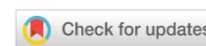


# ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 620.1:620.179.16

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-47-60>

## Локальный градиентный индикатор магнитной изменчивости при циклическом нагружении сталей

 Д.Н. Шерматов , А.О. Борисов , В.А. Гафарова ✉, И.Р. Кузеев 

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

✉ [gafarova.vika@bk.ru](mailto:gafarova.vika@bk.ru)

EDN: BZBQLB

### Аннотация

**Введение.** Усталостное разрушение является одной из основных причин выхода из строя металлоконструкций, работающих под воздействием переменных нагрузок. На ранних стадиях такие повреждения не сопровождаются видимыми трещинами, однако приводят к накоплению микродефектов и перераспределению внутренних напряжений. Проследить за развитием таких дефектов в конструкциях с большой протяженностью и необходимостью контроля большой площади поверхности в настоящее время не представляется возможным. Для своевременного выявления этих процессов необходимы высокочувствительные методы контроля, которые способны на ранних стадиях функционирования конструкции определить с высокой долей вероятности возможное место разрушения. Такие методы не развиты, и представленные исследования в определенной степени могут решить эту проблему. Одним из перспективных направлений является регистрация изменений напряжённости постоянного магнитного поля, отражающих эволюцию состояния материала. Цель настоящей работы — исследовать возможности пространственного анализа магнитного отклика для локализации зон нестабильности в процессе усталостного нагружения, в которых высока вероятность разрушения, и одновременно проанализировать изменения структуры стали.

**Материалы и методы.** Объектом исследования являлись образцы из стали 09Г2С, подвергнутые нагружению до разрушения на сервогидравлической испытательной машине INSTRON-8801. Магнитные измерения проводились в 12 точках вдоль образца с использованием прибора ИКН-2М-8. Фиксировались изменения результирующей напряжённости постоянного магнитного поля на различных стадиях усталостного нагружения. Все измерения повторялись не менее трёх раз для повышения достоверности результатов.

**Результаты исследования.** Установлено, что на стадии относительной наработки  $N_i/N_p = 0,4–0,5$  в отдельных точках регистрировались аномальные изменения напряжённости магнитного поля, соответствующие зоне зарождения очага разрушения. Кроме того, зафиксирован характерный участок стабилизации сигнала в диапазоне  $N_i/N_p = 0,8–0,9$ , что может быть связано с временной релаксацией напряжений перед разрушением. Полученные данные демонстрируют локальную вариативность магнитного отклика и подтверждают чувствительность метода к ранним стадиям деградации материала.

**Обсуждение.** Проведённое исследование показало, что пространственный анализ изменения напряжённости постоянного магнитного поля может быть использован для локализации очагов разрушения в ферромагнитных сталях. Представляется возможным полученный массив данных положить в основу обучающих выборок для интеллектуальных систем мониторинга, включая нейросетевые алгоритмы, ориентированные на прогнозирование остаточного ресурса и автоматическую оценку технического состояния конструкций. Особенно это важно для сварных конструкций с большой протяженностью сварных швов.

**Заключение.** Введение в систему энергии неизбежно приводит к реорганизации структуры конструкционного материала с целью приспособления к внешнему воздействию. Реорганизация сопровождается изменением собственного магнитного поля материала. Фиксация таких изменений позволяет интерпретировать результаты измерений с позиции возможного разрушения, поскольку наиболее эффективным способом реализации поступившей в систему энергии является образование новой поверхности, то есть образование трещины.

**Ключевые слова:** магнитный контроль, усталостные повреждения, локализация очага разрушения, ферромагнитные материалы, распределение магнитной напряжённости, приповерхностный слой, остаточные напряжения, доменная структура, деградация материала, мультифракталы

**Благодарности.** Авторы благодарят редакцию журнала за оперативную подготовку статьи к публикации и за ценные замечания, устранение которых позволило улучшить её содержание.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта проекта Российского научного фонда по соглашению № 25–29–00200 от 28.12.2024 «Прогнозирование уровня деградации свойств сварных соединений с помощью искусственного интеллекта для выявления и предотвращения аварийных ситуаций».

**Для цитирования.** Шерматов Д.Н., Борисов А.О., Гафарова В.А., Кузеев И.Р. Локальный градиентный индикатор магнитной изменчивости при циклическом нагружении сталей. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2026;10(1):47–60. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-47-60>

*Original Empirical Research*

## Local Gradient Indicator of Magnetic Variability under Cyclic Loading of Steels

Dzhamshed N. Shermatov , Alexander O. Borisov , Victoria A. Gafarova ✉, Iskander R. Kuzeev 

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

✉ [gafarova.vika@bk.ru](mailto:gafarova.vika@bk.ru)

### Abstract

**Introduction.** Fatigue failure is one of the main causes of failure of metal structures subjected to variable loads. Initially, this damage is not visible as cracks, but it leads to the accumulation of microdefects and the redistribution of internal stresses. Currently, it is not possible to monitor the progression of these defects in large structures with a significant surface area. To detect such processes in a timely manner, highly sensitive inspection methods are required that can identify potential areas of failure with a high degree of accuracy during the early stages of structural operation. Such methods do not currently exist, and our research aims to solve this problem to a certain extent. One promising approach is the monitoring of changes in the strength of a permanent magnetic field, which reflects the evolution of material state. The current study aims to investigate the potential of spatial analysis of magnetic response to identify instability zones during fatigue loading, where the likelihood of failure is high, as well as to analyze changes in steel structure.

**Materials and Methods.** The study focused on samples made of 09G2S steel, subjected to loading to fracture on a servohydraulic testing machine INSTRON-8801. Magnetic measurements were taken at 12 points along the sample using an IKN-2M-8 instrument. Changes in the resulting strength of the permanent magnetic field were recorded at different stages of fatigue loading. All measurements were repeated at least three times to ensure the reliability of the results.

**Results.** It has been found, that at the stage of relative operating time  $N_i/N_p = 0.4–0.5$ , anomalous changes in the magnetic field strength corresponding to the fracture nucleus were recorded at certain points. Additionally, a characteristic area of signal stabilization was observed in the range  $N_i/N_p = 0.8–0.9$ . This could be explained by the temporary relaxation of stresses prior to destruction. The obtained data demonstrate the local variability of the magnetic response and confirm the sensitivity of this method to the early stages of material degradation.

**Discussion.** The conducted research has shown that spatial analysis of changes in the strength of a permanent magnetic field can be used to locate fracture nuclei in ferromagnetic steels. This dataset can be used as a basis for training samples for intelligent monitoring systems, including neural network algorithms that focus on predicting the remaining life and automatically assessing the technical condition of structures. This is particularly important for welded structures with a high number of welds.

**Conclusion.** The introduction of energy into a system inevitably leads to a reorganization of the structure of the material in order to adapt to external forces. This reorganization is accompanied by a change in the material's magnetic field. By recording these changes, it is possible to interpret the measurement results in terms of possible destruction, as the most efficient way for the system to utilize the supplied energy is through the formation of new surfaces, or cracks.

**Keywords:** magnetic test, fatigue damage, localization of fracture nucleus, ferromagnetic materials, distribution of magnetic tension, near-surface layer, residual stresses, domain structure, degradation of the material, multifractals

**Acknowledgements.** The authors would like to thank the Editorial board of the journal for their prompt review of the article and valuable comments that helped the authors to improve its quality.

**Funding Information.** The research was done with the financial support of a grant from the Russian Science Foundation project under Agreement No. 25–29–00200 dated December 28, 2024, titled “Forecasting the degradation level of properties of welded joints using artificial intelligence to identify and prevent emergencies”.

**For Citation.** Shermatov DN, Borisov AO, Gafarova VA, Kuzeev IR. Local Gradient Indicator of Magnetic Variability under Cyclic Loading of Steels. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(1):47–60. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-47-60>

**Введение.** Актуальность задачи надёжной оценки остаточного ресурса металлоконструкций определяется необходимостью одновременно обеспечить высокий уровень промышленной безопасности и оптимизировать эксплуатационные расходы. Особенно остро эта проблема стоит для протяжённых сварных оболочек, резервуаров и трубопроводов, где необходимо контролировать большую площадь поверхности и значительные объёмы металла в условиях ограниченного доступа и сложных нагрузочных режимов.

