

УДК 004.9+539.422; 620.186:004.855.5

Прогнозирование механических свойств и устойчивости структуры металлических систем на основе искусственного интеллекта и фрактального анализа*

Ю.Г. Кабалдин, Г.Н. Гаврилов, М.С. Аносов, А.А. Башков

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Predicting mechanical properties and structural stability of metallic systems using artificial intelligence and fractal analysis

Y.G. Kabaldin, G.N. Gavrilov, M.S. Anosov, A.A. Bashkov

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev

Предложена комплексная методология прогнозирования механических свойств и оценки структурной устойчивости металлических систем на основе синтеза фрактального анализа микроструктуры и методов искусственного интеллекта. Используя обширную базу экспериментальных данных по микроструктуре углеродистых сталей (включая стали марок 20, У8, У10А и др.), полученных с применением оптической и электронной микроскопии, разработано и апробировано программное обеспечение для автоматизированного расчета фрактальной размерности D_f цифровых изображений микроструктур. Показано, что параметр D_f коррелирует с такими характеристиками, как содержание углерода, вид термообработки, средний размер зерна и степень структурной неоднородности, что позволяет использовать его в качестве чувствительного индикатора изменений, связанных с фазовыми превращениями и процессами разупрочнения. На основе этих данных обучена нейронная сеть, способная по входному изображению микроструктуры предсказывать фрактальную размерность, средний размер зерна и модуль сдвига. Установлено, что у структурно-устойчивых состояний (например, после отпуска) значения D_f меньше, чем у метастабильных (например, закаленных) структур. Предложенный подход демонстрирует высокий потенциал для применения в цифровом материаловедении, в том числе для автоматизированного контроля качества металлов, диагностики обезуглероженных слоев и разработки новых материалов с заданными свойствами.

EDN: VDUDBT, <https://elibrary/vdudbt>

Ключевые слова: искусственный интеллект, фрактальный анализ, прогнозирование свойств, фрактальная размерность, нейронные сети, углеродистые стали

This paper presents an integrated methodology for predicting mechanical properties and assessing structural stability of metallic systems through the synergistic application of fractal analysis and artificial intelligence. Leveraging an extensive experimental dataset comprising microstructural images, morphological characteristics, and mechanical properties of carbon steels — including grades 20, U8, U10A, and others — acquired via optical and electron mi-

* Работа выполнена в рамках гранта №25-19-00534 от 29.05.2025 г.

croscopy, the authors developed specialized software for automated computation of the fractal dimension D_f from digital micrographs. The results demonstrate that D_f exhibits strong correlation with key material parameters such as carbon content, heat treatment condition, average grain size, and degree of structural heterogeneity. Consequently, D_f serves as a sensitive quantitative indicator of phase transformations and degradation processes. A neural network was trained on this dataset to predict, from a given microstructure image, the fractal dimension, average grain size, and shear modulus. Notably, structurally stable states — such as those achieved after tempering — consistently correspond to lower D_f values compared to metastable conditions like as-quenched martensite. The proposed approach holds significant promise for applications in digital materials science, including automated quality control, detection of decarburized layers, and the design of advanced metallic materials with tailored properties.

EDN: VDUDBT, <https://elibrary/vdudbt>

Keywords: artificial intelligence, fractal analysis, property prediction, fractal dimension, neural networks, carbon steels

Для количественной оценки структурных изменений в металлических материалах в ходе их деформирования и разрушения, а также при описании этих процессов, кроме общепринятых структурных параметров — предела прочности σ_b и условного предела текучести $\sigma_{0.2}$ [1] и современных методик исследований (электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа, акустической эмиссии и др.), возникает необходимость разработки новых критериев [2–10], которые смогли бы учесть особенности взаиморасположения структурных элементов и их влияние на прочность материалов [2].

Традиционно микроструктурный анализ металлов и сплавов проводят на основе анализа размеров структурных составляющих и их объемной доли с использованием методов стереометрической металлографии. Однако при наличии даже двух фаз они могут иметь различную морфологию, что требует дополнительных параметров для микроструктурного анализа [2].

