



Evolution of Magnetostriction and Differential Magnetic Permeability of Low-Alloy Structural Steel Specimens under Cyclic and Static Deformations

Anna POVOLOTSKAYA, Sergey ZADVORKIN, Evgenya PUTILOVA,
Aleksandr MUSHNIKOV

Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: us@imach.uran.ru

Abstract

The paper shows of studying the effect of zero-to-tension cycling, with an amplitude approximately corresponding to the conventional yield strength, and subsequent static elastic tension along the same direction on the behavior of magnetostriction and differential magnetic permeability of hot-rolled 08G2B steel. The behavior of the studied magnetic characteristics under static tension confirms the inference that the level of residual compressive stresses induced by cyclic preloading increases along the axis of cyclic tension.

Keywords: Cyclic loading, tension, magnetostriction, differential magnetic permeability

Эволюция магнитоэлектричества и дифференциальной магнитной проницаемости образцов из низколегированной конструкционной стали под действием циклических и статических деформаций

Анна ПОВОЛОЦКАЯ, Сергей ЗАДВОРКИН, Евгения ПУТИЛОВА,
Александр МУШНИКОВ

1. Введение

Зависимости магнитных свойств ферромагнетиков от параметров их напряженного состояния дают возможность создания методик магнитного контроля напряженно-деформированного состояния изделий из таких материалов [1-7]. С другой стороны, в ряде случаев необходимо минимизировать влияние напряжений на намагниченность объекта. Несмотря на попытки создания моделей, описывающих поведение магнитных свойств от деформаций, проблема еще не решена, что обусловлено особенностями поведения магнитоэлектричества железа и его сплавов под действием магнитных полей различной напряженности и механических напряжений.

Усталость материала является одной из основных причин разрушения элементов конструкций, поэтому изучение возможностей магнитной структуроскопии применительно к оценке уровня усталостной деградации конструкционных сталей является весьма важной задачей. Кроме того, при диагностике напряженно-деформированного состояния изделий из ферромагнитных конструкционных материалов в процессе эксплуатации необходимо принимать во внимание предысторию материала, поскольку текущее состояние металлоконструкций, как правило, существенно отличается от заложенного в проектной документации и при выпуске с завода-производителя. С учетом того, что в течение своего жизненного цикла изделия подвергаются чаще всего циклическим нагрузкам [8, 9], представляет интерес также

изучение поведения магнитных характеристик в условиях статического деформирования, осуществляемого после предварительного циклического нагружения.

Предлагаемая статья посвящена исследованию влияния отнулевого циклического растяжения и последующего статического упругого одноосного растяжения горячекатаной стали 08Г2Б на закономерности изменения ее магнитных характеристик, таких как дифференциальная магнитная проницаемость и магнитострикция.

2. Материалы и методики исследований

Для исследований из горячекатаной стали 08Г2Б, были вырезаны плоские образцы с головками вдоль направления прокатки. Рабочая часть образцов сечением $6 \times 34,6$ мм имела длину 100 мм. После изготовления образцы отжигали в вакууме при температуре 700°C в течение 3 часов для снятия внутренних напряжений, наведенных при вырезке образцов.

Предварительные механические испытания, проведенные на универсальной испытательной машине Tinius Olsen Super L60, показали, что для исследуемого материала условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 280$ МПа, временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 535$ МПа, относительное остаточное удлинение после разрыва $\delta = 30\%$.

Циклические испытания образцов проводили на сервогидравлической установке Instron 8801 по схеме отнулевого растяжения с амплитудой 300 МПа, что немного выше значения $\sigma_{0,2}$, с частотой 3 Гц. В результате были получены образцы после 0, 30000, 50000, 100000 и 300000 циклов нагружения.

Затем предварительно циклически деформированные образцы подвергали упругому растяжению с одновременным измерением их магнитных характеристик.