Традиционные методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, радиографический, акустико-эмиссионный и др.) эффективно выявляют сформировавшиеся дефекты типа макротрещин и несплошностей, однако имеют ряд ограничений при ранней диагностике усталостного повреждения. Они, как правило, требуют тщательной подготовки поверхности и значительных трудозатрат, плохо приспособлены к экспресс-картированию протяжённых сварных швов и зачастую дают интегральную оценку состояния без возможности локализовать зоны начальной деградации и градиенты остаточных напряжений. Поэтому значительная часть ресурса конструкции расходуется вслепую, а потенциально опасные зоны могут оставаться незамеченными до стадии развития макротрещин.

На этом фоне возрастает интерес к методам, основанным на регистрации собственных физических полей материала, которые чувствительны к эволюции внутреннего состояния без непосредственного введения энергии в контролируемый объём. Одним из наиболее перспективных является анализ распределения напряжённости постоянного (остаточного) магнитного поля, формируемого в ферромагнитных сталях при накоплении повреждений и перераспределении остаточных напряжений. Магнитные методы обладают рядом важных преимуществ: возможность дистанционных измерений, высокая скорость обследования больших площадей и чувствительность к ранним стадиям перераспределения напряжений и дефектов, когда ещё отсутствуют макротрещины [1].

Надёжная диагностика остаточного ресурса металлоконструкций в этой постановке опирается на детальный анализ микроскопических изменений, происходящих в структуре материала в процессе накопления усталостных повреждений. Одними из наиболее чувствительных и информативных носителей таких сведений выступают собственные магнитные поля материала, формирующиеся в результате перераспределения доменной структуры. Изменения доменной конфигурации интегрально отражают сочетание микроструктурных превращений и эволюции остаточных напряжений, а значит, могут служить основой для построения высокочувствительных диагностических критериев.

В ферромагнитных материалах наблюдаются значимые различия магнитной доменной структуры вблизи поверхности и в объёме. В частности, экспериментальные исследования показали, что у поверхности доменные стенки могут быть существенно шире, чем внутри материала. Это приводит к снижению плотности магнитной энергии в стенке и, как следствие, влияет на подвижность доменных границ и их чувствительность к локальным механическим напряжениям и дефектам [2]. Таким образом, можно заключить, что поверхностные слои обладают особыми магнитными характеристиками, отличными от объёмных, что необходимо учитывать при анализе магнитной текстуры материала.

Прямая визуализация внутренних доменных структур в объёме твёрдых материалов остаётся крайне затруднённой из-за ограниченного пространственного разрешения большинства магнитных микроскопических методов. Такие методы, как магнитооптическая визуализация или магнитная силовая микроскопия, эффективно фиксируют магнитную морфологию лишь на поверхности образца. Для исследования трёхмерной магнитной структуры применяются косвенные подходы. Классические микромагнитные модели и многомасштабные численные схемы позволяют прогнозировать конфигурации доменов и их динамику, учитывая как локальные магнитные поля, так и кристаллографические особенности материала. Внедрение, например, дислокационных напряжений в микромагнитную симуляцию демонстрирует, как дислокации могут служить центрами закрепления доменных границ и влиять на эффект Баркгаузена [2].

Отдельно стоит отметить новейшие методы реконструкции магнитной структуры на основе машинного обучения. В работе [3] представлена модель на основе свёрточной нейронной сети (MagNet), которая повышает точность восстановления трёхмерной конфигурации намагниченности по данным томографии. Данный подход преодолевает ограничения классических алгоритмов векторной томографии, устраняя артефакты неполных данных и существенно улучшая качество реконструированного магнитного поля.

Аналогичный принцип применён в исследовании [4], где нейросетевая модель обучается преобразовывать изображения внешнего магнитного поля (например, карты поля утечки) в распределение вектора намагниченности внутри материала. Это позволяет восстанавливать сложные доменные текстуры с переменным направлением намагничивания, недоступные для традиционных методов инверсии [4]. Подобные нейросетевые подходы расширяют возможности интерпретации экспериментальных данных и приближают исследователей к прямой реконструкции внутренней магнитной текстуры по косвенным измерениям.

Микроструктура материала, включая распределение намагниченности, эволюционирует при накоплении пластической деформации в условиях циклического нагружения. Хотя современные измерительные методы не позволяют напрямую отслеживать перестройку отдельных доменов внутри объёма, совокупный магнитный отклик (например, петля гистерезиса) чувствителен к таким микроструктурным изменениям. Перестройка и перераспределение доменных границ на микроуровне проявляются в измеряемых вариациях магнитной проницаемости, коэрцитивной силы и других параметрах материала. Таким образом, анализ динамики магнитных характеристик под нагрузкой позволяет судить об изменениях внутренней структуры. Учет этих эффектов даёт возможность перейти от интегральной оценки состояния материала к локализованному анализу, нацеленному на раннее выявление зон, предрасположенных к развитию повреждений.

Внутреннее (объёмное) поведение материала при усталостной деформации существенно отличается от процессов, происходящих вблизи поверхности. В толще материала пластическая деформация распределяется более равномерно и градиенты остаточных напряжений значительно ниже, чем у поверхности [5]. В поликристаллическом объёме дислокации генерируются и накапливаются группами, вызывая значительные локальные напряжения, снятие которых затруднено из-за отсутствия свободной поверхности. Границы зёрен выполняют роль внутренней «поверхности», однако для выхода дислокаций через эти границы требуется преодоление энергетического барьера [6]. Лишь по достижении критического уровня накопленных напряжений и энергии дефектов [7] возможно зарождение микротрещин внутри материала. Эти особенности согласуются с концепцией Мира о релаксации внутренних напряжённых полей [8], а также с экспериментальными данными о неравномерном распределении остаточных напряжений (анизотропии напряжений) в сталях [9].

В отличие от объёма, свободная поверхность материала служит эффективным стоком для дислокаций, требуя гораздо меньше энергии для выхода дефектов. Этот факт объясняет, почему усталостные трещины чаще инициируются именно на поверхности. Следовательно, изменения, происходящие в приповерхностном слое в процессе нагружения, могут быть использованы как информативные диагностические признаки развивающейся деградации.

Одним из таких признаков является формирование на поверхности самоподобных (фрактальных) структур по мере развития повреждений. Как отметил Б. Мандельброт, подобные образования обладают свойством самоподобия на разных масштабных уровнях [10]. Действительно, морфология повреждённой поверхности металлов нередко описывается фрактальными характеристиками, которые можно количественно оценивать [11]. Анализ геометрии элементов рельефа на различных масштабах позволяет установить связь между поверхностными проявлениями усталости и протекающими в объёме процессами разрушения [12].

Неоднородность и шероховатость поверхности способны влиять и на магнитные свойства приповерхностного слоя. Согласно исследованиям, изменения фрактальной структуры деформированного материала коррелируют с его магнитными параметрами, такими как насыщенная намагниченность и магнитная проницаемость [11]. Иными словами, трансформация распределения физических свойств по мере роста повреждений может проявлять мультифрактальные черты. Отслеживание эволюции нескольких таких мультифрактальных параметров расширяет возможности диагностической интерпретации, позволяя более надёжно идентифицировать ранние стадии деградации материала.

Таким образом, анализ литературы подтверждает необходимость комплексного подхода к диагностике повреждений в ферромагнитных конструкционных материалах. Магнитные доменные структуры у поверхности и в объёме реагируют по-разному на присутствие дефектов и механических напряжений. Совмещение классических микромагнитных моделей с современными нейросетевыми методами реконструкции [3, 4] позволяет глубже анализировать внутренние изменения магнитной текстуры, недоступные прямому наблюдению. Одновременно учёт особенностей накопления повреждений (дислокационной структуры и остаточных напряжений) в объёме [5–9] и связанных с ними фрактальных признаков на поверхности [10–12] обеспечивает более полный контроль состояния материала. Синтез магнитных и фрактальных критериев деградации, подтверждённых литературными данными, открывает путь к созданию высокочувствительных методов неразрушающего контроля для раннего обнаружения зарождающихся дефектов.

