

Применение коэрцитиметрического метода для диагностики коррозионных повреждений металлоконструкций

О.В. Балина, В.В. Насонов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Аннотация: В работе изучены возможность использования параметра коэрцитивной силы для оценки толщины металла при деградации материала в коррозионных условиях. Разработана методика измерения толщины металлоконструкций через немагнитную изоляцию с использованием коэрцитиметрического метода. Представлены результаты измерения коэрцитивной силы стали 09Г2С через немагнитную изоляцию различной толщины.

Ключевые слова: металлоконструкция, диагностика, деградация, коррозия, коэрцитивная сила, толщинометрия, немагнитная изоляция.

При диагностике повреждений металлоконструкций в ряде случаев необходимы системы дистанционного контроля толщины металла в местах максимальной скорости коррозии без нарушения изоляции и прекращения эксплуатации контролируемого объекта [1, 2]. Помимо сплошной внутренней коррозии и эрозии одним из наиболее вероятных риск-факторов для трубопроводов является канавочная коррозия в нижней части трубы, а для горизонтальных сосудов – неравномерная коррозия в нижней части сосуда. Толщинометрия через немагнитную изоляцию возможна при использовании электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей, однако необходима оценка погрешности за счет анизотропии свойств материала, величины механических напряжений, непараллельности внутренней и наружной поверхностей контролируемого объекта при язвенной коррозии и длинных линий связи между ЭМА-преобразователями и измерительным прибором. Кроме того, стоимость матрицы ЭМА - преобразователей с прибором зачастую сопоставима со стоимостью снятия-восстановления изоляции и традиционной ультразвуковой (УЗ) толщинометрией [3]. Локальный дистанционный контроль толщины металла не заменяет диагностики большой площади, так как даже при малой погрешности измерения толщины

локального участка количество точек контроля будет недостаточным для оценки состояния объекта в целом. Локальный дистанционный контроль является индикатором скорости коррозии и позволяет повысить эффективность планирования диагностики, предусмотренной регламентом эксплуатации.

В литературе описан опыт использования коэрцитивной силы (H_c) для контроля толщины поверхностных слоев после цементации [4, 5], оценки эксплуатационных повреждений грузоподъемных устройств и диагностики строительных конструкций. В последнем случае влияние толщины изделия на коэрцитивную силу рассматривается в качестве помехи [6-8]. Однако, возможность применения параметра коэрцитивной силы для оценки толщины металлической стенки при деградации материала в коррозионных условиях изучена недостаточно.

Целью настоящего исследования стала оценка возможности использования коэрцитиметрического метода для измерения толщины стенки трубопроводов, сосудов или иных металлоконструкций через немагнитную изоляцию.

Исследования проводились на сталях марки 09Г2С двух плавок с разными значениями предела текучести ($\sigma_{0,2}$) и H_c (пл1: $\sigma_{0,2}=232$ МПа, $H_c=390$ А/м; пл2: $\sigma_{0,2}=290$ МПа, $H_c=520$ А/м). Образцы размером 100×300 мм изготовлены из горячекатаного листа толщиной 8 мм.

Для оценки влияния толщины металла на величину H_c на образцах были профрезерованы канавки шириной 8 мм различной глубины (1 – 7 мм), имитирующие канавочную коррозию. Замеры H_c проводились с намагничиванием поперек канавки через немагнитную изоляцию, имитирующую антикоррозионный защитный слой, толщиной 0.1 мм и 2.2 мм. Использовался накладной преобразователь коэрцитиметра КИФМ-1с

полюсами 12×28 мм и преобразователи с полюсами толщиной от 20 до 30 мм и феррозондами, расположенными в основании П-образного сердечника.

Результаты собственных исследований и анализ литературы показали, что зависимость H_c от толщины металла нелинейная. Кроме разброса свойств в пределах марки стали существенное влияние оказывает соотношение толщины контролируемого металла и размеров полюсов намагничивающего устройства. При толщине металла в два раза и более больше толщины полюса, показания коэрцитиметра слабо зависят от толщины контролируемого образца [6, 8]. Разброс H_c в пределах марки стали оказался больше, чем изменение H_c при утонении образца от 8 до 4 мм. При уменьшении толщины стали 09Г2С от 25 до 2.5 мм отличия H_c в пределах марки уменьшаются от 3.7 до 1.5 раза и приближаются к показателям разброса механических свойств газопроводных труб [9, 10].

