of axial stresses of steel in memory mode according to the exponential law of magnetoelastic demagnetization. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2021, 87 (6), 54–62. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-6-54-62. (In Russian).
11. Vonsovsky, S.V. and Shur, Ya.S. *Ferromagnetism* [Ferromagnetism]. GITTL Publ., Moscow–Leningrad, 1948, 816 p. (In Russian).
12. Novikov, V.F. and Bakharev, M.S. *Magnitnaya diagnostika mekhanicheskikh napryazhenii v ferromagnetikakh* [Magnetic Testing of Mechanical Stresses in Ferromagnets]. Vektor Buk Publ., Tyumen, 2001, 220 p. (In Russian).
13. Novikov, V.F., Bakharev, M.S., and Sorokina, S.V. Non-destructive control of snow and wind loads in the mode of magnetoelastic memory. *Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernykh Konstruktsiy i Sooruzheniy*, 2008, 3, 51–54. (In Russian).
14. Ponomarev, V.N., Travush, V.I., Bondarenko, V.M., and Eremin, K.I. On the need for a systematic approach to research in the field of integrated safety and prevention of accidents of buildings and structures. *Predotvrashchenie Avariyy Zdanii i Sooruzheniy: Elektronnyi Zhurnal*, 2013, 1–9. (In Russian). Available at: http://www.pamag.ru/prensa/necessiy_sys-appro (accessed 2013–11–25).
15. Lipanov, I.D., Molodkin, I.A., and Khomonenko, A.D. Development and prospects of the information system for monitoring the condition of bridges. *Intellektualnye Tekhnologii na Transporte*, 2021, 3 (27), 11–16. (In Russian). DOI: 10.24412/2413-2527-2021-327-11-16.
16. Horokhov, E., Vasylev, V., Mironov, A., and Shcherbina, A. Tensely-deformed state of metallic ellipse beam. *Vestnik Donbasskoy Natsionalnoy Akademii Stroitelstva i Arhitektury*, 2020, 4 (104), 65–68. (In Russian).
17. Bozhkov, V.I., Dizenko, S.I., Pedan, O.A., and Khoroshev, A.A. Test of the bridge across the Sochi river. *Nauchnye Trudy KubGTU*, 2017, 3, 83–89. (In Russian). Available at: <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0040/1542.pdf>
18. 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 Non-destructive Testing*, 2022, 58, 186–194. DOI: 10.1134/S1061830922030044.
19. Kurilenko, E.Yu., Ogorodnova, Yu.V., and Shaptala, I.V. *Soprotivlenie materialov: uchebnoe posobie po tekhnicheskoi mekhanike i soprotivleniyu materialov* [Strength of Materials: Study Guide on Technical Mechanics and Strength of Materials]. RIO Tyumen GASU Publ., Tyumen, 2014, 163 p. (In Russian).
20. Mamchenko, V.O. *Raschet balok na prochnost i gestkost pri priyamom i ploskom izgibe* [Calculating Structural Integrity and Rigidity of Beams Under Straight Flat Bending: Teaching Aid]. NIU ITMO, St. Petersburg, 2014, 48 p. (In Russian).

21. Vodopyanov, V.I., Savkin, A.N., and Kondratyev, O.V. *Kurs soprotivleniya materialov s primerami i zadachami. Uchebnoe posobie* [The Course of Resistance of Materials with Examples and Tasks. Textbook]. VolgSTU Publ., Volgograd, 2012, 136 p. (In Russian).
22. Krapivsky, E.I. and Nekuchaev, V.O. *Distsionnaya magnitometriya gazonefteprovodov* [Remote Magnetometry of Gas and Oil Pipelines: Textbook]. UGTU Publ., Ukhta, 2011, 142 p. (In Russian).
23. Venkova, Yu.A. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya neftegazoprovodov po induktivnoy i ostatnochnoy namagnichennosti* [Monitoring the Technical Condition of Oil and Gas Pipelines by Induced and Residual Magnetization: Cand. Thesis]. St. Petersburg, 2016, 149 p. (In Russian).

Подана в журнал: 02.02.2024



УДК 620.179.14

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.3.073-086

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОУПРУГОГО РАЗМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЬНОГО ЛИСТА ПРИ ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБОМ

С. М. Кулак^{а,*}, П. В. Павлов, В. С. Мальцев^б

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

^{а)}  <https://orcid.org/0000-0002-5970-8893>  kulaksm@tyuiu.ru;

^{б)}  coreboxe@gmail.com

*Ответственный автор. Электронная почта: kulaksm@tyuiu.ru

Адрес для переписки: ул. Мельникайте, 70, ауд. 317, г. Тюмень, 625000, Россия

Рассматривается возможность применения метода магнитоупругого размагничивания (магнитоупругой памяти) ферромагнетиков для контроля механических напряжений протяженных стальных конструкций. Для этого исследовано магнитоупругое размагничивание пластинчатого образца больших размеров, предварительно локально намагниченного в виде полосы N-S, при его деформации простым изгибом. При этих условиях деформации листа по его длине будут чередоваться зоны растяжения и сжатия, а следовательно, локально намагниченная полоса стали по своей длине будет испытывать напряжения разного уровня и знака. Установлено, что наибольшее значение убыли δH напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности в виде полосы N-S имеют области стального листа в вершине изгиба, где напряжения растяжения не превышают 100 МПа. В остальных участках листа выявлено периодическое распределение δH меньшего уровня с длиной волны 20–30 см, что сопоставимо с размером половины его зоны с однотипными напряжениями, создаваемыми при изгибе. Проведена калибровка полученных результатов изменения δH по уровню испытываемых напряжений, и получено их распределение вдоль всей длины изгибаемого листа. Сделан вывод о применимости метода магнитоупругой памяти для контроля напряженного состояния протяженных стальных конструкций в режиме памяти.

