

УДК 530.1

А.А. Журба, А.И. Михалев, С.И. Губенко, Е.А. Черноиваненко
**АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ И
ЕЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ
КОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРЫ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ**

Аннотация. В статье рассматривается поверхность шлифа быстрорежущей стали и изменение ее фрактальной размерности в процессе формирования композитной структуры. Были построены эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей структуры стали и их фрактальные сигнатуры.

Ключевые слова: композитная структура, быстрорежущая сталь, фрактал, фрактальная размерность, фрактальная сигнатура (кепстр), фрактальное распределение, глобальная и локальные фрактальные распределения, «тяжёлый хвост».

Введение

Композиты представляют собой материалы с упрочняющими элементами в виде волокон, нитей и других составляющих. Комбинируя объемное содержание разнородных компонентов, можно получать материалы с заданными специальными свойствами. При этом материалы приобретают свойства, которыми не обладает каждый из компонентов в отдельности. Современные стали с композитными структурами применяют для обеспечения высоких требований к их механическим и функциональным свойствам [1].

Композитную структуру в стали можно получить при химико-термической обработке, которая заключается в насыщении поверхностного слоя определенными элементами (например, углеродом), что способствует образованию и росту новых фаз (например, карбидов). При этом в поверхностном слое образуются колонии карбидов, которые способствуют формированию композитной структуры [2].

Очевидно, формирование сложных композитных структур требует новых подходов к изучению особенностей их формирования.

Целью данной работы является изучение фрактальных характеристик в процессе формирования композитной структуры быстрорежущей стали Р6М5 при химико-термической обработке.

Материалы и методики исследования

Для исследования были получены фотографии микроструктуры поверхностного слоя образцов из стали Р6М5 после комплексной химико-термической обработки [2]. В процессе формирования композитной структуры быстрорежущей стали изменяется фрактальная размерность, которая представляет собой важную количественную характеристику и является существенным элементом при фрактальном анализе микроструктур.

Фрактальная размерность определялась методом BOX COUNTING, который может быть применен к изображениям различной структуры и позволяет определить фрактальную размерность не строго самоподобных объектов [3].

Для построения фрактальных распределений использовался метод скользящего окна. Данный метод заключается в определении фрактальной размерности в пределах окна, размер которого можно задавать произвольно. Окно попиксельно перемещается по изображению, вычисляя на каждом шаге фрактальную размерность. Размер окна зависит от масштаба δ и рассчитывается из соотношения $2\delta + 1$ [5].

Чтобы иметь возможность различать фракталы, имеющие элементы различных размеров, необходимо проводить анализ на нескольких масштабах одновременно. В этом случае получена зависимость меры от масштаба $S = f(\delta)$ в логарифмическом масштабе – фрактальная сигнатура (фрактальный кепстр), которая определяется из соотношения (1).

$$S = N\delta, \quad (1)$$

где N - число элементов разрешения, необходимых для покрытия объекта; δ - площадь элемента разрешения.

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе комплексной химико-термической обработки поверхностный слой образцов быстрорежущей стали претерпел ряд структурных и фазовых изменений. Первая стадия обработки включала обезуглероживание образцов (1200°C, 2 часа) с целью подготовки поверхностного слоя к формированию композитной структуры [2]. В

результате образовалась ферритная структура (рисунок 1а). Вторая стадия обработки включала науглероживание при температуре 1180°C с разным временем выдержки (30 минут, 1 час, 2 часа) в процессе которой в поверхностном слое образцов формировалась композитная структура карбид – металлическая матрица (рисунок 1б – 1г) [2].

В таблице 1 приведены значения фрактальной размерности структуры стали в процессе формирования композитных колоний карбид – матрица [6]. Из таблицы 1 видно, что значение фрактальной размерности растет с увеличением времени науглероживания.

Фрактальная размерность конечной структуры композита в поверхностном слое быстрорежущей стали на 5-6% больше фрактальной размерности начальной обезуглероженной поверхности.