Недостаток описания микроструктур на основе плотностей дефектов связан с тем, что для большинства микроструктур этот показатель не определяет поведение материала под нагрузкой. Кроме того, в процессе эволюции системы происходит и эволюция самого дефекта, сопровождающаяся изменением евклидовой размерности и энергии дефекта. По современным представлениям, невозможно установить однозначную связь плотности дефектов с комплексом физико-механических свойств металла. Поэтому в ряде работ для этих целей использованы фрактальные представления [11].

По определению Б. Мандельброта [7] фрактал — структура, состоящая из частей, в каком-то смысле подобных себе. Иначе говоря, фракталы обладают масштабной инвариантностью или скейлингом, т. е. каждый элемент несет информацию о целом. Фрактальные свойства обнаружены у различных объектов как естественного происхождения, так и искусственного. Для поверхностей ряда материалов фрактальные свойства проявляются, начиная с атомных масштабов, и охватывают пространственные масштабы в диапазоне нескольких порядков. Основной характеристикой фрактала является его пространственная размерность, которая может быть дробной величиной. Теоретические основы применения фрактального подхода для описания связи микроструктуры и макроскопических свойств материалов заложены в работе [12].

В настоящее время имеются отдельные труды [3–8] по распознаванию и классификации микроструктуры металлов с применением искусственного интеллекта (ИИ) и фрактального анализа, в том числе для прогнозирования их механических свойств. Известно, что на структуру металла и его свойства влияет большое число различных факторов, вследствие чего использование ИИ оказывается особенно эффективным математическим аппаратом.

Для этой цели необходима информация об известных материалах, которая должна быть представлена в виде базы данных (БД) свойств материалов в исходном состоянии [9] при различных температурах, нагрузках и т. д. Исходную информацию для металлов можно взять из стандартов, в том числе государственных,

а также из результатов собственных экспериментальных исследований и других авторов.

Цель работы — рассмотреть возможность прогнозирования структурной устойчивости и механических свойств металлов, исходя из условий их эксплуатации с использованием подходов ИИ и фрактального анализа на основе накопленных экспериментальных данных по исследованию структур большого числа металлов, их морфологических характеристик и механических свойств.

Методы и программное обеспечение для фрактального анализа микроструктур. Структура искусственной нейронной сети показана на рис. 1. Здесь на вход подано электронное изображение уже известных структур (из БД). На выходе: D_f — фрактальная размерность искомой новой структуры; d_{cp} — средний размер зерна и модуль сдвига G .

Обучение нейронной сети проведено в среде MatlabR2021b на основе морфологических и механических характеристик рассматриваемых известных металлов (в БД). По результатам обучения нейронной сети получены зависимости, в частности фрактальной размерности от среднего размера зерна прогнозируемой структуры нового металла.

Для оценки среднего размера зерна d_{cp} новой микроструктуры, его фрактальной размерности

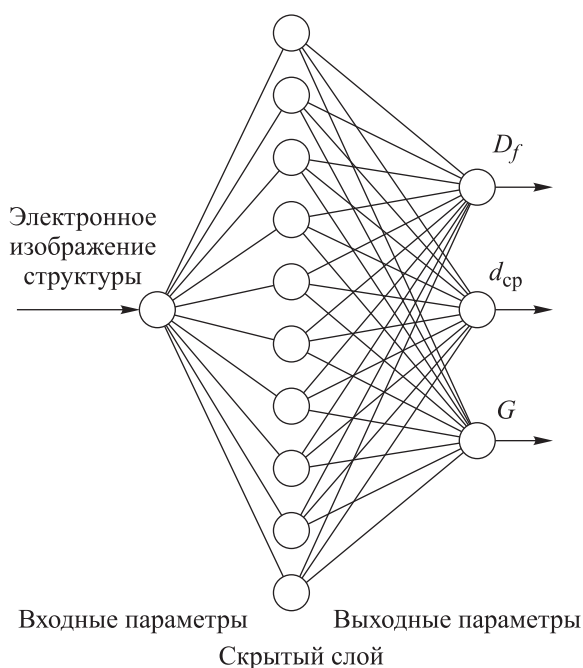


Рис. 1. Структурная схема нейронной сети для определения фрактальной размерности и механических свойств новой структуры

