

ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРЫ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ, ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА И НЕЙРОНСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Башков А.А., Кротиков Д.В., Высоколов В.В.
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород

Ключевые слова: металлы, база известных структур, механические свойства, нейронносетевое моделирование, фрактальный анализ, новые структуры металлов, заданные свойства.

Аннотация. Повышение надежности машин и конструкций в современном производстве, обуславливает необходимость применения новых материалов с заданными свойствами. Особый интерес представляет разработка и прогнозирование устойчивости новых структур с заданными свойствами, путем анализа цифровых изображений известных материалов и их структуры, при последующем нейронносетевом моделировании.

DIAGNOSTICS OF THE STRUCTURE OF NEW MATERIALS AND PREDICTION OF THEIR MECHANICAL PROPERTIES BASED ON APPROACHES OF NONLINEAR DYNAMICS, FRACTAL ANALYSIS AND NEURAL NETWORK MODELING

Kabaldin Yu.G., Nosov M.S., Bashkov A.A., Krotkov D.V., Sokolov V.V.
Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod

Keywords: metals, base of known structures, mechanical properties, neural network modeling, fractal analysis, new metal structures, specified properties.

Abstract. Increasing the reliability of machines and structures in modern production necessitates the use of new materials with specified properties. Of particular interest is the development and prediction of the stability of new structures with specified properties, by analyzing digital images of known materials and their structure, with subsequent neural network modeling.

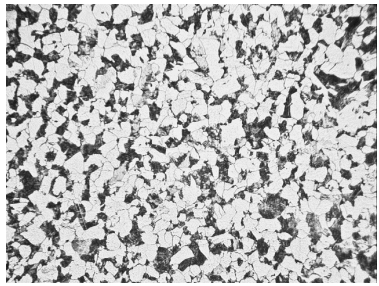
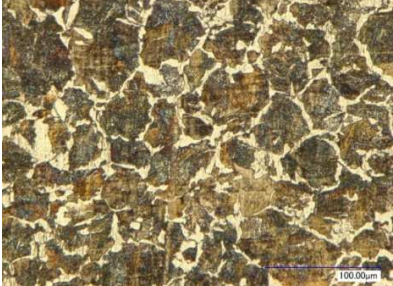

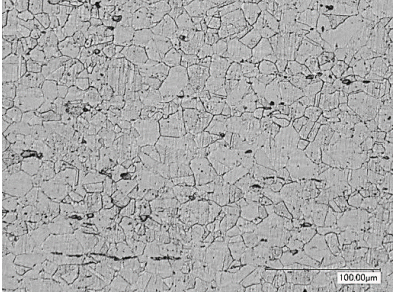
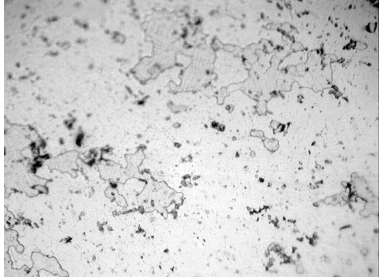
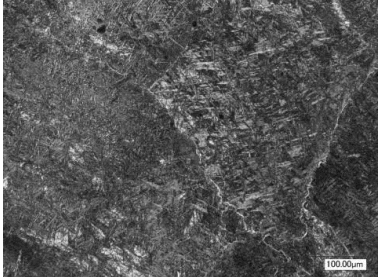
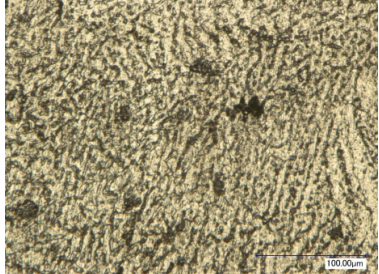
В таблице 1 представлен ряд цифровых изображений структур хорошо изученных металлов. Была проведена также оценка их морфологических и механических характеристик.

