

Received: 28.04.2022

Revised: 20.07.2022

Accepted: 26.08.2022

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.4.050-060

EXPERIMENTAL FACILITY FOR STUDYING THE PHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS IN A PLANE STRESS STATE

A. N. Mushnikov^{1, a)*}, S. M. Zadvorkin^{1, b)}, E. N. Perunov^{1, c)}, S. V. Vyskrebentsev², R. F. Izmailov³,
D. I. Vichuzhanin^{1, d)}, N. N. Soboleva^{1, e)}, and A. S. Igumnov^{4, f)}

¹*Institute of Engineering Science, UB RAS,*

34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

²*N. A. Semikhatov Scientific and Production Association of Automatics JSC,*

145 Mamina-Sibiryaka St., Ekaterinburg, 620075, Russian Federation

³*Ural Electromechanical Plant JSC,*

9 Studencheskaya St., Ekaterinburg, 620137, Russian Federation

⁴*N. N. Krasovskiy Institute of Mathematics and Mechanics UB RAS,*

16 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620990, Russian Federation

- a)  <https://orcid.org/0000-0001-7073-6476>  mushnikov@imach.uran.ru;
b)  <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>  zadvorkin@imach.uran.ru;
c)  perunovmail@mail.ru;
d)  <https://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  mmm@imach.uran.ru;
e)  <https://orcid.org/0000-0002-7598-2980>  natashasoboleva@list.ru;
f)  <https://orcid.org/0000-0002-0907-9187>  parallel@imm.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: mushnikov@imach.uran.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

Tel.: +7 (343) 362 30 29

An original experimental facility for studying the physical properties of materials during elastic-plastic deformation along two axes has been created. The facility has no ferromagnetic parts in the working area, thus enabling us to make more accurate magnetic measurements. Biaxial deformation is simulated by the finite element method in order to optimize the geometry of the specimen and to determine the stress state in the central zone of the specimen. Test experiments on the effect of biaxial tension on the coercive force of the 12G2S are performed.

Keywords: biaxial deformation, plane stress state, nondestructive testing.

Acknowledgment

The work was performed under the state assignment on theme No. AAAA-A18-118020790148-1. The equipment of the Plastometriya shared research facilities center of the IES UB RAS was used to determine the initial properties of the specimen material. The Uran supercomputer of the IMM UB RAS was used in the simulation.

References

- Schneider C.S., Richardson J.M. Biaxial magnetoelasticity in steels. *Journal of Applied Physics*, 1982, vol. 53, pp. 8136–8138. DOI: 10.1063/1.330341.
- Sablik M.J., Jiles D.C. Modeling the Effects of Torsional Stress on Hysteretic Magnetization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, vol. 35, No. 1, part 2, pp. 498–504. DOI: 10.1109/20.737472.

