

УДК 620.179.14

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СВОЙСТВА СТАЛИ  
ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

**MAGNETIC FIELD INFLUENCE ON THE STEEL PROPERTIES  
OF THE MAIN PIPELINES LINEAR PART**

**А.И. Ильясова**

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
г. Уфа, Российская Федерация**

**Aigul I. Ilyasova**

**Ufa State Petroleum Technological University,  
Ufa, Russian Federation**

**e-mail: bikbulatova@inbox.ru**

**Аннотация.** По результатам внутритрубной диагностики линейной части магистральных трубопровода исследуется влияние магнитного поля на механические свойства металла. Приведены данные, подтверждающие влияние постоянного магнитного поля на снижение прочности и повышение пластичности стали, что, в свою очередь, влияет на безопасную эксплуатацию трубопроводных систем.

Магнитное, как и у любое другое воздействие, имеет отрицательные и положительные стороны. Если отрицательное влияние заключается в повышении скорости коррозии, то положительное, по мнению автора, – в повышении ресурса в результате обработки электромагнитным импульсом. Данный эффект разупрочнения материала под действием электромагнитного поля основывается на гипотезе электронно-дислокационного взаимодействия. Воздействие магнитного поля и остаточная намагниченность в металлах также положительно влияют на

напряженно-деформированное состояние, статическую прочность, пластичность. Исследования проводились на образцах из сталей марок 08Г2С, 17Г1С, которые используются при строительстве трубопроводов. Результаты исследований необходимо учитывать при расчете риска разгерметизации трубопровода.

**Abstract.** According to the results of the in-line diagnostics of the main pipelines linear part, the magnetic field effect on the metal mechanical properties is investigated. The data confirming the constant magnetic field effect on reducing the strength and increasing the steel ductility, which, in turn, affects the safe operation of pipeline systems.

Magnetic, like any other effect, has negative and positive sides. If the negative effect is to increase the corrosion rate, then the positive, according to the author, is to increase the resource as a treatment result with an electromagnetic pulse. This material softening effect under the electromagnetic field action is based on the hypothesis of electron-dislocation interaction. The magnetic field effect and the residual magnetization in metals also positively affect the stress-strain state, static strength, ductility. Studies were conducted on samples of steel grades 08G2S, 17G1S, which are used in the pipelines construction. Research results must be considered when calculating the risk of pipeline depressurization.

**Ключевые слова:** магистральный газопровод, внутритрубная магнитная дефектоскопия, магнитное поле, электромагнитное поле, остаточная намагниченность

**Key words:** main gas pipeline, in-line magnetic flaw detection, magnetic field, electromagnetic field, residual magnetization

В последние годы появляется все больше работ по изучению влияния магнитного поля на механические свойства металла. В научных работах [1–3] отмечается, что воздействие магнитного поля изменяет показатели прочности, пластичности и других механических и эксплуатационных свойств металла.

При мониторинге технического состояния, при проведении работ по внутритрубной диагностике, трубопроводы линейной части объектов магистрального транспорта подвергаются воздействию постоянного магнитного поля. Такое магнитное поле характеризуется малой напряженностью – до 16 МА/м (140 кЭ) и длительностью воздействия [2], следовательно, требуется изучение влияния такого поля на механические свойства металла.

Авторами [4, 5] проведен ряд исследований и установлены зависимости, указывающие на то, что воздействие магнитного поля привело к увеличению пластичности стали. В работе [4] определено, что в случае одноосного растяжения поперечное воздействие магнитным полем снижало вытянутость зерен вдоль направления деформации. Трубопроводы линейной части объектов магистрального транспорта в процессе эксплуатации испытывают одноосное растяжение и кручение. В работе [5] авторами проведен ряд экспериментов, в которых образцы испытывались на кручение под воздействием внешнего магнитного поля, в процессе исследования было подтверждено, что в металле образовывались дефекты, которые зарождались на начальной стадии пластической деформации. Образование дефектов сопровождалось частичной релаксацией упругой энергии. Магнитные характеристики, измеренные в различных магнитных полях, позволили сопоставить величину пластической деформации и степень поврежденности. С увеличением степени деформации увеличилась «магнитная жесткость» образцов, поэтому значения коэрцитивной силы, остаточной индукции увеличивались, а магнитная проницаемость уменьшилась. Данное явление

связано с затруднением намагничивания металла, что объясняется появлением в деформируемом образце дефектов с более высокими значениями критических полей и взаимодействием доменных границ с дефектами структуры металла. Изменение магнитных характеристик происходит уже при малых степенях деформации. Если рассмотреть данное явление как модель, то коэрцитивная сила связана с плотностью дислокаций, и, как следствие, с увеличением плотности дислокаций коэрцитивная сила будет увеличиваться. Дальнейшее увеличение магнитных характеристик вызывает образование дислокационных стенок, которые становятся местами закрепления доменных границ [6].