Магнитные методы диагностики по распределению напряженности постоянного магнитного поля применяются для выявления зон концентрации напряжений и участков локальной деградации в ферромагнитных сталях. Их основа — чувствительность магнитного отклика к перераспределению остаточных напряжений и к дефектам, формирующим локальные неоднородности поля. Вместе с тем известные подходы часто используют интегральные показатели или одномерные профили вдоль выбранной линии и не обеспечивают строгой привязки пространственных аномалий поля к (i) стадии усталостного нагружения и (i) параметрам микроструктуры по толщине материала.

Однако до настоящего времени недостаточно исследовано, как локальные аномалии распределения результирующей напряжённости постоянного магнитного поля на поверхности конструкционных сталей количественно согласуются с изменением микроструктуры и с её мультифрактальными параметрами в приповерхностном слое и в объёме при циклическом нагружении. Отсутствие такой связи ограничивает формирование устойчивого диагностического признакового пространства для ранней локализации очага разрушения.

В этой связи целью настоящей работы является экспериментальное обоснование диагностического подхода, при котором пространственно-локализованные измерения результирующей напряжённости остаточного магнитного поля при циклическом изгибе стали 09Г2С сопоставляются с мультифрактальными параметрами микроструктуры, рассчитанными по микрофотографиям в характерных зонах по толщине.

**Материалы и методы.** Для исследования взяты образцы из низколегированной конструкционной стали 09Г2С, подвергавшиеся циклическому нагружению с целью моделирования условий эксплуатации элементов, работающих под переменными механическими воздействиями (например, резервуары, трубопроводы, несущие элементы металлоконструкций) (рис. 1). Для измерения напряженности постоянного магнитного поля был использован прибор ИКН-2М-8 (измеритель концентрации напряжений).

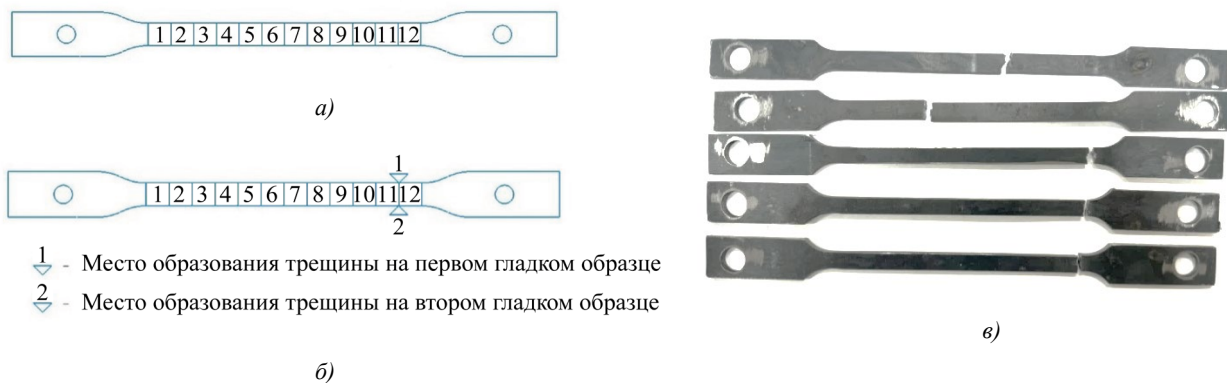


Рис. 1. Образцы для проведения испытаний: а — в исходном состоянии; б — места разрушения образцов; в — испытанные образцы

Магнитные измерения проводились в 12 точках с шагом 10 мм. На каждом уровне нагружения испытательная машина останавливалась и измерения выполнялись по согласованной схеме в фиксированных контрольных точках, что обеспечивало корректное сопоставление данных между циклами. Для оценки воспроизводимости и статистической надёжности результаты измерений регистрировались на пяти идентичных образцах, подвергнутых одинаковому режиму циклического нагружения. Это позволило подтвердить стабильность магнитного отклика и уменьшить влияние случайных факторов, связанных с локальной микроструктурной неоднородностью. Для повышения достоверности анализа все измерения повторялись не менее трёх раз в каждой точке.

После завершения циклических испытаний и фиксации разрушения из исследованных образцов были вырезаны участки для анализа микроструктурных изменений.

Фрактальный анализ микроструктуры использовался для установления взаимосвязи между структурной неоднородностью металла и локальными магнитными аномалиями, зафиксированными при измерении результирующей напряжённости постоянного магнитного поля  $H_r$ . Исследование микроструктуры проводилось на микрофотографиях, полученных в поперечном сечении разрушенного образца в трёх характерных зонах:

- в зоне, примыкающей к наружной поверхности;
- в центральной (объёмной) части;
- в зоне, примыкающей к очагу разрушения.

Дополнительно для сравнительного анализа использовались микроструктуры исходного состояния металла, полученные до циклического нагружения.

Микрофотографии каждой изучаемой зоны были получены при увеличении  $\times 200$ ,  $\times 500$  и  $\times 1000$ , что обеспечивало анализ структуры на различных масштабных уровнях. Обработку изображений проводили в программе *MFRDrom Fast*, разработанной профессором Г.В. Встовским [13, 14], в режиме Normalized By  $D_1$ , с типом анализа Pseudo.

Для каждой зоны рассчитывались параметры, характеризующие фрактальную размерность, скрытую периодичность и степень однородности микроструктуры [13]. Их сопоставление между зонами по толщине образца и на различных масштабах позволило оценить пространственно-масштабную изменчивость структурной организации материала. Такой подход обеспечил возможность сопоставления градиента микроструктурной сложности с распределением магнитного отклика  $H_r$ , фиксируемого на соответствующих участках поверхности образца.

**Результаты исследования.** Получены результаты измерений результирующей напряжённости постоянного магнитного поля  $H_r$  на поверхности образцов при циклическом нагружении, а также результаты расчёта показателя локального изменения магнитной характеристики  $G_i$ . Уровень накопленных повреждений задавался относительной наработкой  $Ni/Np$ , где  $Ni$  — текущее число циклов,  $Np$  — число циклов до разрушения. Измерения выполнены на пяти образцах ( $n = 5$ ), в каждой измерительной точке на каждом уровне  $Ni/Np$  проводилось три повтора ( $m = 3$ ). Для каждой комбинации «точка — уровень  $Ni/Np$ » рассчитывались среднее значение и стандартное отклонение, на рис. 2, 3 представлены средние значения с планками погрешности. Паспортная погрешность измерительного прибора не превышала 10 %.

Зависимости  $H_r$  от  $Ni/Np$  для точек 1, 11 и 12 показаны на рис. 2. Во всём диапазоне  $Ni/Np$  значения  $H_r$  в точке 1 сохраняются на существенно более низком уровне, по сравнению с точками 11 и 12. В интервале  $Ni/Np = 0,4-0,5$  фиксируется расхождение поведения  $H_r$  в точках 11 и 12: в точке 11 наблюдается снижение  $H_r$  относительно соседних уровней, тогда как в точке 12 — повышение  $H_r$  с формированием локального максимума. Различия между точками 11 и 12 в указанном интервале превышают величину разброса ( $\pm SD$ ) и воспроизводятся по серии измерений ( $n = 5$ ).

Для количественной оценки изменчивости магнитного отклика рассчитан показатель локального изменения  $G_i$ , его зависимости от  $Ni/Np$  для точек 1, 11 и 12 приведены на рис. 3. В диапазоне  $Ni/Np = 0,2-0,6$  значения  $G_i$  в точках 11 и 12 существенно превышают значения, полученные в точке 1. Максимальные значения  $G_i$  в точках 11 и 12 наблюдаются при  $Ni/Np$  порядка 0,35–0,5, при дальнейшем росте  $Ni/Np$  фиксируется снижение  $G_i$ . В точке 1 значения  $G_i$  остаются на более низком уровне, без выраженных пиков, сопоставимых с точками 11 и 12. Таким образом, результаты магнитных измерений подтверждают пространственную неоднородность распределения  $H_r$  и локализацию наибольших изменений магнитной характеристики в области точек 11, 12 в интервале  $Ni/Np$  порядка 0,35–0,5 (рис. 2–3).

