

Ю.А. Водолазский, А.И. Михалев, А.П. Клименко

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОШЛИФОВ КОЛЁСНЫХ СТАЛЕЙ

Аннотация. В работе вычислены мультифрактальные параметры серии микрошлифов колёсных сталей. Исследована взаимосвязь между структурой (мультифрактальные параметры) и свойствами сталей (твёрдость).

Ключевые слова: металловедение, фрактальная геометрия, мультифрактал, размерности Реньи.

Введение

Установление связей в цепи “состав - структура - свойство” металлических материалов является важнейшей задачей металловедения. Однако, несмотря на накопленный большой экспериментальный материал по исследованию влияния структуры на свойства, соотношения, выявляемые между свойствами и структурными характеристиками, в подавляющем большинстве случаев носят качественный характер.

В свою очередь классической является задача прогнозирования механических свойств стали по её фактическому химическому составу и данным металлографического анализа, который позволяет определить: размер зерна и его статистические характеристики (среднеквадратичное отклонение, асимметрия, эксцесс); долю избыточного феррита; балл пластинчатого перлита (средневзвешенный); долю бейнитной фазы и общую долю загрязненности неметаллическими включениями.

В данной работе предлагается вместо классического металлографического анализа использовать аппарат фрактальной геометрии для вычисления численных параметров (спектра мультифрактальных размерностей [1]), на основе которых предлагается прогнозировать механические свойства изучаемых материалов.

Анализ публикаций

В работе [2] рассматривается изучение фундаментальных механических свойств материалов, в том числе, и с помощью теории

фракталов. Моделированию металлических материалов с помощью фрактальных структур посвящена работа [3]. Использование мультифрактального анализа и определение численных параметров структур металлов и других материалов рассматривается в работах [4-6].

Постановка задачи

1. Определить с использованием мультифрактального анализа количественные параметры изображений микрошлифов образцов колесных сталей, из которых изготавливали колеса в серийном производстве.
2. Проанализировать взаимосвязь найденных мультифрактальных параметров с технологическими параметрами соответствующих образцов сталей.

Мультифрактальный анализ микрошлифов

Мультифрактальный анализ заключается в вычислении спектра размерности Реньи и мультифрактального спектра, а также проверке их корректности [1, 4-6]. Расчеты проводились с помощью авторского программного обеспечения MFMet [5,6].

Исходные данные

Обрабатывалось 96 образцов, соответствующих колесам различных типоразмеров и составов стали. В таблице 1 приведены интервалы варьирования содержания химических элементов (C, Mn, Si) и твёрдости, измерение которой проводилось в лабораторных условиях по шкале Бринелля на приборе ТШ-2М.

Таблица 1

Химические и технологические параметры исследуемых образцов

	C, %	Mn, %	Si, %	Твёрдость, НВ
Min	0,46	0,62	0,27	255
Max	0,68	0,81	0,41	345

Цифровые изображения поверхностей колёсных сталей, используемые для анализа, снимались в светлом поле зрения с использованием световых металлографических микроскопов “Epiqwant” и “Neofot-21”, модернизированных посредством установки цифровой видеокамеры «Panasonic NV-CS1» подключенной к компьютерному комплексу. Шлифы изготавливались по стандартной методике. Травление каждого образца производилось по отдельности и в новой пор-

ции травителя. Применяемые увеличения при световой микроскопии x500, x1000 крат.

Предварительная обработка изображений

Используемое программное обеспечение (MFMet) анализирует только бинарные изображения, поэтому необходима предварительная обработка цветных (яркостных) изображений, получаемых на микроскопе. Бинаризация с использованием порога яркости даёт много шумов и плохо выделяет границы зёрен (рисунок 1), что вносит погрешности в расчёты.

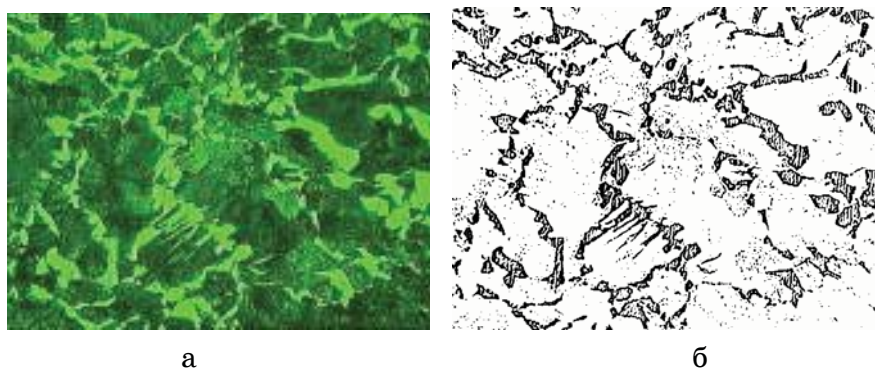


Рисунок 1 – Бинаризация с помощью порога яркости.