Ключевые слова: магнитоупругая память металла, механические напряжения, стальная конструкция

1. Введение

Механические напряжения в ферромагнитном материале, создаваемые внешними воздействиями или термической деформацией, вызывают изменения доменной структуры, а следовательно, и его магнитоупругих свойств [1–5]. В частности, остаточная намагниченность ферромагнетика необратимо изменяется под действием механических напряжений растяжения и сжатия. Этот эффект магнитоупругого размагничивания (магнитоупругой памяти МУП) ферромагнитных материалов может быть использован для контроля их напряженного состояния [6–10]. Для этого необходимо измерить напряженность магнитного поля рассеяния H остаточного намагниченного элемента контролируемой конструкции до и после его деформации и сопоставить ее изменения с уровнем испытываемых напряжений. При контроле напряжений металлоконструкции магнитоупругим методом после ее локального намагничивания (ЛН) над намагниченным участком индуцируется магнитное поле, напряженность H которого определяется магнитным моментом локальной намагниченности M_r . Метод МУП заключается в необратимом уменьшении напряженности магнитного поля рас-

сеяния локальной остаточной намагниченности M_r ферромагнитного материала (стали) при силовом воздействии на него [6–10]. Под действием напряжений магнитная система (домены и их границы) ферромагнетика (стали), предварительно находящегося в остаточном намагниченном состоянии, перестраивается для достижения им минимума магнитоупругой энергии [11]. Убыль намагниченности M_r , а следовательно, и H стали, испытывавшей механические напряжения σ , будет тем больше, чем больше изменение ее магнитоупругой энергии $\Delta W_{\text{му}}$ и чем больше величина магнитоэластической энергии, и она зависит от подвижности доменных границ [12]. Применение метода МУП для контроля механических напряжений в стальной конструкции не требует подготовки ее поверхности, размещения на ней датчиков и регистрирующей аппаратуры. Роль запоминающего датчика в методе МУП выполняет сама контролируемая конструкция, а именно ее локально намагниченная область (магнитная метка). Физическая природа эффекта МУП, а именно необратимость изменений контролируемого магнитного параметра (остаточная намагниченность, напряженность H магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности), делает возможным его применение для контроля амплитуды механических напряжений в конструкциях, испытывающих не только статические, но и периодические разноуровневые нагрузки. К таким нагрузкам можно отнести, например, нагрузки, создаваемые в конструкциях порывами ветра в степных или северных районах, снеговые нагрузки [13], которые могут составлять до 30 % от расчетных значений статических напряжений. В работах [14, 15] показано, что одной из причин аварийного разрушения мостов являются динамические нагрузки, которые они испытывают в процессе эксплуатации. Поэтому важным направлением научных исследований по обеспечению безопасности таких транспортных сооружений является исследование изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) в опасных зонах и узлах, а также создание необходимых для этого новых приборов и методик [16, 17].

В работах [18, 9] изложены результаты исследования магнитоупругого размагничивания несущих балок моста после их локального намагничивания и динамического воздействия проезжающего по нему транспорта. По результатам этих исследований проведена оценка максимальных механических напряжений, создаваемых в средней части балок деформацией изгиба после динамического воздействия на них проезжающего транспорта. Протяженность исследуемых балок составляет ~42 м, и при их поперечном изгибе от проезжающего транспорта все точки балки будут также испытывать напряжения разной величины и знака. Поэтому возникла необходимость в исследовании возможностей метода магнитоупругого размагничивания при контроле механических напряжений протяженных стальных конструкций, например элементов мостовых сооружений, в режиме сканирования по всей их длине.

Цель работы – исследование магнитоупругого размагничивания протяженного стального образца при его деформации изгибом.

В ходе выполнения работы решались следующие задачи:

- разработка и изготовление стенда для намагничивания и деформации изгибом стального протяженного образца;
- исследование магнитоупругого размагничивания стального образца после его простого изгиба различного уровня;
- изучение распределения механических напряжений в стальном образце при деформации изгибом по результатам исследований его магнитоупругого размагничивания.

2. Материал и методика

Исследования проводили на стальном листе размером $2,5 \times 1,25$ м и толщиной 3 мм из стали 08пс. Согласно сертификату качества, выданному заводом-изготовителем, сталь 08пс имеет следующий уровень механических свойств: $\sigma_b = 340$ Н/мм²; $\delta = 35$ %; $\sigma_T = 196$ МПа.

Если рассматривать исследуемый образец в качестве простой балки, то допускаемая величина изгибающей силы при коэффициенте запаса прочности 1,5 не должна превышать 3,5 кН [19].

Для исследования магнитоупругих свойств протяженного стального образца при его деформации изгибом изготовлен стенд из немагнитных материалов, состоящий из платформы с подъемным механизмом и устройства для протяженного полосового намагничивания и измерения напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности (ЛОН) в виде полосы N-S вдоль листа после каждого этапа его изгиба (рис. 1).



