

Новиков В.Ф., Соколов Р.А., Нерадовский Д.Ф., Муратов К.Р.

## МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛИ

*Аннотация.* Проведены исследования, направленные на разработку метода, позволяющего увеличить срок службы изделий из стали работающих в агрессивных средах. Изучена возможность контроля коррозионных параметров стальных образцов по магнитным характеристикам, полученным магнитным структуроскопом DIUS-1.15M разработки ИФМ УрО РАН.

*Ключевые слова:* гармонический анализ; магнитный гистерезис; коррозия; амплитуда гармоник; температура отпуска.

*Abstract.* Research works were carried out to develop a technique with the aim to increase the lifetime of steel items used in corrosive media. The possibility to monitor corrosion parameters of steel samples is analyzed on the basis of magnetic properties obtained by means of a magnetic structuroscope DIUS-1.15M designed by the Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMP UB RAS).

*Keywords:* harmonic analysis; magnetic hysteresis; corrosion; amplitude of harmonics; tempering temperature.

### Введение

Имеется много современных методов контроля коррозионного повреждения металла: весовой, металлографический, ультразвуковой и радиационный (по изменению толщины металла); магнитный (по магнитным полям рассеяния); оптический по изменению отражения и рассеяния света и др.. Прогнозирование коррозии осуществляется, как правило, путем определения скорости коррозии прямыми или косвенными методами на выборочно вырезанных образцах [1–2]. Такой подход является разрушающими, требуют многой времени и не позволяет осуществлять стопроцентный контроль. Необходим поиск новых параметров контроля, позволяющих с необходимой достоверностью прогнозировать скорость коррозии неразрушающими ускоренными методами [3]

Целью работы явилась изучение связи гармонических составляющих петли магнитного гистерезиса с коррозионными свойствами стали 45Х.

В магнитной структуроскопии, для контроля прочностных свойств сталей, снимаются петли магнитного гистерезиса, состоящие из большого числа экспериментальных точек. Но только некоторые из этих точек применяются для целей неразрушающего контроля: коэрцитивная сила, магнитная проницаемость, релаксационная коэрцитивная сила, дифференциальная магнитная проницаемость и др. Одной из задач исследования явилось

представление квазистатической петли магнитного гистерезиса в периодический сигнал и расчет гармоник такого сигнала.

### Образцы и методика эксперимента

Квазистатические петли гистерезиса ферромагнетиков снимались с помощью современного структуроскопа (и аппаратно-программный комплекс АПС DIUS-1.15М, разработанный и изготовленный в ИФМ г. Екатеринбург).

Материалом исследования явилась сталь 45Х закаленная от температуры 950 °С с последующим рядом температурных отпусков, снятые с помощью аппаратно-программного комплекса (АПС DIUS-1.15М) петли магнитного гистерезиса для стали.

С целью расширения возможностей всей петли гистерезиса воспользовались разработанным нами методом гармонического анализа квазистатической петли гистерезиса [4]

Для этого временной параметр в гармоническом разложении заменяли напряженностью магнитного поля  $t = H/k$ , так как ток намагничивания и размагничивания в используемом приборе, следовательно, и напряженность поля, описывается пилообразной функцией. Для формирования периодической функции симметрично отображали нисходящую (верхнюю) ветвь петли относительно вертикальной прямой, проходящей через точку  $H_{\max}$ .

В результате получили представление петли гистерезиса в виде периодической функции  $f(H) = f(k \cdot t)$  (Рисунок 1). Для такой функции может быть выполнено дискретное преобразование Фурье [5, 6]. Методом дискретного преобразования Фурье были рассчитаны амплитуды первой, третьей, пятой, седьмой гармоник петель гистерезиса стали 45Х в зависимости от температуры отпуска, которые приведены на Рисунке 1. Здесь А – безразмерные амплитуды гармоник Фурье – спектра. Как можно заметить амплитудные значения гармонических составляющих испытывают немонокотонное изменение во всем диапазоне температур, что связано с протекающими процессами изменения структуры исследуемой стали.