Вместо измерения абсолютных величин H_c и перевода их в толщину стенки предложен метод относительных величин - отношение величины коэрцитивной силы в конкретной точке измерения к начальной величине H_c при максимальной толщине металлической стенки контролируемого образца.

$$H_{c_{\text{отн}}} = H_{c_i} / H_{c_{\text{max}}}$$

Например, для трубопровода с вероятной канавочной коррозией в нижней части, принимается за начальное значение величина H_c , измеренная в верхней части трубы, где толщина стенки максимальна и известна по данным толщинометрии или проекта (паспорта на трубопровод). Предложенный метод позволяет существенно уменьшить влияние состава и структуры стали на зависимость H_c от толщины металла. Например, при толщине образца 8 мм H_c сталей ШХ 15 и 09Г2С отличаются почти в 10 раз, но при изменении толщины образца в два раза, H_c стали ШХ15 изменится в 1.5 раза, а стали 09Г2С в 1.2 – 1.5 раза. Результаты сравнительного анализа

влияния толщины образцов на абсолютные и относительные величины H_c представлены в табл. 1.

Таблица № 1

Анализ влияния толщины образцов
на абсолютные и относительные величины H_c

Материал	Толщина, мм	2,5	5 (6*)	8	10	12	15	20	25
09Г2С (пл1)	H_c , А/см	5.3	4.7	3.9	-	-	-	-	-
	$H_{c_{отн}}$	1.35	1.2	1	-	-	-	-	-
09Г2С (пл2)	H_c , А/см	7.0	6.2	5.2	-	-	-	-	-
	$H_{c_{отн}}$	1.35	1.2	1	-	-	-	-	-
09Г2С Мин. [6, 7]	H_c , А/см	4	3	-	2	-	1.8	1.5	1
	$H_{c_{отн}}$	2	1.5	-	1	-	-	-	-
09Г2С Средн. [6, 7]	H_c , А/см	5	4.5	-	4	-	3,5	3	2,5
	$H_{c_{отн}}$	1.25	1.13	-	1	-	-	-	-
09Г2С Макс. [6, 7]	H_c , А/см	6	5.7	-	5	-	4.7	4	3.7
	$H_{c_{отн}}$	1.2	1.14	-	1	-	-	-	-
10ХСНД [6, 7]	H_c , А/см	-	7	-	5.5	-	4.5	4	-
	$H_{c_{отн}}$	-	1.27	-	1	-	-	-	-
Ст 3 [6, 7]	H_c , А/см	-	3	-	1.8	-	1.2	1.1	-
	$H_{c_{отн}}$	-	1.67	-	1	-	-	-	-
Ст 3 [6, 7]	H_c , А/см	-	3*	2.7	2.43	2.17	-	-	-
	$H_{c_{отн}}$	-	1.23	1.11	1	-	-	-	-
Аналог Ст 3, Прибор1 [6, 7]	H_c , А/см	-	-	3.6	-	2.8	-	2.3	2
	$H_{c_{отн}}$	-	-	1.29	-	1	-	-	-
Аналог Ст 3, Прибор3 [6, 7]	H_c , А/см	-	-	2.8	-	1.6	-	1.2	1
	$H_{c_{отн}}$	-	-	1.75	-	1	-	-	-
Аналог Ст 3, Прибор4 [6, 7]	H_c , А/см	-	-	3.4	-	2.5	-	1.5	2
	$H_{c_{отн}}$	-	-	1.36	-	1	-	-	-
09Г2С, Приборы 1 и 2 [6, 7]	H_c , А/см	-	4.4*	3.9	3.7	3.5	-	-	-
	$H_{c_{отн}}$	-	1.26	1.11	1.06	1	-	-	-
09Г2С, Прибор3 [6, 7]	H_c , А/см	-	4.3*	3.8	3.3	2.9	-	-	-
	$H_{c_{отн}}$	-	1.48	1.31	1.14	1	-	-	-
ШХ-15 [8]	H_c , А/см	-	-	38	-	-	27	-	19
	$H_{c_{отн}}$	-	-	1.5	-	-	1	-	-

При уменьшении толщины металла (увеличении глубины канавки-имитатора коррозии) коэрцитивная сила увеличивается. При этом относительные изменения коэрцитивной силы обоих образцов одинаковы.

