УДК 620.179.142

Шерматов Д.Н.,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологические машины и оборудование»
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Россия, г. Уфа
Царев Н.Ю.,
студент-магистрант,
2 курс, факультет «Институт нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий»
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Россия, г. Уфа

ОЦЕНКА ЗОН КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА ПОСЛЕ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ЧИСТЫЙ ИЗГИБ СТАЛИ 09Г2С

Аннотация: *В статье рассматривается экспериментальная оценка распределения параметров остаточного магнитного поля по поверхности образца из стали 09Г2С после циклического нагружения на чистый изгиб и определены информативные признаки зоны концентрации напряжений и зоны разрушения по данным метода магнитной памяти металла (МПМ). Была заложена экспериментальная основа для последующей интеграции магнитных признаков в цифровой двойник элемента/соединения оболочковой конструкции и для назначения зон приоритетного контроля.*

Ключевые слова: *сталь 09Г2С, усталостные испытания, метод неразрушающего контроля, магнитная память металла, вектор напряженности постоянного магнитного поля.*

Annotation: *The article discusses the experimental assessment of the residual magnetic field parameters distribution over the surface of a 09G2S steel sample after cyclic loading by pure bending and identifies informative features of the stress concentration zone and the zone of destruction according to the data of the magnetic memory of metal (MPM) method. An experimental basis was laid for the subsequent integration of magnetic features into the digital twin of the shell structure element/connection and for the assignment of priority control zones.*

Key words: *09G2S steel, fatigue tests, non-destructive testing method, metal magnetic memory, and constant magnetic field intensity vector.*

Надежность сварных и цельных оболочковых конструкций во многом определяется локализацией зон повышенных напряжений и ранним выявлением очагов накопления повреждений. В последние годы активно развивается подход, в котором измеряемые параметры физических полей и результаты неразрушающего контроля включаются в контур построения цифровых двойников конструкций.

Для оболочковых конструкций предложены алгоритмы формирования цифровых двойников сварных соединений на основе пространственно распределённых физических параметров и их сопоставления с расчетной моделью напряженно-деформированного состояния [5]. Показано также, что формирование сварного соединения приводит к характерной перестройке распределения магнитных характеристик оболочки [6], а распределение физико-механических свойств в зоне сварного соединения носит выраженно неоднородный характер, что необходимо учитывать при расчетах и диагностике [10].

Схожая логика «структурные изменения – физические поля – критерии работоспособности» применима и к высокотемпературному трубному оборудованию: информативность демонстрируют как акустические параметры (скорость ультразвуковых волн) [7], так и электрические отклики

материала [8]. Вопросы деградации и формирования структуры поверхностного слоя змеевиков реакционных печей, а также комплекс экспериментальных данных по материалам змеевиков обобщены в диссертационной работе Д.Н. Шерматова [11]. Применение силицирования рассматривается как эффективная мера повышения стойкости трубной стали в условиях эксплуатации реакционных печей [9].

Цель работы — экспериментально оценить распределение параметров остаточного магнитного поля по поверхности образца из стали 09Г2С после циклического нагружения на чистый изгиб и определить информативные признаки зоны концентрации напряжений и зоны разрушения по данным метода магнитной памяти металла (МПМ). Задачи: (1) провести циклические испытания до разрушения по стандартизованной методике; (2) выполнить измерения тангенциальной и нормальной составляющих поля в контрольных точках; (3) проанализировать распределение экстремумов и сопоставить его с фактической зоной разрушения.

1. Метод магнитной памяти металла

Метод магнитной памяти металла относится к пассивным магнитным методам неразрушающего контроля и основан на регистрации распределения собственного (остаточного) магнитного поля рассеяния на поверхности изделия. Формирование магнитных аномалий связывают с неравномерностью напряженно-деформированного состояния и развитием пластической деформации, сопровождаемых локальной перестройкой доменной структуры материала. [1–3].

В рамках МПМ выделяют зоны концентрации напряжений (ЗКН) — области, в которых совокупность конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов приводит к локальному росту напряжений и ускоренному накоплению повреждений. На практике ЗКН рассматривают как приоритетные участки для мониторинга, сопоставления с расчетной моделью и назначения углубленных видов контроля. [1–3].