а – исходное изображение, б – бинарное

Предлагается получать бинарные изображения с помощью выделения границ зёрен по градиенту яркости с использованием различных фильтров, например Гаусса, Превита и Собеля (рисунок 2).

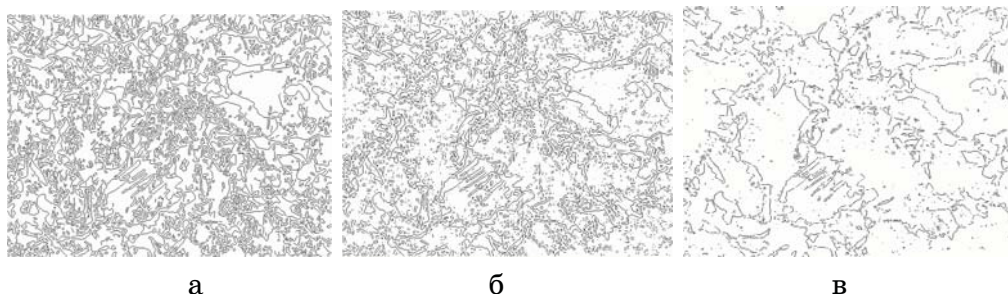


Рисунок 2 – Бинаризация выделением контрастных границ с помощью фильтров Гаусса (а), Превита (б) и Собеля (в)

Параметры фильтров подбирались таким образом, чтобы полученное изображение наиболее чётко отображало исходную структуру микрошлифа и содержало минимальное количество шума. В большинстве случаев это был фильтр Собеля с адаптивной настройкой параметров.

Оценивание результатов мультифрактального анализа

Для каждого изображения были рассчитаны мультифрактальный спектр и спектр размерностей Реньи [1, 4, 5]. Таким образом, для каждого изображения, а соответственно и для связанного с ним образца стали, получен целый ряд количественных характеристик, отражающих сложную, иррегулярную, самоподобную структуру его поверхности. При этом наиболее важными характеристиками выявились фрактальная, информационная, корреляционная размерности, оценки однородности и упорядоченности [4].

Значение твёрдости в исследуемой выборке принимало 12 значений от 255 НВ до 345 НВ. Изображения были разбиты на группы с одинаковыми значениями твёрдости соответствующих им образцов стали (см. таблицу 2).

Таблица 2

Группирование микрошлифов по значению твёрдости

Твёрдость, НВ	255	260	266	272	278	283	285	290	292	293	298	345
Количество микрошлифов	2	23	8	20	4	2	14	3	10	3	5	2

Ниже приведены графики для оценки упорядоченности $d = D_1 - D_{q_{Max}}$ (далее, mf-параметр). Анализ этого параметра показал, что его значения уменьшаются с увеличением твёрдости.

На рис. 3 приведены параметры распределения оценки упорядоченности для каждого значения твёрдости. В качестве центра распределения использовалась медиана, так как она более устойчива к выбросам, которые присутствуют в исходной выборке. По той же причине вместо дисперсии для оценивания разброса распределения в группе использовался интерквартильный размах.

Из рисунка 3 видно, что изображения, относящиеся к одной группе, имеют, как правило, близкие значения mf-параметров. К тому же, средние значения mf-параметра изменяются с изменением твёрдости так, что прослеживается линейная зависимость.

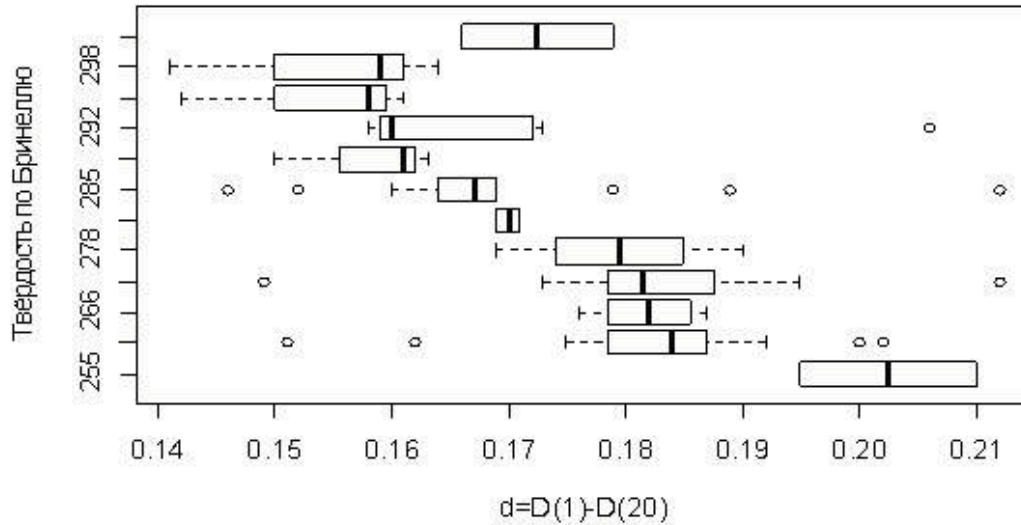


Рисунок 3 – Распределение мультифрактального параметра (оценка однородности) по значениям твёрдости. Прямоугольник показывает интерквартильный размах (IQR), вертикальная линия внутри прямоугольника – медиана, «усы» - точки, удалённые на полтора IQR. Отдельными точками показаны выбросы

