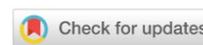


ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 669.1

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-221-229>

Идентификация морфологии поверхности стального естественного феррито-мартенситного композита с использованием программного обеспечения ImageJ

В.В. Дука , Л.П. Арефьева  

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

 ludmilochka529@mail.ru

EDN: ZHEYTV

Аннотация

Введение. Современные материалы требуют глубокого понимания их структуры для прогнозирования эксплуатационных свойств. Применение различных методик и программ для визуализации, таких как оптическая и электронная микроскопия, ограничено двумерными изображениями, что затрудняет детальный анализ морфологии. Несмотря на наличие исследований в этой области, существует недостаток в понимании трехмерной организационной структуры материалов, что создает пробелы в знании о влиянии геометрии на физические свойства композитов. Программа ImageJ была выбрана для данного исследования благодаря своей многофункциональности и поддержке множества форматов, что значительно упрощает анализ. Она также предлагает мощные инструменты для автоматизации процессов и позволяет извлекать 3D-информацию из двумерных изображений, что критично для точной идентификации структурных компонентов. Настоящее исследование направлено на устранение недостающей информации, фокусируясь на анализе морфологии стального феррито-мартенситного композита. Цель работы — идентификация 3D-структуры поверхности композита, что позволит улучшить понимание его эксплуатационных характеристик и подтвердить значимость выбора подходящих методов визуализации.

Материалы и методы. В качестве исходного материала для анализа было выбрано изображение микроструктуры стального естественного феррито-мартенситного композита (ЕФМК), полученное на оптическом микроскопе Метам РВ–22. Рассматриваемая микроструктура состоит из 2-х фаз, где светлой фазой является феррит, а темной — мартенсит. Использовалась программа ImageJ, адаптированная под различные форматы электронно-микроскопических и металлографических изображений и позволяющая получить широкий набор геометрических характеристик поверхности.

Результаты исследования. Исследование с использованием программного обеспечения ImageJ микроструктуры стального феррито-мартенситного композита выявило характерную строчечную структуру, состоящую из светлой фазы (феррита) и темной фазы (мартенсита). Обработка изображений, включая масштабирование и сегментацию, привела к преобразованию в черно-белый формат, что позволило четко визуализировать границы между фазами и геометрические формы частиц. Четырехпараметрическая калибровочная функция Родбарда обеспечила дополнительные данные о площади, стандартном отклонении, асимметрии и эксцессе, что затрудняет анализ структуры. В результате отмечено 40,8 % площади, занятый ферритом, и 59,2 % — мартенситом. Профиль поверхности показывает чередование слоев из разориентированных кристаллов, а количественная информация позволила создать четкое 3D-изображение поверхности композита.

Обсуждение. Измеряемая в пикселях толщина границ зерен оказывается тоньше, чем в других графических редакторах, за счёт чего изменяется площадь и соответственно количество светлой фазы. Изменение количественного соотношения фаз «феррит-мартенсит» связано с тем, что в программе подавляется «шум» изображения и нераспознанная серая фаза прочитывается более чётко: часть её относится к светлой фазе, и часть — к тёмной.

В условиях современных технологий и высоких требований к прочности и износостойкости, понимание микро-структуры становится ключевым для оптимизации свойств материалов. Выбор подходящих методов визуализации, таких как применение программного обеспечения ImageJ, не только позволяет получить точные данные о распределении фаз, но также способствует более глубокому анализу механических свойств, таких как твердость и устойчивость к коррозии. Эти аспекты важны в контексте роста инновационных технологий, где надежность и долговечность материалов играют центральную роль.

Заключение. Применение программного комплекса ImageJ для визуализации в 2D и 3D графике и качественного и количественного анализа морфологии поверхности гетерогенных структурных состояний материалов является удобным, эффективным и информативным способом получения геометрических характеристик частиц структурных составляющих. Также возможно проведения картирования формы и размеров частиц. Автоматизация процесса приводит к экономии затрат времени и ресурсов, минимизирует влияние субъективных факторов на результат на разных этапах проведения анализа. Идентификация 3D-структуры поверхности композита помогает углубить знания о его эксплуатационных характеристиках, что крайне актуально в условиях современных технологических требований. Это понимание позволяет разрабатывать новые материалы, улучшать их характеристики, такие как прочность, износостойкость и устойчивость к коррозии, а также предсказывать, как материалы будут вести себя в реальных условиях.