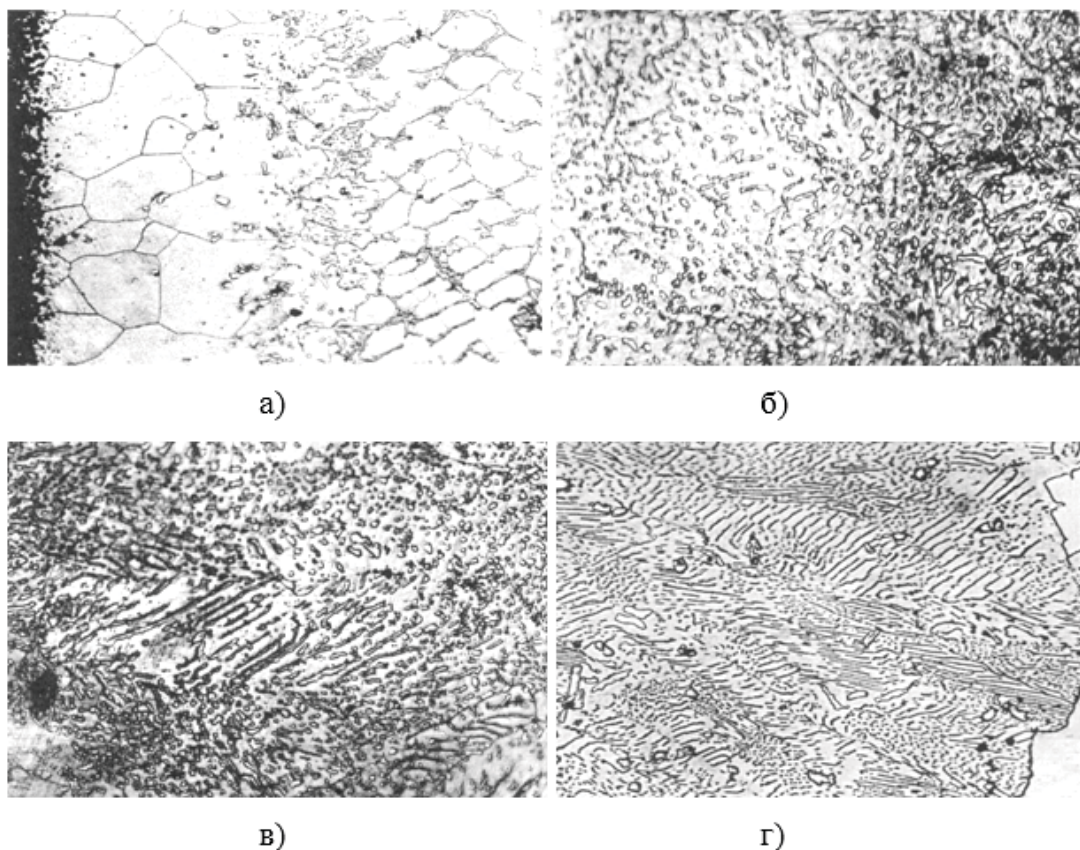


Рисунок 1 – Сталь Р6М5. Процесс формирования композитной структуры быстрорежущей стали Р6М5: а) обезуглероженный поверхностный слой; б) науглероживание 30 минут; в) науглероживание 1 час; г) науглероживание 2 часа, конечная структура

Изображение может состоять из фрагментов, имеющих различные оценки размерности. Это связано с тем, что изображение может содержать несколько составляющих, часть из которых при масштабе, большем некоторого числа, становится точками, другие же

части на этих масштабах остаются множествами. Следовательно, фрактальная размерность каждого фрагмента будет разной и будет отличаться от размерности всего изображения. Если оценивать фрактальную размерность всего изображения (глобальная фрактальная размерность), не обращая внимания на масштабы, то оценка фрактальной размерности не позволит отделить участки (кластеры) изображений. К тому же оценка размерности может быть некорректной, так как часть участков изображения окажется непроанализированной [3,4].

Для решения этой проблемы необходимо разделить изображение на малые фрагменты и в этих фрагментах оценивать фрактальные размерности (локальные фрактальные размерности). Если фрагменты находятся на изображении фрактала, имеющего одинаковую размерность, то и общая оценка размерности по этим фрагментам останется постоянной.