Большой интерес вызывают работы, в которых показано влияние монотонных зависимостей на пьезоостаточную намагниченность растягивающих, сжимающих и крутящих упругих деформаций. Данные деформации позволили зарегистрировать величину максимальных действовавших напряжений по изменению пьезоостаточной намагниченности предварительно намагниченного ферромагнетика. Данное явление может быть использовано для «запоминания» максимальных напряжений, действовавших непосредственно на материал, то есть быть элементом «магнитной памяти». Но даже при наличии данного эффекта, чтобы запомнить максимальные действовавшие напряжения, необходимо произвести не менее двух измерений, то есть до действия напряжения и после. Любые внешние упругие деформации будут влиять на остаточный магнитный момент, а изменяющееся структурное состояние будет усиливать влияние. Чем более мягким в магнитном отношении является материал, тем сильнее влияние упругих напряжений и изменение структурного состояния на величину остаточной намагниченности [7].

При термическом воздействии электромагнитного поля оно основано на наличии градиентов температуры и электрического потенциала – электростимуляции [8], определяемой удельной энергией

$q = 1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>, приходящийся на единицу объема обрабатываемого материала, длительность воздействия варьируется от 1 до 30 с. При этом наблюдается [9] увеличение пластичности при незначительно изменении прочности токопроводящих материалов.

Одним из возможных механизмов явления может являться неоднородность выделенной энергии  $q$ , связанная с наличием фаз, неметаллических включений, концентраторов электрического и магнитного поля в структуре металла. Результаты исследований, связанных с магнитно-импульсным воздействием, показали, что при воздействии сильного электромагнитного поля происходят структурные изменения в металлических изделиях, приводящие к их упрочнению. Изменяется структура сплава, которая обретает вид, свойственный для отожженной структуры.

Более глубоко исследовано влияние магнитного поля на разные виды металла при усталостном нагружении. Так, например, количество циклов до разрушения увеличивается у следующих металлов: медь, вольфрам-рений. Для образцов из алюминия разницы между количеством циклов до разрушения в магнитном поле и без него не выявлено. Образцы из свинца и сплавов циркония разрушаются быстрее в магнитном поле. Результаты сводятся тому, что влияние магнитного поля на механические свойства происходит при нескольких условиях, а, именно, образцы должны находиться в напряженном состоянии для того, чтобы было движение дислокаций, данные напряжения могут быть как от приложения внешней силы, так и как остаточные напряжения, появившиеся в образце в ходе его изготовления. Также необходимо наличие парамагнитных дефектов. Однако их может быть очень мало, так как дислокация при своем движении проходит довольно большой путь, поэтому может быть достаточно фоновых примесей. Необходимо отметить, что радиационная стойкость, вернее ее часть, связанная с движением дислокаций, также будет зависеть от магнитного поля [10-13].

Выполнено измерение скорости распространения ультразвука (СУЗ) в металлах и сплавах, чтобы улавливать изменения, происходящие в материалах при деформации и термической обработке [14]. Данный метод авторы назвали электростимулированием металлов и сплавов, при котором восстанавливается и повышается работоспособность с помощью обработки мощным импульсом электрического тока. Проведен ряд испытаний малоциклового усталости на следующих сталях: X18H10T, 70XГСА, P6M5, 40X, 38X2MЮА, 08Г2С [15]. В данном исследовании рассматривается возможная связь зависимости СУЗ от числа циклов нагружения на основании модели теории надежности «прочность – нагрузка». В процессе усталости металла скорость ультразвука снижалась из-за появления дефектов и микротрещин в металле. Установлены зависимости изменения СУЗ от числа циклов и их связь с данными оптической и электронной растровой. Оценка уровня напряжений позволила установить физическую природу электростимулирования восстановления усталостного ресурса. По мнению автора, измерение СУЗ, то есть обработка электрическим импульсом, дает возможность восстановления долговечности и надежности механизмов.