Ключевые слова: ImageJ, композит, мартенсит, профиль поверхности, пиксель, микроструктура, масштаб

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Дука В.В., Арефьева Л.П. Идентификация морфологии поверхности стального естественного феррито-мартенситного композита с использованием программного обеспечения ImageJ. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(3):221–229. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-221-229>

Original Empirical Research

Surface Morphology Identification of Steel Natural Ferrite-Martensitic Composite Using ImageJ Software

Valentina V. Duka , Lyudmila P. Aref'eva  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 ludmilochka529@mail.ru

Abstract

Introduction. Modern materials require a deep understanding of their structure in order to predict their performance properties. However, the use of various imaging techniques and programs, such as optical and electron microscopy, is limited to two-dimensional images, making it difficult to fully analyze the morphology of materials. Despite research in this field, there is still a lack of knowledge about the three-dimensional organization of materials, leading to gaps in our understanding of how geometry affects the physical properties of composite materials. ImageJ was chosen for this study due to its versatility and ability to support multiple formats, simplifying the process of analysis. It also offers powerful tools for automated processing and allows users to extract three-dimensional information from two-dimensional images. This is crucial for accurately identifying structural components. The current study aims to fill in the missing information by analyzing the morphology of a steel ferrite-martensite composite. The aim of the work is to determine the 3D surface structure of the composite, which will improve understanding of its performance characteristics and confirm the significance of selecting appropriate visualization techniques.

Materials and Methods. An image of the microstructure of a steel natural ferrite-martensitic composite (NFMС), obtained using a Metam PB–22 optical microscope, was chosen as the starting material for analysis. The microstructure in question consists of two phases: the light phase being ferrite and the dark phase being martensite. The ImageJ program, which has been adapted to various formats of electron microscopic and metallographic images, was used to obtain a wide range of geometric characteristics of the surface.

Results. A study using ImageJ software on the microstructure of a steel ferrite-martensitic composite revealed a characteristic lineage structure consisting of a light phase (ferrite) and a dark phase (martensite). Image processing, including scaling and segmentation, led to the conversion to black and white format, allowing for clear visualization of the boundaries between the phases and the geometric shapes of the particles. The four-parameter Rodbard calibration function provided additional data on area, standard deviation, skewness, and kurtosis, making it difficult to analyze the structure. As a result, ferrite occupied 40.8% of the area, while martensite occupied 59.2%. The surface profile revealed an alternating pattern of misoriented crystals, and the quantitative information allowed for the creation of a clear 3D image of the composite surface.

Discussion. The thickness of grain boundaries in pixels was found to be thinner in this graphic editor than in others, which affected the area and, consequently, the amount of light phase. The change in the quantitative ratio of ferrite-martensite phases was due to the program's ability to suppress image “noise” and more clearly read the unrecognized gray phase, with some of it belonging to the light phase and some to the dark phase.

With the advancement of technology and the increasing demands for strength and wear resistance, understanding the microstructure of materials has become crucial for optimizing their properties. The selection of appropriate imaging techniques, such as the use of ImageJ software, not only allows for accurate data on phase distribution, but also contributes to a more in-depth analysis of mechanical properties such as hardness and corrosion resistance. These aspects are important in the context of the development of innovative technologies where reliability and durability are essential factors.

Conclusion. The use of the ImageJ software package for visualization in 2D and 3D graphics and qualitative and quantitative analysis of the surface morphology of heterogeneous structural states of materials is a convenient, effective and informative way to obtain geometric characteristics of particles of structural components. It is also possible to map the shape and size of particles. Automation of this process leads to time and resource savings, minimizing the influence of subjective factors on results at different stages of analysis. Identification of the 3D surface structure of composites helps to deepen our understanding of their operational characteristics, which is crucial in the context of modern technological demands. This knowledge allows us to develop new materials with improved properties such as strength, wear and corrosion resistance. Furthermore, it enables us to predict how materials will perform in actual conditions.

Keywords: ImageJ, composite, martensite, surface profile, pixel, microstructure, scale

Acknowledgments. The authors would like to thank the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and comments that allowed them to improve its quality.