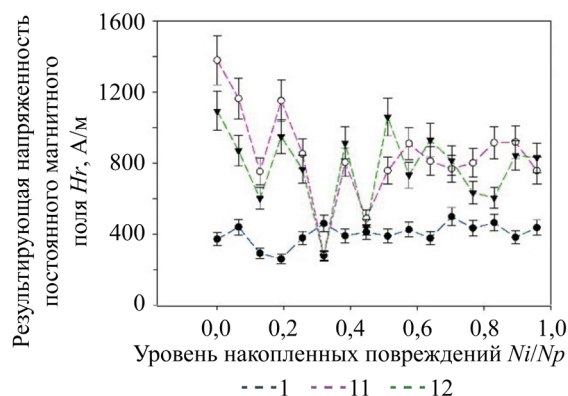


Рис. 2. Зависимость изменения результирующей напряжённости постоянного магнитного поля от уровня накопленных повреждений

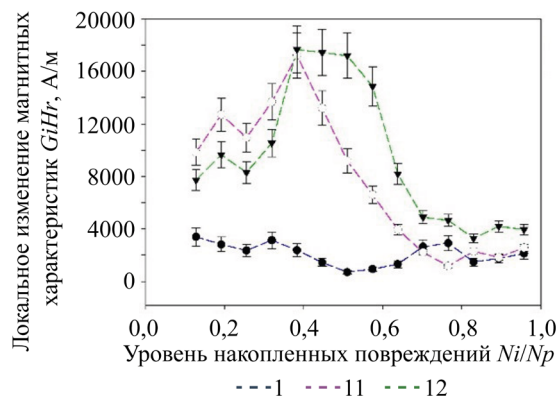


Рис. 3. Зависимость локального изменения результирующей напряжённости постоянного магнитного поля от уровня накопленных повреждений

Максимальные значения  $G_i$  в точках 11 и 12 наблюдаются при  $Ni/Np$  порядка 0,35–0,5, при дальнейшем росте  $Ni/Np$  значения  $G_i$  снижаются, и при  $Ni/Np = 0,75$  фиксируется отчётливое уменьшение показателя (рис. 3). В точке 1 значения  $G_i$  остаются на более низком уровне, без выраженных пиков, сопоставимых с точками 11 и 12.

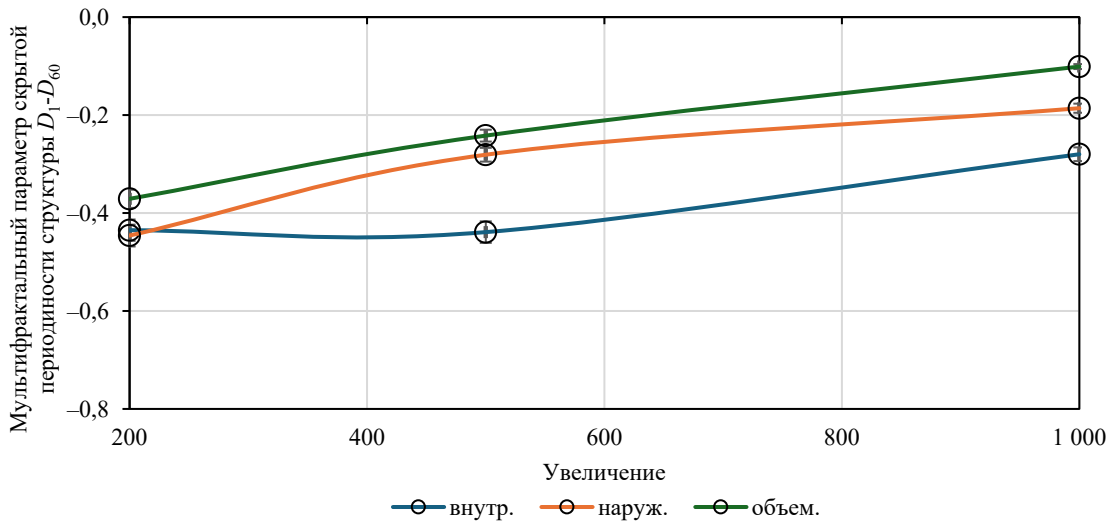
**Обсуждение.** Полученные результаты подтверждают диагностический потенциал пространственно-локализованных измерений результирующей напряжённости постоянного магнитного поля  $H_r$  при циклическом нагружении. Наиболее выраженная магнитная изменчивость наблюдается в интервале  $Ni/Np = 0,4-0,5$ , а максимальные локальные изменения параметров регистрируются в зоне формирования очага разрушения, что согласуется с ранее показанной чувствительностью магнитных характеристик к накоплению повреждений в модельных элементах металлоконструкций [1].

В диапазоне  $Ni/Np = 0,8–0,9$  выявлена фаза относительной стабилизации магнитного отклика (снижение вариативности  $Hr$  и/или производных показателей) с последующим переходом к более неустойчивому режиму. Подобная динамика по типу «затишье → резкое изменение» описана для акустических сигналов как диагностический признак предразрушения [15]. Сопоставимые подходы к мониторингу деградации по физическим параметрам в условиях эксплуатации также демонстрируются при ультразвуковом контроле [16].

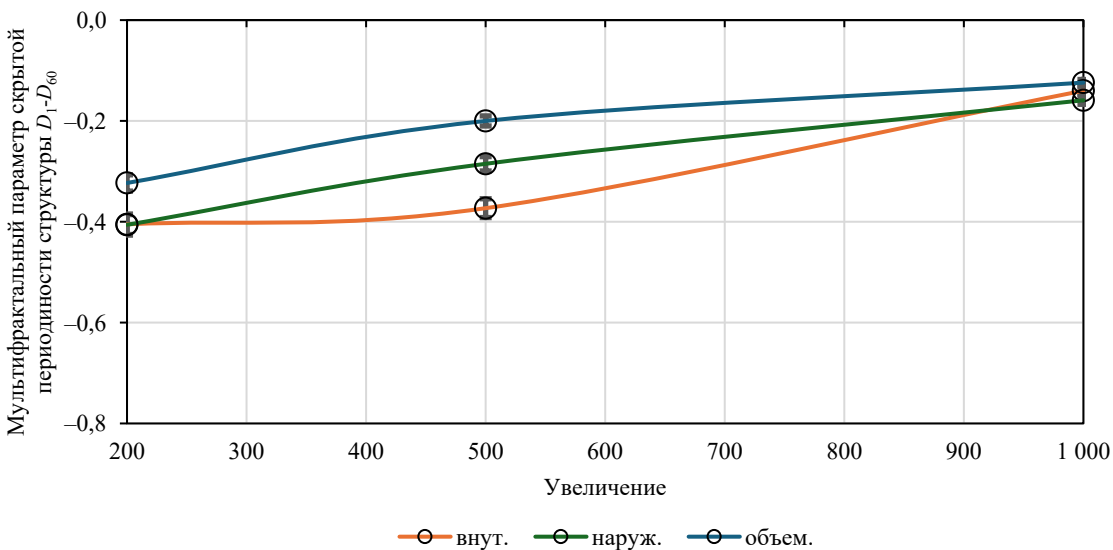
Интерпретация наблюдаемых магнитных эффектов должна учитывать связь магнитного отклика с дефектной структурой и локальным напряжённым состоянием материала. Взаимодействие доменных стенок с дислокациями и дефектами, показанное в микромагнитном моделировании, является одним из механизмов, способных приводить к локальным изменениям магнитных параметров [2]. Дополнительно информативность магнитных методов, чувствительных к микроструктурным неоднородностям на уровне зёрен и границ, подтверждается исследованиями магнитного шума Баркгаузена с высоким пространственным разрешением [17].