Анализ распределений mf-параметра в группах позволил локализовать 12 выбросов, что составляет 12,5% от объёма исследуемой выборки. Наличие таких отклонений от основной массы измерений в отдельных случаях объясняются нечёткостью соответствующих им снимков или присутствию артефактов на поверхности микрошлифа. Полное же объяснение всех выбросов требует дополнительных исследований. Тем не менее, в данной работе все заключения о поведении mf-параметра сделаны, основываясь на выборке без учёта выбросов, которая приведена на рисунке 4.б. Поведение mf-параметра, соответствующее диапазону твёрдости 255 – 298 (НВ), можно описать линейной зависимостью. Коэффициент корреляции Пирсона между исследуемыми параметрами составляет $-0,84$, 95%-доверительный интервал $[-0.89, -0.76]$, что и подтверждает линейность зависимости между mf-параметром и твёрдостью. Это позволяет прогнозировать твёрдость стали в диапазоне 255 – 298 (НВ), измеряя mf-параметр по цифровому изображению микрошлифа.

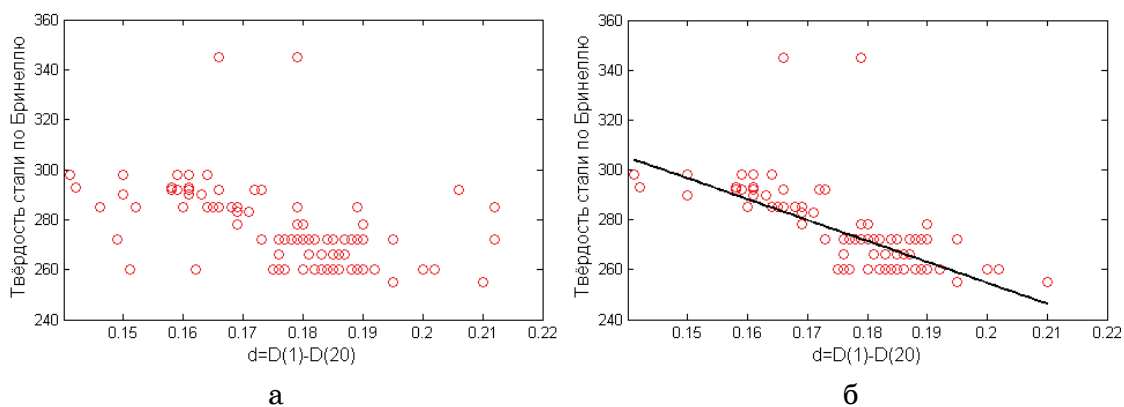


Рисунок 4 – Зависимость твёрдости образца микрошлифа от оценки однородности изображения его поверхности: а – исходная выборка, б – значения после удаления выбросов

Выводы

Для исследуемого набора микрошлифов колёсных сталей была изучена связь между мультифрактальным параметром, характеризующим структуру стали и её важнейшим механическим свойством – твёрдостью. Исследуемая выборка показала наличие линейной зависимости, что подтверждается проведённым корреляционным анализом. Это позволяет прогнозировать, в исследуемом диапазоне, значение твёрдости стали, основываясь только на расчёте мультифрактального параметра (оценки однородности) цифрового изображения микрошлифа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Harte D. Multifractals: theory and applications. – Boca Raton, Florida: Chapman & Hall/CRC, 2001.
2. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Наука, 1992.
3. Помулев В.В. Разработка моделей фрактальных структур металлических материалов: дисс. канд. техн. наук: 01.05.02 / Помулев Валерий Валериевич – Днепропетровск, 2005.
4. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Монография. – М.: Ижевск, 2001.
5. Оценка параметров мультифрактальных моделей металлографических изображений / Михалев А.И., Дервянко А.И., Водолазский Ю.А., Помулев В.В. – Современные проблемы металлургии. – Том 7, 2004. – С. 140-148.

6. Михалев А.И., Водолазский Ю.А. Мультифрактальный анализ в задачах оценивания качества медных покрытий // Нові Технології. – 2(12). – Кременчук: КУЕІТУ, 2006. – С. 184-188.
7. Водолазский Ю.А., Михалёв А.И., Лихоузова Т.А. Метод максимум вейвлет преобразования в задачах анализа поверхностей материалов // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 6 (59) . – Дніпропетровськ, 2008. – С. 36-42.
8. Михальов О.І., Водолазський Ю.О. Вейвлет-мультифрактальний аналіз складних зображень // Вісник ВПІ. – Випуск 2. – Вінниця, 2009. – С. 84-87.