

---

# 1. ИСТОРИЯ МЕТОДА И ТЕРМИНЫ

Для металловедения фрактальный подход является достаточно новым, поэтому автор считает необходимым очень кратко коснуться истории развития метода и осветить современное состояние вопроса.

Интерес естественных наук, главным образом математики и физики, к фракталам тесно связан с появлением и развитием нового направления — синергетики. Синергетика — учение о самоорганизации сложных систем. Термин «синергетика» (от *греч.* «синергос» — вместе действующий) введен Г. Хакеном еще в 40-е гг. XX в., т. е. до «века кибернетики». Синергетика занимается изучением процессов самоорганизации, устойчивости и распада структур различной природы, формирующихся в системах, далеких от равновесия. Они наблюдаются в живой и неживой природе. Общность заключается в том, что и биологическим, и химическим, и физическим неравновесным процессам свойственны неравновесные фазовые переходы, отвечающие особым точкам — точкам бифуркации, по достижении которых спонтанно изменяются свойства среды, обусловленные самоорганизацией диссипативных структур [37].

С развитием синергетики утвердился термин «самоорганизация». В чем же различие между процессами организации и самоорганизации? Понятие организации относится к процессам, близким к равновесным, при которых движущей силой развития является стремление системы к минимуму свободной энергии. Самоорганизация структур связана с переходом через кризис (неустойчивость системы) в условиях, далеких от равновесия. Движущей силой процесса в этих условиях является стремление системы к минимуму производства энтропии.

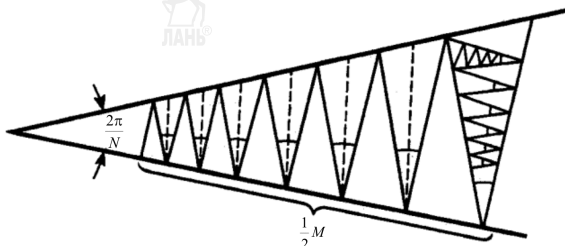
Материаловедение изобилует множеством примеров самоорганизации структур. В начале 1991 г., после открытия явления сверхпроводимости при  $T > 33\text{К}$  поликристаллического углерода  $C_{60}$ , легированного атомами щелочных металлов, стабильные кластеры углерода ( $C_{60}$ ,  $C_{120}$ ,  $C_{76}$ ,  $C_{84}$ ) оказались в центре исследования. Они получили название **фуллеренов** и являются примером высокоорганизованной стабильной структуры.

Обнаружено, что структура кластера  $C_{60}$  характерна для самоорганизующихся в пламени органических соединений (сажи). Структура фуллеренов представлена на рисунке 1.

## 4. ФРАКТАЛЬНЫЕ МАРТЕНСИТНЫЕ И ДЕНДРИТНЫЕ СТРУКТУРЫ

Изучают естественные фрактальные структуры, сопоставляя их с известными геометрическими фракталами.

Пример аппроксимации природных фракталов регулярными представлен на рисунке 13.

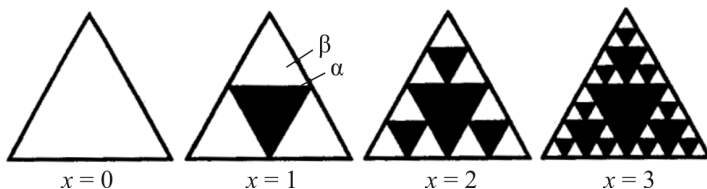


**Рис. 13**

*Схема преобразования структуры чечевицеобразного мартенсита с использованием структурных параметров  $M$  и  $N$  (в трудах Е. Хорнбогена [65, 66])*

Для идентификации фрактальной структуры чечевицеобразного мартенсита здесь применяется решетка с немонотонной зависимостью масштаба ( $M$ ) от количества самоподобных частей ( $N$ ).

Двухфазные сплавы — интересный объект для исследования фрактальности микроструктуры. Е. Хорнбоген при анализе микроструктуры чечевицеобразного мартенсита рассмотрел треугольник Серпинского (рис. 14) в качестве геометрического аналога фрактальности мартенситных структур (рис. 13). При мартенситном превращении площадь поверхности раздела  $\alpha/\beta$ -фаз увеличивается с возрастанием числа актов фрагментации ( $x$ ), при этом доля остаточного аустенита ( $\beta$ ) уменьшается.