Практическая применимость методики для реальных металлоконструкций определяется требованиями к точности и воспроизводимости измерений и устойчивости результата к действию внешних факторов. К критическим условиям относятся воспроизводимое позиционирование датчика (ориентация и зазор «датчик — поверхность»), повторяемая траектория сканирования и контроль магнитного фона. На результаты могут влиять геометрия объекта (кривизна, изменение толщины, близость сварных швов и вырезов), магнитная предыстория (остаточное намагничивание) и посторонние источники магнитного поля. Существенным фактором интерпретации остаются остаточные напряжения как компонент текущего состояния материала, что подчёркивается в обзорных работах по данной тематике [5].

На рис. 4 приводятся результаты изучения изменения мультифрактальных параметров в соответствии с [13, 14].



а)



б)

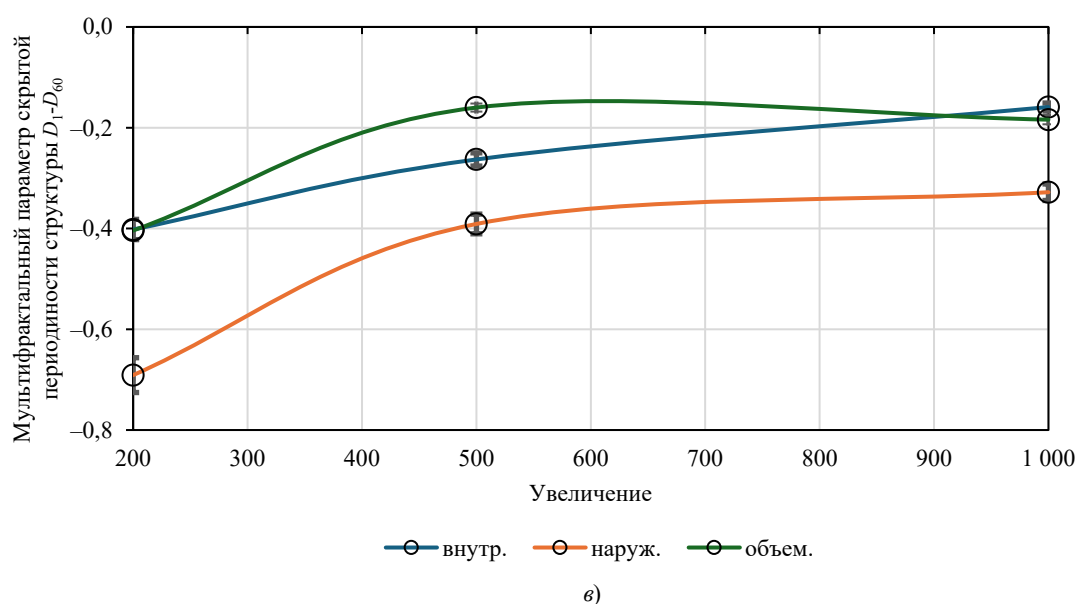


Рис. 4. Изменение мультифрактального параметра скрытой периодичности структуры  $D_1-D_0$  в зависимости от масштаба наблюдения (увеличения микроскопа) для различных зон образца стали 09Г2С: *a* — исходное состояние; *b* — область, отдалённая от зоны разрушения; *в* — зона разрушения

В исходном состоянии (рис. 4 *a*) зависимости параметра  $D_1-D_0$  от увеличения масштаба имеют плавный характер и не демонстрируют резких различий между зонами по толщине образца, что свидетельствует об отсутствии признаков локальной деградации.

В области, отдалённой от зоны разрушения (рис. 4 *b*), зависимости параметра  $D_1-D_0$  сохраняют возрастающий характер, однако различия между зонами по толщине становятся более выраженными. На увеличении  $\times 500$  фиксируется максимальное расхождение кривых, что связано с переходом от зеренной к субзеренной организации структуры, наиболее чувствительной к внутренним напряжениям. Внутренняя зона характеризуется пониженным значением параметра  $D_1-D_0$ , что указывает на частичную потерю структурной упорядоченности.

Объёмная часть, напротив, сохраняет высокую скрытую периодичность, что отражает её относительную стабильность. Таким образом, на данном этапе развития повреждений формируется градиент микроструктурной организации от устойчивой (объём) области к неустойчивой, что согласуется с распределением внутренних напряжений в циклически нагруженном образце.

В зоне разрушения (рис. 4 *в*) наблюдается наиболее резкое изменение характера зависимости  $D_1-D_0 = f(\text{увеличение})$ . Для внутренней поверхности, прилегающей к очагу разрушения, значения параметра становятся минимальными (до  $-0,6 \dots -0,7$ ), что указывает на потерю скрытой периодичности и рост хаотичности распределения структурных элементов.

Сопоставление полученных зависимостей показывает, что по мере перехода от исходного состояния к зоне разрушения происходит устойчивая тенденция к снижению параметра  $D_1-D_0$ , особенно в области, прилегающей к очагу трещины.

Таким образом, мультифрактальный параметр  $D_1-D_0$ , характеризующий скрытую периодичность, может рассматриваться как чувствительный индикатор перехода структуры от стабильного состояния к неустойчивому. Его пространственное распределение коррелирует с зоной магнитных аномалий, выявленных по изменению результирующей напряжённости магнитного поля  $H_r$ , что указывает на общую природу микроструктурных и магнитных признаков деградации в исследуемом материале.

Сопоставление зависимостей мультифрактального параметра скрытой периодичности структуры  $D_1-D_0$  для различных стадий состояния материала (рис. 4) показало, что по мере перехода от исходного состояния к зоне разрушения наблюдается устойчивая тенденция к снижению параметра и исчезновению структурной периодичности. В исходном состоянии структура стали 09Г2С сохраняет выраженную масштабную упорядоченность и слабый технологический градиент по толщине. В зоне, отдалённой от очага разрушения, формируется градиент микроструктурной стабильности: внутренние области демонстрируют снижение  $D_1-D_0$  вследствие локальной деформации, тогда как наружные сохраняют регулярность субструктуры. В зоне разрушения происходит полная утрата корреляции между структурными элементами, исчезает скрытая периодичность, а микроструктура приобретает статистически хаотический характер. Таким образом, изменение параметра  $D_1-D_0$  отражает переход материала от состояния структурного равновесия к фазе деградации и может использоваться как чувствительный количественный индикатор степени поврежденности в ферромагнитных сталях.

Сопоставление зависимости степени однородности  $f_{60}$  для различных зон по толщине образца (рис. 5) показало, что при переходе от исходного состояния к зоне разрушения наблюдается устойчивая тенденция к снижению параметра и нарушению равномерности распределения структурных элементов. В исходном состоянии структура стали 09Г2С характеризуется высокой однородностью и слабым технологическим градиентом. В зоне, отдалённой от очага разрушения, наблюдается выравнивание значений  $f_{60}$ , что свидетельствует о начале дестабилизации структуры и частичном перераспределении внутренних напряжений. В зоне разрушения происходит дальнейшее снижение степени однородности и изменение соотношения между зонами: наружная поверхность сохраняет остаточную упорядоченность, тогда как объёмная часть теряет структурную согласованность. Таким образом, уменьшение  $f_{60}$  является количественным показателем роста неравномерности распределения микроструктуры и соответствует фрактальному признаку деградации материала, установленному ранее по параметру  $D_1-D_0$ .