Измерение локальных размерностей производится с помощью скользящего окна. После измерения локальных размерностей производится построение эмпирического распределения локальных фрактальных размерностей.

Сложные изображения или изображения, состоящие из множества фрагментов различной природы, после вычисления локальных размерностей дают мультимодальные распределения. Каждая мода такого распределения соответствует кластеру изображения, имеющему близкие значения локальных размерностей [4]. На рисунке 2 представлены эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей на разных этапах формирования композитной структуры стали Р6М5 при масштабе $\delta = 7$ (размер скользящего окна 15x15 пикселей). Из рисунка 2а видно, что структура содержит четыре вида кластеров, имеющих близкие значения локальных размерностей, что соответствует поверхности на рисунке 1а. На рисунке 2б количество таких кластеров сокращается до трех, что свидетельствует о более однородной поверхности на рисунке 1б. Распределения на рисунках 2в и 2г показывают, что повышается степень однородности поверхностей, представленных на рисунках 1в и 1г [6].

Изменение величины фрактальной размерности в процессе формирования композитной структуры стали

№	Описание	Фрактальные характеристики
Рисунок 1а	Обезуглероженный поверхностный слой; $\times 100$; t 1200°C. Частицы карбидов практически отсутствуют	<ul style="list-style-type: none"> • Фрактальная размерность $D=1.8515$; • Эмпирическое распределение локальных фрактальных размерностей: рисунок 2а; • Фрактальные сигнатуры: рисунок 4а.
Рисунок 1б	Науглероживание в среде пропан+азот; $\times 500$; t 1180°C; время науглероживания 30 минут. Появились глобулярные карбиды	<ul style="list-style-type: none"> • Фрактальная размерность $D=1.9147$; • Эмпирическое распределение локальных фрактальных размерностей: рисунок 2б; • Фрактальные сигнатуры: рисунок 4б.
Рисунок 1в	Науглероживание в среде газ(пропан)+азот; $\times 500$; t 1180°C; время науглероживания 1 час. Карбидов стало больше, они начинают менять форму	<ul style="list-style-type: none"> • Фрактальная размерность $D=1.9704$; • Эмпирическое распределение локальных фрактальных размерностей: рисунок 2в; • Фрактальные сигнатуры: рисунок 4в.
Рисунок 1г	Науглероживание; $\times 250$; конечная структура – колонии аустенит+карбид; время науглероживания 2 часа. Изменилась форма карбидов, возникли колонии аустенит+карбид	<ul style="list-style-type: none"> • Фрактальная размерность $D=1.9563$; • Эмпирическое распределение локальных фрактальных размерностей: рисунок 2г; • Фрактальные сигнатуры: рисунок 4г.

На характер распределения влияют размеры измерительного и масштабного окон. На рисунке 3 представлены эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей на разных этапах формирования композитной структуры стали Р6М5 при масштабе $\delta = 8$ (размер скользящего окна 17x17 пикселей). При данном масштабе в окрестности значения фрактальной размерности полезной со-

ставляющей появляется «тяжелый хвост» фрактального распределения (паретиана), достигающий стабильной величины 10-20%.