Немагнитная изоляция уменьшает показания коэрцитиметра с накладным преобразователем. В работах [11, 12] показано, что при зазоре более 4 мм механические напряжения не влияют на показания КИФМ – 1 и КРМ-Ц-К2М. Влияние зазора нелинейное, наибольшее изменение показаний прибора происходит при увеличении зазора от 0 до 2.5 мм. Влияние немагнитной изоляции на показания коэрцитиметра зависит от размера полюсов намагничивающего устройства и места установки феррозондов или элементов Холла в накладном преобразователе [13-15]. Используя накладные преобразователи с полюсами толщиной от 20 до 30 мм и феррозондами, расположенными в основании П-образного сердечника, удалось существенно уменьшить влияние немагнитного зазора на показания коэрцитиметра. При этом влияние толщины металла при измерении без зазора оказалось меньше, чем с зазором.

Величины коэрцитивной силы при измерениях на плоских образцах без канавки, толщиной металла 1 мм или на образцах толщиной 8 мм с канавкой глубиной 7 мм практически одинаковы. Также на величину H_c практически не влияет толщина изоляции, при толщине металла 1 мм, результаты измерения через немагнитную изоляцию толщиной 0.1 мм и 2.2 мм отличаются в 1.075 раза. Однако, при увеличении толщины металла возрастает влияние толщины немагнитной изоляции. Например, на образцах толщиной металла 8 мм. Значение H_c , полученное через немагнитную изоляцию толщиной 2.2 мм, в 1.4 раза меньше, чем при толщине изоляции 0.1 мм. Это объясняется разной степенью насыщения металла при намагничивании. Выбирая режимы намагничивания и размеры намагничивающего сердечника можно получить максимальную

чувствительность величины H_c к изменению толщины металла при заданной величине немагнитной изоляции.

На рис.1. представлены результаты толщинометрии с использованием предложенного метода относительных величин.