Рис. 1. Стенд для исследования магнитоупругих свойств стального листа при простом поперечном изгибе: 1 – исследуемый стальной лист (образец); 2 – платформа с подъемным механизмом, расположенным внизу под листом в его центральной части; 3 – устройство для полосового намагничивания и сканирования листа стали

Платформа 2 с установленным снизу (под листом) подъемным механизмом и свободно лежащим на ее поверхности листом 1 располагалась горизонтально. В средней части платформы поперек листа внизу находился деревянный брусок длиной, равной ширине листа. Брусок плотно прилегал снизу к поверхности листа и свободно перемещался в вертикальной плоскости на фиксируемую высоту с помощью подъемного механизма, тем самым создавая изгибные деформации разного знака в плоскости исследуемого образца по всей его длине. Сверху, на поверхности исследуемого листа, располагалось устройство 3 для его полосового намагничивания и сканирования. Это устройство состояло из направляющих рельсов, расположенных параллельно друг другу и сторонам листа, намагничивающего устройства П-образной формы (рис. 2 а) и сканирующего устройства с датчиками феррозондового магнитометра ИКНМ-9М-12 (рис. 2 б). Намагничивающее и сканирующее устройства приводились в равномерное прямолинейное движение вдоль поверхности листа посредством веревки, наматываемой на барабан при его равномерном вращении. Направляющие рельсы устройства 3 позволяли производить намагничивание листа в виде строго параллельной полосы N-S поперек оси создаваемых в нем изгибом деформаций и сканировать магнитное поле рассеяния полученной локально остаточной намагниченности при строгом расположении датчиков магнитометра в местах максимумов нормальной и тангенциальной составляющих напряженности магнитного поля рассеяния создаваемой ЛОН.

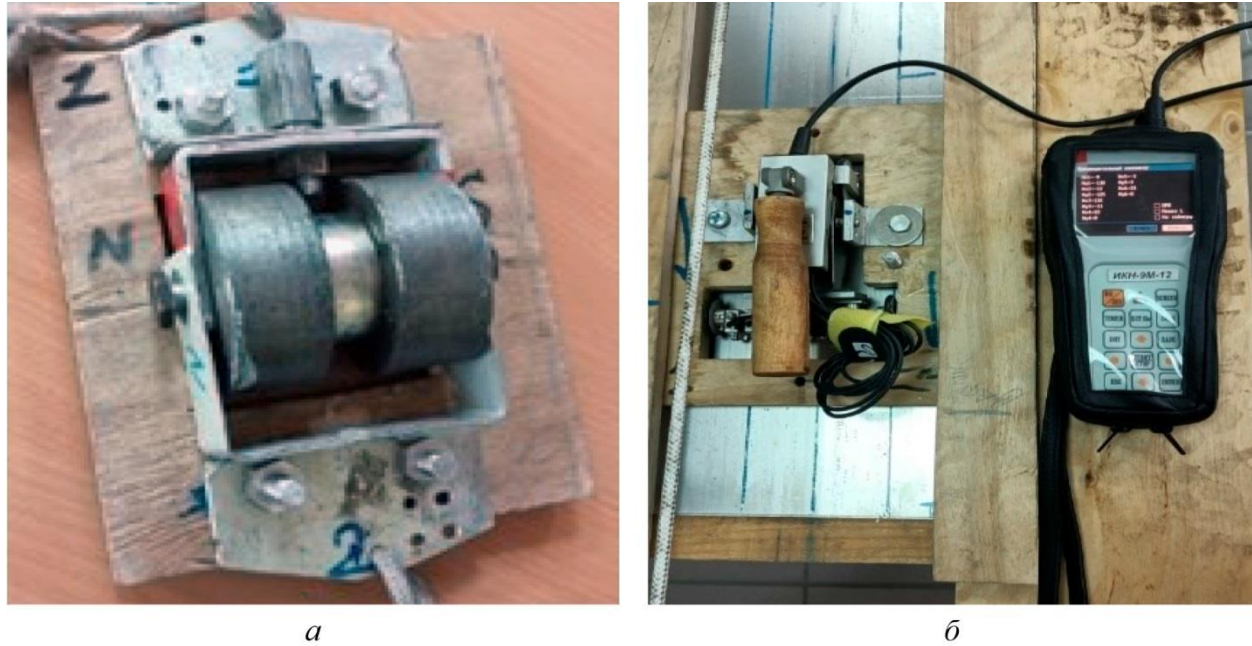


Рис. 2. Намагничивающее устройство П-образной формы (а) и сканирующее устройство с датчиками магнитометра ИКН-9М-12 (б)

Профиль создаваемой намагничивающим устройством ЛОН в виде полосы N-S и точки расположения феррозондовых датчиков на ней показаны на рис. 3.