В качестве одного из геометрических признаков магнитной аномалии часто используют расстояние между точками смены знака нормальной составляющей магнитного поля (градиентные зоны) и/или положение экстремумов компонент поля вдоль траектории сканирования. Конкретные критерии выделения ЗКН зависят от геометрии объекта, направления нагружения и принятой схемы измерений. [1–3].

Контроль методом МПМ выполняется без искусственного намагничивания и, как правило, без предварительной зачистки поверхности до металлического блеска, что повышает технологичность экспресс-обследований. При этом корректность сопоставления измерений по стадиям нагружения требует фиксации одинаковой траектории сканирования, ориентации датчика и условий измерения. [2, 3].

2. Объект исследования

Образец (рис. 1) изготовлен из низколегированной конструкционной стали 09Г2С, широко применяемой в трубопроводных и резервуарных конструкциях. Геометрия образца соответствует схеме испытаний на чистый изгиб и обеспечивает формирование максимальных изгибных напряжений в рабочей зоне.

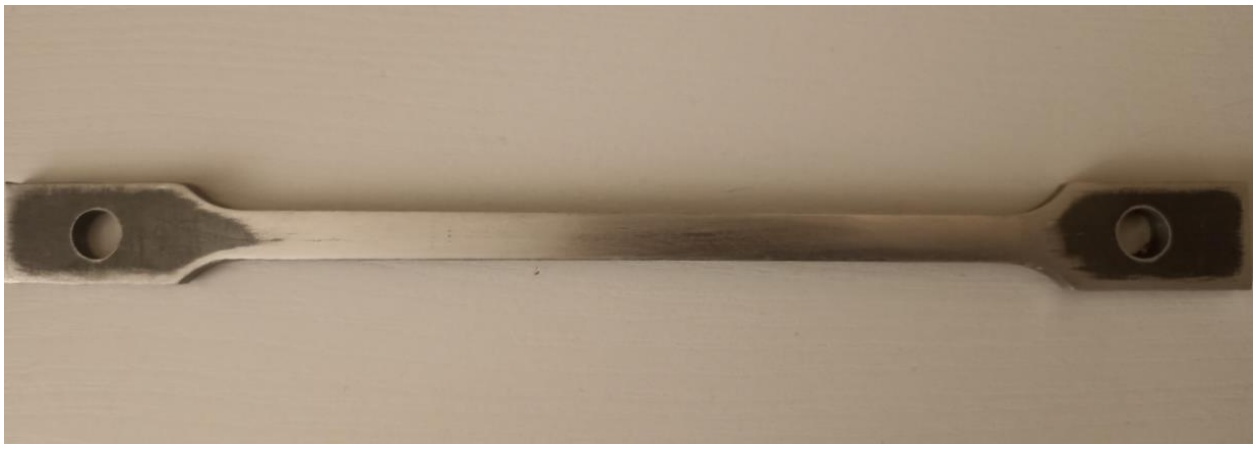

Рисунок 1. Объект исследования

3. Методика эксперимента

Испытания проводились на установке усталостных испытаний на чистый симметричный изгиб с частотой 10 циклов в минуту в соответствии с ГОСТ 25.502–79 [4]. Критерием завершения испытаний являлось разрушение образца.

После завершения испытаний выполнялись:

– разметка контрольных точек на рабочей поверхности образца в зоне изгиба;

– регистрация тангенциальной (H1) и нормальной (H2) составляющих вектора напряженности постоянного магнитного поля в каждой точке;

– анализ распределения H1 и H2, выявление экстремумов и сопоставление с зоной разрушения.

4. Оборудование и приборы

Для проведения эксперимента использовалось следующее оборудование:

Установка усталостных испытаний на чистый симметричный изгиб – для циклического нагружения образца (рис. 2);

Рисунок 2. Установка усталостных испытаний

Измеритель концентрации напряжений (ИКН-2М-8) – для регистрации тангенциальной (Н1) и нормальной (Н2) составляющих вектора напряженности постоянного магнитного поля на поверхности образца (рис. 3). [2, 3].