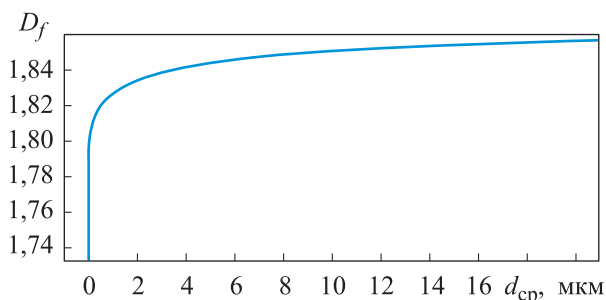


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности D_f от среднего размера зерна d_{cp} в металлах

сти D_f , которая выступает дополнительным количественным показателем анализа микроструктур разработано программное обеспечение (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2024660065 от 02.05.2024).

Эта программа позволяет по загруженному в нее цифровому изображению микроструктуры металла применить ряд фильтров, чтобы повысить четкость, контрастность и выполнить бинаризацию. По обработанному изображению программа рассчитывает фрактальную размерность D_f клеточным методом, выделяет зерна и вычисляет их средний размер.

Зависимость фрактальной размерности D_f от среднего размера зерна d_{cp} в металлах приведена на рис. 2. Видно, что с увеличением среднего размера зерна фрактальная размерность возрастает, а устойчивые структуры находятся в пределах $1 \leq D_f \leq 2$.

Оценка фрактальной размерности и свойств углеродистых сталей по цифровым изображениям. Современные металлографические микроскопы позволяют рассматривать непрозрачные тела в отраженном свете. В этом его основное отличие от биологического микроскопа. Изучение микроструктуры целесообразно начинать с рассмотрения микрошлифа в не травленном виде, т. е. непосредственно после полирования, промывания и высушивания. Процедуры подготовки, травления и анализа микрошлифов выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 34473–2018 [13].

При исследовании шлифов можно обнаружить на светлом поле темные или серые точки и линии, которые могут представлять собой неметаллические включения. В сталях выявляются оксиды, сульфиды, шлаки, силикаты и другие дефекты металлургического производства, а в чугунах — графитные включения. Неме-

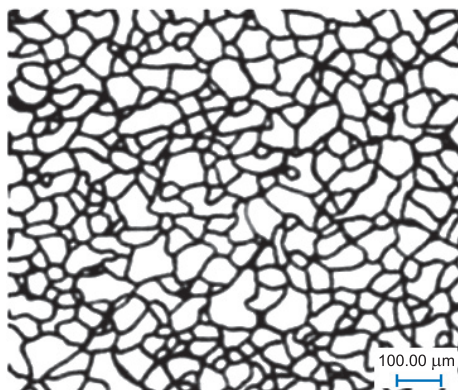


Рис. 3. Микроструктура феррита при увеличении $\times 100$

таллические включения имеют иной коэффициент отражения, чем основной металл.

Для характеристики стали по степени ее загрязнения неметаллическими включениями применяют шкалу баллов. Выявление микроструктуры металлов основано на неравномерном растворении в реактиве деталей структуры (структурных составляющих). В чистом металле границы зерен растравливаются сильнее, чем их тела. В результате на границах зерен после травления образуются углубления, которые рассеивают (гасят) лучи света, и потому при рассмотрении структуры под микроскопом они наблюдаются в виде темных линий. Например,

микроструктура однофазного сплава — феррита [14] — показана на рис. 3.