Данные источников по влиянию магнитных полей на скорость коррозии металла противоречивы. В частности, в работе [16] описан опыт на коррозионную стойкости образцов, изготовленных из стали 17Г1С в растворе  $H_2SO_4$ . Некоторые образцы устанавливались между одноименными магнитными полюсами, создающими неоднородное магнитное поле. Результаты данного исследования показали, что воздействие внешнего магнитного поля повысило коррозионную стойкость в 2,12 раза по сравнению с коррозионной стойкостью образцов, находящихся в той же среде без воздействия магнитного поля. Однако в работе не указаны величина магнитного поля и распределение его градиента.

По мнению автора [17] и результатам проведенных опытов выясняется, что скорость коррозии стали У10, находящейся в неоднородном магнитном поле, увеличивается, а в остаточном намагниченном состоянии коррозионная прочность стали снижается.

Однако в работе [18] исследуется влияние остаточной намагниченности на скорость коррозии металла. Указывается, что согласно результатам эксперимента намагниченные образцы менее стойки, и их скорость коррозии выше, а защитное действие ингибитора коррозии ниже, чем на образцах без воздействия магнитного поля.

Различие внешнего вида образцов с магнитными свойствами и без них связано с тем, что, если продукты коррозии ферромагнитны, то они в меньшем количестве будут смываться с поверхности металла и переходить в водную фазу.

## **Выводы**

Магнитное, как и у любое другое воздействие, имеет отрицательные и положительные стороны.

Если отрицательное влияние заключается в повышении скорости коррозии, то положительное, по мнению автора, – в повышении ресурса в результате обработки электромагнитным импульсом. Данный эффект разупрочнения материала под действием электромагнитного поля основывается на гипотезе электронно-дислокационного взаимодействия [19].

Воздействие магнитного поля и остаточная намагниченность в металлах также положительно влияют на напряженно-деформированное состояние, статическую прочность, пластичность. Исследования проводились на образцах из сталей марок 08Г2С, 17Г1С, которые используются при строительстве трубопроводов.

Результаты исследований необходимо учитывать при расчете риска разгерметизации трубопровода.

### Список используемых источников

1. Счастливец В.М. Калетина Ю.В., Фокина Е.А. Мартенситное превращение в магнитном поле. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 322 с.
2. Комшина А.В., Помельникова А.С., Шипко М.Н. Влияние импульсных магнитных полей на микротвердость ферро- и парамагнитных сплавов // Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов: матер. II междунар. конф. Орск, 2011. С. 384-390.
3. Гринкевич В.А., Шевченко Т.Н., Краев М.В., Краева В.С., Бондарев С.В. Комбинированная обработка давлением сталей с применением внешнего магнитного поля // Обработка материалов давлением. 2013. № 4 (37). С. 79-82.
4. Лоу Дж.Р. Связь хрупкого разрушения с микроструктурой. Структура металлов и свойства. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1957. С. 170-189.
5. Atherton D.L., Jiles D.C. Effects of Stress on Magnetization // NDT International. 1986. Vol. 19. P. 15–19.
6. Jiles D.C. The Effect of Compressive Plastic Deformation on the Magnetic Properties of AISI 4130 Steels with Various Microstructures // J. Phys. D: Appl. Phys. 1988. pp. 1196–1204.
7. Загидуллин Р.В., Мужичкий В.Ф., Загидуллин Т.Р. Расчет остаточной намагниченности деформированной стальной пластины // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2005. № 2. Т. 71. С. 25-28.
8. Александров П.А., Бударегин В.В., Шахов М.Н. Механические свойства некоторых материалов в магнитном поле // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2005. Вып. 1. С. 24-30.
9. Фролов К.В., Махутов Н.А., Хуршудов Г.Х., Гаденин М.М. Прочность, ресурс и безопасность технических систем // Проблемы прочности. 2002. № 5. С. 8-18.



10. Теплинский Ю.А., Агинец Р.В., Кузьбожев А.С., Андронов И.Н. Исследование особенностей изменения магнитных параметров стали 17Г1С в условиях одноосной растягивающей нагрузки // Контроль. Диагностика. 2004. № 1. С. 14-16.

11. Горкунов Э.С., Митропольская С.Ю., Вичужанин Д.И., Туева Е.А. Применение магнитных методов для оценки нагруженности и поврежденности стали X70 // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. № 1. С. 73-82.

12. Моргунов Р.Б. Спиновая микромеханика в физике пластичности // Успехи физических наук. 2004. Вып. 174 (2). С. 131-152.

13. Краев М.В., Гринкевич В.А., Шевченко Т.Н., Краева В.С. Комбинированная обработка давлением сталей с применением внешнего магнитного поля // Обработка материалов давлением. 2012. № 3 (32). С. 116-120.