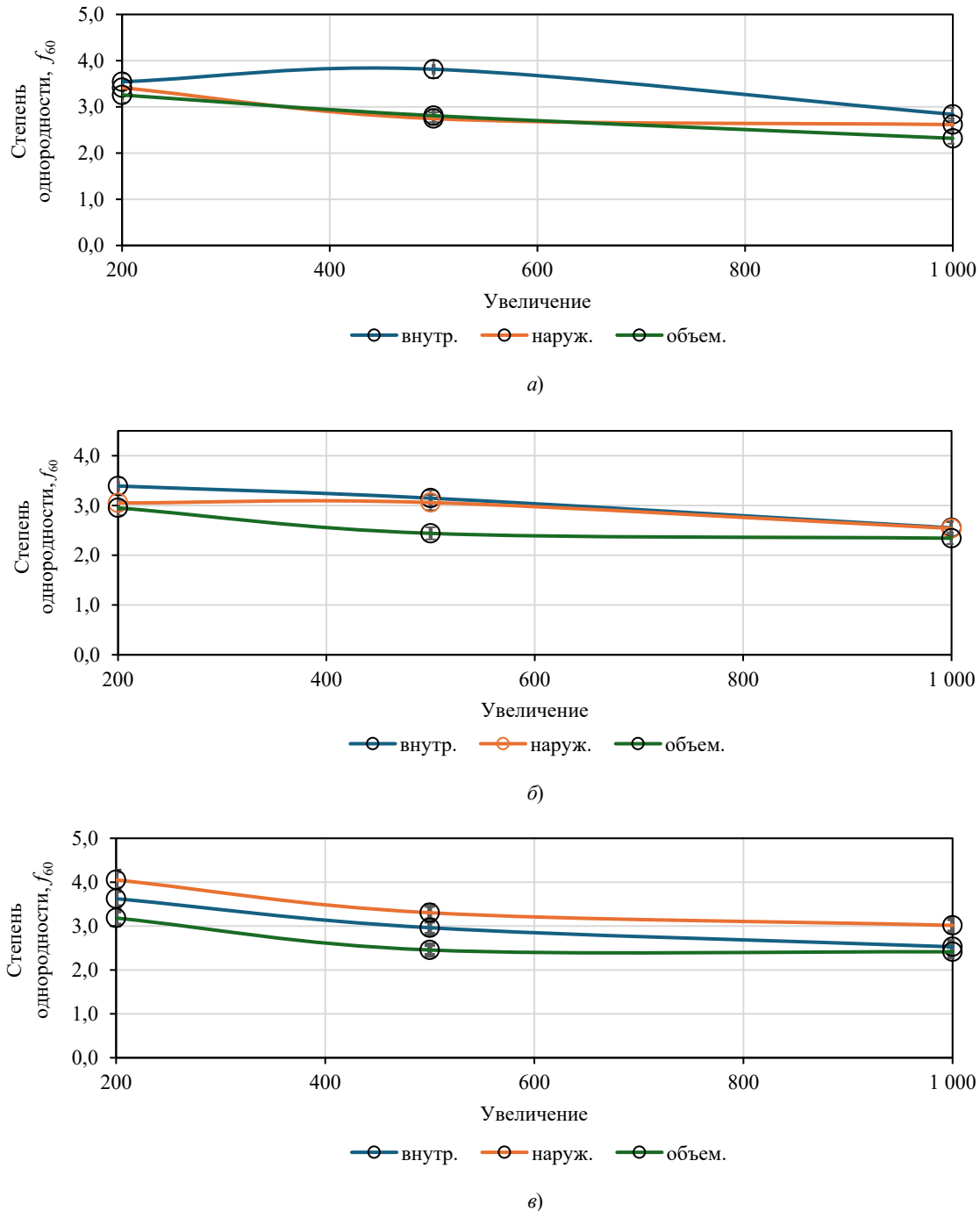
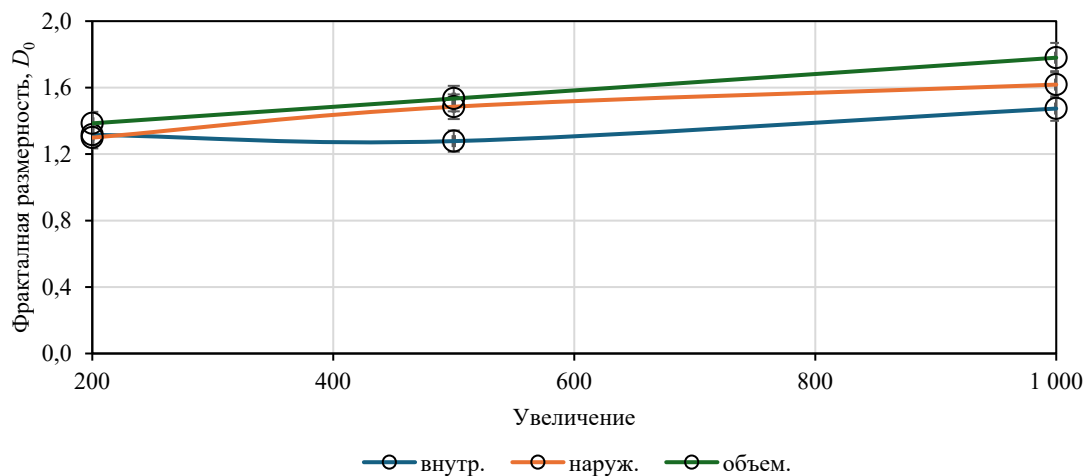
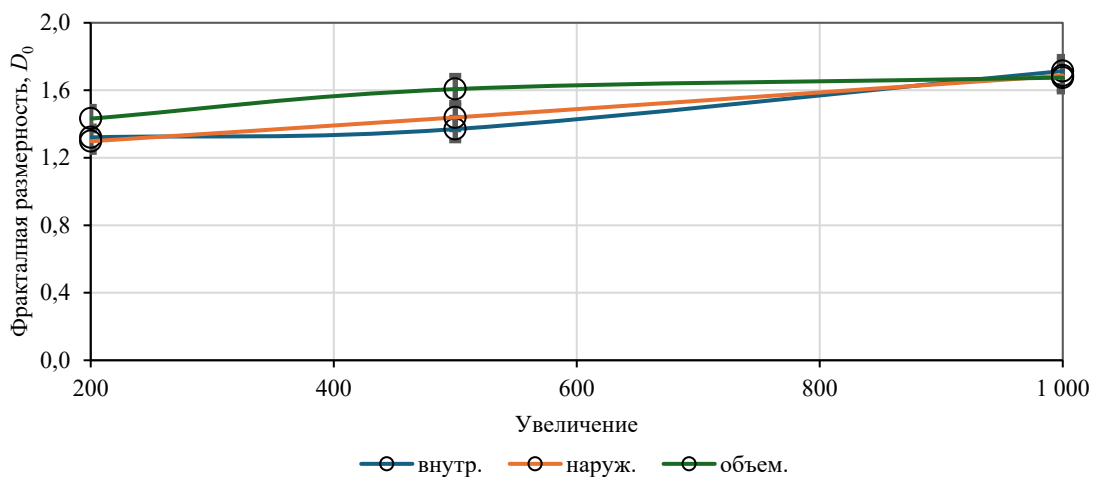


Рис. 5. Изменение мультифрактального параметра степени однородности  $f_{60}$  в зависимости от масштаба наблюдения (увеличения микроскопа) для различных зон образца стали 09Г2С: а — исходное состояние; б — область, отдалённая от зоны разрушения; в — зона разрушения

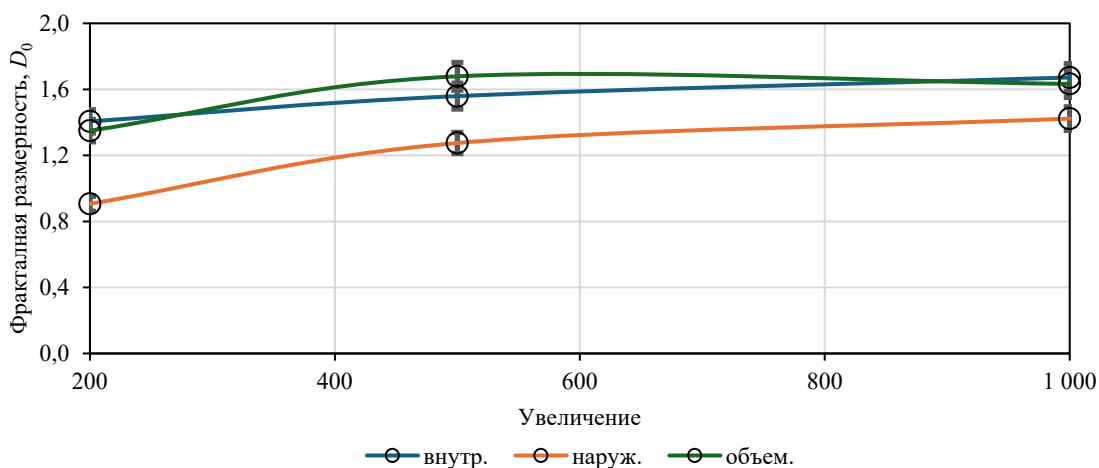
Анализ изменения фрактальной размерности  $D_0$  для различных зон образца показал закономерную эволюцию геометрической сложности микроструктуры по мере перехода от исходного состояния к зоне разрушения (рис. 6).