Параметрами, характеризующими устойчивость структурного состояния металлов, на основе подходов нелинейной динамики, являются D_F фрактальная размерность и S_H информационная энтропия [1]. В ряде работ [2, 4] показана связь механических свойств различных металлов с величиной их D_F фрактальной размерности.

Параметр D_F , по отношению к металлам, как к динамическим системам, будет характеризовать их структурную устойчивость [1]. В частности, он будет определять число степеней свободы, т.е. возможных перемещений зерен в структуре в процессе деформации. Обычно он ниже двух, т.е. возможно двухмодовое движение. Поэтому, чем ниже фрактальная размерность структуры, тем структура металла более устойчивая к деформациям. Изрезанные границы

(табл. 1) зерен также фрактальны [3] и характеризуются дробной размерностью от $2 \leq D_F \leq 3$.

Табл. 1. Цифровое изображение структур металлов

Металл	Микроструктура металла	Металл	Микроструктура металла
Сталь 20		Сталь 45	
09Г2С		12Х18Н10Т	
Д16		ВТ8	
АМг5			

Экспериментальная оценка фрактальной размерности рассматриваемых металлов (табл. 1) показала, что она также находится в этих же пределах, т.е. соблюдается соотношение $2 \leq D_F \leq 3$. На основе анализа результатов оценки указанных параметров, установлено, что наименьшей фрактальной размерностью, обладает нержавеющая сталь 12Х18Н10Т.

В таблице 2 приведены экспериментальные данные исследований вязкости разрушения (KCV) ряда металлов и их исходной фрактальной размерности – D_F по электронным изображениям (табл. 1).

Как следует из таблицы 2, наименьшая фрактальная размерность наблюдается у стали 12Х18Н10Т, однако значения ее ударной вязкости (KCV) наибольшие. Следовательно, чем выше величина ударной вязкости, тем меньше

фрактальная размерность, и тем выше устойчивость структурного состояния металла и значения ударной вязкости.

Табл. 2. Фрактальная размерность исходной структуры металлов и их ударная вязкость

Металл	D_f , исходной структуры	KCV, Дж/см ²
Сталь 12Х18Н10Т	1,714	310
ВТ8	1,793	50
D16	1,739	20

На основе, накопленных нами экспериментальных данных по исследованию известных структур широкого круга металлов, их морфологических характеристик и механических свойств, рассмотрим возможность прогнозирования новых структур металлов с заданными свойствами, исходя из условий их эксплуатации с использованием подходов искусственного интеллекта и фрактального анализа.

На рисунке 1 показана нейронная сеть, где на ее вход подается электронное изображение уже известных структур (табл. 1). На выходе – фрактальная размерность искомой новой структуры, характеризующая ее устойчивость и заданные свойства, в частности, рассчитываются наиболее важные показатели - средний размер зерна и модуль сдвига.