14. Горкунов Э.С., Смирнов С.В., Задворкина С.М., Вичужанин Д.И., Митропольская С.Ю. Влияние накоплений деформации сдвига и поврежденности при кручении на магнитные характеристики стали // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № S1-2. С. 311-314.

15. Худяков М.А., Алтынова Р.Р. Влияние постоянного магнитного поля на циклическую трещиностойкость и коррозионную стойкость стали 17Г1С // Нефтегазовое дело. 2006. Т. 4. № 1.

16. Зимина Т. Наука и жизнь. Новости науки и техники. URL: <http://www.nkj.ru/news/5875/> (дата обращения: 25.02.2019)

17. Новиков В.Ф., Быков В.Ф., Муратов К.Р. Ускоренное определение величины скорости коррозии // Актуальные проблемы строительства и эксплуатации газовых скважин, промышленного обустройства месторождений и транспорта газа: сб. науч. тр. ООО «ТюменНИИгипрогаз». М.: Недра, 2002. С. 120-123.

18. Рогачев М.К., Кузьмин М.И., Кондрашева Н.К. Исследование влияния магнитного поля на скорость коррозии металла насосно-компрессорных труб и реологические свойства скважинной продукции // Записки Горного института. 2012. Т. 199. С. 379-383.

19. Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем // Матер. Второго Всесоюзного семинара «Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем». М., 1971. 316 с.

## References

1. Schastlivtsev V.M., Kaletina Yu.V., Fokina E.A. *Martensitnoe prevrashchenie v magnitnom pole* [Martensitic Transformation in a Magnetic Field]. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. 322 p. [in Russian].

2. Komshina A.V., Pomel'nikova A.S., Shipko M.N. Vliyanie impul'snykh magnitnykh polei na mikrotverdost' ferro- i paramagnitnykh splavov [Influence of Pulsed Magnetic Fields on Microhardness of Ferro- and Paramagnetic Alloys]. *Materialy II Mezhdunarodnoi konferentsii «Innovatsionnaya deyatel'nost' predpriyatii po issledovaniyu, obrabotke i polucheniyu sovremennykh materialov i splavov»* [Materials of the II International Conference «Innovative Activity of Enterprises in Research, Processing and Production of Modern Materials and Alloys»]. Orsk, 2011. pp. 384-390. [in Russian].

3. Grinkevich V.A., Shevchenko T.N., Kraev M.V., Kraeva V.S., Bondarev S.V. Kombinirovannaya obrabotka davleniem stali s primeneniem vneshnego magnitnogo polya [Combined Pressure Treatment of Steels Using an External Magnetic Field]. *Obrabotka materialov davleniem – Pressure Treatment of Materials*, 2013, No. 4 (37), 79-82 p. [in Russian].

4. Lou Dzh.R. *Svyaz' khrupkogo razrusheniya s mikrostrukturoi Struktura metallov i svoistva* [Connection with the Brittle Fracture Microstructure. Metal Structure and Properties]. Moscow, State Scientific and Technical Publishing House of Literature on Ferrous and Nonferrous Metallurgy, 1957. pp. 170-189. [in Russian].
5. Atherton D.L., Jiles D.C. Effects of Stress on Magnetization. *NDT International*, 1986, Vol. 19, pp. 15–19.
6. Jiles D.C. The Effect of Compressive Plastic Deformation on the Magnetic Properties of AISI 4130 Steels with Various Microstructures. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1988, pp. 1196-1204.
7. Zagidullin R.V., Muzhitskii V.F., Zagidullin T.R. Raschet ostatochnoi namagnichennosti deformirovannoi stal'noi plastiny [Calculation of the Residual Magnetization of the Deformed Steel Plate]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2005, No. 2, Vol. 71, pp 25-28. [in Russian].
8. Aleksandrov P.A., Budaragin V.V., Shakhov M.N. Mekhanicheskie svoistva nekotorykh materialov v magnitnom pole [Mechanical Properties of Certain Materials in Magnetic Fields]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Termoyadernyi sintez – Problems of Atomic Science and Engineering, Ser. Thermonuclear Fusion*, 2005, Issue 1, pp. 24-30. [in Russian].
9. Frolov K.V., Makhutov N.A., Khurshudov G.Kh, Gadenin M.M. Prochnost', resurs i bezopasnost' tekhnicheskikh system [Strength, Service Life and Safety of Technical Systems]. *Problemy prochnosti – Strength of Materials*, 2002, No. 5, pp. 8-18. [in Russian].
10. Teplinskii Yu.A., Aginei R.V., Kuz'bozhev A.S., Andronov I.N. Issledovanie osobennostei izmeneniya magnitnykh parametrov stali 17G1S v usloviyakh odnoosnoi rastyagivayushchei nagruzki [Study of the Features of Changes in the Magnetic Parameters of Steel 17G1S under Uniaxial Tensile Load]. *Kontrol'. Diagnostika – Testing. Diagnostics*, 2004, No. 1, pp. 14-16. [in Russian].