**Рис. 14**

*Построение регулярного треугольного ковра Серпинского для моделирования процесса мартенситного превращения [48]*

---

## 9. ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОРИСТОСТИ В ПОКРЫТИЯХ ПРИ МИКРОПЛАЗМЕННОМ ОКСИДИРОВАНИИ

Другим примером использования фрактального подхода в металловедении служит анализ структурообразования покрытий, нанесенных методом микроплазменного (микродугового) оксидирования.

Формирование покрытий в режиме микродугового оксидирования происходит в условиях многократно повторяющихся дуговых пробоев образующегося оксидного слоя. Ввиду постоянно изменяющейся электропроводимости количество и размеры образующихся кратеров спонтанно изменяются, и регулировать процесс их формирования не представляется возможным. Образование пор в МДО-покрытиях является результатом специфики механизма пробоя анодных пленок. Пористость анодных оксидных покрытий и анодных пленок является основной проблемой, приводящей к частичной или полной потере защитных свойств МДО-покрытий и, как следствие, к снижению коррозионной стойкости, износостойкости и других эксплуатационных характеристик. В работе А. И. Горчакова исследованы причины образования пор в МДО-покрытиях, выводы о паровой природе пор подтверждены физико-химическими расчетами условия кипения металла, металлографическим и фрактальным анализами морфологии пор при исследовании микроструктуры МДО-покрытия [60].

Причин образования пористости в покрытиях, полученных при микродуговом оксидировании, несколько. Во-первых, анализ тепловых условий процесса показывает, что при потенциалах микродуги электрические пробои в жидкостях вызывают локальное повышение температуры до  $20 \cdot 10^3 \text{ К}$ , а давления — до 100 МПа, что делает возможным протекание термохимических реакций с участием как обрабатываемого металла, так и элементов электролита. В этих условиях вполне вероятно кипение металла основы на дне канала пробоя и образование вследствие этого пузырька пара этого металла. Второй причиной порообразования может явиться кипение электролита в порах при относительно большой плотности тока (свыше  $1 \text{ А/дм}^2$ ).

Схема образования парового пузырька на границе раздела фаз в МДО-покрытии показана на рисунке 37. Учитывая, что толщина оксидного слоя обычно составляет 50–200 мкм, пузырек пара должен выйти на поверхность, и разряд приведет к появлению эффекта поло-

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>1. ИСТОРИЯ МЕТОДА И ТЕРМИНЫ.....</b>	<b>6</b>
<b>2. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ЕСТЕСТВЕННЫЕ ФРАКТАЛЫ.....</b>	<b>11</b>
<b>3. СТРУКТУРА МЕТАЛЛА</b>	
<b>КАК ОБЪЕКТ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА.....</b>	<b>17</b>
<b>4. ФРАКТАЛЬНЫЕ МАРТЕНСИТНЫЕ</b>	
<b>И ДЕНДРИТНЫЕ СТРУКТУРЫ.....</b>	<b>19</b>
<b>5. ВЫБОР МЕРЫ ДЛЯ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА</b>	
<b>СТРУКТУР МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ШВОВ.....</b>	<b>24</b>
<b>6. ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВИДМАНШТЕТТОВОЙ</b>	
<b>СТРУКТУРЫ В СВАРНЫХ ШВАХ.....</b>	<b>31</b>
6.1. Общая характеристика видманшеттговой структуры.....	31
6.2. Алгоритм фрактального анализа видманшеттговой структуры .....	33
6.3. Взаимосвязь фрактальной размерности структуры с уровнем свойств металла шва .....	38
6.4. Фрактальная размерность в задачах оптимизации состава электродного покрытия.....	39
<b>7. ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО ПОДХОДА</b>	
<b>ДЛЯ АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТИ</b>	
<b>УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ .....</b>	<b>45</b>
<b>8. МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНОГО</b>	
<b>СОСТАВА ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ</b>	
<b>СТАЛЕЙ С КАРБОНИТРИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ .....</b>	<b>51</b>
<b>9. ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ</b>	
<b>ПОРИСТОСТИ В ПОКРЫТИЯХ</b>	
<b>ПРИ МИКРОПЛАЗМЕННОМ ОКСИДИРОВАНИИ .....</b>	<b>61</b>
<b>10. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ</b>	
<b>НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЗОНЕ</b>	
<b>ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТАЛИ 16Г2АФ</b>	
<b>МЕТОДОМ ФРАКТАЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ.....</b>	<b>68</b>
<b>11. ОЦЕНКА ЖАРОПРОЧНОСТИ СТАЛИ 15Х1М1Ф</b>	
<b>ПРИ ОБРАБОТКЕ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ</b>	
<b>ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ</b>	
<b>ФРАКТАЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ.....</b>	<b>78</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>84</b>