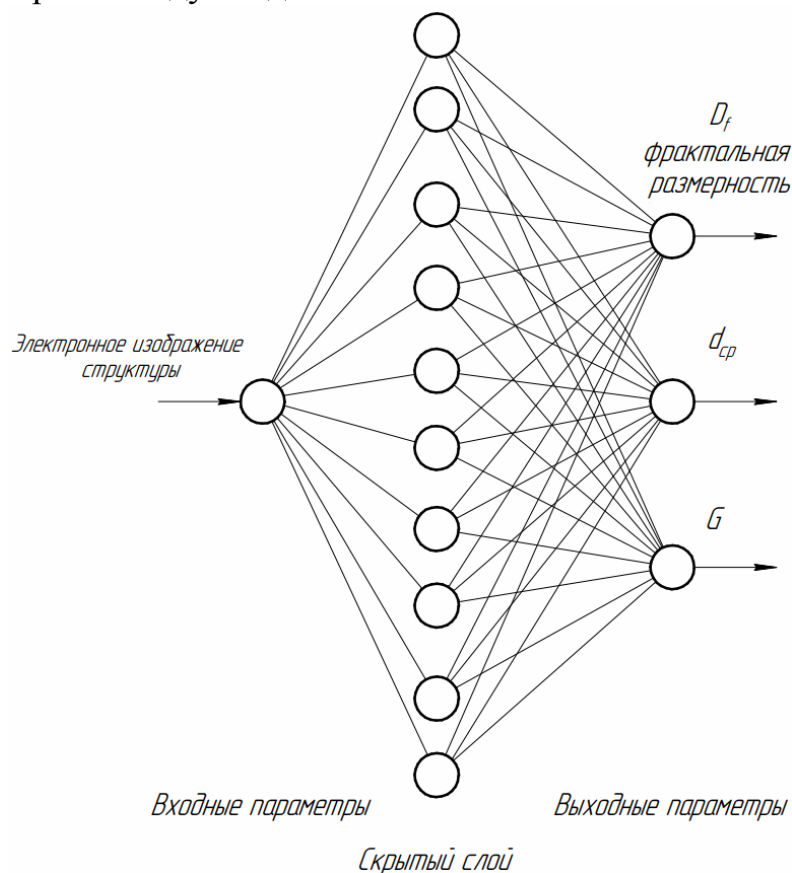


Рис. 1. Нейронная сеть для определения фрактальной размерности и механических свойств новой структуры

Обучение нейронной сети проводилось в среде Matlab R2021b, на основе морфологических и механических характеристик рассматриваемых известных металлов (табл. 1). По результатам обучения нейронной сети, получено ряд зависимостей, в частности, зависимостей D_F от размера зерна и модуля сдвига.

На рисунке 2 представлена зависимость фрактальной размерности от d среднего размера зерна и модуля сдвига – G . Средний размер зерен структуры металла, является одним из важных параметров, определяющим его механические характеристики. Анализ рисунка 2, показывает, что существенное влияние на фрактальные свойства металлов, а следовательно, и на их механические характеристики, оказывают малые величины зерен [10-13] структурных элементов, упрочняющих основную фазу, например, цементит Fe_3C в α -железе углеродистых сталей.

Структурные изменения, порождаемые внешним воздействием, обусловлены движением отдельных частиц (зерен). Увеличение при этом у них числа степеней свободы приводит к качественному изменению их динамики. Оценка фрактальной размерности, позволяет определить число переменных (мод), формирующих режим пластического течения металла. В этой связи, можно утверждать, что рост структурной неустойчивости при внешнем воздействии, обусловлен двухмодовым движением зерен из-за роста числа степеней свободы частиц ($D_F > 1$).