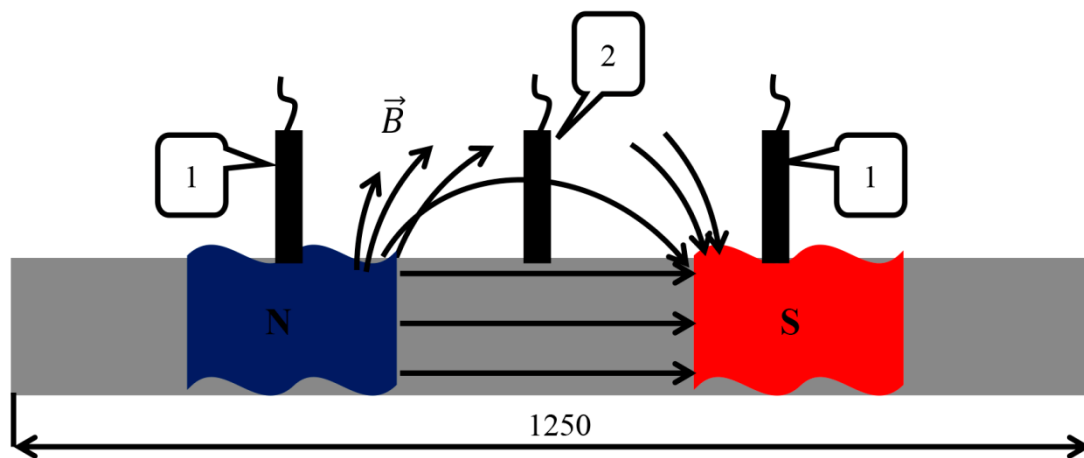


Рис. 3. Поперечное сечение стального листа, намагниченого локально полосой N-S с расположенными на его поверхности датчиками в местах максимумов нормальной (1) и тангенциальной (2) составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН

Ширина полюсов N и S намагничивающего устройства значительно больше толщины исследуемого листа, что позволяло его намагничивать на всю толщину.

Методика исследований состояла в следующем. В направляющие рельсы устройства 3 (рис. 1) помещали намагничивающее устройство (рис. 2 а), перемещаемое вдоль длины листа, и производили его поперечное намагничивание в виде полосы N-S. Всего намагничивание производили вдоль трех выделенных параллельных линий, одна из которых проходила через середину листа, а две другие – на расстоянии 0,5 м от нее. Затем намагничивающее устройство в направляющих рельсах заменяли на сканирующее (рис. 2 б) и измеряли нормальную H_{n0} и тангенциальную H_{t0} составляющие напряженности магнитного поля рассея-

ния ЛОН в точках, показанных на рис. 3 и в таблице. При этом показания датчиков H_n усредняли, что исключало влияние внешнего магнитного поля на результаты измерений.

Таблица

Результаты измерения нормальной H_{n0} и тангенциальной $H_{\tau0}$ составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН в виде полосы N-S в исходном, ненагруженном изгибом, состоянии стального листа

Расстояние от края полосы $X, м$	Составляющие напряжённости магнитного поля рассеяния ЛОН	
	$H_{\tau0}, А/м$	$H_{n0}, А/м$
0	-199	71,7
0,1	-212	84
0,2	-212	91,5
0,3	-212	86,5
0,4	-212	88
0,5	-212	76
0,6	-242	77,8
0,7	-212	90,5
0,8	-201	94
0,9	-205	77,5
1,0	-212	76,5
1,1	-209	86,5
1,2	-209	84
1,3	-209	89
1,4	-196	82,5
1,5	-206	70,5
1,6	-200	84,5
1,7	-199	98,5
1,8	-199	79
1,9	-185	74
2,0	-164	62,5
2,1	-187	72,5
2,2	-212	77
2,3	-221	76

С помощью подъемного механизма стенда выполняли вертикальный подъем деревянного бруска, расположенного под листом в его середине, на высоту $h = 10$ мм, тем самым создавая минимальный изгиб листа с расположенным на его поверхности устройством 3 (рис. 1). Повторяли аналогичные измерения H_n и H_τ вдоль выделенных линий. Далее следовали повторные операции подъема центральной части листа на высоту $h = 20, 30, 40, 50$ и 60 мм и измерения H_{ni} и $H_{\tau i}$. Оценивали величины относительного изменения обеих составляющих δH_n и δH_τ напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН листа после каждого этапа его изгиба.

$$\delta H_n = \frac{H_{n0} - H_{ni}}{H_{n0}}, \quad \delta H_\tau = \frac{H_{\tau0} - H_{\tau i}}{H_{\tau0}}. \quad (1)$$

С помощью тензометрического устройства, применяемого в работах [18, 9] для измерения деформации балок автомобильного моста, проведена калибровка величины стрелы из-

гиба h исследуемого листа по уровню деформаций растяжения (механических напряжений σ), создаваемых в его середине. Согласно исследованиям [20, 21], при поперечном вертикальном изгибе горизонтальной балки вверх в ее центральной части реализуются наибольшие деформации растяжения в верхней плоскости и сжатия – в нижней. При этом знак и величина деформации вдоль верхней и нижней поверхностей листа поперек линии его изгиба будут изменяться. Увеличение стрелы изгиба h листа в его центральной части сопровождается неодинаковым уменьшением радиуса кривизны различных участков его поверхности и соответствующим ростом деформации в этих местах. Поэтому вследствие магнитоупругого эффекта, вызванного простым изгибом стального листа, его остаточная намагниченность M_r , а следовательно и напряженность магнитного поля рассеяния H ЛОН, измеренная на верхней поверхности в области полосы N-S, будет претерпевать изменения, соответствующие величине и знаку создаваемых изгибом нормальных напряжений σ . Вдоль средней линии по толщине листа между верхней и нижней поверхностями нормальные напряжения равны нулю. В последующем была установлена зависимость относительного изменения напряженности магнитного поля рассеяния δH_n и δH_t ЛОН стального листа от механических напряжений σ , создаваемых при его изгибе.