Рисунок 3. Аппарат ИКН-2М-8

5. Методика измерения магнитных параметров

Измерения выполнялись измерителем концентрации напряжений ИКН-2М-8, предназначенным для регистрации распределения поля остаточной намагниченности (поля рассеяния) в рамках метода МПМ. [2, 3].

Перед измерениями фиксировали ориентацию датчика относительно продольной оси образца и траекторию контроля. В каждой контрольной точке регистрировали тангенциальную (Н1) и нормальную (Н2)

составляющие напряженности поля (А/м). Сопоставимость результатов обеспечивали постоянством схемы измерений и последовательности обхода точек.

Функциональные возможности приборов типа ИКН включают многоканальную регистрацию, применение специализированных сканирующих устройств, автоматизированную обработку и хранение результатов измерений. [2, 3].

6 Результаты и обсуждение

После разрушения образца на рабочей поверхности была выполнена разметка 15 контрольных точек с шагом 10 мм. Фактическая зона разрушения соответствует области точки №7 (рис. 4).

Рисунок 4. Образец после разрушения и схема расположения контрольных точек

Далее выполнены измерения тангенциальной (H1) и нормальной (H2) составляющих вектора напряженности постоянного магнитного поля в каждой точке. Результаты представлены в таблице 1 и на рисунке 5.

Таблица 1.

Значения составляющих вектора напряженности постоянного магнитного поля

Номер точки	Составляющие вектора напряженности постоянного магнитного поля, А/м	
	Тангенциальная	Нормальная
1	311,00	373,00
2	305,00	135,00
3	288,00	-11,00
4	259,00	159,00
5	267,00	276,00
6	113,00	607,00
7	801,00	1588,00
8	136,00	923,00
9	220,00	563,00
10	265,00	-230,00
11	279,00	-180,00
12	282,00	-30,00
13	283,00	126,00
14	293,00	267,00
15	297,00	418,00

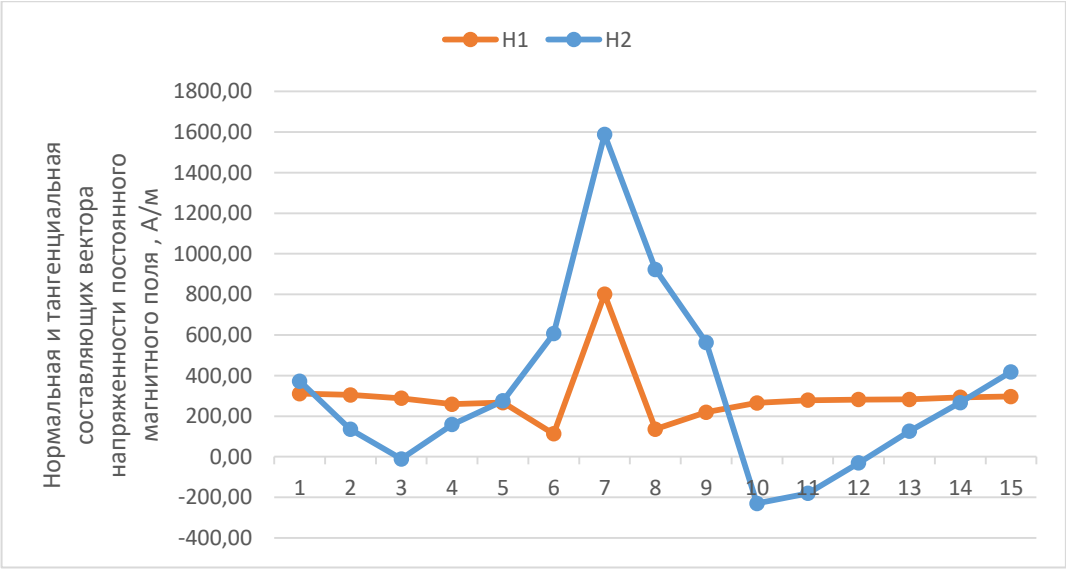

Рисунок 5. Распределение тангенциальной (H1) и нормальной (H2) составляющих вектора напряженности постоянного магнитного поля по контрольным точкам

Анализ табличных данных показывает, что максимальные значения компонент поля зарегистрированы в окрестности зоны разрушения (точки 6–9). Наиболее выраженный экстремум соответствует точке №7: H1 = 801 А/м и H2 = 1588 А/м, что приводит к максимальному модулю результирующего вектора Hr ≈ $1{,}78\times10^3$ А/м. Для остальных участков образца Hr существенно ниже (как правило, менее $0{,}6\times10^3$ А/м), что указывает на локализованный характер магнитной аномалии и её привязку к очагу разрушения. Полученный результат согласуется с представлениями МПМ о формировании магнитных аномалий в областях интенсивной пластической деформации и концентрации напряжений. [1–3].