3. Kulak S.M., Novikov V.F., Probotyuk V.V., Vatsenkov S.M., Fursov E.S. Magnetic testing of stressed state of hydrotested gas-separator wall. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 55, pp. 225–232. DOI: 10.1134/S1061830919030070.
4. Kulak S.M., Novikov V.F., Mitrofanov D.D. Evaluation of stresses in a pressurized vessel by magnetoelastic demagnetization. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2019, iss. 6, pp. 6–14. DOI: 10.1088/1757-899X/154/1/012004. Available at: http://dream-journal.org/issues/2019-6/2019-6_272.html (accessed: 22.04.2022).
5. Kulak S.M., Novikov V.F., Baranov A.V. Control of mechanical stresses of high pressure container walls by magnetoelastic method. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 154, 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/154/1/012004.
6. Zakharov V.A., Ul'yanov A.I., Gorkunov E.S. Regularities of the change in the coercive force under biaxial asymmetric deformation of steel 3. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, vol. 46, pp. 194–205. DOI: 10.1134/S1061830910030071.
7. Novikov V.F., Zakharov V.A., Ul'yanov A.I., Sorokina S.V., Kudryashov M.E. The influence of biaxial elastic deformation on the coercive force and local remanent magnetization of construction steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, vol. 46, pp. 520–526. DOI: 10.1134/S1061830910070065.
8. Zakharov V.A., Ul'yanov A.I. & Gorkunov E.S. Coercive force of ferromagnetic steels under the biaxial symmetrical tension of a material. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, vol. 47, pp. 359–368. DOI: 10.1134/S1061830911060106.
9. Langman R. Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress. *IEEE Transactions on magnetics*, 1990, vol. 26, No. 4, pp. 1246–1251. DOI: 10.1109/20.54015.
10. Aginey R.V., Islamov R.R., Mamedova E.A. Determination of stress-strain state of the pressure pipeline section by the coercive force measurement results. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2019, vol. 9, No. 3, pp. 284–294. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-3-284-294.
11. Berdnik Maria, Berdnik Aleksandr. Aspects of the coercimetry application to estimate parameters of the structure strain-stress state. *NDT WORLD*, 2017, vol. 20, No. 4, pp. 53–56. DOI: 10.12737/article_5a2fb89e6134d2.05260495.
12. Andronov I.N., Kucheryavyj V.I., Savich V.L., Borejko D.A. Coercytimeetric analysis of the stress state of technological gas pipelines of a compressor shop on the example of a gas air cooling apparatus. *Inzhener-neftyanik*, 2019, No. 1, pp. 38–45 (In Russian).
13. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Mushnikov A.N., Smirnov S.V., Yakushenko E.I. Effect of mechanical stresses on the magnetic characteristics of pipe steel. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2014, vol. 55 (3), pp. 530–538. DOI: 10.1134/S002189441403016X.
14. Pearson J., Squire P.T., Maylin M.G., Gore J.G. Biaxial stress effects on the magnetic properties of pure iron. *IEEE Transactions on magnetics*, 2000, vol. 36, No. 5, pp. 3251–3253. DOI: 10.1109/20.908758.
15. Pearson J., Squire P.T., Maylin M.G., Gore J.G. Apparatus for magnetic measurements under biaxial stress. *IEEE Transactions on magnetics*, 2000, vol. 36, No. 5, pp. 3599–3601. DOI: 10.1109/20.908913.
16. Kai Y., Tsuchida Y., Todaka T., Enokizono M. Development of system for vector magnetic property measurement under stress. *Journal of Electrical Engineering*, 2010, vol. 61, No. 7/s, pp. 77–80.
17. Kai Y., Tsuchida Y., Todaka T., Enokizono M. Influence of biaxial stress on vector magnetic properties and 2-D magnetostriction of a nonoriented electrical steel sheet under alternating magnetic flux conditions. *IEEE Transactions on magnetics*, 2014, vol. 50, No. 4, 6100204. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2287875.

18. Kai Y., Enokizono M. Effect of arbitrary shear stress on vector magnetic properties of non-oriented electrical steel sheets. *IEEE Transactions on magnetics*, 2017, vol. 53, No. 11, 2002304. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2703592.
19. Aydin U., Rasilo P., Singh D., Lehtikoinen A., Belahcen A., Arkkio A. Coupled magneto-mechanical analysis of iron sheets under biaxial stress. *IEEE Transactions on magnetics*, 2016, vol. 52, No. 3, 2000804. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2496207.
20. Aydin U., Rasilo P., Martin F., Belahcen A., Daniel L., Haavisto A., Arkkio A. Effect of multi-axial stress on iron losses of electrical steel sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 469, pp. 19–27. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.08.003.
21. Aydin U., Martin F., Rasilo P., Belahcen A., Haavisto A., Singh D., Daniel L., Arkkio A. Rotational single sheet tester for multiaxial magneto-mechanical effects in steel sheets. *IEEE Transactions on magnetics*, 2019, vol. 55, No. 3, 2001810. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2889238.
22. Aydin U., Rasilo P., Martin F., Belahcen A., Daniel L., Arkkio A. Modeling of multi-axial stress dependent iron losses in electrical steel sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, vol. 504, 166612. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.08.003.
23. Biaxial and triaxial testing machines. *ZwickRoel*. Available at: <https://www.zwickroell.com/products/static-materials-testing-machines/biaxial-and-triaxial-testing-machines>.
24. Biaxial testing machines. *ADMET*. Available at: <https://www.admet.com/products/biaxial-testing-machines>.
25. Gupte A.A. Optimization of Cruciform Biaxial Composite Specimen. In: *Master on Science Thesis, South Dakota State University*, 2003.
26. Escárpita D.A.A., Cárdenas D., Elizalde H., Ramirez R., Probst O. Biaxial tensile strength characterization of textile composite materials. In: *Composites and Their Properties*, ed. by N. Hu, London, United Kingdom: IntechOpen, 2012.
27. Zhao K., Chen L., Xiao R., Ding Z., Zhou L. Design of a biaxial tensile testing device and cruciform specimens for large plastic deformation in the central zone. *Journal of Materials Science*, 2019, vol. 54, pp. 7231–7245. DOI: 10.1007/s10853-019-03358-2.
28. G. Kirsch. Die theorie der elastizität und die bedürfnisse der festigkeitslehre. *Zentralblatt Verlin Deutscher Ingenieure*, 1898, vol. 42, pp. 797–807.
29. Gorkunov E.S., Mushnikov A.N. Magnetic methods of evaluating elastic stresses in ferromagnetic steels (review). *Kontrol'. Diagnostika ("Testing. Diagnostics")*, 2020, vol. 23, No. 12, pp. 4–23. (In Russian).