Под действием механических напряжений σ магнитная система (домены и их границы) ферромагнетика (стали), предварительно находящегося в остаточной намагниченности, перестраивается для достижения им минимума магнитоупругой энергии [11]:

$$\Delta W_{\text{my}} = -3/2 \cdot \lambda_s \sigma \cos^2 \varphi.$$

Здесь λ_s – константа магнитоупругости; σ – упругие напряжения; φ – угол между магнитным моментом \vec{P}_m ферромагнетика (направлением намагниченности) и осью действующих напряжений в нем.

Если ферромагнетик (сталь) локально намагнитить в виде полосы N-S внешним магнитным полем П-образного намагничивающего устройства (рис. 2 а) поперек длины листа, создав преимущественную ориентацию магнитных моментов доменов \vec{P}_m в этом направлении (рис. 3), а затем в этом же месте оказать сжимающее воздействие $\sigma < 0$ поперек оси намагничивания, то магнитные моменты \vec{P}_m его доменов будут стремиться изменить свое прежнее пространственное положение максимум на $\varphi \sim 90^\circ$, или, другими словами, занять положение с максимальным углом φ между магнитным моментом и осью нагружения, т. е. расположиться нормально к плоскости. Тем самым будет достигнут минимум магнитоупругой энергии ΔW_{my} стали (ферромагнетика) в области локальной остаточной намагниченности N-S. В этом случае рост напряжений сжатия в листе за счет большего изгиба будет вызывать увеличение нормальной H_n и убыль тангенциальной H_t составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН полосы N-S. На рис. 4 и 5 зоны сжатия приходятся на участки верхней поверхности листа с координатами $L = 0 \div 60$ см и $180 \div 240$ см. В этих участках величина δH_n с ростом стрелы изгиба h изменяется неоднозначно, а δH_t только увеличивается. При аналогичном полосовом намагничивании листа и ортогональном к создаваемой локальной остаточной намагниченности нагружению растяжением $\sigma > 0$ для достижения минимума ΔW_{my} магнитные моменты доменов \vec{P}_m будут занимать положение вдоль оси нагружения. Следовательно, здесь обе составляющие H_n и H_t будут только убывать с ростом напряжений растяжения при увеличении h . Область исследуемого образца, где реализуются напряжения растяжения при его центральном изгибе, находится в его средней части размером $L = 60 \div 180$ см. Как видно из рис. 4 и 5, в этой части образца величины δH_n и δH_t только возрастают при увеличении стрелы изгиба листа h . Таким образом, для двух отличающихся видов однородного нагружения ферромагнетика (например, осевое сжатие и растяжение) при одной и той же исходной конфигурации распределения магнитных моментов \vec{P}_m , его локальной намагниченности, создаваемой полосовым намагничиванием N-S, и качественно подобной магнитоупру-

гой энергии происходит перестройка магнитных моментов \vec{P}_m , доменной системы стали в этом месте, и тем самым формируется локально ее остаточной намагниченное состояние. Индуцируемое локальной остаточной намагниченностью стали магнитное поле рассеяния H на поверхности стального образца регистрируется датчиком феррозондового магнитометра.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 4 и 5 показаны распределения изменения нормальной δH_n и тангенциальной δH_t составляющих напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН вдоль средней намагниченной полосы N-S после намагничивания листа и его изгиба с разной стрелой h .

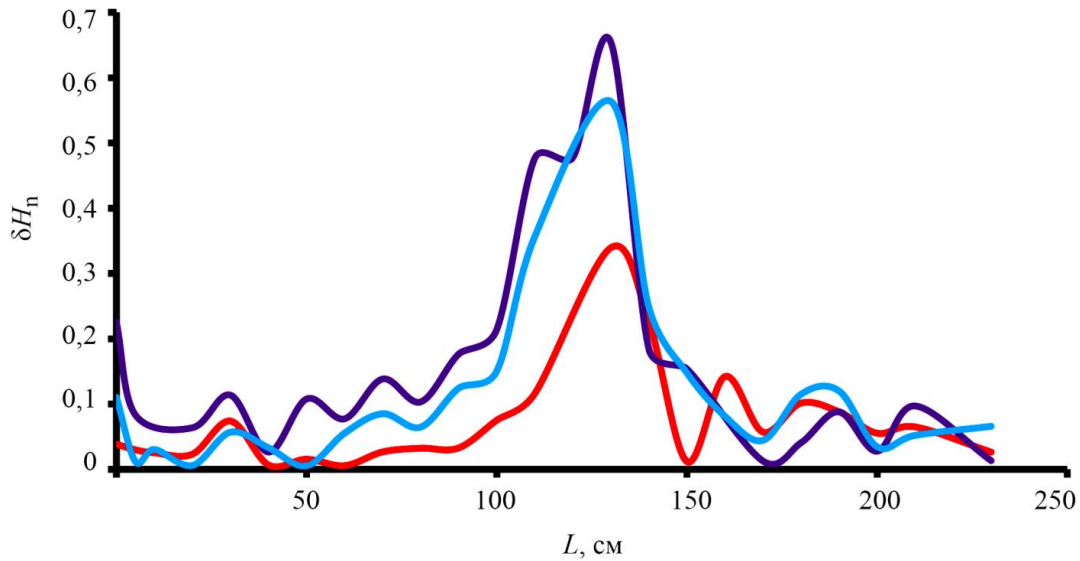


Рис. 4. Распределение величины δH_n – относительного изменения нормальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН полосы N-S по длине стального листа L после его намагничивания и изгиба в средней части со стрелой $h = 10$ (—), 30 (—) и 60 (—) мм