а)



б)



в)

Рис. 6. Изменение фрактальной размерности  $D_0$  в зависимости от масштаба наблюдения (увеличения микроскопа) для различных зон образца стали 09Г2С: а — исходное состояние; б — область, отдаленная от зоны разрушения; в — зона разрушения

Наиболее существенные изменения наблюдаются в зоне разрушения (рис. 6 в). Для наружной поверхности фиксируется наибольшее снижение фрактальной размерности  $D_0$  (до 1,3), в то время как для внутренней и объёмной частей значения остаются выше (1,6–1,7). Это отражает потерю структурной сложности и разрушение самоподобной организации микроструктуры именно в поверхностных слоях.

Таким образом, уменьшение фрактальной размерности  $D_0$  служит индикатором потери структурной сложности и самоорганизации материала, отражая переход от устойчивой конфигурации зеренной и субзеренной структуры к фрагментированной и хаотичной. Минимальные значения  $D_0$  на наружной поверхности соответствуют зонам инициации микротрещин, показанным на рис. 7.

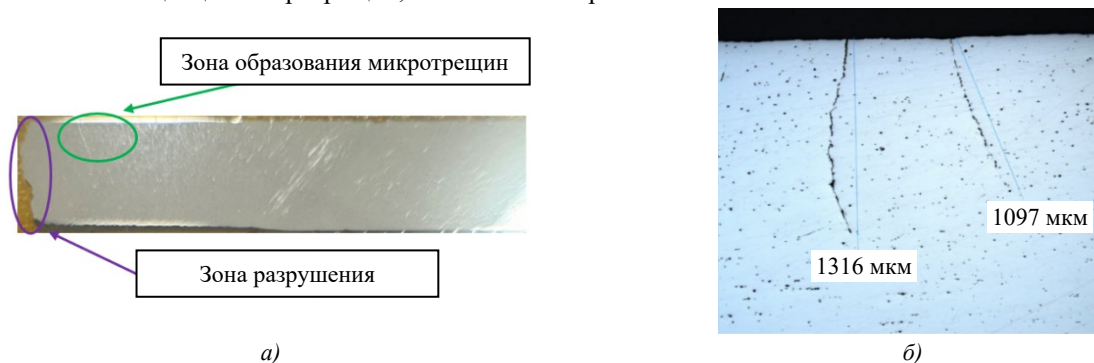


Рис. 7. Макроструктура и микротрещины в поперечном сечении образца из стали 09Г2С вблизи зоны разрушения после циклического изгиба: а — общий вид поперечного сечения с выделением области разрушения и области образования микротрещин; б — микрофотография микротрещин в поперечном сечении с указанием характерной длины 1097 и 1316 мкм ( $\times 100$ )

Следует отметить, что снижение фрактальной размерности  $D_0$  на наружной поверхности сопровождается аналогичными изменениями других мультифрактальных параметров.

Локальное падение всех трёх параметров ( $D_0$ ,  $D_1-D_0$  и  $f_{60}$ ) согласуется с выявленными при магнитных измерениях аномалиями  $H_r$ , что подтверждает общую природу процессов накопления повреждений и инициирования микротрещин.

Для наглядного подтверждения закономерностей, выявленных по мультифрактальным и магнитным параметрам, был проведён анализ микроструктуры образцов в характерных зонах. Представленные на рис. 8 изображения демонстрируют постепенное нарушение упорядоченности структуры — от внутренней части к наружной поверхности, где формируются микротрещины.

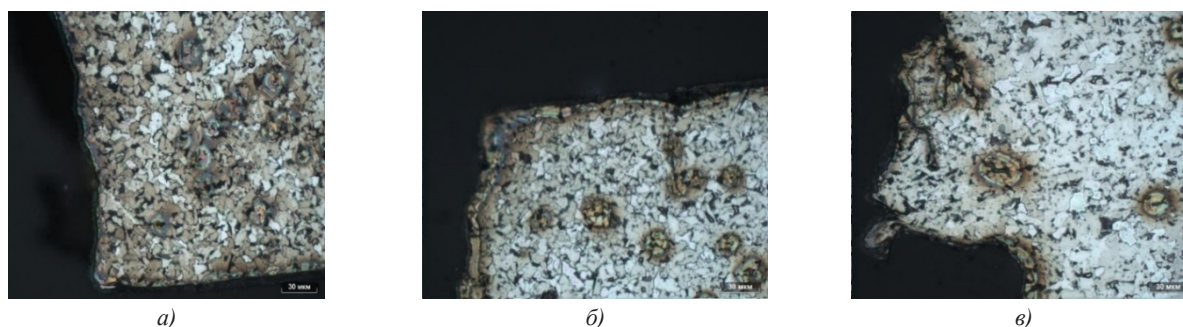


Рис. 8. Микроструктура частей поперечного сечения стенки образца в зоне разрушения: а — наружной; б — центральной; в — внутренней

На микроструктуре наружной поверхности, прилегающей к зоне разрушения, наблюдается высокая степень фрагментации зерен феррита и перлита, а также локальные участки с неравномерным контрастом, свидетельствующие о развитии пластической деформации. Видны начальные микротрещины и субмикроскопические разрывы по границам зёрен, сопровождающиеся потерей чёткости их очертаний и локальной разориентацией субструктурных элементов (рис. 8).

Сравнение микроструктур наружной, центральной и внутренней частей образца в зоне разрушения (рис. 8) показывает выраженный градиент степени деградации структуры по толщине. Внутренняя часть сохраняет упорядоченную феррито-перлитную морфологию, чёткие границы зёрен и равномерное распределение фаз, что соответствует высоким значениям фрактальной размерности  $D_0$  и параметра однородности  $f_{60}$ . В центральной зоне наблюдается начальная перестройка зеренно-субзеренной структуры: появляются малоугловые субграницы и локальные контрасты, указывающие на повышение внутренней неустойчивости и снижение параметра  $D_1-D_0$ . Наконец, на наружной поверхности фиксируется максимальная фрагментация и локальное микротрещинообразование, что сопровождается падением всех трёх фрактальных показателей:  $D_0$ ,  $D_1-D_0$  и  $f_{60}$

Такое распределение микроструктурных признаков полностью согласуется с результатами мультифрактального анализа и магнитных измерений: наружная часть, где наблюдается наибольшая потеря структурной сложности, совпадает с областью магнитных аномалий  $H_r$  и отражает зону максимального накопления повреждений. Таким образом, сопоставление микроструктурных, фрактальных и магнитных данных подтверждает, что деградация материала имеет выраженный градиентный характер — от стабильной внутренней структуры к разрушенной поверхности, где и формируется очаг усталостного разрушения.

Полученный набор магнитных и мультифрактальных признаков рассматривается как основа для последующего построения моделей оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса. Формируемый массив параметров может быть использован в дальнейшем как обучающая база для интеллектуальных систем оценки технического состояния, что открывает возможности к построению более устойчивых и адаптивных методов прогностического мониторинга.

**Заключение.** Комплексное исследование стали 09Г2С при циклическом изгибе показало единый закономерный характер эволюции магнитных, фрактальных и микроструктурных параметров, отражающих процессы накопления повреждений и разрушения. Магнитные измерения распределения результирующей напряжённости поля  $H_r$  выявили локальные аномалии, совпадающие с областями повышенных остаточных напряжений, и локализации деформации вблизи наружной поверхности.

Результаты мультифрактального анализа микрофотографий, выполненного в программе *MFRDrom Fast*, подтвердили связь магнитных аномалий с деградацией микроструктуры. Отмечено последовательное снижение фрактальной размерности  $D_0$ , параметра скрытой периодичности  $D_1-D_0$  и степени однородности  $f_{60}$ , что указывает на разрушение самоподобной организации и рост хаотичности субструктуры.