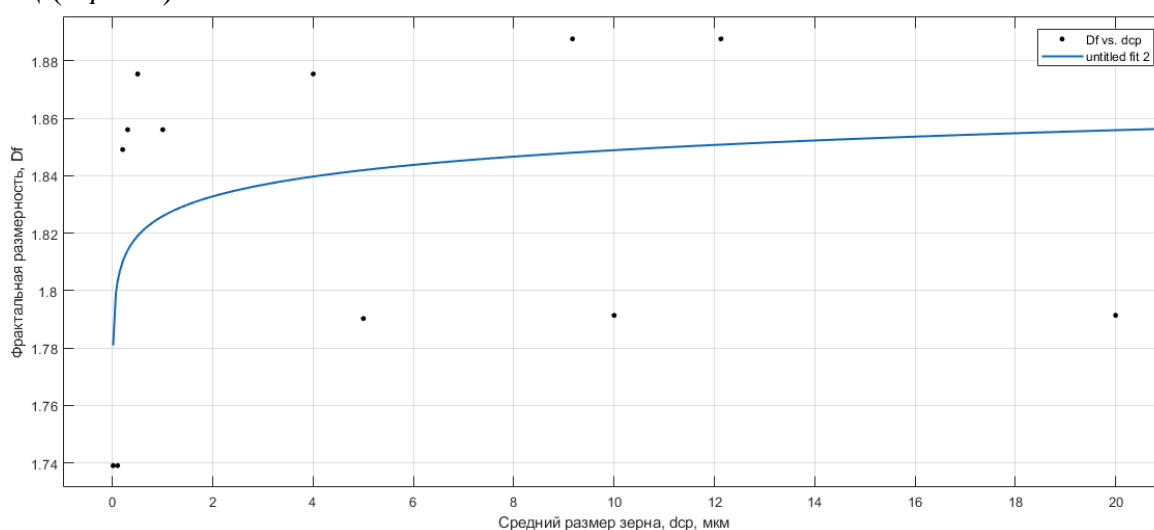


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности от среднего размера зерна в металлах

В частности, в углеродистых сталях [10-13], размеры цементита находятся в диапазоне 5...15 нм, а средний размер феррита составляет порядка 13 мкм (по ГОСТ 5639, балл зерна по ГОСТ 5639-829-10).

На рисунке 3 приведена электронная микрофотография (рис. 3,а), полученная нами при анализе структуры стали 20, где можно видеть размер зерен феррита и зерен карбидов железа, которые согласуется с результатами оценки размеров этих структурных элементов в углеродистых сталях [10-13].

Поэтому с увеличением размера зерен, прежде всего, упрочняющей фазы, фрактальная размерность растет (рис. 2), т.е. структурная устойчивость металла снижается.

Это связано с тем, что твердые частицы (зерна карбидов, нитридов) при деформации могут раскалываться и выступать очагами начальных субмикротрещин (рис. 4).

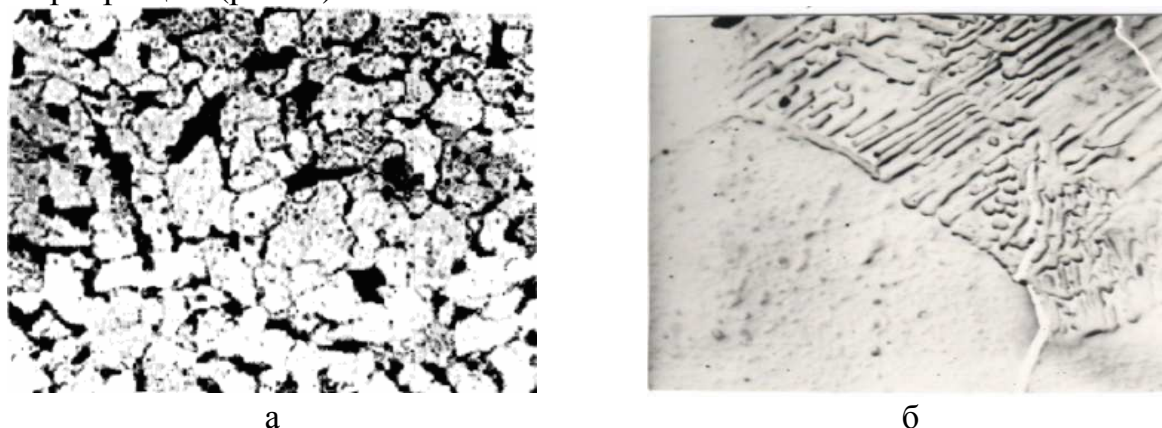


Рис. 3. Микрофотографии структуры стали 20: а) исходная микроструктура (x 300); б) исходная микроструктура (x 3000)

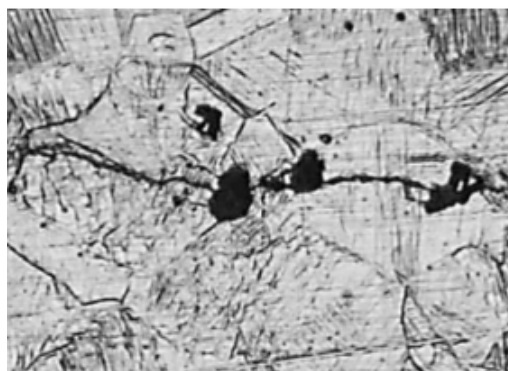


Рис. 4. Микрофотография, иллюстрирующая рост микротрещин при раскалывании твердых частиц в аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T (x3000)