Измерение линейной магнитострикции λ образцов осуществляли с помощью разработанной в ИМАШ УрО РАН многоканальной прецизионной системы сбора данных (ССД) [10], реализующей аналого-цифровое преобразование интегрирующего типа с нелинейной шкалой и позволяющей измерять малые электрические величины с малыми погрешностями. Для преобразования магнитострикции в электрические сигналы применена стандартная мостовая схема Уинстона, выполненная на тензорезисторах типа КФ5П1-10-400-А-12. Измерительные тензорезисторы были наклеены посередине рабочей части образца, а термокомпенсационные – на медную пластину, которую располагали вблизи исследуемого образца. Питание моста осуществляли постоянным стабилизированным током. Электрическая величина в виде разности потенциалов с дифференциального выхода моста поступала в один из каналов ССД, имеющей недифференциальный вход, через согласующий усилитель. При измерениях исследуемый образец перемагничивали в пермеамetre. При этом внутреннее магнитное поле, напряженность которого измеряли с помощью С-образного потенциалметра, достигало 500 А/см. В результате измерений осуществляли запись полевых зависимостей продольной магнитострикции.

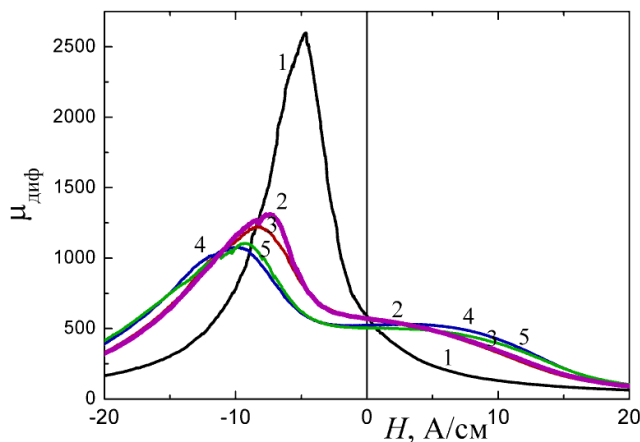
3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образцов, испытанных на отнулевого циклическое растяжение с различным количеством циклов n . Для образца в недеформированном состоянии на полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости наблюдается один пик, в то время как на циклически нагруженных образцах можно наблюдать наличие двух максимумов (в отрицательных и положительных полях). С

увеличением количества циклов высота пика в отрицательных полях на полевой зависимости уменьшается, а его локализация смещается в сторону более сильных полей. В то же время на кривых $\mu_{\text{диф}}(H)$ для циклически нагруженных образцов с ростом количества циклов пик, расположенный в положительных полях, становится более выраженным, а его расположение также смещается в сторону более сильных полей.

Формирование двух пиков на зависимостях $\mu_{\text{диф}}(H)$ у циклически деформированных образцов связано с особенностями перераспределения обратимых и необратимых процессов перемагничивания и разделением вкладов в процессы перемагничивания 90- и 180-градусных доменных границ. Аналогичное формирование двух максимумов на зависимостях дифференциальной магнитной проницаемости было отмечено в работах [11-14] для образцов, подвергнутых статическому одноосному растяжению.

По наличию, положению и высоте пика в области положительных полей на зависимости дифференциальной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля можно судить о величине деформации, накопленной в изделии при циклическом нагружении.



**Рис. 1. Полевые зависимости дифференциальной магнитной образцов, циклически деформированных на различное количество циклов n .
Кривая 1 – $n = 0$; 2 – 30000; 3 – 50000; 4 – 100000; 5 – 300000 циклов.**

На рис. 2а приведены полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образца, подвергнутого предварительно на отнулевое циклическое растяжение на 100000 циклов, при различных значениях статических растягивающих напряжений. С увеличением растягивающих напряжений высота пика $\mu_{\text{диф макс}}$ в отрицательных полях на полевой зависимости для образца, предварительно циклически деформированного на 100000 циклов, увеличивается, в то же время пик на кривых $\mu_{\text{диф}}(H)$, расположенный в положительных полях, с ростом приложенных напряжений становится менее выраженным и при значениях 80-100 МПа пик совсем пропадает.