For citation. Duka VV, Aref'eva LP. Surface Morphology Identification of Steel Natural Ferrite-Martensitic Composite Using ImageJ Software. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(3):221–229. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-221-229>

Введение. В настоящее время в области материаловедения активно используются множество методик и специализированных компьютерных программ, которые позволяют расширять возможности визуализации строения материалов за счет повышения разрешающей способности. Это, в свою очередь, увеличивает вероятность прогнозирования эксплуатационных свойств. Морфология поверхности, её химический состав и структурные компоненты являются ключевыми показателями при изучении структуры материалов, поскольку они напрямую влияют на их свойства, поведение и эксплуатационные характеристики. Традиционные методы определения морфологии поверхности материалов включают несколько ключевых техник, которые позволяют оценить топографию, шероховатость, структуру и дефекты поверхности. К ним относятся: оптическая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, трансмиссионная электронная микроскопия, профилометрия и другие. Однако все эти методы, несмотря на широкое применение, дают возможность получать только двумерные изображения, что ограничивает информацию о рельефе поверхности, формируемом фазовым составом материала, и, как правило, являются разрушающими методами контроля. Вместе с тем использование программных алгоритмов современных цифровых технологий позволяет извлекать 3D информацию из двумерного изображения структуры без потери разрешения, а также обеспечивает эффективное хранение и быструю интерпретацию 3D изображений как на микро-, так и на нано-уровнях. Электронные 3D структурные изображения повышают достоверность морфологической организации материала благодаря прецизионной детализации. Это позволяет осуществить точную оценку геометрических размеров структурных компонентов и локально определить их физические и механические свойства с минимальными погрешностями. При выборе программ для визуализации 3D изображений важно учитывать поставленные цели и задачи исследования, а также удобство работы с интерфейсом и его функциональные возможности. В настоящее время существует множество прикладных программ для обработки изображений с разнообразным набором возможностей. Среди доступных программных комплексов, таких как Adobe Photoshop [1], Gimp [2], CellProfiler [3], Huygen [4], Leica QWin [5], Gwyddion, ImageJ выделяется многофункциональностью, поддержкой множества форматов, гибкостью, производительностью и возможностями автоматизации. Эти качества делают её особенно востребованной при работе с изображениями [6]. Цифровой способ обработки изображений для анализа рельефа поверхности с использованием программы ImageJ позволяет извлекать 3D информацию из двумерных изображений, полученных методами оптической микроскопии, без потери разрешения [7]. Это особенно важно при идентификации морфологии структурных компонентов композита и последующей интерпретации его свойств в целом. В данной работе программный пакет ImageJ впервые применяется для исследования естественного феррито-мартенситного композита [8]. Цель работы — идентификация морфологии поверхности стального естественного феррито-мартенситного композита с использованием программного обеспечения ImageJ.

Материалы и методы. Объектом исследования являлось изображение микроструктуры естественного феррито-мартенситного композита, полученного с помощью оптического микроскопа Метам РВ–22 [9].

Для получения дополнительной информации о структурном состоянии ЕФМК в работе была использована программа ImageJ, адаптированная под различные форматы электронно-микроскопических и металлографических изображений [10]. Она позволяет рассчитать площадь, длину, объем, периметр, угловые размеры поверхности структурных составляющих, в том числе со статистическими показателями как в пиксельных значениях, так и в системе СИ [11]. При этом геометрические характеристики определяются в результате последовательного картирования структуры (рис. 1) с последующим интегрированием всей площади изображения [12].

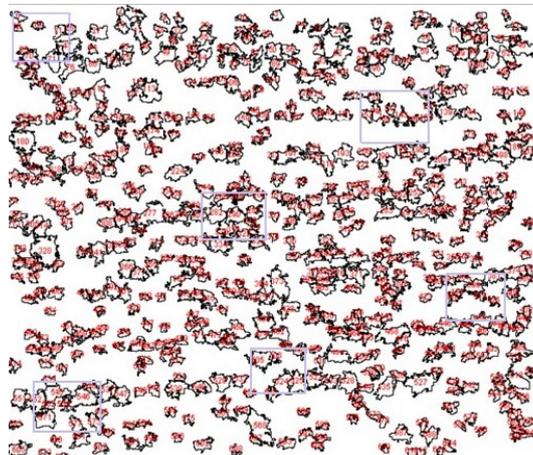


Рис. 1. Последовательное картирование структуры ЕФМК

Опция «Set Measurements» программы позволяет рассчитать как общую, так и относительную площади частиц структурных составляющих, а также их средний размер [9–12, 13]. Калибровочная четырехпараметрическая функция Родбарда, согласно уравнению 1, точно идентифицирует оттенки черного и белого благодаря анализу интенсивности пикселей вдоль линии внутри изображения и преобразует 2D-поверхность в 3D-изображение [13, 14].