Подана в журнал: 28.04.2022

УДК 620.179.1:539.3

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.4.050-060

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

А. Н. Мушников^{1, а)*}, С. М. Задворкин^{1, б)}, Е. Н. Перунов^{1, в)}, С. В. Выскребенцев²,
Р. Ф. Измаилов³, Д. И. Вичужанин^{1, г)}, Н. Н. Соболева^{1, д)}, А. С. Игумнов^{4, е)}

¹Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова УрО РАН,
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

²Акционерное общество

«Научно-производственное объединение автоматики имени академика Н. А. Семихатова»,
ул. Мамина-Сибиряка, 145, г. Екатеринбург, 620075, Российская Федерация

³Акционерное общество «Уральский электромеханический завод»,

ул. Студенческая, 9, г. Екатеринбург, 620137, Российская Федерация

⁴Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН,

ул. Софьи Ковалевской, 16, г. Екатеринбург, 620990, Российская Федерация

^{а)}  <https://orcid.org/0000-0001-7073-6476>  mushnikov@imach.uran.ru;

^{б)}  <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>  zadvorkin@imach.uran.ru;

^{в)}  perunovmail@mail.ru;

^{г)}  <https://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  mmm@imach.uran.ru;

^{д)}  <https://orcid.org/0000-0002-7598-2980>  natashasoboleva@list.ru;

^{е)}  <https://orcid.org/0000-0002-0907-9187>  parallel@imm.uran.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: mushnikov@imach.uran.ru

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

Тел.: +7 (343) 362–30–29

Создана оригинальная экспериментальная установка, предназначенная для исследования физических свойств материалов в процессе упругопластического деформирования по двум осям. Установка не имеет ферромагнитных деталей в рабочей зоне, что позволяет более точно проводить магнитные измерения. Выполнено моделирование процесса двухосного деформирования методом конечных элементов для оптимизации геометрии образца и определения напряженного состояния в его центральной зоне. Проведены тестовые эксперименты по определению влияния двухосного растяжения на коэрцитивную силу конструкционной стали 12Г2С.

Ключевые слова: двухосное деформирование, плоское напряженное состояние, неразрушающий контроль.

1. Введение

Напряженно-деформированное состояние конструкций во многом определяет возможность их надежной эксплуатации. В ферромагнитных материалах, к которым относятся многие конструкционные стали, действие упругих деформаций сопровождается формированием особой доменной структуры (так называемой магнитной текстуры), которая определяет процессы намагничивания и перемагничивания. Это позволяет использовать различные магнитные параметры, получаемые из кривых намагничивания и петель магнитного гистерезиса, для неразрушающей оценки уровня действующих напряжений.

Исследованиями возможности применения магнитных методов неразрушающего контроля для оценки напряженно-деформированного состояния металлоконструкций ученые занимаются с середины прошлого века. Однако зачастую в экспериментах рассматривали одноосное нагружение. В реальных условиях, как правило, элементы конструкций подвержены более сложным воздействиям. Это обуславливает актуальность создания методик неразрушающей оценки напряжений, в частности, при плоском напряженном состоянии.

Исследования влияния двухосного напряженного состояния на магнитные характеристики начались сравнительно недавно. В некоторых работах [1, 2] для создания плоского напряженного состояния в исследуемых образцах использовали тот факт, что при кручении цилиндрического образца возникающие на поверхности касательные напряжения эквивалентны паре равных по модулю, но разных по знаку взаимно перпендикулярных растягивающих и сжимающих напряжений. Нагружение тонкостенной оболочечной конструкции внутренним давлением тоже создаст плосконапряженное состояние на поверхности [3–5]. Однако в обоих случаях напряжения, действующие по двум осям, взаимосвязаны, что значительно ограничивает возможности экстраполяции полученных данных на общий случай плоского напряженного состояния.

Ряд проведенных российскими [6–8] и зарубежными [9] учеными экспериментов на плоских крестообразных образцах обладает тем же недостатком: установки позволяли получать только симметричное (напряжения по двум осям совпадают) и асимметричное (напряжения совпадают по величине, но различаются знаком) состояния.

В работах [10–13] рассмотрено комбинированное нагружение тонкостенной трубы осевой нагрузкой и внутренним давлением. В [14] сложнапряженное состояние создается комбинацией растяжения или сжатия с кручением и внутренним давлением в полом цилиндрическом образце. Подобные схемы уже позволяют независимо изменять ортогонально действующие осевые и окружные напряжения. Ограничением является то, что окружные напряжения в таких экспериментах не могут быть отрицательными.