В сплавах неоднородные структурные составляющие также обладают неодинаковой растворимостью, вследствие чего на поверхности шлифа образуется определенный рельеф разной глубины (рис. 4, а). Зерна перлита, представляющие собой смесь пластинок феррита и цементита, протравливаются сильнее, чем однородные зерна феррита. Свет по-разному отражается от тех и других зерен, зерна феррита выглядят под микроскопом светлыми, а зерна перлита темными (рис. 4, б).

Рассмотрим возможность применения фрактального анализа к наиболее изученным структурам в углеродистых сталях.

Зависимости фрактальной размерности структур углеродистой стали D_f от содержания углерода в сплаве при увеличении $\times 200$, $\times 500$ и $\times 1000$ приведены на рис. 5, а–в, где точки — значения D_f ; линия — аппроксимирующая функция. Видно, что увеличение $\times 200$ нельзя рекомендовать для оценки фрактальной размерности, что предположительно связано с тем, что при таком приближении на D_f в большей степени влияют макропараметры, такие как включения, трещины, повреждения, а не особенности зеренной структуры. При увеличении $\times 500$ и $\times 1000$ наблюдается стойкое увеличение

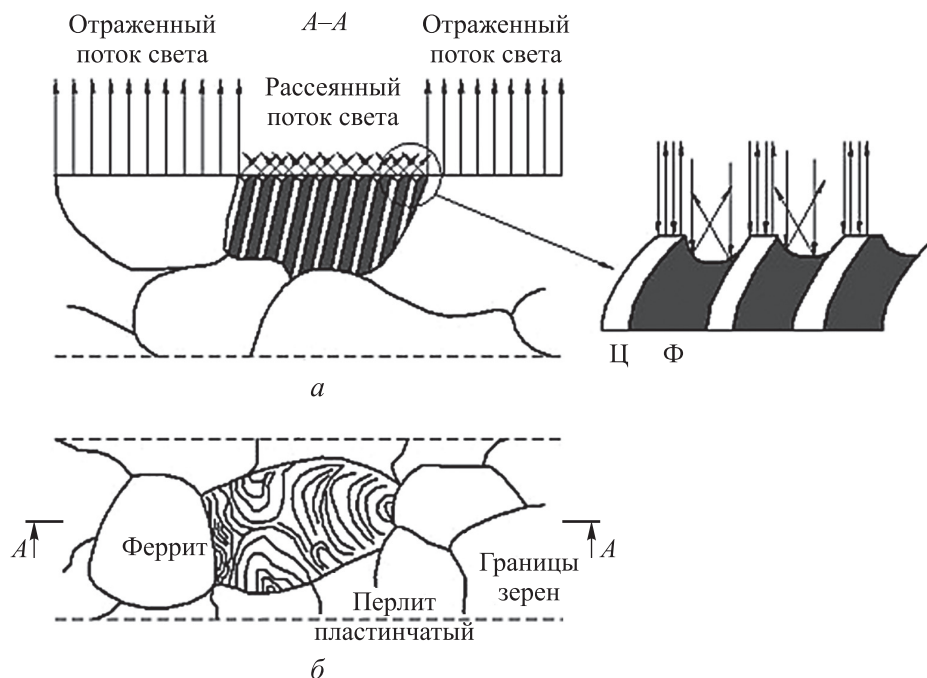


Рис. 4. Схема отражения потока света в неоднородном феррито-перлитном сплаве (а) и его микроструктура под микроскопом (б):

Ц — пластина цементита в перлите (светлая); Ф — пластина феррита в перлите (темная)