$$y = d + \frac{a - b}{1 + \left(\frac{x}{c}\right)^b}, \quad (1)$$

где y — значение функции; x — независимая переменная; d — максимальное значение функции (верхняя асимптота); a — минимальное значение функции (нижняя асимптота); b — параметр, определяющий наклон (крутизну) кривой; c — значение, при котором функция принимает значение, равное средней точке между a и d .

ЕФМК — композит на основе горячекатаной доэвтектоидной строительной стали 14Г2 с исходной строчечной феррито-перлитной структурой. После закалки из межкритического интервала температур (МКИ) структура такого композита представляет собой чередующиеся слои феррита и мартенсита, выполняющего роль армирующей составляющей. Такая структура позволяет получать необычное соотношение высокой пластичности, вязкости и прочности.

Известно, что в ЕФМК основные показатели механических, физических и эксплуатационных свойств определяются химическим составом и количественным соотношением фаз. Соотношение объемных долей феррита и мартенсита, а также микротвердость упрочняющей фазы зависят от температуры закалки из МКИ. Установлено, что при закалке при температуре 730 °С объемная доля мартенситной составляющей не превышает 25–30 %, а ее микротвердость составляет 735–740 МПа. При закалке при более высокой температуре — 780 °С — формируется структура мартенсита с большей объемной долей — 55–60 %, но с более низкой микротвердостью — 450–455 МПа. Понижение микротвердости связано с тем, что при увеличении температуры закалки в МКИ количество углерода в мартенсите уменьшается [15].

Результаты исследования. На рис. 2 а, полученного с помощью оптического микроскопа Метам РВ–22, представлена характерная строчечная структура ЕФМК, состоящая из «слоев» светлой фазы — феррита и темной фазы — мартенсита. Однако детализация структурных составляющих затруднительна. После предварительной обработки изображения путем последовательного масштабирования, сегментации и извлечения геометрических характеристик программа ImageJ трансформировала изображение в черно-белый 8-битный формат (рис. 2 б), где каждый пиксель — это одно байтовое значение в диапазоне от 0 до 255, обозначающее яркость. Картина микроструктуры приобретает высокую контрастность, а на ней четко просматриваются геометрическая форма частиц, границы между фазовыми слоями, что существенно расширяет возможности структурного анализа 2D изображений морфологии гетерогенной структуры естественного феррито-мартенситного композита [16].