Для определения достоверности снимаемых показаний с АПС DIUS-1.15М было проведено сравнение показаний по коэрцитивной силе с коэрцитиметром КРМ-Ц-К2М. Значения коррелировали с коэффициентом достоверности аппроксимации линейной функции  $R^2 = 0,99$ .

Образцы исследуемой стали, отпущенные при различной температуре были подвергнуты коррозионным испытаниям в растворе соляной (5%) и серной (5%) кислот при комнатной температуре (Рисунок 2).

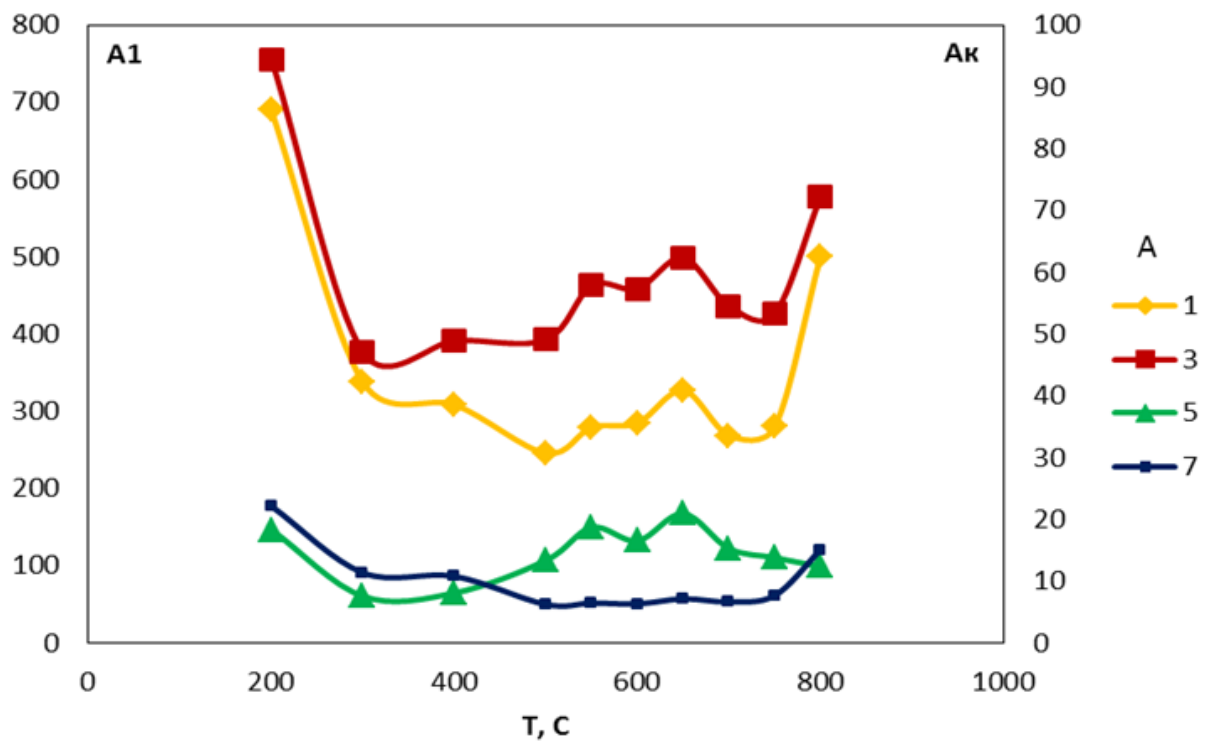


Рисунок 1 – Зависимости амплитуд  $A_1$ ,  $A_k$  ( $k=3,5,7$ ) нечетных гармоник фурье-спектра петель гистерезиса для стали 45X от температуры отпуска.