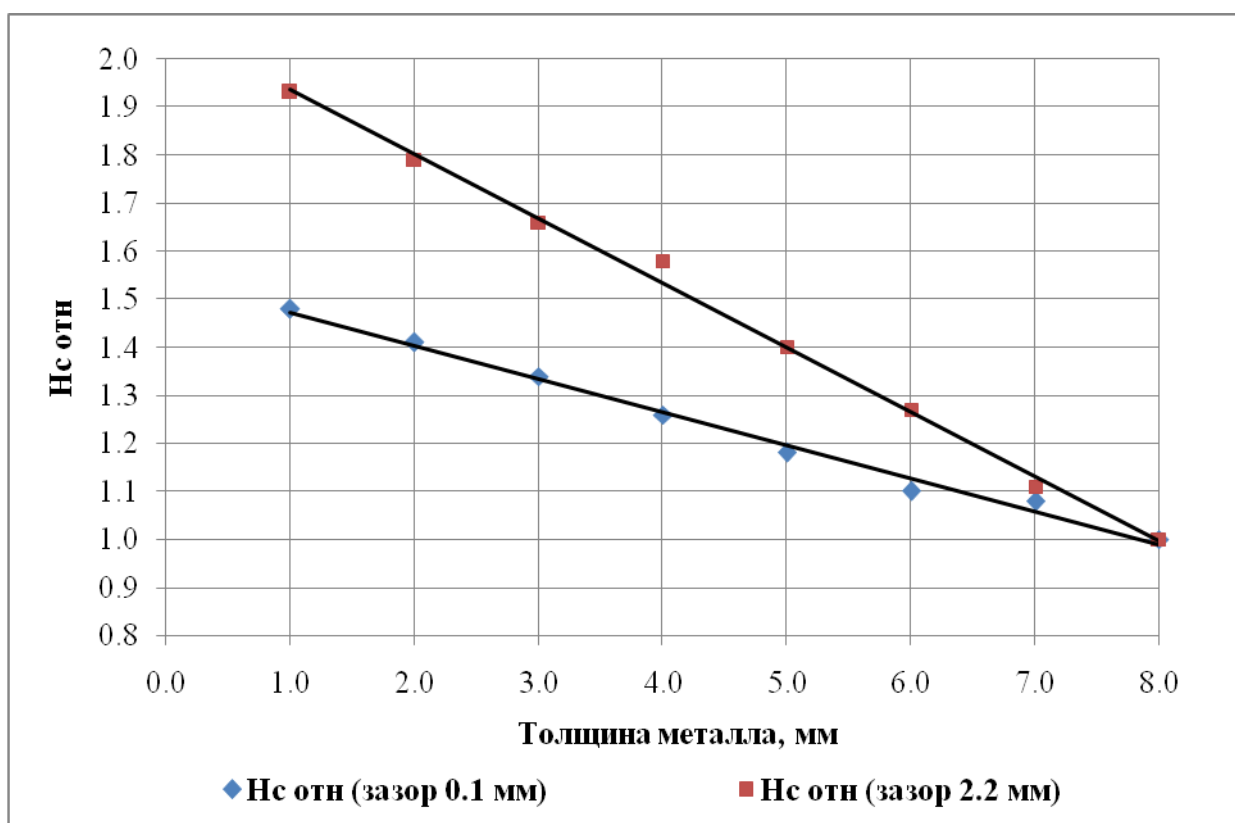


Рис.1 - Изменение относительных величин коэрцитивной силы в зависимости от толщины металла и изоляции

Поскольку значительным влияющим фактором при измерении коэрцитивной силы является величина механических напряжений в контролируемом материале, необходимо учитывать направления действия напряжений и установки накладного преобразователя. При одноосном растяжении образца из стали 09Г2С до $0.6 \sigma_{0.2}$ величина коэрцитивной силы, измеряемой в поперечном направлении относительно растягивающего усилия, меняется в 1.4 раза, что эквивалентно утонению ненагруженного образца от 8 до 5 миллиметров [16].

Результаты исследований позволяют сделать вывод, что для низколегированных сталей типа 09Г2С возможно измерение толщин металла от 1 до 8 мм с относительной погрешностью 10% при немагнитной изоляции до 2.2 миллиметра с использованием дистанционного опроса накладного преобразователя коэрцитиметра. Начальная толщина металла перед установкой накладного преобразователя определяется по результатам толщинометрии или задается проектной документацией.

Варьируя режимы намагничивания и размерами П-образного сердечника накладного преобразователя, можно достигать максимальной чувствительности коэрцитивной силы к изменению толщины металла в определенном диапазоне при заданной толщине немагнитной изоляции.

Литература

1. Вирясов А.Н., Гостинин И.А., Семенова М.А. Применение труб коррозионностойкого исполнения для обеспечения надежности нефтегазотранспортных систем Западной Сибири // Инженерный вестник Дона. 2013. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/nly2013/1487.

2. Лебедева М.А., Идиятуллина Э.Ф., Набоков А.В., Чухлатый М.С. Строительство трубопроводов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // Инженерный вестник Дона. 2020. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N1y2020/6235.

3. Алехин С.Г. Толщинометрия металлоконструкций на основе электромагнитно-акустического преобразования в импульсном магнитном поле: автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук: 05.11.13 / Алехин Сергей Геннадиевич; ЗАО «НИИИИ МНПО «СПЕКТР». – Москва. 2013. – 21 с.

4. Михеев М.Н., Бида Г.В., Костин В.Н., Михайлова А.А., Каюкова Т.Н. Контроль глубины и твердости закаленных после нагрева ТВЧ слоев на шейках коленчатого вала автомобиля. // Дефектоскопия. 1985. № 8. С. 12-17.

5. Горкунов Э.С., Лapidус Б.М. Магнитные свойства двухслойных ферромагнетиков применительно к контролю качества поверхностно упрочненных изделий. // Сборник трудов. Структурно-фазовые превращения в металлах: проблемы прочности и пластичности. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. С. 103-110.

6. Grigorov O.V., Gubskiy S.A., Strijak V.V., Ivchenko D.A., Borisenko A.A. Forecasting the remaining available resource of the metallic bearing structure of the bridge-cranes used over the standard operating time. Annals of the University of Petrosani, Mechanical Engineering. 2008. № 10. P. 59-72.

7. Попов В.А. Исследования и практика применения магнитной структуроскопии. // Подъемные сооружения. Специальная техника. Одесса, 2004. № 9. С. 12-15.

8. Гобов Ю.Л., Жаков С.В., Михайлов А.В. Измерение коэрцитивной силы в локальной области образца. // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 27-32.

9. Бирилло И.Н., Теплинский Ю.А. О механических характеристиках газопроводных труб из стали 17ГС и 17Г1С. // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 2. С. 12-14.

10. Голофаст С.Л. Оценка влияния механических свойств трубной стали 17Г1С различных производителей на прочностную надежность магистральных трубопроводов. // Экспозиция нефть и газ. 2018. № 7. С. 67-72.