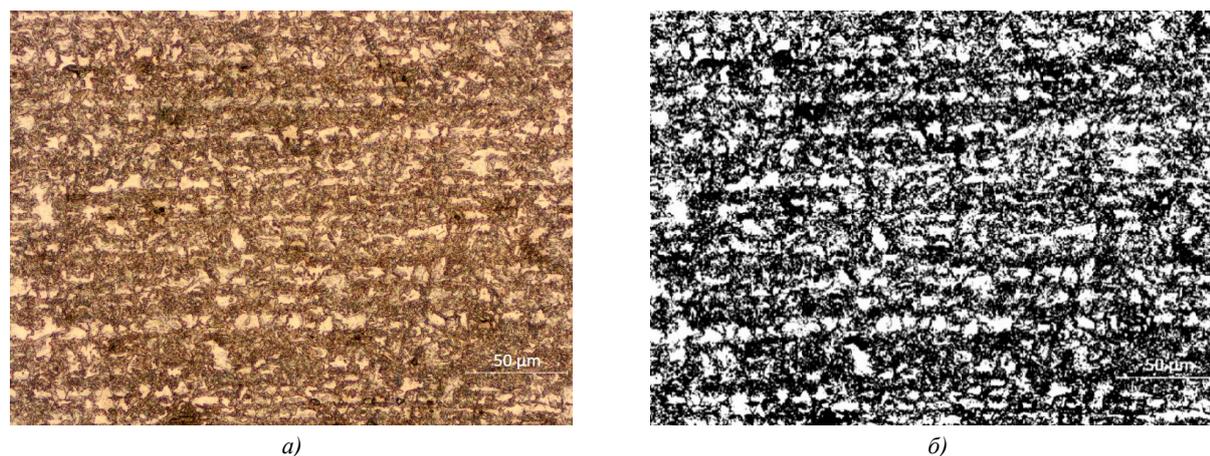


Рис. 2. Микроструктура ЕФМК после закалки из МКИ (светлая область-феррит, темная область-мартенсит):
 а — микроструктура ЕФМК до обработки в программе ImageJ; б — микроструктура ЕФМК после преобразования
 в черно-белую графику с помощью компьютерной программы ImageJ

Использование четырехпараметрической калибровочной функции Родбарда (рис. 3) позволило извлечь дополнительную информацию о заданных в опции «Set Measurements» параметрах структурных составляющих — общей площади исследования (область), стандартном отклонении, асимметрии и эксцессе пиксельного изображения, доле площади и периметре анализируемых фаз. Значения указанных параметров с учетом масштабирования приведены в таблице 1.

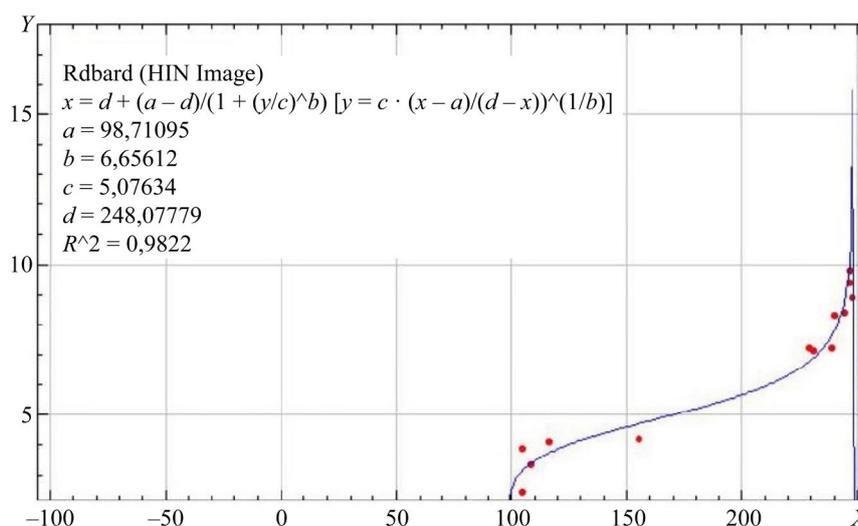


Рис. 3. Четырехпараметрическая калибровочная функция Родбарда,
 по оси X — расстояние вдоль линии, оси Y — интенсивность пикселей

Таблица 1

Результаты заданных измерений в диалоговом окне «Set Measurements»

Параметр	Значение
Область (пикс)/(мкм ²)	313908 / 66789
Стандартное отклонение	124,7
Асимметрия	0,4
Доля площади светлой фазы — феррита (%)	40,8
Доля площади темной фазы — мартенсита (%)	59,2
Среднее значение серого цвета	101,0
Периметр (пикс)/(мкм)	2248 / 478,3
Эксцесс	-1,8

По полученным данным был построен двумерный график профиля (рис. 4), из которого следует, что на поверхности ЕФМК сформирована строчечная структура, отличительной особенностью которой является наличие чередующихся слоев мартенсита и феррита, состоящих из разориентированных в пространстве кристаллов, на что указывают локальные максимумы и минимумы профиля.