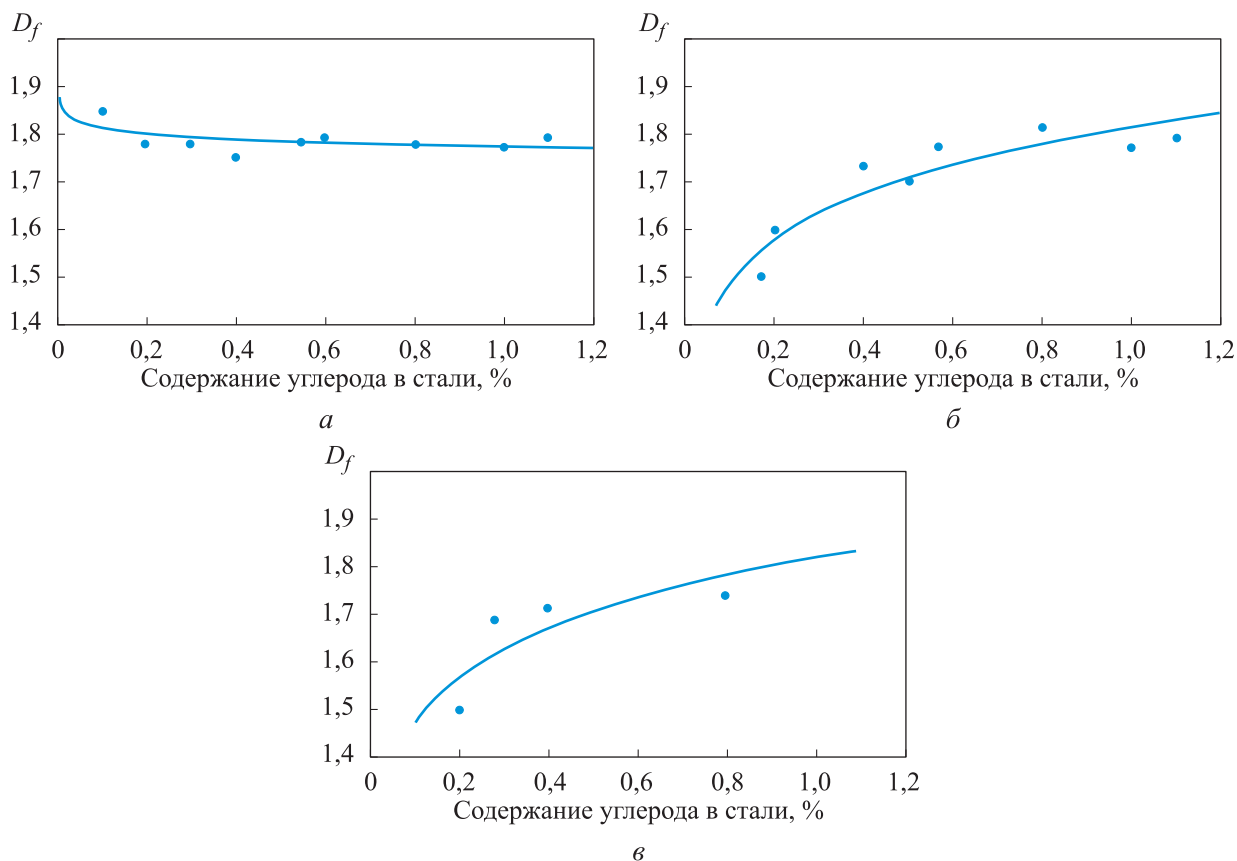


Рис. 5. Зависимости фрактальной размерности D_f углеродистой стали от содержания в ней углерода при увеличении $\times 200$ (*a*), $\times 500$ (*б*) и $\times 1000$ (*в*)

фрактальной размерности от содержания углерода.

Это обусловлено возрастанием количества перлита в сплаве при увеличении количества углерода в стали. Так как структура перлита, по сравнению с ферритом, более сложна при визуальном наблюдении, при росте углерода в стали значение фрактальной размерности повышается. Выявленное свойство параметра фрактальной размерности D_f можно эффективно использовать для определения обезуглероженных участков при автоматизированном сравнительном анализе образцов металла.

Влияние термообработки на фрактальную размерность и структурную устойчивость. Зависимости фрактальной размерности D_f от вида термообработки показаны на рис. 6. Для их построения были обработаны цифровые изображения, полученные во время структурных превращений мартенсита в стали У8 при нагреве [9]. Учитывая зависимость, приведенную на рис. 6, можно полагать, что при низком значении фрактальной размерности металл ведет

себя более устойчиво, так как фрактальная размерность является низкой.