11. Новиков В.Ф., Бахарев М.С., Нассонов В.В., Изосимов В.А. Определение напряжений в трубопроводах коэрцитиметрическим методом. // Нефть и газ. 1997. №3. С. 66-71.

12. Агинея Р.В., Кузьбожаев А.С., Андронов И.Н. Алгоритм определения механических напряжений в металле трубопровода по коэрцитивной силе металла. // Нефтегазовое дело. 2007. Т.5. №1. С. 235-240.

13. Kostin V.N., Vasilenko O.N. Local Measurement Of The Coercive-Return Induction In The Presence Of A Gap In The Transducer-Object Combined Circuit. Russian Journal Of Nondestructive Testing. 2012, T48. № 7. pp. 391-400.

14. Kostin V.N., Vasilenko O.N. On New Possibilities For Making Local Measurements Of The Coercive Force Of Ferromagnetic Objects. Russian Journal Of Nondestructive Testing. 2012, T48. № 7. pp. 401-410.

15. Ничипурук А.П., Бида Г.В., Царькова Т.П., Гобов Ю.Л., Сташков А.Н., Поволоцкая А.М. О снижении влияния зазора на результаты коэрцитиметрии при учете свойств приставного преобразователя. // Дефектоскопия. 2010. № 8. С. 45-53.

16. Balina O.V., Nasonov V.V. Application of the coercimetric method to the evaluation of uniaxial stresses without stress relief. AIP Conference Proceedings. 2020, №2315. aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0036760.

References

1. Viryasov A.N., Gostinin I.A., Semenova M.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus).2013, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/nly2013/1487.

2. Lebedeva M.A., Idiyatullina E.F., Nabokov A.V., Chukhlaty M.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2020, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N1y2020/6235.

3. Alekhin G.S. Tolshchinometriya metallokonstruktsiy na osnove elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya v impulsnom magnitnom pole [Metal Structure Thickness Measurement Based on Electromagnetic Acoustic Transduction in a Pulsed Magnetic Field: Author's Abstract of Candidate's Thesis. Moskva: NIIN MNPO «Spektr», 2013. 21p.

4. Mikheev M.N., Bida G.V., Kostin V.N., Mikhailova A.A., Kayukova T.N. Defektoskopiya. 1985, No. 8, pp. 12–17.

5. Gorkunov E.S., Lapidus B.M. Magnetic properties of double-layer ferromagnetsas applied to quality control of surface-hardened products. In:

Strukturno-fazovye prevrashcheniya v metallakh: problem prochnosti i plastichnosti [Structural-Phase Transformations in Metals: Problems of Strength and Plasticity]. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1987. pp. 103–110.

6. Grigorov O.V., Gubskiy S.A., Strijak V.V., Ivchenko D.A., Borisenko A.A. Annals of the University of Petrosani, Mechanical Engineering. 2008, No. 10, pp. 59–72.

7. Popov V.A. Podyomnye Sooruzheniya. Spetsialnaya Tekhnika. 2004, No. 9, pp. 12–15.

8. Gobov Yu.L., Zhakov S.V., Mikhailov A.V. Defektoskopiya. 2017, No. 11, pp. 27–32.

9. Birillo I.N., Teplinsky Yu.A. Bezopasnost Truda v Promyshlennosti (Occupational Safety in Industry). 2004, No. 2, pp. 12–14.

10. Golofast S.L. Ekspozitsiya Neft i Gaz. 2018, No. 7, pp. 67–72.

11. Novikov V.F., Bakharev M.S., Nassonov V.V., Izosimov V.A. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Neft i Gaz. 1997, No. 3, pp. 66–71.

12. Aginei R.V., Kuzbozhaev A.S., Andronov I.N. Neftegazovoe Delo. 2007, vol. 5, No. 1, pp. 235–240.

13. Kostin V.N., Vasilenko O.N. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012, vol. 48, No. 7, pp. 391–400.

14. Kostin V.N., Vasilenko O.N. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012, vol. 48, No. 7, pp. 401–410.

15. Nichipuruk A.P., Bida G.V., Tsarkova T.P., Gobov Yu.L., Stashkov A.N., Povolotskaya A.M. Defektoskopiya. 2010, No. 8. pp. 45–53.

16. Balina O.V., Nassonov V.V. Application of the coercimetric method to the evaluation of uniaxial stresses without stress relief. AIP Conference Proceedings. 2020, № 2315. [aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0036760](https://doi.org/10.1063/5.0036760).