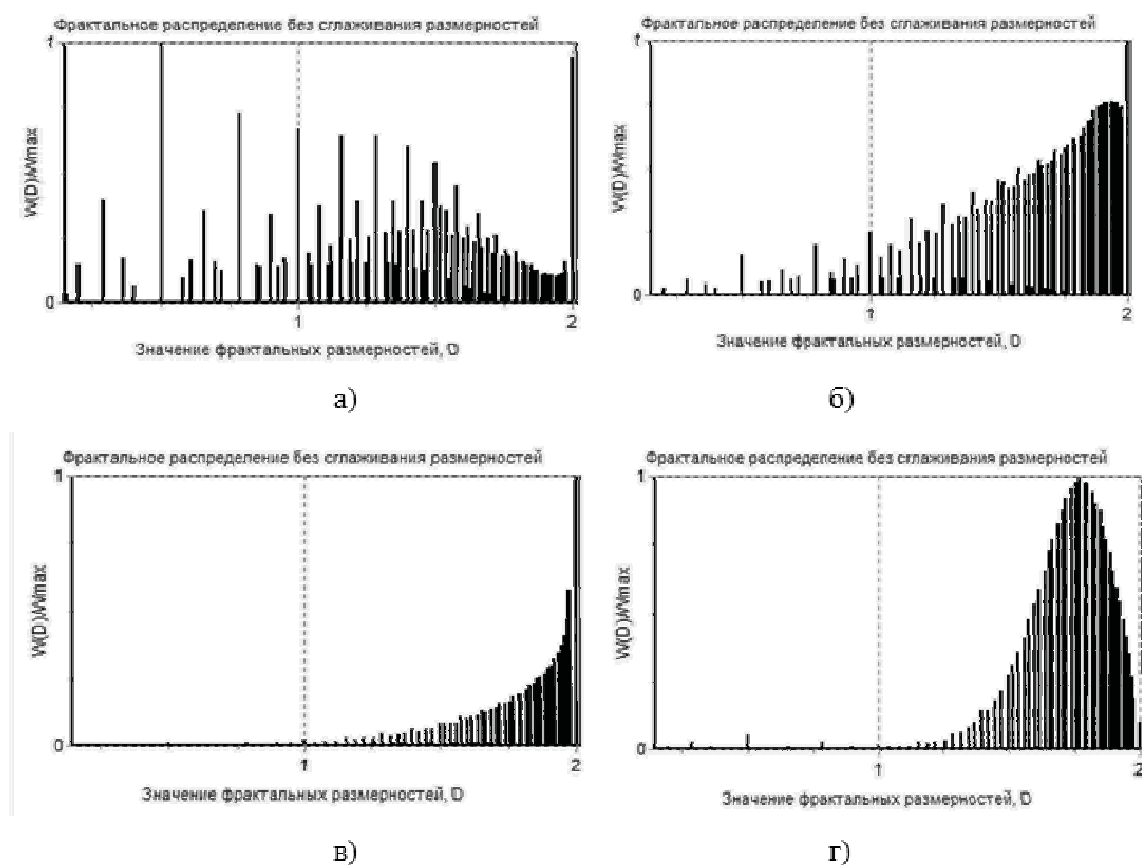


Рисунок 2 – Эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей структуры стали в процессе формирования композитных колоний (при размере скользящего окна 15x15 пикселей): а) обезуглероженный поверхностный слой; б) науглероживание 30 минут; в) науглероживание 1 час; г) науглероживание 2 часа, конечная структура – колонии аустенит+карбид

При определении фрактальной размерности возникает проблема, если неизвестен конечный масштаб, в результате чего фрактальная размерность может быть искажена. Возникает вопрос о размере фрагментов изображения. Этот размер должен быть не больше, чем предполагаемые размеры анализируемых элементов изображения. Если размер фрагмента выбрать близким размеру исследуемого элемента, то возможна ситуация, при которой только часть элемента окажется в пределах одного фрагмента, а другая часть окажется в пределах другого фрагмента. Это приведет к искажению оценки размерности, так как кроме фрактального изображения в область анализа попадет и фон, размерность которого другая. Поэтому выбирают

размеры фрагментов или окон заведомо малыми, близкими к размерам минимальных элементов ожидаемого фрактального рисунка.