Испытательные машины, позволяющие получить произвольное плоское напряженное состояние, использовались в исследованиях [15–23]. Следует отметить, что исследования [15, 16] проводили на технически чистом железе, а в работах [17–23] объектами исследований были электротехнические стали, которые являются магнитомягкими материалами. Проведение подобных исследований на конструкционных сталях является актуальной задачей с точки зрения развития неразрушающих методов контроля напряженно-деформированного состояния элементов металлоконструкций.

На сегодняшний день существуют серийно выпускаемые машины для механических испытаний на двухосное деформирование [24, 25]. Однако наличие большого количества ферромагнитных элементов в рабочей зоне таких машин является существенным недостатком для магнитных исследований. Намагничиваясь за счет магнитоупругого эффекта и под действием прикладываемых в экспериментах магнитных полей, детали машины будут вносить искажения в результаты последующих измерений. Поэтому целью настоящей работы являлось создание оригинального стенда для двухосного деформирования, все силовые части которого изготовлены из неферромагнитных материалов.

2. Конструкция экспериментальной установки

Для повышения точности магнитных исследований каркас установки (рис. 1) изготовлен из алюминиевого сплава, а штанги и захваты изготовлены из аустенитной стали, то есть неферромагнитных материалов.

Экспериментальная установка оснащена четырьмя электромеханическими приводами с прецизионными червячными редукторами, шаговыми двигателями и программируемыми блоками управления шаговыми двигателями. Блоки управления шаговыми двигателями че-

рез коммутатор соединены с персональным компьютером для автоматизированного управления установкой.

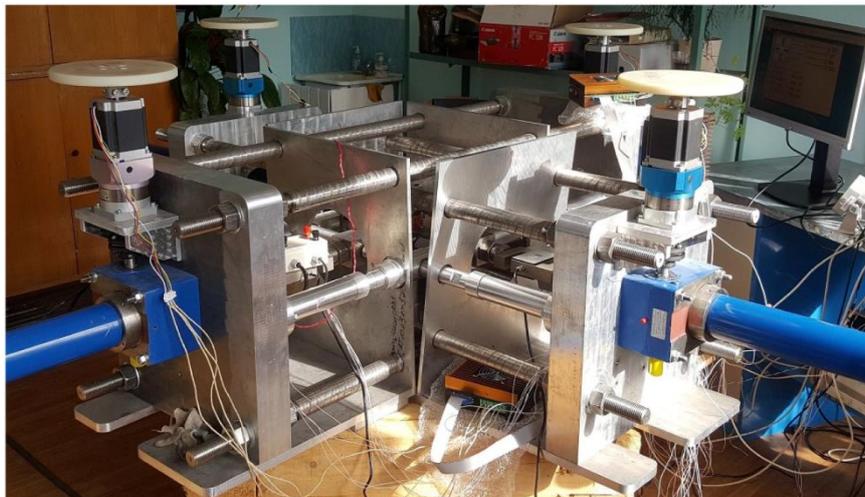


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

Для закрепления образца в захватах применяются пальцы из аустенитной стали. Таким образом, в рабочей зоне отсутствуют элементы из ферромагнитных материалов, которые могли бы вносить искажения в результаты магнитных измерений. Фотография рабочей зоны представлена на рис. 2.