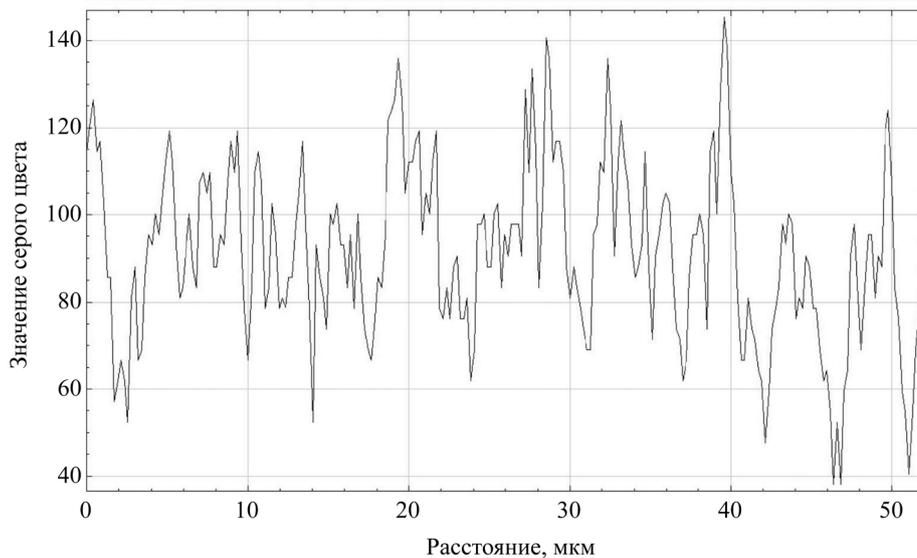


Рис. 4. Профиль поверхности ЕФМК

С помощью, встроенной в опцию «Set Measurements» дополнительной функции «Analyze Particles» была проведена фильтрация объектов по размерам и форме, что дало возможность определить общую и относительную площади рассматриваемых структурных составляющих, а также их средний размер. Таким образом, суммарное число частиц темной и светлой фазы по всей площади изображения составляет 1 088, среди которых 27 316 мкм² или 40,8 % от общей площади в 66 789 мкм² заняты светлой ферритной составляющей со средним размером 4,72 мкм, а оставшаяся доля 39 473 мкм² или 59,2 % — темной фазой мартенсита со средним размером 5,29 мкм. Количественная информация о расположении и интенсивности пикселей позволила получить четкое 3D-изображение профиля поверхности ЕФМК (рис. 5).

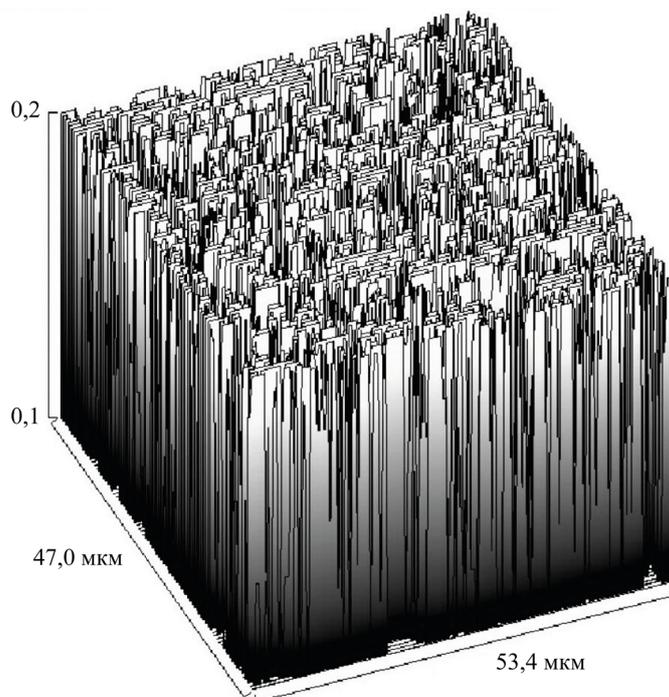


Рис. 5. 3D-изображение профиля поверхности ЕФМК

Обсуждение. Из работ [17, 18] известно, что процентное соотношение фаз феррита и мартенсита при температуре закалки 790–800 °С в среднем составляет 35/65–30/70. Количественное соотношение феррита и мартенсита на исследуемом в программе ImageJ изображении оказалось, соответственно, ~ 40/60. Отклонение полученных данных от результатов работ [17, 18] объясняется тем, что в программе ImageJ осуществляется обработка изображения по интенсивности пиков, что позволяет более точно просматривать границы зерен. Измеряемая в пикселях толщина границ зерен оказывается тоньше, чем в других графических редакторах, что, в свою очередь, изменяет площадь и соответствующее количество светлой фазы. Изменение количественного соотношения фаз «феррит-мартенсит» связано с тем, что в программе подавляется «шум» изображения, и нераспознанная серая фаза считывается более чётко: часть её относится к светлой фазе, а часть — к тёмной. Полученные результаты позволяют более точно количественно охарактеризовать степень неоднородности и расположение феррита и мартенсита на исследуемом изображении. Результаты хорошо согласуются с данными работ и в целом соответствуют полученным визуальным изображениям.