Металлографический анализ выявил чёткий градиент деградации по толщине: внутренняя часть сохраняет стабильную феррито-перлитную структуру, центральная характеризуется частичной фрагментацией, а наружная наиболее разрушена и содержит микротрещины. Сопоставление данных трёх уровней показало согласованное поведение параметров  $H_r$ ,  $D_0$ ,  $D_1-D_0$  и  $f_{60}$ , что подтверждает их взаимосвязанную природу.

Таким образом, деградация стали 09Г2С при циклическом изгибе имеет мультиуровневый характер: магнитные изменения отражают накопление дефектов, фрактальные параметры — разрушение масштабной структуры, а микроструктурный анализ — конечную стадию микротрещинообразования. Совокупность этих признаков может быть использована как единый диагностический критерий состояния материала и основа для оценки остаточного ресурса элементов, работающих в условиях переменных нагрузок.

#### Список литературы / References

1. Кадыров Р.О., Шерматов Д.Н., Гафарова В.А., Кузеев И.Р. Изменение магнитных характеристик в модельном образце уторного узла резервуара от уровня накопленных повреждений. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2025;4:68–79.
2. Kadyrov RO, Shermatov DN, Gafarova VA, Kuzeev IR. Changes in the Magnetic Characteristics of a Model Specimen of a Tank's Utor Assembly as a Function of Accumulated Damage. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2025;4:68–79. (In Russ.)
3. Kaappa S, Santa-aho S, Honkanen M, Vippola M, Laurson L. Magnetic Domain Walls Interacting with Dislocations in Micromagnetic Simulations. *Communications Materials*. 2024;5:256. <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00697-9>
4. Boyao Lyu, Shihua Zhao, Yibo Zhang, Weiwei Wang, Haifeng Du, Jiadong Zang. MagNet: Machine Learning Enhanced Three-Dimensional Magnetic Reconstruction. *arXiv*. 2022;2210.03066. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.03066>
5. Broadway DA, Flaks M, Dubois AEE, Maletinsky P. Reconstruction of Non-Trivial Magnetization Textures from Magnetic Field Images Using Neural Networks. *Mesoscale and Nanoscale Physics arXiv*. 2024;2412.19381. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.19381>
6. Ali Tabatabaiean, Ahmad Reza Ghasemi, Mahmood M Shokrieh, Bahareh Marzbanrad, Mohammad Baraheni, Mohammad Fotouhi. Residual Stress in Engineering Materials: A Review. *Advanced Engineering Materials*. 2021;23(5):1–65. <https://doi.org/10.1002/adem.202100786>
7. El-Achkar T, Weygand D. Free Surface Acts as Dislocation Sink in Cyclic Loading. In book: *Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles*. Springer; 2018. P. 395–416.
8. Polák J. Role of Persistent Slip Bands and Persistent Slip Markings in Fatigue Crack Initiation in Polycrystals. *Crystals*. 2023;13(2):220. <https://doi.org/10.3390/cryst13020220>
9. Romanov AE, Kolesnikova AL. Micromechanics of Defects in Functional Materials. *Acta Mechanica*. 2021;232(5):1901–1915. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02872-8>

9. Gaur V, Doquet V, Persent E, Mareau C, Roguet É, Kittel J. Surface Versus Internal Fatigue Crack Initiation in Steel: Influence of Mean Stress. *International Journal of Fatigue*. 2016;82(3):437–448. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.08.028>
10. Mandelbrot BB. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Company; 2021. 500 p.
11. Fernández R, González-Doncel G, Garcés G. Fractal Analysis of Strain-Induced Microstructures in Metals. In book: *Fractal Analysis – Selected Examples*. IntechOpen; 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91456>
12. Patiño-Ortiz M, Patiño-Ortiz J, Martínez-Cruz MÁ, Esquivel-Patiño FR, Balankin AS. Morphological Features of Mathematical and Real-World Fractals: A Survey. *Fractal and Fractional*. 2024;8(8):440. <https://doi.org/10.3390/fractalfract8080440>
13. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. *Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов*. Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика»; 2002. 116 с.  
Vstovskii GV, Kolmakov AG, Bunin IZh. *Introduction to Multifractal Parameterization of Material Structures*. Izhevsk: Scientific Publishing Center “Regular and Chaotic Dynamics”; 2002. 116 p. (In Russ.)
14. Встовский Г.В. *Элементы информационной физики*. Москва: МГИУ; 2002. 258 с.  
Vstovskii GV. *Elements of Information Physics*. Moscow: MSIU; 2002. 258 p. (In Russ.)
15. Ботвина Л.Р., Петерсен Т.Б., Тютин М.Р. Акустическое затишение как диагностический признак предразрушения. *Доклады Академии наук*. 2018;479(5):514–518. <https://doi.org/10.7868/S0869565218110087>  
Botvina LR, Petersen TB, Tyutin MR. The Acoustic Gap as a Diagnostic Sign of Prefracture. *Doklady Physics*. 2018;479(5):514–518. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0869565218110087>
16. 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;17(5):81–88. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2019-5-81-88>  
Shermatov JN, Naumkin EA, Kuzeev IR, Rubtsov AV. Change of Ultrasonic Waves Speed Spreading in a Material of the Reaction Furnace Coil during Operation Process. *Petroleum Engineering*. 2019;17(5):81–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2019-5-81-88>
17. Ailin Li, Wenwu Zhong, Cong Yu, Xin Zhang, Tao Li, Zheng Fei. Study on Rock Damage Mechanics in the Sustainable Development of the Red Sandstone Area in China: Taking Zhongjiang County as an Example. *Frontiers in Earth Science*. 2025;12:1484633. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1484633>

**Об авторах:**

**Джамшед Наимджонович Шерматов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), [ORCID](#), [Scopus](#), [SPIN-код](#), [jamshed8808@mail.ru](mailto:jamshed8808@mail.ru)

**Александр Олегович Борисов**, аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), [ORCID](#), [SPIN-код](#), [ResearcherID](#), [wot\\_bax\\_bax@mail.ru](mailto:wot_bax_bax@mail.ru)

**Гафарова Виктория Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), [ORCID](#), [SPIN-код](#), [Scopus](#), [ResearcherID](#), [gafarova.vika@bk.ru](mailto:gafarova.vika@bk.ru)

**Кузеев Искандер Рустемович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), [ORCID](#), [kuzeev2002@mail.ru](mailto:kuzeev2002@mail.ru)

**Заявленный вклад авторов:**

**Д.Н. Шерматов:** разработка методологии, визуализация, проведение исследований, анализ полученных результатов.

**А.О. Борисов:** проведение исследований, формальный анализ.

**В.А. Гафарова:** проведение исследований, написание черновика рукописи, администрирование.

**И.Р. Кузеев:** научное руководство, анализ полученных результатов, рецензирование и редактирование рукописи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

*About the Authors:*

**Dzhamshed N. Shermatov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Machines and Equipment, Ufa State Petroleum Technical University (1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation), [ORCID](#), [Scopus](#), [SPIN-code](#), [jamshed8808@mail.ru](mailto:jamshed8808@mail.ru)

**Alexander O. Borisov**, Postgraduate Student of the Department of Technological Machines and Equipment, Ufa State Petroleum Technical University (1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [ResearcherID](#), [wot\\_bax\\_bax@mail.ru](mailto:wot_bax_bax@mail.ru)

**Victoria A. Gafarova**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Machines and Equipment, Ufa State Petroleum Technical University (1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [Scopus](#), [ResearcherID](#), [gafarova.vika@bk.ru](mailto:gafarova.vika@bk.ru)

**Iskander R. Kuzeev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technological Machines and Equipment, Ufa State Petroleum Technical University (1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation), [ORCID](#), [kuzeev2002@mail.ru](mailto:kuzeev2002@mail.ru)

*Claimed Contributorship:*

**DN Shermatov:** methodology, visualization, research, results analysis.

**AO Borisov:** investigation, formal analysis.

**VA Gafarova:** investigation, writing – original draft, administration.

**IR Kuzeev:** supervision, results analysis, writing – review & editing.

*Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.*

*All authors have read and approved the final version of manuscript.*

Поступила в редакцию / Received 08.12.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 15.01.2026

Принята к публикации / Accepted 27.01.2026