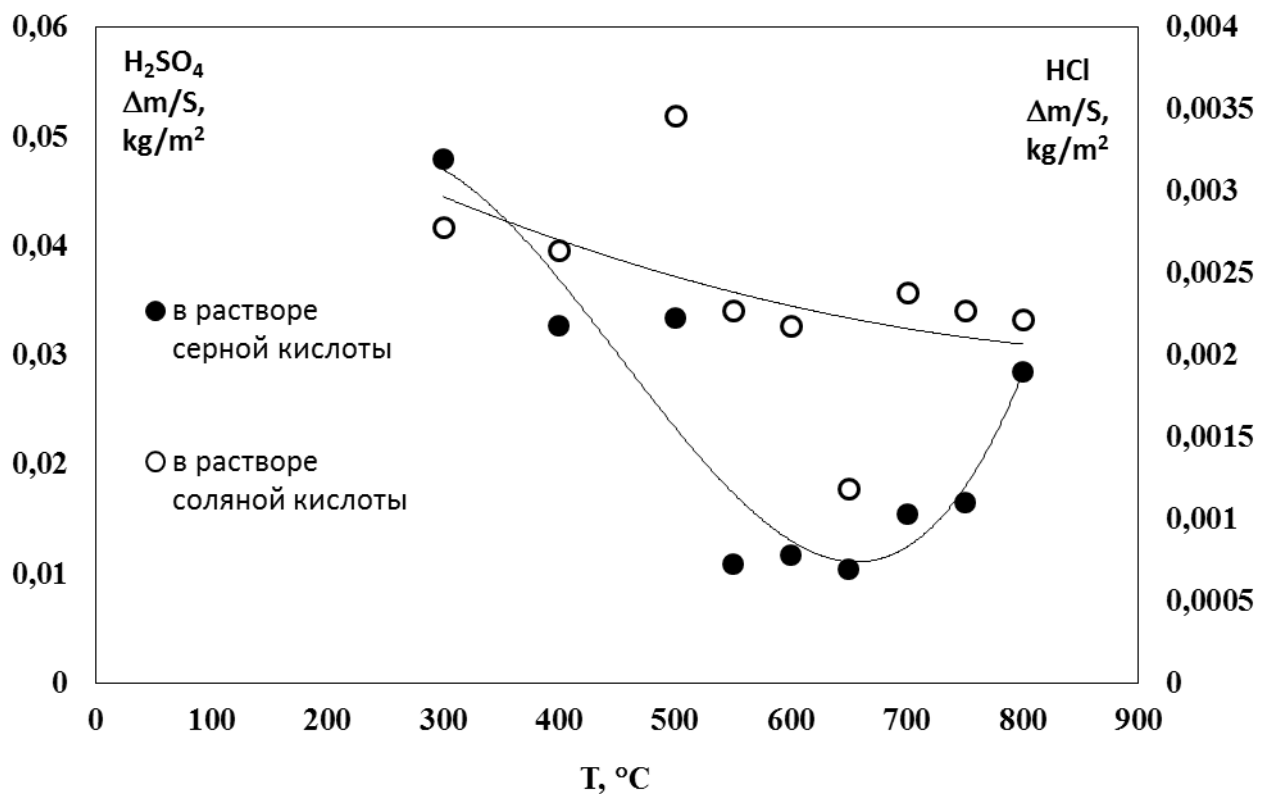


Рисунок 2 – Зависимость убыли массы образцов стали 45X в растворе 5 %-соляной и 5 % серной кислоты от температуры отпуска.

## Результаты и обсуждение

Согласно теории включений коэрцитивной силы, увеличение содержания карбидных составляющих углерода ведет к увеличению коэрцитивной силы. Дисперсность структуры ведет к увеличению числа микро-гальванопар и соответственно росту скорости протекания коррозионных процессов.

В работе [7] показано, что при температурах выше 200<sup>0</sup>С остаточный аустенит превращается в мартенсит отпуска, уменьшаются внутренние напряжения. Все это приводит к уменьшению коэрцитивной силы.