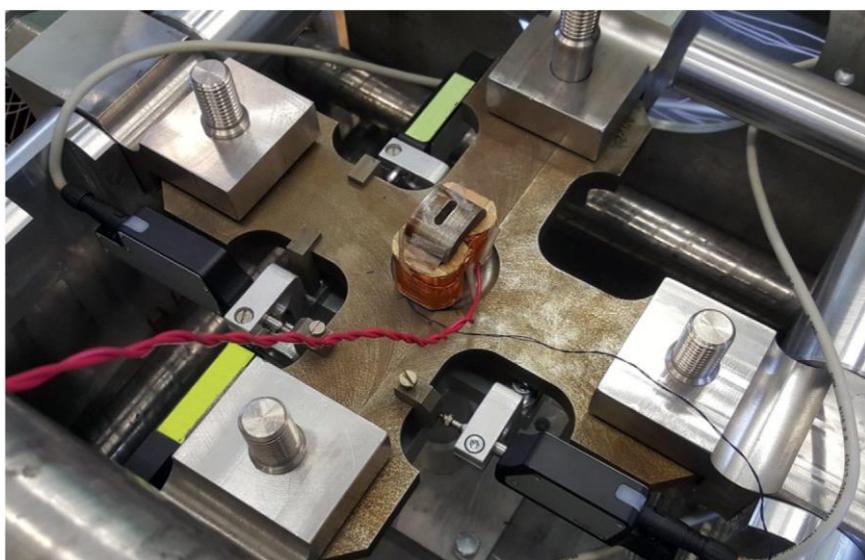


Рис. 2. Фото рабочей зоны

Для определения действующих сил на захваты установлены тензодатчики, подключенные к индикаторам и персональному компьютеру. Диапазон допустимых нагрузок по каждой из осей составляет от -50 кН до $+50$ кН. Величины прикладываемых нагрузок F_x и F_y , соответственно, вдоль осей x и y взаимно независимы (рис. 3). На боковые грани образца устанавливаются четыре высокоточных абсолютных линейных датчика перемещения. Персональный компьютер выводит попарно суммы и разности показаний датчиков. Они служат индикаторами, соответственно, деформации и нарушения симметрии. Кроме того на компьютер выводятся показания четырех тензодатчиков, определяющих действующие нагрузки и

также сигнализирующих о нарушении симметрии. Контроль симметрии позволяет удерживать центр образца неподвижным и избежать возникновения нежелательных боковых нагрузок на домкраты.

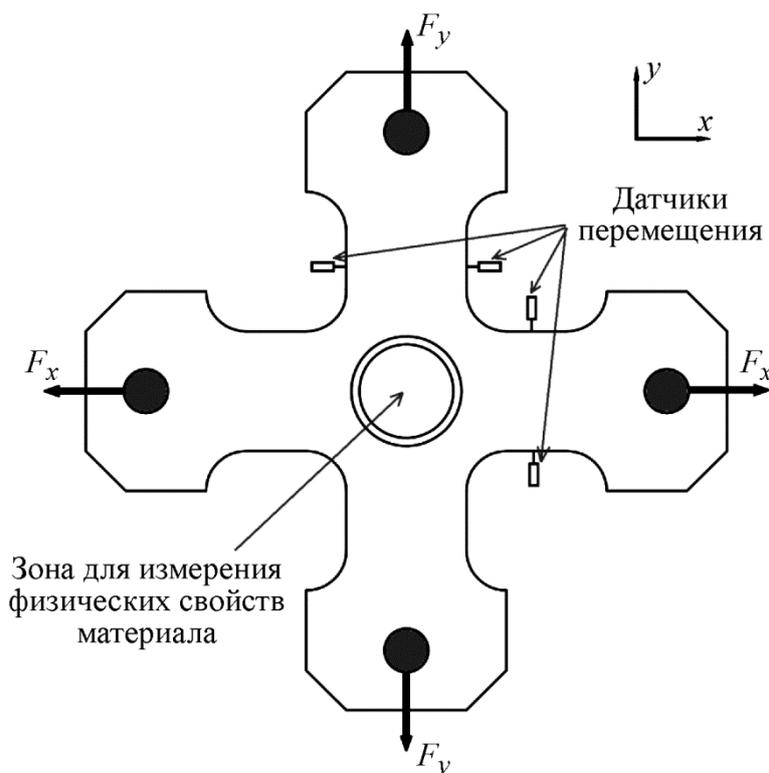


Рис. 3. Эскиз образца и схема нагружения

3. Расчет напряженного состояния

Для оценки параметров напряженно-деформированного состояния было выполнено моделирование процесса деформации методом конечных элементов. Была построена трехмерная модель процесса. Граничные условия задавали в перемещениях. Для материала деформируемого образца принимали изотропную упругую модель. Материал нагружающего инструмента (пальцев) рассматривался как абсолютно жесткое тело.

Для локализации напряжений в центральной зоне образца делают выборки круговой [26] или ромбовидной [27] формы (в указанных работах предметом исследований были композитные материалы, но этот же подход может быть применен и для стальных образцов). На распределение напряжений значительное влияние оказывают радиусы закругления углов [28]. В настоящей работе в центральной зоне образца была сделана круговая выборка (рис. 3), размер которой определялся, в том числе, используемым в эксперименте приставным магнитным устройством (ПМУ).

В результате моделирования процесса деформирования методом конечных элементов было установлено, что интенсивность напряжений распределена в центральной зоне равномерно в случае как одноосного, так и двухосного нагружения. Все касательные напряжения, а также нормальные напряжения, перпендикулярные плоскости образца, на 3–4 порядка меньше нормальных напряжений вдоль осей x и y (σ_x и σ_y), поэтому их величинами будем пренебрегать. Тогда связь напряженного состояния с нагрузками F_x и F_y определяется тензором напряжений:

$$\begin{pmatrix} k_1 F_x + k_2 F_y & 0 & 0 \\ 0 & k_1 F_y + k_2 F_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где коэффициенты $k_1 = 574 \text{ м}^{-2}$, $k_2 = -28 \text{ м}^{-2}$.