Заключение. Программа ImageJ предоставляет удобные инструменты для визуализации и документирования результатов исследований гетерогенных структурных состояний материалов различного функционального назначения, позволяя создавать отчеты с наглядными иллюстрациями формата 2D и 3D графики. Широкий функционал встроенных опций позволяет оценивать различные геометрические параметры морфологии частиц и, на этой основе, проводить анализ формы, размеров, расположения, количества и даже осуществлять картирование. Применение данного программного комплекса для изучения морфологии поверхности ЕФМК путем обработки фотографий микроструктуры существенно повышает эффективность, точность и объективность исследования. Автоматизация процесса значительно экономит время и человеческие ресурсы, а также минимизирует вариабельность данных, связанную с ручной обработкой. Использование таких инструментов особенно целесообразно в сочетании с традиционными методами получения данных, что позволяет получить более полное и надежное представление о свойствах и структуре материалов.

Список литературы / References

1. Tim Gräning, Lizhen Tan, Ishtiaque Robin, Yutai Katoh, Ying Yang. A Novel Design of Transitional Layer Structure between Reduced Activation Ferritic Martensitic Steels and Tungsten for Plasma Facing Materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24:4285–4299. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.019>
2. Garcia JuM, Accioly Monteiro AC, Barcelos Casanova AM, Checca Huaman NR, Monteiro SN, Brandao LP. Microstructural Analysis of Phase Precipitation during High Temperature Creep in AISI 310 Stainless Steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;23:5953–5966. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.175>
3. Karin P, Chammana P, Oungpakornkaew P, Rungsritanapaisan P, Amornprapa W, Charoenphonphanich C, et al. Impact of Soot Nanoparticle Size and Quantity on Four-Ball Steel Wear Characteristics Using EDS, XRD and Electron Microscopy Image Analysis. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;16:1781–1791. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.111>
4. Setareh Medghalchi, Ehsan Karimi, Sang-Hyeok Lee, Benjamin Berkels, Ulrich Kerzel, Sandra Korte-Kerzel. Three-Dimensional Characterisation of Deformation-Induced Damage in Dual Phase Steel Using Deep Learning *Journal Materials & Design*. 2023;232:112108. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112108>
5. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. *Цифровые изображения. От получения до обработки*. Минск: ОИПИ НАН Беларуси; 2014. 202 с.
Starovoitov VV, Golub YuI. *Digital Images. From Receipt to Processing*. Minsk: UIIP NAS of Belarus; 2014. 202 p. (In Russ.)
6. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Домбровский Ю.М., Дука В.В. Структурная организация и свойства естественного стального ферритно-мартенситного композита. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2020;(6(780)):15–21. URL: <https://mitom.folium.ru/index.php/mitom/article/view/251> (дата обращения: 01.06.2025).
Pustovoit VN, Dolgachev YuV, Dombrovskii YuM, Duka VV. The Structure and Properties of a Natural Steel Ferritic-Martensitic Composite. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2020;(6(780)):15–21. (In Russ.) URL: <https://mitom.folium.ru/index.php/mitom/article/view/251> (accessed: 01.06.2025).
7. Вернези Н.Л., Русаков В.А. О контроле прочности металла конструктивных элементов плавучих кранов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2022;(3):50–51. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-48-53>
8. Vernezi NL, Rusakov VA. On the Control of Metal Strength of Structural Elements of Floating Cranes. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2022;(3):50–51. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-48-53>
9. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Домбровский Ю.М. Баллистическая стойкость стали со структурой естественного феррито-мартенситного композита. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2022;(3):54–59. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-54-59>

Pustovoi VN, Dolgachev YuV, Dombrovskii YuM. Ballistic Resistance of Steel with the Structure of a Natural Ferrite-Martensitic Composite. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2022;(3):54–59. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-54-59>

9. Зильберглейт М.А., Темрук В.И. Применение пакета ImageJ для обработки изображений, полученных электронной сканирующей микроскопией (на примере анализа бумаги). *Полимерные материалы и технологии*. 2017;3(1):71–74.