На рис. 2б) представлены зависимости величины максимума дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф макс}}$ от приложенных напряжений для образцов, предварительно циклически нагруженных на различное количество циклов. Как видно из рисунка, в диапазоне растягивающих напряжений от 0 до 100 МПа $\mu_{\text{диф макс}}$ изменяется монотонно.

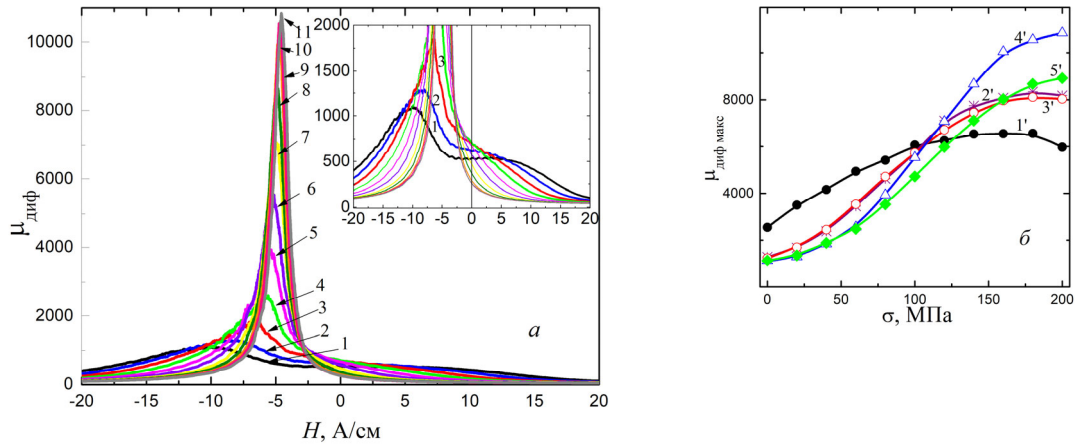


Рис. 2. (а) – зависимости $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образца, предварительно циклически деформированного на 100000 циклов, при различных величинах приложенных растягивающих напряжений σ : кривая 1 – $\sigma = 0$; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100; 7 – 120; 8 – 140; 9 – 160; 10 – 180; 11 – 200 МПа; (б) – зависимости $\mu_{\text{диф макс}}(\sigma)$ для образцов, предварительно циклически деформированных на различное количество циклов. Кривая 1' (●) – $n = 0$; 2' (*) – 30000; 3' (○) – 50000; 4' (Δ) – 100000; 5' (◆) – 300000 циклов.

На рис. 3 (а, б и в) приведены полевые зависимости продольной магнитострикции λ при растягивающей нагрузке различной величины для образцов из стали 08Г2Б, испытанных на отнулевое циклическое растяжение с количеством циклов 0, 30000 и 100000 циклов соответственно. Как было отмечено в работах [15–18], чем выше уровень приложенных сжимающих напряжений в стали, тем больше площадь положительного участка полевой зависимости магнитострикции и величина ее максимума. Сравнивая кривые 1 на рис. 3 (а, б и в), соответствующие состоянию образцов до деформирования статическим растяжением, можно видеть увеличение положительного участка с ростом количества циклов предварительного циклического нагружения. Это подтверждает вывод о возрастании уровня остаточных напряжений сжатия, наведенных предварительным циклическим нагружением, с увеличением количества циклов.