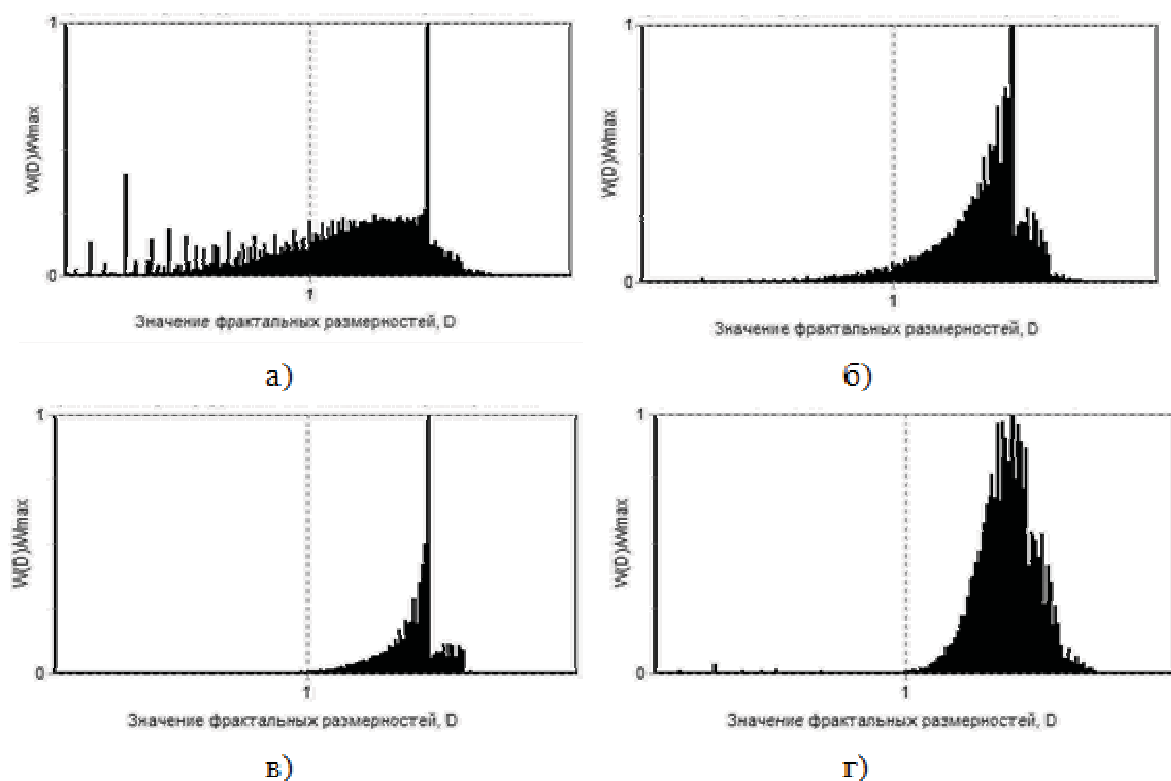
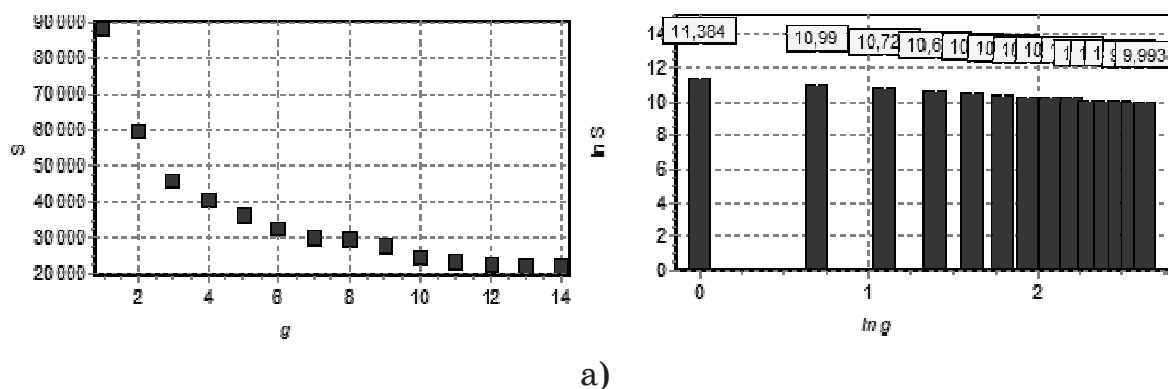


Рисунок 3 – Эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей структуры стали в процессе формирования композитных колоний (при размере скользящего окна 17x17 пикселей): а) обезуглероженный поверхностный слой; б) науглероживание 30 минут; в) науглероживание 1 час; г) науглероживание 2 часа, конечная структура – колонии аустенит+карбид

Решить эту проблему помогает построение фрактальной сигнатуры, которая представляет собой зависимость оценок типа от масштаба наблюдения [4]. На рисунке 4 представлены фрактальные сигнатуры композитных структур стали Р6М5 [6].