Zilbergleit MA, Temruk VI. Package ImageJ. Application for Image Processing Obtained Scanning Electronic Microscopy (Paper Analysis). *Polymer Materials and Technologies*. 2017;3(1):71–74. (In Russ.)

10. Иоффе А.И. Метод оценки неоднородности выделенной области. *Исследование земли из космоса*. 2013;(3):92–94. <https://doi.org/10.7868/S0205961413020048>

Ioffe AI. Method for Estimation of a Given Area Relief Roughness. *Earth Research from Space*. 2013;(3):92–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0205961413020048>

11. Burger W, Burge MJ. *Digital Image Processing. An Algorithmic Introduction Using Java. Second Edition*. London: Springer; 2016. 811 p.

12. Атрошенко С.А., Майер С.С., Смирнов В.И., Структурно-фазовое состояние металла рельса с внутренней трещиной после длительной эксплуатации. *Журнал технической физики*. 2021;91(9):1363–1368. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.09.51215.72-21>

Atroshenko SA, Maier SS, Smirnov VI. Structural Phase State of the Metal of a Rail with an Internal Crack after Long-Term Operation. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 2021;91(9):1363–1368. (In Russ.) <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.09.51215.72-21>

13. Torres AL, Bidarra SJ, Pinto MT, Aguiar PC, Silva EA, Barrias CC. Guiding Morphogenesis in Cell-Instructive Microgels for Therapeutic Angiogenesis. *Biomaterials*. 2018;154:34–47. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2017.10.051>

14. Rueden CT, Schindelin J, Hiner MC, DeZonia BE, Walter AE, Arena ET. ImageJ2: ImageJ for the Next Generation of Scientific Image Data. *BMC Bioinformatics*. 2017;18(1):529. <https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z>

15. Duka VV, Pustovoi VN, Ostapenko DA, Aref'eva LP, Dombrovskij YuM. The Use of the Atomic Force Microscopy to Investigate the Structure of Steel 14G2. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;680:012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/680/1/012023>

16. Дука В.В., Арефьева Л.П., Пустовойт В.Н., Киселева Д.А. Исследование строчечной структуры строительной стали методом атомно-силовой микроскопии. *Письма о материалах*. 2020;10(4(40)):445–450. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-4-445-450>

Duka VV, Aref'eva LP, Pustovoi VN, Kiseleva DA. Study of the Lineage Structure of Building Steel by Atomic Force Microscopy. *Letters on Materials*. 2020;10(4(40)):445–450. (In Russ.) <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-4-445-450>

17. Арефьева Л.П., Дука В.В., Забияка И.Ю. Взаимосвязь структурно-фазового состава с механизмом разрушения высокопрочной строительной стали. *Письма в журнал технической физики*. 2022;48(8):39–42. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.08.52366.19093>

Aref'eva LP, Duka VV, Zabyaka IY. Relationship between the Structural-Phase Composition and the Fracture Mechanism of High-Strength Construction Steel. *Technical Physics Letters*. 2022;48(8):39–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.08.52366.19093>

18. Duka VV, Aref'eva LP, Mitrin BI, Pustovoi VN. Investigation of the Fracture Structure of a Composite Material after Bending Test by Atomic Force Microscopy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1029:012059. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012059>

Об авторах

Валентина Владимировна Дука, старший преподаватель, кафедра «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), valentina.duka.92@mail.ru

Людмила Павловна Арефьева, доктор физико-математических наук, доцент, доцент, кафедра «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), ludmilochka529@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

В.В. Дука: разработка концепции, формальный анализ, проведение исследований, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

Л.П. Арефьева: разработка концепции, курирование данных, разработка методологии, предоставление ресурсов, научное руководство, написание рукописи — внесение замечаний и исправлений.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Valentina V. Duka, Senior Lecturer of the Department of Materials Science and Technology of Metals, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), valentina.duka.92@mail.ru

Lyudmila P. Aref'eva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Science and Technology of Metals, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), ludmilochka529@mail.ru

Claimed Contributorship:

VV Duka: conceptualization, formal analysis, investigation, validation, visualization, writing – original draft preparation.

LP Aref'eva: conceptualization, data curation, methodology, resources, supervision, writing – review & editing.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 10.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 30.06.2025

Принята к публикации / Accepted 14.07.2025