В указанной аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T (рис. 4) размер зерен аустенита достигает 300 мкм, а размеры упрочняющих частиц (нитридов, карбидов легирующих элементов) – нескольких нанометров. Однако большие размеры, а также сегрегация твердых частиц в аустенитной стали (рис. 4), оказываются достаточными, чтобы их раскалывание вызывало развитие субмикротрещины.

В алюминиевых сплавах [14] средний размер зерен чистого алюминия достигает 1200 мкм, а упрочняющей фазы нескольких нм.

Таким образом, структурная устойчивость металлов в значительной степени определяется размером зерен упрочняющих частиц и их распределением в матрице основной структурной фазы. Одним из методов снижения среднего размера основы (матрицы) в металлах, является его модифицирование [1, 14, 15] в жидком состоянии, наночастицами.

На рисунке 5 показана зависимость фрактальной размерности от модуля сдвига. Видно, что с ростом G модуля сдвига, фрактальная размерность D_F снижается. Следовательно, при деформации металла, наибольшую способность противостоять сдвиговым нагрузкам, вплоть до разрушения, обладают металлы с большим значением модуля сдвига, благодаря росту прочности межатомной связи.

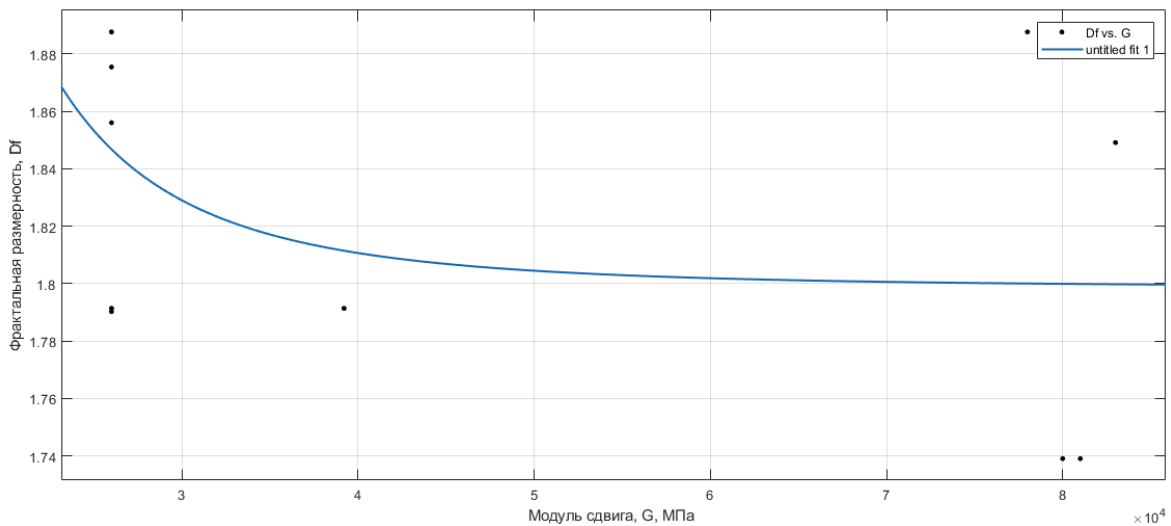


Рис. 5. Зависимость фрактальной размерности от модуля сдвига металлов

С дальнейшим ростом модуля сдвига металла, фрактальная размерность практически не изменяется, т.е. структурная устойчивость металлов достигает своего наибольшего значения, при G модуле сдвига равным $5,3 \cdot 10^4$ МПа.