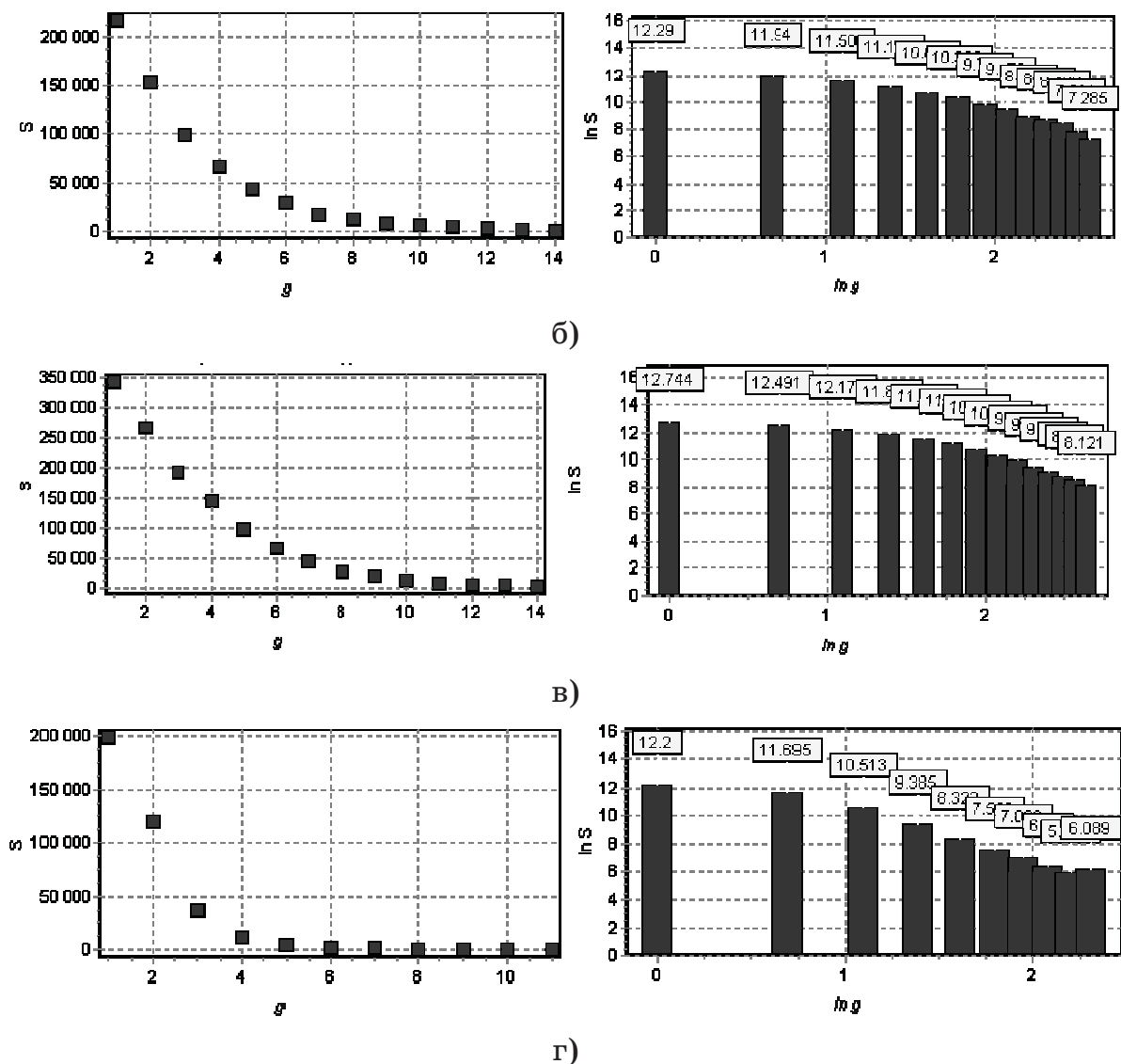


Рисунок 4 – Фрактальные сигнатуры структуры стали Р6М5 в процессе формирования композитных колоний: а) обезуглероженный поверхностный слой; б) науглероживание 30 минут; в) науглероживание 1 час; г) науглероживание 2 часа, конечная структура аустенит+карбид