Высокие значения D_f свидетельствуют о низкой структурной устойчивости металла в состоянии закалки. Для проверки изложенного заключения проведен сравнительный анализ

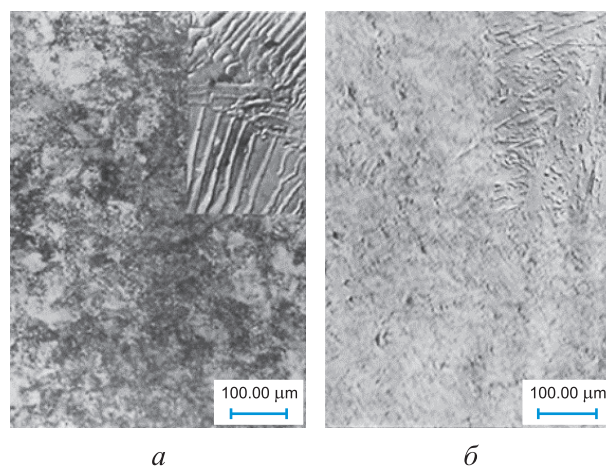
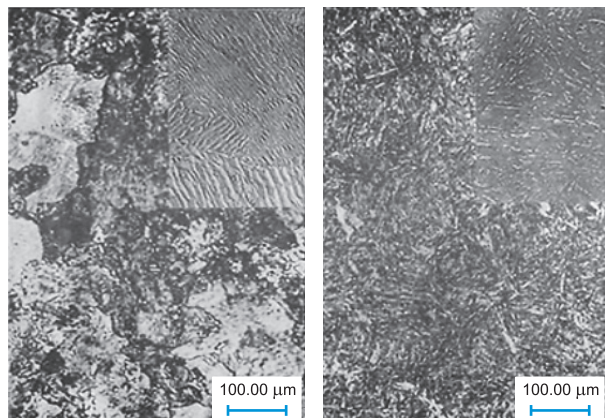


Рис. 6. Микроструктура стали У8 при увеличении $\times 400$:
a — сорбит закалки, $D_f = 1,9044$;
б — сорбит отпуска, $D_f = 1,71732$



а *б*
Рис. 7. Микроструктура стали У8
при увеличении $\times 400$:
а — троостит закалки, $D_f = 1,8957$;
б — троостит отпуска, $D_f = 1,7944$

одинаковых микроструктур в разных состояниях (закалки и отпуска). При этом известно, что микроструктуры отпуска считаются более стабильными, чем структуры закалки.

Анализ показал, что сорбит закалки имеет более высокую фрактальную размерность, чем сорбит отпуска. Следовательно, отпуск повышает устойчивость структуры сорбита. Подоб-

ная тенденция снижения фрактальной размерности при переходе от метастабильных структур к равновесным подтверждена и в независимых исследованиях [15].

Микроструктура стали У8 показана на рис. 7, *а* и *б*, где видно, что троостит отпуска имеет более низкую фрактальную размерность, чем троостит закалки.

Выводы

1. Анализ микроструктур показал, что при использовании параметра фрактальной размерности для оценки устойчивости структуры требуется большое число цифровых изображений, которые должны быть получены на одном устройстве при соответствующем увеличении, иначе этот параметр будет ошибочным.

2. Проведены исследования зависимости фрактальной размерности от балла зерна с использованием эталонных шкал. Изображения эталонов микроструктур были взяты из приложения к государственному стандарту [14]. Применение эталонных микроструктур должно повысить точность определения фрактальной размерности.