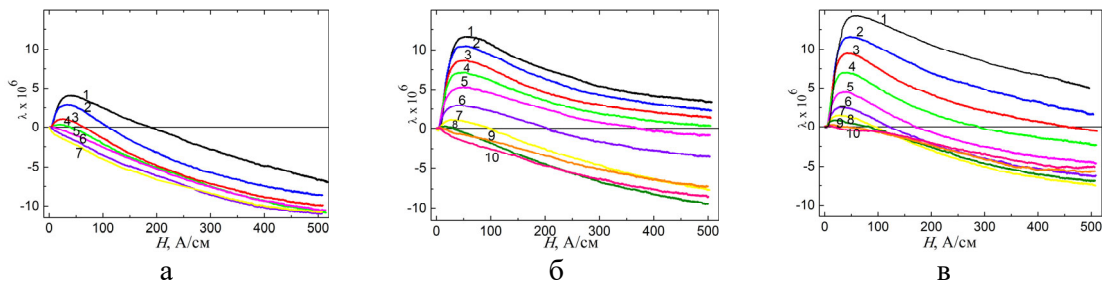


Рис. 3. Зависимости $\lambda(H)$ при различных значениях растягивающих напряжений для образцов, предварительно циклически нагруженных на различное количество циклов. а – 0; б – 30000; в – 100000 циклов. Кривая 1 – $\sigma = 0$; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100; 7 – 120; 8 – 140; 9 – 160; 10 – 180 МПа.

С ростом приложенных напряжений величина максимума магнитострикции уменьшается, а при определенной величине напряжений магнитострикция, начиная с нулевого значения магнитного поля, принимает только отрицательные значения. Для образца, не подвергнутого циклическому нагружению, это происходит уже при нагрузке 100 МПа, для образца, предварительно циклически нагруженного на 30000 циклов – в диапазоне растягивающих напряжениях от 160 до 180 МПа, для 100000 циклов – выше 180 МПа.

Изменение характера полевой зависимости продольной магнитострикции под действием упругого одноосного нагружения определяет особенности поведения магнитных характеристик под действием тех же нагрузок [19-22]. В результате изменения типа магнитной текстуры в диапазоне растягивающих напряжений, где произошла смена знака магнитострикции, на зависимостях $\mu_{\text{диф макс}}(\sigma)$ формируются максимумы.

4. Заключение

На примере стали 08Г2Б показано, что предыстория в виде предварительного циклического нагружения по схеме от нулевого растяжения с амплитудой, соответствующей условному пределу текучести, сказывается на последующих закономерностях изменения магнитных параметров материала при его упругом деформировании. Данное обстоятельство следует учитывать при разработке магнитных методик оценки параметров напряженно-деформированного состояния элементов стальных конструкций. Поведение дифференциальной магнитной проницаемости и магнитострикции при статическом растяжении свидетельствует об усилении напряжений сжатия, обусловленных предварительным циклическим нагружением, в направлении действия циклической нагрузки.

Исследования магнитострикции образцов из стали 08Г2Б, подвергнутых предварительному циклическому растяжению, показали, что последующее деформирование статическим растяжением на определенном этапе приводит к исчезновению положительного участка на полевых зависимостях магнитострикции, при всех значениях магнитного поля магнитострикция принимает отрицательные значения. Диапазоны растягивающих напряжений, в которых происходит смена знака магнитострикции, а, значит, и типа магнитной текстуры, примерно соответствуют диапазонам напряжений, в которых формируются экстремумы на зависимостях максимумов дифференциальной магнитной проницаемости от растягивающей нагрузки.

Установлено, что величина максимума дифференциальной магнитной проницаемости образцов из стали 08Г2Б, подвергнутых циклическому нагружению на разное количество циклов, при последующем статическом растяжении изменяется однозначно в диапазоне напряжений от 0 МПа до 100 МПа.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-48-660035_p_a. При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.

Список литературы

1. Chen H.-E., S. Xie, Z. Chen, T. Takagi, T. Uchimoto, K. Yoshihara. Quantitative nondestructive evaluation of plastic deformation in carbon steel based on electromagnetic methods. Materials Transactions, Vol. 55, No. 12, 2014, pp 1806-1815.
2. Qiu F., W. Ren, G. Y. Tian, B. Gao. Characterization of applied tensile stress using