11. Gorkunov E.S., Mitropol'skaya S.Yu., Vichuzhanin D.I., Tueva E.A. Primenenie magnitnykh metodov dlya otsenki nagruzhennosti i povrezhdennosti stali Kh70 [Magnetic Methods for Estimation of Loading and Damaging in Kh70 Steel]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2010, Vol. 1, No. 13, pp. 73-82. [in Russian].

12. Morgunov R.B. Spinovaya mikromekhanika v fizike plastichnosti [Spin Micromechanics in Physics of Plasticity]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Actual Problems of Oil and Gas*, 2004, Issue 174 (2), pp. 131-152. [in Russian].

13. Kraev M.V., Grinkevich V.A., Shevchenko T.N., Kraeva V.S. Kombinirovannaya obrabotka davleniem stalei s primeneniem vneshnego magnitnogo polya [Combined Pressure Treatment of Steels Using an External Magnetic Field]. *Obrabotka materialov davleniem – Pressure Treatment of Materials*, 2012, No. 3 (32), pp. 116-120. [in Russian].

14. Gorkunov E.S., Smirnov S.V., Zadvorkina S.M., Vichuzhanin D.I., Mitropol'skaya S.Yu. Vliyanie nakoplenii deformatsii sdviga i povrezhdennosti pri kruchenii na magnitnye kharakteristiki stali [Effect of Shear Strain and Accumulated Damage on Magnetic Properties of Steel in Torsion]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2004, Vol. 7, No. S1-2, pp. 311-314. [in Russian].

15. Khudyakov M.A., Altynova R.R. Vliyanie postoyannogo magnitnogo polya na tsiklicheskuyu treshchinostoikost' i korroziionnuyu stoikost' stali 17G1S [Influence of a Constant Magnetic Field on Cyclic Crack Resistance and Corrosion Resistance of Steel 17G1S]. *Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering*, 2006, Vol. 4, No. 1. [in Russian].

16. Zimina T. *Nauka i zhizn'. Novosti nauki i tekhniki*. [Science and Life. News of Science and Technology]. Available at: <http://www.nkj.ru/news/5875/> (accessed 25.02.2019). [in Russian].

17. Novikov V.F., Bykov V.F., Muratov K.R. Uskorennoe opredelenie velichiny skorosti korrozii [Rapid Determination of Corrosion Rate]. *Sbornik nauchnykh trudov OOO «TyumenNIIgiprogaz» Aktual'nye problemy stroitel'stva i ekspluatatsii gazovykh skvazhin, promyslovogo obustroistva mestorozhdenii i transporta gaza»* [Collection of Scientific Works of LLC TyumenNIIgiprogaz «Actual Problems of Construction and Operation of Gas Wells, Field Arrangement of Fields and Gas Transport»]. Moscow, Nedra Publ., 2002. pp. 120-123. [in Russian].

18. Rogachev M.K., Kuz'min M.I., Kondrasheva N.K. Issledovanie vliyaniya magnitnogo polya na skorost' korrozii metalla nasosno-kompressornykh trub i reologicheskie svoistva skvazhinnoi produktsii [Investigation of the Influence of the Magnetic Field on the Corrosion Rate of Metal Tubing and Rheological Properties of Borehole Products]. *Zapiski Gornogo instituta – Journal of Mining Institute*, 2012, Vol. 199, pp. 379-383. [in Russian].

19. Voprosy teorii i praktiki magnitnoi obrabotki vody i vodnykh sistem [Theory and Practice of Magnetic Treatment of Water and Water Systems]. *Materialy vtorogo Vsesoyuznogo seminarra «Voprosy teorii i praktiki magnitnoi obrabotki vody i vodnykh sistem»* [Materials of the Second All-Union Seminar «Problems of Theory and Practice of Magnetic Treatment of Water and Water Systems»]. Moscow, 1971. 316 p. [in Russian].

### **Сведения об авторе**

#### **About the author**

Ильясова Айгуль Ириковна, ассистент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Aigul I. Ilyasova, Assistant of Industrial Safety and Labor Protection Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: bikbulatova@inbox.ru