Литература

- [1] Гуляев А.П. *Металловедение*. Москва, Металлургия, 1986. 544 с.
- [2] Потапов А.А. *Новейшие методы обработки изображений*. Москва, Физматлит, 2008. 496 с.
- [3] Уэлстид С. *Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии*. Москва, Изд-во Триумф, 2003. 320 с.
- [4] Мандельброт Б.Б. *Фрактальная геометрия природы*. Москва, ИКИ, 2002. 656 с.
- [5] Бондарь А.С., Стрельцова О.В., Чмиленко Ф.В. Исследование предсказания свойств сталей с помощью искусственных нейронных сетей. *Наука и инновации в технических университетах. Мат. 13 Всерос. форума студентов, аспирантов и молодых ученых*. Санкт-Петербург, СПбПУ, 2019, с. 5–7.
- [6] Емельянов В.А., Феклин Г.В., Емельянова Н.Ю. Применение технологий искусственного интеллекта для оценки качества металлов на производстве. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*, 2022, т. 24, № 5, с. 28–35, doi: <https://doi.org/10.18127/j19998554-202205-03>
- [7] Ковун В.А., Каширина И.Л. Использование нейронных сетей U-Net и W-Net в металлографическом анализе образцов стали. *Вестник ВГУ. Сер. Системный анализ и информационные технологии*, 2022, № 1, с. 101–110, doi: <https://doi.org/10.17308/sait.2022.1/9205>
- [8] Соболева Н.Н. Применение нейронных сетей для анализа микроструктуры металлов. *Перспективные материалы*, 2022, № 5, с. 34–41.
- [9] Горбенко О.М., Фельштын М.Л., Усачев Д.Ю. и др. Автоматическое распознавание структур ферритно-перлитных сталей по изображениям, полученным методом атомно-силовой микроскопии. *Научное приборостроение*, 2012, т. 22, № 4, с. 62–71.
- [10] Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж. и др. *Синергетика и фракталы в материаловедении*. Москва, Наука, 1994. 383 с.

- [11] Кабалдин Ю.Г. *Введение в цифровое материаловедение*. Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2025. 226 с.
- [12] Dai Q., Liu X., Ma X. et al. Research status and prospects of the fractal analysis of metal material surfaces and interfaces. *Int J Miner Metall Mater.*, 2025, vol. 32, pp. 20–38, <https://doi.org/10.1007/s12613-024-2961-1>
- [13] ГОСТ 34473–2018. *Стали углеродистые и легированные. Методы определения микроструктуры*. Москва, Стандартинформ, 2018. 24 с.
- [14] ГОСТ 8233–56. *Сталь. Эталоны микроструктуры*. Москва, Изд-во стандартов, 2004. 13 с.
- [15] Vadavadi B.H., Bhujle H.V., Khatirkar R.K., Shekhawat S.K. Microstructural correlation with formability aspects of low carbon steels during deep drawing operations. *Materials Characterization*, 2021, vol. 178, art. 111267, doi: 10.1016/j.matchar.2021.111267