- domain wall dynamic behavior of grain-oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 432, 2017, pp 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.01.076>.
3. Kurz J. H., K. Szielasko, R. Tschuncky. Micromagnetic and ultrasound methods to determine and monitor stress of steel structures. *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 23, No. 2, 2017, B4016009.
 4. Takahashi S., S. Kobayashi, I. Tomas, L. Dupre, G. Vertesy. Comparison of magnetic nondestructive methods applied for inspection of steel degradation. *NDT & E International*, Vol. 91, 2017, pp 54–60.
 5. Schajer Gary S. *Practical residual stress measurement methods*. Vancouver, Canada: John Wiley & Sons Ltd, 2013.
 6. Gorkunov E. S., Yu. V. Subachev, A. M. Povolotskaya, S. M. Zadvorkin. The Influence of a Preliminary Plastic Deformation on the Behavior of the Magnetic Characteristics of High Strength Controllably Rolled Pipe Steel under an Elastic Uniaxial Tension (Compression). *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 51, No. 9, 2015, pp 563–572.
 7. Gorkunov E. S., A. M. Povolotskaya, S. M. Zadvorkin, E. A. Putilova. Comparative Analysis of the Magnetic Characteristics of Plastically Deformed Metal in Different Zones of a Welded Pipe under Elastic Deformation. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 53, No. 9, 2017, pp 636-643.
 8. Suresh S. *Fatigue of Materials*. 2nd ed., Cambridge University Press, New York, 2004.
 9. Murakami Y., K. J. Miller. What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process. *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, No. 8, 2005, pp 991-1005.
 10. Lookin N. A., L. S. Rubin. Precision Nonlinear Low Current Meter. *AIP Conf. Proc.*, Vol. 2176, 2019, 020003.
 11. Makar J. M., B. K. Tanner. The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 222, No. 3, 2000, pp 291–304.
 12. Pal'a J., O. Stupakov, J. Bydzovsky, I. Tomas, V. Novak. Magnetic behaviour of low-carbon steel in parallel and perpendicular directions to tensile deformation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 310, 2007, pp 57–62.
 13. Nichipuruk A. P., E. V. Rozenfel'd, M. S. Ogneva, A. N. Stashkov, A. V. Korolev. An experimental method for evaluating the critical fields of moving domain boundaries in plastically tension-deformed low-carbon wires, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 50, No. 10, 2014, pp 566-573.
 14. Kuleev V. G., T. P. Tsar'kova, E. Yu. Sazhina, A. S. Doroshek. On the influence of plastic deformations of low-carbon ferromagnetic steels on the changes in the shapes of their hysteresis loops and the field dependences of the differential permeability. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 51, No. 12, 2015, pp 738-749.
 15. Anderson P. I., A. J. Moses, H. J. Stanbury. Assessment of the stress sensitivity of magnetostriction in grain-oriented silicon steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, 2007, pp 3467–3476.
 16. Gorkunov E. S., Yu. V. Subachev, A. M. Povolotskaya, S. M. Zadvorkin. The Influence of an Elastic Uniaxial Deformation of a Medium-Carbon Steel on the Its Magnetostriction in the Longitudinal and Transverse Directions. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 49, No. 10, 2013, pp 584-594.
 17. Dias M. B. S., F. J. G. Landgraf. Compressive stress effects on magnetic properties of uncoated grain oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 504, 2020, 166566.

18. Wun-Fogle M., J. B. Restorff, J. M. Cuseo, I. J. Garshelis, S. Bitar. Magnetostriction and Magnetization of Common High Strength Steels. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, No. 10, 2009, pp 4112–4115.
19. Bozorth R. *Ferromagnetizm [Ferromagnetism]*. Moscow: IIL, 1956, 784 p.
20. Gorkunov E. S., A. M. Povoltskaya, K. E. Solov'ev, S. M. Zadvorkin. The Influence of the Magnetoelastic Effect on the Hysteretic Properties of Medium-Carbon Steel during Uniaxial Loading. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 46, No. 9, 2010, pp 638-644.
21. Gorkunov E. S., Subachev Yu. V., Povoltskaya A. M., Zadvorkin S. M. The Influence of Elastic Deformations on the Hysteresis Properties of a Two-Layer Ferromagnet Composed of Components with Magnetostrictions of Opposite Signs. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 50, No. 8, 2014, pp 469-480.
22. Leuning N., S. Steentjes, M. Schulte, W. Bleck, K. Hameyer. Effect of elastic and plastic tensile mechanical loading on the magnetic properties of NGO electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 417, 2016, pp 42-48.