Фрактальные сигнатуры объектов и их производные позволяют оценить фрактальную размерность.

$$D_{\delta} = - \log_{\frac{\delta+\Delta}{\delta}} \frac{S(\delta+\Delta)}{S(\delta)}, \quad (2)$$

где Δ - шаг дискретизации по масштабу.

Если изображение имеет почти одинаковую природу, имеет смысл определять размерность D по наклону фрактальной сигнатуры.

Наибольшие различия в сигнатурах и их производных позволяют определить средний размер элементов структуры стали.

Построив фрактальную сигнатуру можно различать самоподобные объекты и определять размер некоторых их элементов. Если изображение состоит из нескольких самоподобных структур, то различия сигнатур будут проявляться сразу в нескольких диапазонах масштабов.

Выводы

В данной работе исследовалось изменение фрактальных характеристик в процессе формирования композитной структуры быстрорежущей стали Р6М5 при комплексной химико-термической обработке. Разработан программный продукт, позволяющий оценивать фрактальную размерность и фрактальную сигнатуру поверхностей, а также строить распределение локальных фрактальных размерностей.

В процессе формирования композитной структуры стали Р6М5 изменяются ее свойства, и, следовательно, - фрактальная размерность. Выявлено, что значение фрактальной размерности растет с увеличением времени науглероживания. Фрактальная размерность конечной структуры композита на 5-6% больше фрактальной размерности начальной обезуглероженной поверхности.

Изображения, состоящие из множества фрагментов различной природы, после вычисления локальных размерностей дают мультимодальные распределения, что говорит о разных размерах кластеров, содержащихся в структуре. Определено, что в процессе формирования композитной структуры фрактальное распределение изменяется существенно. С увеличением времени науглероживания стали Р5М6 распределение локальных фрактальных размерностей перестает быть мультимодальным, что говорит о том что, поверхность постепенно становится однородной.

На характер фрактального распределения влияют размеры измерительного и масштабного окон. При масштабе $\delta = 8$ в окрестности значения фрактальной размерности полезной составляющей появляется «тяжелый хвост» фрактального распределения, достигающий стабильной величины 10-20%.

Построение фрактальной сигнатуры позволяет различать самоподобные объекты и определять размер некоторых элементов, что позволяет оценивать их фрактальную размерность.

В заключение можно отметить, что фрактальные методы обработки изображений поверхностей в широком смысле основаны на той

части информации, которая при классических методах безвозвратно теряется, что приводит к потере информации о свойствах поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. Материаловедение: Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2007. - 784 с.:ил.
2. Черноиваненко Е.А., Губенко С.И., Мовчан А.В., Бачурин А.П. Получение композитной структуры в приповерхностном слое инструмента на базе литой быстрорежущей стали Р6М5 //Вісник Дніпропетровського університету. – Випуск 4. Том 19. – Дніпропетровськ, 2011. – С. 188 – 192.
3. Журба А.О., Михальов О.І. Побудова фрактальних розподілень поверхонь Пенроуза //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2(73). – Дніпропетровськ, 2011. – С.105-110.
4. Потапов А.А., Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Пахомов А.А., Потапова В.А.. Новейшие методы обработки изображений. / Под ред. А.А. Потапова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
5. Потапов А.А., Герман В.А. О методах измерения фрактальной размерности и фрактальных сигнатур многомерных стохастических сигналов //Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49, №12. – С.1468 – 1491.
6. Журба А.А., Михалев А.И., Губенко С.И. Анализ фрактальных характеристик поверхностей стали в процессе формирования композитной структуры //Сучасні проблеми металургії. – 2011. – №14. – С.93 – 99.