Заключение

– Метод магнитной памяти металла применён для послересурсной диагностики образца из стали 09Г2С после усталостного нагружения на чистый изгиб. [1–4].

– В зоне разрушения (точка №7) зафиксирован выраженный экстремум компонент остаточного магнитного поля (H1 = 801 А/м; H2 = 1588 А/м), а также максимальный модуль результирующего вектора поля. [1–4].

– Повышенные значения магнитных параметров в окрестности точек 6–9 указывают на локализованную область концентрации напряжений и накопления повреждений, что подтверждает диагностическую чувствительность МПМ к очагам разрушения при изгибе. [1–4].

– Полученные данные целесообразно использовать как экспериментальную основу для последующей интеграции магнитных признаков в цифровой двойник элемента/соединения оболочковой конструкции и для назначения зон приоритетного контроля. [5, 6, 10].

Перспективы работы связаны с расширением экспериментальной программы (измерения на промежуточных стадиях циклирования, оценка повторяемости, учет влияния геометрии и направления датчика) и с сопоставлением магнитных аномалий с микроструктурными и энергетическими показателями материала.

Список использованных источников:

1. Дубов А.А. Метод магнитной памяти металла. История возникновения и развития. М.: ФГУП Издательство «Известия», 2011. 256 с.

2. Дубов А.А., Дубов Ал.А., Колокольников С.М. Метод магнитной памяти металла: учебное пособие. М.: Издательский дом «Спектр», 2012. 395 с.

3. Дубов А.А. Назначение и практические возможности метода магнитной памяти металла: учебное пособие. М.: Издательский дом «Спектр», 2012. 395 с.

4. ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы

испытаний на усталость. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200009538 (дата обращения: 24.12.2025).

5. Гафарова В.А., Шерматов Д.Н., Баязитов М.И., Арсланов А.Л. Разработка алгоритма создания цифрового двойника сварного соединения оболочковой конструкции (часть 1) // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21. № 5. С. 198–211. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-5-198-211.

6. Гафарова В.А., Шерматов Д.Н., Баязитов М.И., Арсланов А.Л. Изменение распределения магнитных характеристик в стальной оболочковой конструкции в результате формирования сварного соединения (часть 2) // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21. № 6. С. 252–263. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-6-252-263.

7. Шерматов Д.Н., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р., Рубцов А.В. Изменение скорости распространения ультразвуковых волн в материале змеевика реакционной печи в процессе эксплуатации // Нефтегазовое дело. 2019. Т. 17. № 5. С. 81–88. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-81-88.

8. Naumkin E.A., Shermatov J.N. Regularities of Changes in the Mechanical Characteristics and Electrical Properties of the Reaction Furnaces Coils Material during Operation // Materials Science Forum. 2020. Vol. 992. P. 706–711. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.706.

9. Rubtsov A.V., Shermatov D.N., Seitzhaparov B.S., Strokina U.Yu., Konkova D.L. Features of Siliconizing of Pipe Steel X12CrNi25-20 with Various Term of Operation in the Conditions of the Reactionary Furnace // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2373. 032001. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/3/032001.

10. Гафарова В.А., Шерматов Д.Н., Кузеев И.Р., Арсланов А.Л. Характер распределения физико-механических свойств стали в сварной оболочковой конструкции. Часть 1 // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2024. Т. 14. № 4. С. 356–366. DOI: 10.28999/2541-9595-2024-14-4-356-366.

11. Шерматов Д.Н. Формирование структуры поверхностного слоя труб из высоколегированных хромоникелевых сталей в процессе эксплуатации змеевиков реакционных печей: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2021.