4. Влияние двухосного растяжения на коэрцитивную силу стали 12Г2С

В качестве тестового эксперимента было выполнено исследование изменений коэрцитивной силы стали при действии двухосного растяжения. Для эксперимента был изготовлен образец из конструкционной низколегированной стали 12Г2С. Химический состав стали, приведенный в табл. 1, был определен на оптическом эмиссионном спектрометре Spectromaxx.

Таблица 1

Химический состав исследуемой стали

Элемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	Cu
Содержание, масс. %	0,139	0,67	1,58	0,033	0,0075	0,022	0,031	0,016	0,045

Дополнительно, для определения механических свойств материала был изготовлен разрывной образец и проведены испытания в соответствии с ГОСТ 1497-84 на гидравлической испытательной машине Tinius Olsen Super L-60. Были определены следующие характеристики материала: условный предел текучести 340 МПа, временное сопротивление 540 МПа, модуль Юнга 190 ГПа, относительное удлинение при разрыве 29 %.

Магнитные характеристики материала в исходном состоянии были определены в замкнутой магнитной цепи на магнитоизмерительном комплексе Remagraph C-500 по петле магнитного гистерезиса с максимальной напряженностью поля 600 А/см. Коэрцитивная сила исследуемой стали в исходном состоянии равна 3,57 А/см.

В работах [17–23] для определения индукции в рабочей зоне образца были сделаны отверстия, через которые намотаны катушки индукции. Такой метод позволяет более точно определять магнитную индукцию по сравнению с использованием ПМУ. Авторы утверждали, что эти отверстия не оказывают существенного влияния на напряженно-деформированное состояние исследуемого объема, но не представили расчеты, подтверждающие их слова. Данные утверждения выглядят сомнительно ввиду известной задачи Кирша [29], в соответствии с решением которой напряжения вблизи отверстия возрастают в 3 раза. Поэтому в настоящей работе для определения коэрцитивной силы было использовано П-образное ПМУ с сечением полюсов 18×9 мм и межполюсным расстоянием 16 мм. Максимальная напряженность магнитного поля достигала 200 А/см, что более чем на порядок превышает коэрцитивную силу исследуемой стали, то есть такое поле позволяет достичь технического насыщения материала. Для определения индукции измерительная обмотка была соединена с флюксометром EF-5.

Было получено 25 различных напряженных состояний, для каждого из которых было определено изменение коэрцитивной силы по отношению к ненагруженному состоянию (рис. 4).

Для стали 09Г2С, которая по составу близка к рассматриваемой в настоящей работе стали 12Г2С, ранее было определено, что в исследуемом диапазоне напряжений магнито-стрикция положительна [14, 30]. Поэтому наблюдаемые в настоящем эксперименте процессы можно объяснить формированием магнитных текстур, характерных для материалов с положительной магнито-стрикцией.

При воздействии одноосного растяжения, соосного с направлением магнитных измерений x , величина $\lambda\sigma_x$ положительна, т. е. $\lambda\sigma_x > 0$. Формируется магнитная текстура типа «ось легкого намагничивания», что приводит к уменьшению коэрцитивной силы материала. Напряжения σ_y при растяжении перпендикулярно к направлению магнитных измерений способствуют повороту векторов магнитных моментов доменов к оси y , что затрудняет процессы перемагничивания и ведет к росту коэрцитивной силы.

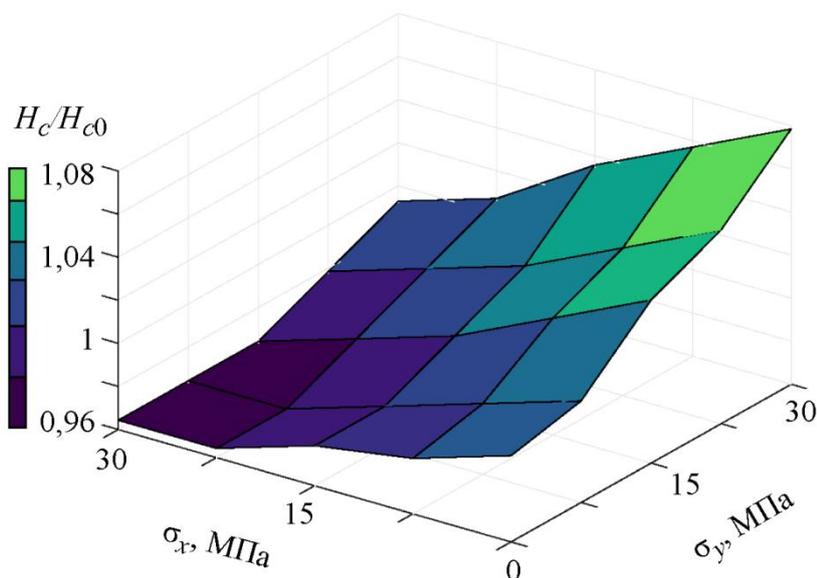


Рис. 4. Относительные изменения коэрцитивной силы стали 12Г2С под действием двухосного растяжения