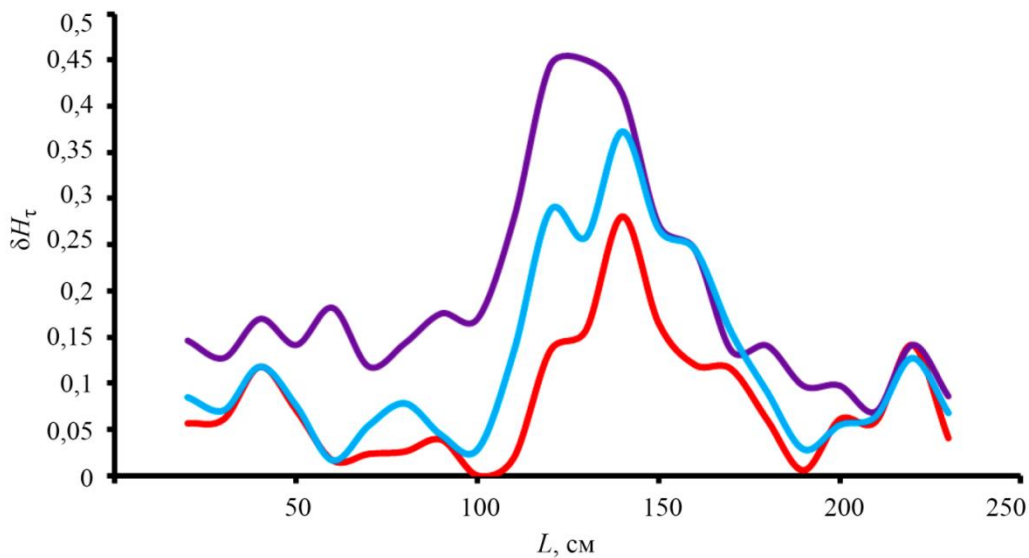


Рис. 5. Распределение величины δH_t – относительного изменения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН полосы N-S по длине стального листа L после его намагничивания и изгиба в средней части со стрелой $h = 10$ (—), 30 (—) и 60 (—) мм

Как видно из рис. 4 и 5, составляющие δH_n и δH_t имеют наибольшее значение в центральной части листа, где он испытывает наибольшие изгибные деформации. С ростом стрелы изгиба листа h эти изменения неодинаково возрастают в каждой точке контролируемой полосы N-S. Также можно отметить синфазную периодичность изменения δH_n и δH_t при любой стреле изгиба листа h . При этом длина волны такой периодической кривой составляет 20–30 см, что приблизительно соответствует половине протяженности участка листа, испытывающего однородные напряжения растяжения или сжатия. Повторные поэтапные циклы изгибной деформации листа до уровня $h = 60$ мм не вызвали изменений регистрируемых параметров δH_n и δH_t .

Знак величины изменения напряженности магнитного поля рассеяния δH_n , δH_t локально намагниченной стали (магнитоупругого размагничивания, или МУП) остается неизменным при смене знака прикладываемых к ней напряжений (растяжение или сжатие) при изгибе [6]. При пьезомагнитном намагничивании деформируемого изгибом стального трубопровода его магнитное поле изменяется периодически как по модулю, так и по направлению [22, 23] и имеет схожий характер с магнитным полем подземного трубопровода, испытывающего изгибные деформации [6].

На рис. 6 показано распределение механических напряжений σ по длине средней полосы N-S, оцененных по результатам калибровки магнитоупругого сигнала δH_n и δH_t и стрелы изгиба листа h по уровню механических напряжений σ , измеренных с помощью тензометрического устройства [18, 9]. Отметим, что в областях сжатия изгибаемого листа в точках с $L = 0 \div 50$, $200 \div 250$ см величина создаваемых напряжений определяется положительной.