При отпуске в температурном интервале 300 – 450 <sup>0</sup>С, полностью завершается процесс выделения углерода из пересыщенного твердого раствора и мартенсит превращается в феррит. Карбид Fe<sub>2</sub>C преобразуется в цементит Fe<sub>3</sub>C [8]. Образуется структура, состоящая из феррита, в котором равномерно распределены мельчайшие частицы цементита, называемая трооститом отпуска. Эти процессы уменьшают коррозионную восприимчивость стали (Рисунок 4). Так как петли магнитного гистерезиса непосредственно связаны с магнитными параметрами стали, то изменение гармонических спектров намагниченности на их основе также будут чувствительны к изменению структуры и фазового состава стали. На Рисунке 3 можно наблюдать увеличение амплитуд третьей, пятой, девятой гармоник намагниченности, а первой и седьмой уменьшаются.

При высоком отпуске (500 – 650 <sup>0</sup>С) происходит коагуляция частиц цементита – мелкие частицы сливаются в более крупные, и в результате уменьшается их количество [9]. Стали после такого отпуска состоит из достаточно грубой смеси феррита и цементита, которая называется зернистым перлитом или перлитом отпуска. С повышением температуры отпуска структура все больше приближается к равновесному состоянию [10, 11]. При этом существенно изменяются и свойства стали, в том числе и коррозионные (увеличение коррозионной активности в растворе серной кислоты). Коэрцитивная сила имеет небольшой максимум в диапазоне температур 500 – 600 <sup>0</sup>С, что в большей степени связано с наличием легированного цементита или специальных карбидов, имеющих более мелкие включения. Происходит рост амплитуд гармоник намагниченности, также наблюдаются возникновение пиков для амплитуд первой, третьей и пятой гармоник, что возможно связано с определенной долей концентрации карбидных частиц и достижениями ими в процессе коагуляции «критического размера» [8, 10].

В области высокого отпуска (температурный диапазон 600 – 800 <sup>0</sup>С) происходит выделение карбидов. Амплитуды гармоник до температуры 700 <sup>0</sup>С ведут себя монотонно, но после данной температуры происходит рост у

амплитуд седьмой и первой гармоник и падение у пятой [12, 13]. Из – за выделения карбидов происходит образование микрогальванопар, приводящих к увеличению коррозионной активности.

Как можно заметить из Рисунка 3 минимальная коррозионная активность стали 45X наблюдается при температуре отпуска 450 – 600 °С. Это происходит в результате того, что уменьшается разнородность структуры, материал при этом переходит в равновесное состояние.

При сравнении составляющих гармонического спектра и убыли массы в указанных выше коррозионных средах были получены зависимости, представленные на Рисунке 3.