При двухосном растяжении растягивающие напряжения способствуют формированию двух противодействующих текстур типа «ось легкого намагничивания» вдоль осей x и y . Одна будет способствовать повороту векторов магнитных моментов доменов к направлению поля, а вторая препятствовать этому. Поэтому изменения результирующей намагниченности будут определяться величиной приложенного поля и значениями напряжений σ_x и σ_y . Симметричное растяжение ($\sigma_x = \sigma_y$) практически не оказывает влияния на относительные изменения коэрцитивной силы.

5. Заключение

Разработана оригинальная экспериментальная установка для двухосного деформирования, которая, ввиду отсутствия ферромагнитных деталей в рабочей зоне, позволяет осуществлять эксперименты на двухосное растяжение и сжатие одновременно с точными измерениями магнитных характеристик ферромагнитных материалов. Установка аналогично может быть использована для исследований свойств материалов вихретоковым, ультразвуковым и другими методами с использованием малогабаритных приставных преобразователей.

Проведено моделирование с целью оптимизации геометрии крестообразного образца с круговой выборкой. Предложенная геометрия обеспечивает равномерное распределение напряжений в зоне установки приставного магнитного устройства.

Выполнен тестовый эксперимент по определению влияния двухосного растяжения на коэрцитивную силу конструкционной стали 12Г2С.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № АААА-А18-118020790148-1. Для определения исходных свойств материала образца было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» ИМаш УрО РАН. При проведении моделирования был использован суперкомпьютер «Уран» ИММ УрО РАН.

Литература

1. Schneider C. S., Richardson J. M. Biaxial magnetoelasticity in steels // Journal of Applied Physics. – 1982. – Vol. 53. – P. 8136–8138. – DOI: 10.1063/1.330341.
2. Sablik M. J., Jiles D. C. Modeling the Effects of Torsional Stress on Hysteretic Magnetization // IEEE Transactions on Magnetics. – 1999. – Vol. 35, No. 1, part 2. – P. 498–504. – DOI: 10.1109/20.737472.
3. 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. – P. 225–232. – DOI: 10.1134/S1061830919030070.
4. Kulak S. M., Novikov V. F., Mitrofanov D. D. Evaluation of Stresses in a Pressurized Vessel by Magnetoelastic Demagnetization // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2019. – Iss. 6. – P. 6–14. – DOI: 10.17804/2410-9908.2019.6.006-014. – URL: http://dream-journal.org/issues/2019-6/2019-6_272.html (accessed: 22.04.2022).
5. 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.
6. Zakharov V. A., Ul'yanov A. I., Gorkunov E. S. Regularities of the change in the coercive force under biaxial asymmetric deformation of steel 3 // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2010. – Vol. 46. – P. 194–205. – DOI: 10.1134/S1061830910030071.
7. The influence of biaxial elastic deformation on the coercive force and local remanent magnetization of construction steels / V. F. Novikov, V. A. Zakharov, A. I. Ul'yanov, S. V. Sorokina, M. E. Kudryashov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2010. – Vol. 46. – P. 520–526. – DOI: 10.1134/S1061830910070065.
8. Zakharov V.A., Ul'yanov A.I. & Gorkunov E.S. Coercive force of ferromagnetic steels under the biaxial symmetrical tension of a material // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2011. – Vol. 47. – P. 359–368. – DOI: 10.1134/S1061830911060106.
9. Langman R. Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress // IEEE Transactions on magnetics. – 1990. – Vol. 26, No. 4. – P. 1246–1251. – DOI: 10.1109/20.54015.
10. Aginey R. V., Islamov R. R., Mamedova E. A. Determination of stress-strain state of the pressure pipeline section by the coercive force measurement results // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. – 2019. – Vol. 9, No. 3. – P. 284–294. – DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-3-284-294.
11. Berdnik Maria, Berdnik Aleksandr. Aspects of the coercimetry application to estimate parameters of the structure strain-stress state // NDT WORLD. – 2017. – Vol. 20, No. 4. – P. 53–56. – DOI: 10.12737/article_5a2fb89e6134d2.05260495.
12. Коэрцитиметрический анализ напряженного состояния технологических газовых трубопроводов компрессорного цеха на примере аппарата воздушного охлаждения газа / И. Н. Андронов, В. И. Кучерявый, В. Л. Савич, Д. А. Борейко // Инженер-нефтяник. – 2019. – № 1. – С. 38–45.
13. 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 (3). – P. 530–538. – DOI: 10.1134/S002189441403016X.