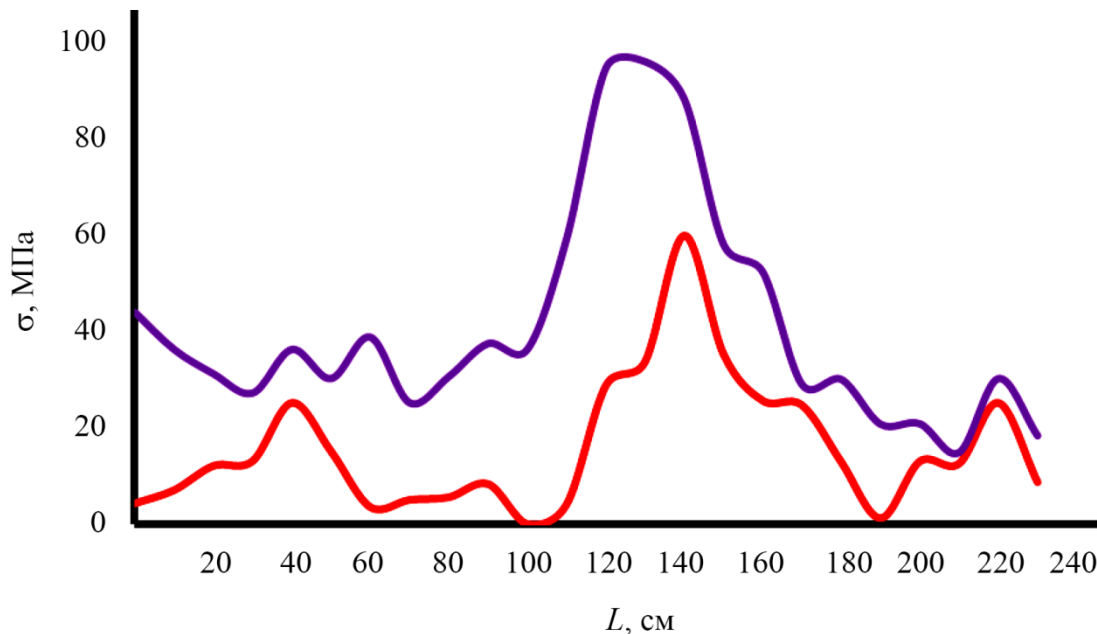


Рис. 6. Распределение нормальных напряжений σ вдоль средней полосы N-S листа длиной L при стреле его изгиба $h = 10$ (—) и 60 (—) мм

Как видно из рис. 6, увеличение стрелы изгиба листа до $h = 60$ мм приводит к различному увеличению уровня напряжений вдоль всей его длины и создает в центре его верхней поверхности наибольшие напряжения растяжения (порядка 100 МПа).

Изгиб исследуемого стального листа с подъемом $h = 60$ мм смоделирован в программе ELCUT, в результате чего было получено распределение нормальных механических напряжений по его длине (рис. 7).

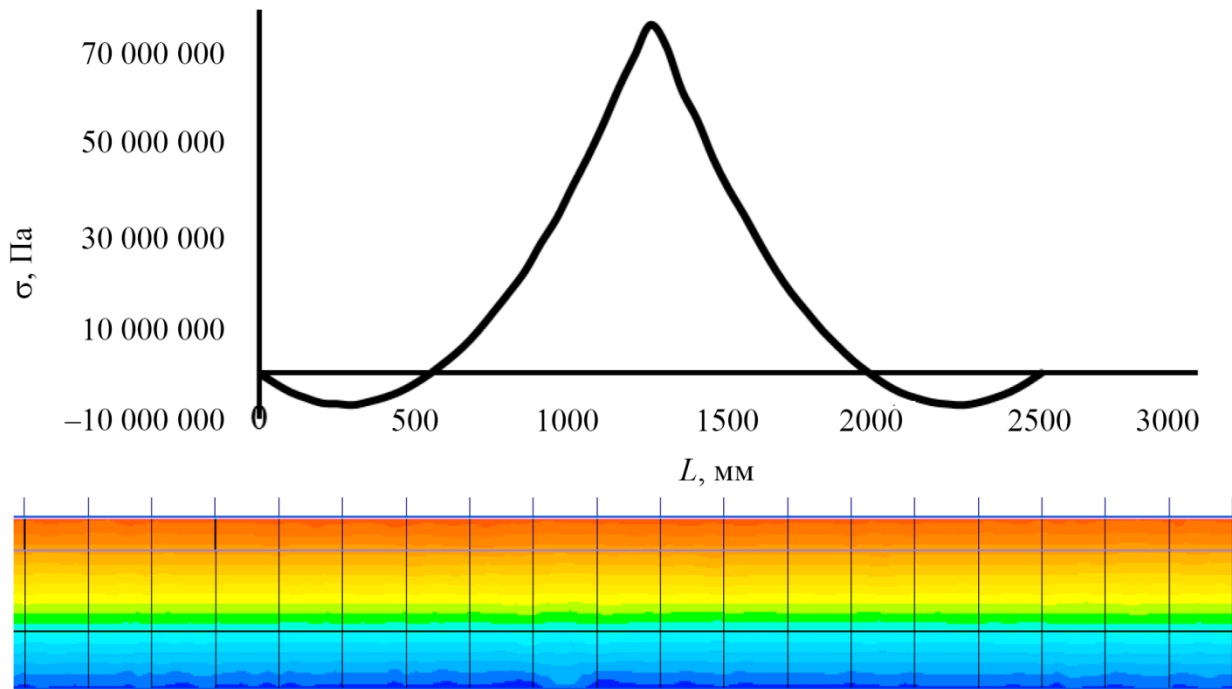


Рис. 7. Распределение нормальных напряжений σ растяжения и сжатия по длине стального листа при его изгибе, полученное в среде ELCUT, и их цветовая диаграмма для участка размером 200 мм, расположенного в его середине

Результаты количественной оценки напряжений на участке $L = 80 \div 180$ см намагниченной полосы деформируемого листа по расчетной модели в ELCUT и экспериментальной отличаются не более чем на 18 %.

Полученные результаты исследования магнитоупругого размагничивания протяженного стального образца свидетельствуют в пользу перспективности контроля напряженно-деформированного состояния протяженных стальных конструкций методом магнитоупругой памяти в режиме сканирования.