References

- [1] Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metal science]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 544 p. (In Russ.).
- [2] Potapov A.A. *Noveyshie metody obrabotki izobrazheniy* [Newest methods of image processing]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 496 p. (In Russ.).
- [3] Welstead S. *Fractal and wavelet image compression techniques*. SPIE Press, 1999. 232 p. (Russ. ed.: *Fraktaly i veyvlety dlya szhatiya izobrazheniy v deystvii*. Moscow, Izd-vo Triumf, 2003. 320 p.)
- [4] Mandelbrot B. *The fractal geometry of nature*. Times Books, 1982. 468 p. (Russ. ed.: *Fraktalnaya geometriya prirody*. Moscow, IKI Publ., 2002. 656 p.)
- [5] Bondar A.S., Streltsova O.V., Chmilenko F.V. [A study on predicting steel properties using artificial neural networks]. *Nauka i innovatsii v tekhnicheskikh universitetakh. Mat. 13 Vses. foruma studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Science and Innovation in Technical Universities. Proc. 13th Russ. Forum of Students, Graduate Students, and Young Scientists]. Sankt-Peterburg, SPbPU Publ., 2019, pp. 5–7. (In Russ.).
- [6] Emelyanov V.A., Feklin G.V., Emelyanova N.Yu. Application of artificial intelligence technologies to assess the quality of metals in a metallurgical production. *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye* [Neurocomputers], 2022, vol. 24, no. 5, pp. 28–35, doi: <https://doi.org/10.18127/j19998554-202205-03> (In Russ.).
- [7] Kovun V.A., Kashirina I.L. Usage of u-net and w-net neural network architectures for steel samples metallographic analysis. *Vestnik VGU. Ser. Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Proceedings of Voronezh State University. Ser. Systems Analysis and Information Technologies], 2022, no. 1, pp. 101–110, doi: <https://doi.org/10.17308/sait.2022.1/9205> (in Russ.).
- [8] Soboleva N.N. Application of neural networks for metal microstructure analysis. *Perspektivnye materialy*, 2022, no. 5, pp. 34–41. (In Russ.).
- [9] Gorbenko O.M., Felshtyn M.L., Usachev D.Yu. et al. Automatic recognition of the structures of ferritic-pearlitic steels on the images, obtained by the method of atomic-force microscopy. *Nauchnoye priborostroenie*, 2012, vol. 22, no. 4, pp. 62–71. (In Russ.).
- [10] Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh. et al. *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii* [Synergetics and fractals in materials science]. Moscow, Nauka Publ., 1994. 383 p. (In Russ.).
- [11] Kabal'din Yu.G. *Vvedenie v tsifrovoe materialovedenie* [Introduction to digital materials science]. Nizhniy Novgorod, NGTU im. R.E. Alekseeva Publ., 2025. 226 p. (In Russ.).
- [12] Dai Q., Liu X., Ma X. et al. Research status and prospects of the fractal analysis of metal material surfaces and interfaces. *Int J Miner Metall Mater.*, 2025, vol. 32, pp. 20–38, <https://doi.org/10.1007/s12613-024-2961-1>
- [13] GOST 34473–2018. *Stali uglerodistye i legirovannye. Metody opredeleniya mikrostruktury* [Pipeline valves. Steel all-welded ball valves for water heat networks. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 24 p. (In Russ.).
- [14] GOST 8233–56. *Stal. Etalony mikrostruktury* [Steel. Microstructure standards]. Moscow, Izd-vo standartov, 2004. 13 p. (In Russ.).

- [15] Vadavadagi B.H., Bhujle H.V., Khatirkar R.K., Shekhawat S.K. Microstructural correlation with formability aspects of low carbon steels during deep drawing operations. *Materials Characterization*, 2021, vol. 178, art. 111267, doi: 10.1016/j.matchar.2021.111267

Статья поступила в редакцию 23.01.2026

Информация об авторах

КАБАЛДИН Юрий Георгиевич — заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения». Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (603155, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: uru.40@mail.ru).

ГАВРИЛОВ Геннадий Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов». Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (603155, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: gavrilo1109@mail.ru).

АНОСОВ Максим Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения». Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (603155, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: anosov-maksim@list.ru).

БАШКОВ Андрей Алексеевич — старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроения». Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (603155, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: bashkov.aa@nntu.ru).

Information about the authors

KABALDIN Yuriy Georgievich — Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Machine Building Technology and Equipment. Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: uru.40@mail.ru).

GAVRILOV Gennady Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Materials Science, Materials Technology and Metal Heat Treatment. Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603155, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: gavrilo1109@mail.ru).

ANOSOV Maksim Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Machine Building Technology and Equipment. Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: ansv-maksim@rambler.ru).

BASHKOV Andrey Alekseevich — Senior Lecturer, Department of Machine Building Technology and Equipment. Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: bashkov.aa@nntu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кабалдин Ю.Г., Гаврилов Г.Н., Аносов М.С., Башков А.А. Прогнозирование механических свойств и устойчивости структуры металлических систем на основе искусственного интеллекта и фрактального анализа. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 4, с. 66–73.

Please cite this article in English as:

Kabaladin Y.G., Gavrilov G.N., Anosov M.S., Bashkov A.A. Predicting mechanical properties and structural stability of metallic systems using artificial intelligence and fractal analysis. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 4, pp. 66–73.