14. Biaxial stress effects on the magnetic properties of pure iron / J. Pearson, P. T. Squire, M. G. Maylin, J. G. Gore // IEEE Transactions on magnetics. – 2000. – Vol. 36, No. 5. – P. 3251–3253. – DOI: 10.1109/20.908758.
15. Apparatus for magnetic measurements under biaxial stress / J. Pearson, P. T. Squire, M. G. Maylin, J. G. Gore // IEEE Transactions on magnetics. – 2000. – Vol. 36, No. 5. – P. 3599–3601. – DOI: 10.1109/20.908913.
16. Development of system for vector magnetic property measurement under stress / Y. Kai, Y. Tsuchida, T. Todaka, M. Enokizono // Journal of Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 61. – No. 7/s. – P. 77 – 80.
17. Influence of biaxial stress on vector magnetic properties and 2-D magnetostriction of a nonoriented electrical steel sheet under alternating magnetic flux conditions / Y. Kai, Y. Tsuchida, T. Todaka, M. Enokizono // IEEE Transactions on magnetics. – 2014. – Vol. 50, No. 4. – 6100204. – DOI: 10.1109/TMAG.2013.2287875.
18. Kai Y., Enokizono M. Effect of arbitrary shear stress on vector magnetic properties of non-oriented electrical steel sheets // IEEE Transactions on magnetics. – 2017. – Vol. 53, No. 11. – 2002304. – DOI: 10.1109/TMAG.2017.2703592.
19. Coupled magneto-mechanical analysis of iron sheets under biaxial stress / U. Aydin, P. Rasilo, D. Singh, A. Lehikoinen, A. Belahcen, A. Arkkio // IEEE Transactions on magnetics. – 2016. – Vol. 52, No. 3. – 2000804. – DOI: 10.1109/TMAG.2015.2496207.
20. Effect of multi-axial stress on iron losses of electrical steel sheets / U. Aydin, P. Rasilo, F. Martin, A. Belahcen, L. Daniel, A. Haavisto, A. Arkkio // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – Vol. 469. – P. 19–27. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.08.003.
21. Rotational single sheet tester for multiaxial magneto-mechanical effects in steel sheets / U. Aydin, F. Martin, P. Rasilo, A. Belahcen, A. Haavisto, D. Singh, L. Daniel, A. Arkkio // IEEE Transactions on magnetics. – 2019. – Vol. 55, No. 3. – 2001810. – DOI: 10.1109/TMAG.2018.2889238.
22. Modeling of multi-axial stress dependent iron losses in electrical steel sheets / U. Aydin, P. Rasilo, F. Martin, A. Belahcen, L. Daniel, A. Arkkio // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – Vol. 504. – 166612. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166612.
23. Biaxial and triaxial testing machines // ZwickRoell. – URL: <https://www.zwickroell.com/products/static-materials-testing-machines/biaxial-and-triaxial-testing-machines/> (дата обращения: 28.04.2022).
24. Biaxial testing machines // ADMET. – URL: <https://www.admet.com/products/biaxial-testing-machines/> (дата обращения: 28.04.2022).
25. Gupte A. A. Optimization of cruciform biaxial composite specimen : Master on Science Thesis. – South Dakota State University, 2003.
26. Biaxial tensile strength characterization of textile composite materials / D. A. A. Escárpita, D. Cárdenas, H. Elizalde, R. Ramirez, and O. Probst // Composites and Their Properties. – London, United Kingdom: IntechOpen. – 2012. – URL: <https://www.intechopen.com/chapters/38394>. – DOI: 10.5772/48105.
27. Design of a biaxial tensile testing device and cruciform specimens for large plastic deformation in the central zone / K. Zhao, L. Chen, R. Xiao, Z. Ding, L. Zhou // Journal of Materials Science. – 2019. – Vol. 54. – P. 7231–7245. – DOI: 10.1007/s10853-019-03358-2.
28. Kirsch G. Die theorie der elastizitat und die bedurfnisse der festigkeitslehre // Zentralblatt Verlin Deutscher Ingenieure. – 1898. – Vol. 42. – P. 797–807.
29. 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.