4. Заключение

Изготовлено устройство и отработана методика полосового намагничивания протяженного стального листа, и исследовано его магнитоупругое размагничивание при простом поперечном изгибе. Обнаружено, что в области деформации растяжением верхней поверхности листа нормальная H_n и тангенциальная H_t составляющие напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности полосы N-S убывают, а в области сжатия H_n изменяется неоднозначно с периодом 20–30 см. Установлено распределение механических напряжений вдоль средней линии стального листа при его деформации изгибом с максимумом растяжения $\sigma \sim 100$ МПа в центральной части. Показана возможность контроля напряженно-деформированного состояния протяженных стальных конструкций, испытывающих изгибные деформации, методом магнитоупругого размагничивания в режиме сканирования.

Литература

1. Горкунов Э. С., Мушников А. Н. Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // Контроль. Диагностика. – 2020. – Т. 23, № 12. – С. 4–23. – DOI: 10.14489/td.2020.12.pp.004-023.
2. Irreversible changes in the magnetization as indicators of stress-strain 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. 45, No. 11. – P. 786–798. – DOI: 10.1134/S1061830909110059.
3. Kuleev V. G., Tsarkova T. P., Nichipuruk A. P. Effect of tensile plastic deformations on the residual magnetization and initial permeability of low-carbon steels // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2006. – Vol. 42, No. 4. – P. 261–271. – DOI: 10.1134/S1061830906040073.
4. Mushnikov A. N., Mitropolskaya S. Yu. Influence of mechanical loading on the magnetic characteristics of pipe 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.htmlv
5. Correlation between the stress-strain state parameters and magnetic characteristics of carbon steels / E. S. Gorkunov, S. M. Zadvorkin, S. V. Smirnov, S. Yu. Mitropolskaya, D. I. Vichuzhanin // The Physics of Metals and Metallography. – 2007. – Vol. 103. – P. 311–316. – DOI: 10.1134/S0031918X07030131.
6. Диагностика мест повышенной разрушаемости трубопровода / В. Ф. Новиков, Ю. И. Важенин, М. С. Бахарев, С. М. Кулак, К. Р. Муратов. – Москва : Недра–Бизнесцентр, 2009. – 200 с.
7. 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. – Vol. 154. – P. 012004. – DOI: 10.1088/1757-899X/154/1/012004.
8. On controlling stresses in a complexly loaded steel construction by magnetoelastic demagnetization / V. F. Novikov, V. P. Ustinov, A. V. Radchenko, K. R. Muratov, S. M. Kulak, S. V. Sorokina // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52, No. 6. – P. 357–361. – DOI: 10.1134/S1061830916060073.
9. 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.
10. 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.
11. Вонсовский С. В., Шур Я. С. Ферромагнетизм. – М.–Л. : ГИТТЛ, 1948. – 816 с.
12. Новиков В. Ф., Бахарев М. С. Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках. – Тюмень : Вектор Бук, 2001. – 220 с.
13. Новиков В. Ф., Бахарев М. С., Сорокина С. В. Неразрушающий контроль снеговой и ветровой нагрузки металлоконструкций в режиме магнитоупругой памяти // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2008. – № 3. – С. 51–54.
14. О необходимости системного подхода к научным исследованиям в области комплексной безопасности и предотвращения аварий зданий и сооружений / В. Н. Пономарев, В. И. Травуш, В. М. Бондаренко, К. И. Еремин // Предотвращение аварий зданий и сооружений: электронный журнал. – URL: http://www.pamag.ru/prensa/necessiy_sys-appro (04.03.2021).
15. Липанов И. Д., Молодкин И. А., Хомоненко А. Д. Разработка и перспективы информационной системы для мониторинга состояния мостов // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2021. – № 3 (27). – С. 11–16. – DOI: 10.24412/2413-2527-2021-327-11-16.

16. Напряженно-деформированное состояние металлической эллипсной балки / Е. В. Горохов, В. Н. Васылев, А. Н. Миронов, А. С. Щербина // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2020. – Вып. 4 (104). – С. 65–68.
17. Испытание моста через реку Сочи / В. И. Божков, С. И. Дизенко, О. А. Педан, А. А. Хорошев // Научные труды КубГТУ. – 2017. – № 3. – С. 83–89. – URL: <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0040/1542.pdf>
18. 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.
19. Куриленко Е. Ю., Огороднова Ю. В., Шаптала И. В. Сопротивление материалов : учеб. пособие. – Тюмень : РИО ТюмГАСУ, 2014. – 163 с.
20. Мамченко В. О. Расчет балок на прочность и жесткость при прямом плоском изгибе : учеб.-метод. пособие. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2014. – 48 с.
21. Водопьянов В. И., Савкин А. Н., Кондратьев О. В. Курс сопротивления материалов с примерами и задачами : учеб. пособие. – ВолгГТУ : Волгоград, 2012. – 136 с.
22. Крапивский Е. И., Некучаев В. О. Дистанционная магнитометрия газонефтепроводов : учеб. пособие. – Ухта : УГТУ, 2011. – 142 с.
23. Венкова Ю. А. Мониторинг технического состояния нефтегазопроводов по индуцированной и остаточной намагниченности : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19. – Санкт-Петербург, 2016. – 149 с.