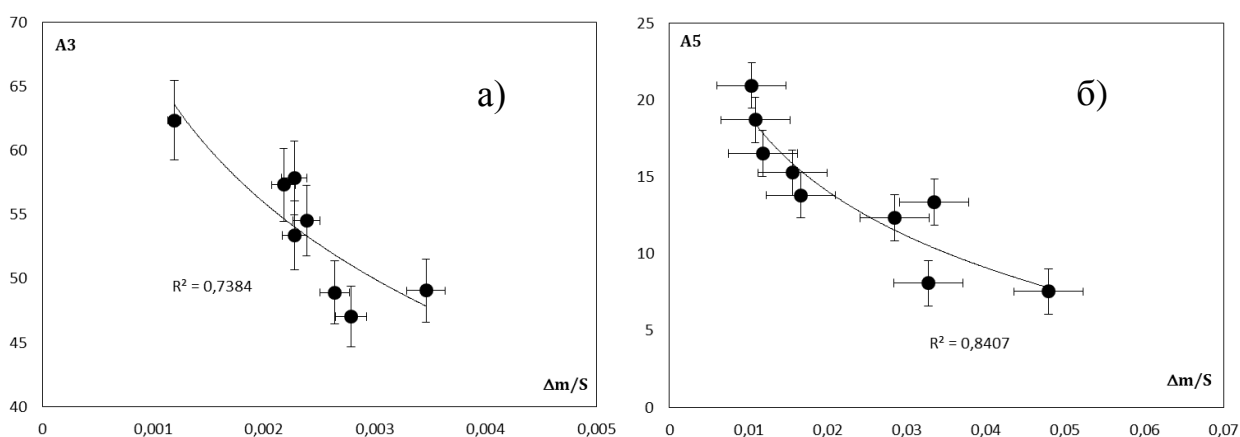


Рисунок 3 – Зависимости амплитуды гармоник  $A_3$  и  $A_5$  от относительной коррозионной убыли массы  $\Delta m/S$  термообработанных образцов стали 45X:

- а) зависимость амплитуды третьей гармоники от убыли массы в растворе соляной кислоты; б) зависимость амплитуды пятой гармоники от убыли массы в растворе серной кислоты

### Заключение

В результате получены зависимости для гармонического спектра и относительной убыли массы, описываемые логарифмической функцией с достоверностью 74 и 84 %.

Установлена корреляционная связь с коэффициентом 75, 80% между коррозионной убылью массы и изменением амплитуд гармонического спектра для закаленных и отпущенных образцов стали 45X.

Показано, что коэрцитивная сила для стали 45X практически не связана с коррозией в растворе соляной и серных кислот.

Таким образом, полученная зависимость с применением гармонического анализа может являться перспективным направлением для создания методики прогнозирования коррозионной стойкости стали 45X.

### *Библиографический список*

1. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / под ред. В. В. Клюева. – Москва : Машиностроение, 2003. – 656 с.
2. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости [Электронный ресурс] : ГОСТ 9.008–85. ЕСЗКС. // Кодекс : нормат.-правовая база. – Ресурс доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200007383>.
3. Способ и устройство для контроля избыточной коррозии стали : патент 2570704 Рос. Федерация : МПК G01N 17/00 / Новиков В. Ф., Устинов В. П., Радченко А. В., Евко В. П. ; патентообладатель ООО Науч.-произв. фирма «Радан». – № 2015103100/28 ; заявл. 30.01.2015 ; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34.
4. Новиков В. Ф. Использование квазистатических петель магнитного гистерезиса для контроля структуры стали / В. Ф. Новиков, Д. Ф. Нерадовский, Р. А. Соколов // Вестник ПНИПУ. Серия: Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 38–50.
5. Белашов В. Ю. Эффективные алгоритмы и программы вычислительной математики / В. Ю. Белашов, Н.М. Чернова. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 1997. – 160 с.
6. Пономарев Ю. Ф. Гармонический анализ намагниченности ферромагнетиков, перемагничиваемых переменным полем, с учетом магнитного гистерезиса. Ч. 4. Применение к неразрушающему контролю / Ю. Ф. Пономарев // Дефектоскопия.– 1986. – № 7. – С. 67–78.
7. Малахов А. И. Основы материаловедения и теория коррозии / А. И. Малахов, А. П. Жуков. – Москва, 1989. – 516 с.
8. Михеев М. Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М. Н. Михеев, Э. С. Горкунов. – Москва : Наука, 1993. – С. 50–75.
9. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – Москва : Металлургия, 1974. – 400 с.
10. Могутнов Б. М. Термодинамика сплавов железа / Б. М. Могутнов, И. А. Томилин, Л. А. Шварцман. – Москва : Металлургия, 1984. – 208 с.
11. Структура и физико-механические свойства сталей / М. Н. Михеев [и др.]. – Предпринт. – Свердловск : Ин-т физики металлов УНЦ АН СССР, 1981. – 31 с.
12. Бида Г. В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 2005. – С. 79–84.
13. Курдюмов В. Г. Превращения в железе и стали / В. Г. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин.– Москва : Наука, 1977. – 238 с.