Модуль сдвига [16] определяет прочность межатомных связей в поликристаллах и зависит от природы металла, его типа кристаллической решетки, систем скольжения и т.д. Сплавы с ОЦК решеткой обладают большими значениями G модуля сдвига, чем ГЦК.

В целом фрактальный анализ и нейронносетевое моделирование показало, что искомая структура в данном исследовании, должна быть близка по структуре к стали 12X18H10T, однако механические свойства оказывается иными.

По мнению экспертов, именно «интеллектуальные» технологии разработки новых материалов с заданными свойствами, определяют развитие как материаловедения, так и металлургических процессов XXI века.

Список литературы

1. Кабалдин Ю.Г. Научные основы управления макро- и микроструктурой металла заготовок, полученных аддитивным выращиванием, путем послойного нано- и дисперсного модифицирования для повышения механических характеристик изделий: монография. – Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексева, 2024. – 193 с.
2. Савенков Г.Г., Барахтин Б.К. Связь фрактальной размерности поверхности разрушения с комплексом стандартных характеристик материала на растяжение // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52, № 6. – С. 177-184.
3. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж. и др. Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 384 с.
4. Кузнецов П.В., Петракова И.В., Шрайбер Ю.В. Фрактальная размерность как характеристика усталости поликристаллов металлов // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7, № 1. – С. 389-392.
5. Сагарадзе В.В., Уваров А.И. Упрочнение и свойства аустенитных сталей. – Екатеринбург.: РИО УрО РАН, 2013. – 720 с.
6. Ким В.А., Башков О.В., Попкова А.А., Шпилёва А.А., Золотарёва С.В., Белова И.В., Емец Н.Е. Основы количественной и компьютерной металлографии: Учебное пособие. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2013. – 133 с.
7. Гадалов В.Н., Башков О.В., Ворначева И.В., Филонович А.В. Цифровая обработка изображений металлографических микроструктур в среде MATLAB. Методика // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). – 2015. – №12(21). – С. 43-46.

8. Галушкин А.И. Итоги развития многослойных нейронных сетей (1965-1995) в работах Научного центра нейрокомпьютеров и ее перспективы // Нейрокомпьютер. – 1996. – №5. – С. 5-23.
9. Потемкин В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети MATLAB 6. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
10. Корзников А.В., Корзникова Г.Ф. Зарипова Р.Г., Закирова А.А. Сверхпластичность сталей и сплавов на основе железа // Письма о материалах. –2012. – Т. 2. – С. 170-176.
11. Цементит в углеродистых сталях: коллектив, монография / под ред. В.М. Счастливецова. – Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2017. – 380с.
12. Халикова Г.Р., Шерматов Д.Н., Наумкин Е.А. Структура и механические свойства стали 09Г2С в кольцевой заготовке, изготовленной центробежным электрошлаковым литьем // Материаловедение и защита от коррозии. – 2020. – Т. 18, №5. – С.104-113.
13. Ганеев А.В. Особенности формирования сегрегаций и карбидов железа на границах зерен и механизмы упрочнения в ультрамелкозернистых углеродистых сталях, полученных интенсивной пластической деформацией кручением: Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – Уфа, 2019. – 20с.
14. Жуков И.А., Потекаев А.И., Ворожцов А.Б., Матвеев А.Е., Кудряшова О.Б. Влияние размеров вводимых в расплав частиц на измельчение зерна в конечной структуре алюминиевых сплавов // Известия Вузов. Физика. 2018. – Т. 61, №8. – С. 79-86.
15. Гаврилин И.В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов. – Владимир: Владимир. гос. универ., 2000. – 260 с.
16. Гольштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 312 с.

Сведения об авторах:

Кабалдин Юрий Георгиевич – д.т.н., профессор;

Аносов Максим Сергеевич – к.т.н.;

Башков Андрей Алексеевич – аспирант;

Кротиков Дмитрий Александрович – магистр;

Высоколов Виктор Владимирович – аспирант.