

УДК 519.21

**К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ТЕОРИИ МУЛЬТИФРАКТАЛОВ
ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА**

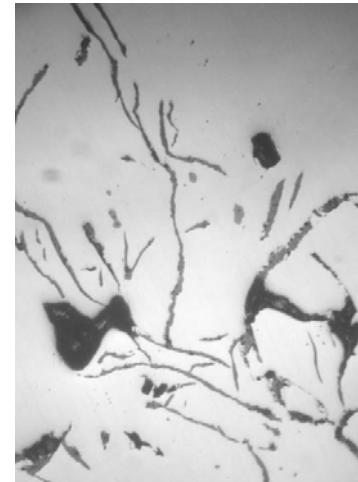
к. т. н., доц. В. Н. Волчук

*ГВУЗ "Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры"*

Оптимизация технологии производства металла, как правило, идет по пути включения в эту технологию новых, ранее неприменяемых при его изготовлении легирующих элементов, использование которых, приводит к улучшению комплекса его физико-механических свойств [1]. Это один из многих приемов, применяемых инженерами и учеными при оптимизации той или иной технологии. При этом улучшение физико-механических свойств металла, за счет оперативного определения этих свойств непосредственно в процессе их производства, трудоемкая, длительная и дорогостоящая задача, совершенствование которой, по нашему мнению, должно идти по пути создания экспресс-метода для их определения.

Создание такого метода покажем на примере оценки механических свойств чугуновых валков.

Объектом исследования являлся валковый чугун марок СПХН производства ПАО ДЗПВ. Из рабочего слоя бочек валков на глубине 10 мм были вырезаны темплеты, из которых были изготовлены тангенциальные образцы для механических испытаний и микрошлифы. Структура рабочего слоя бочек чугуновых валков состоит из перлита, пластинчатого графита и карбидов (рис. 1).



а) до травления



б) до травления

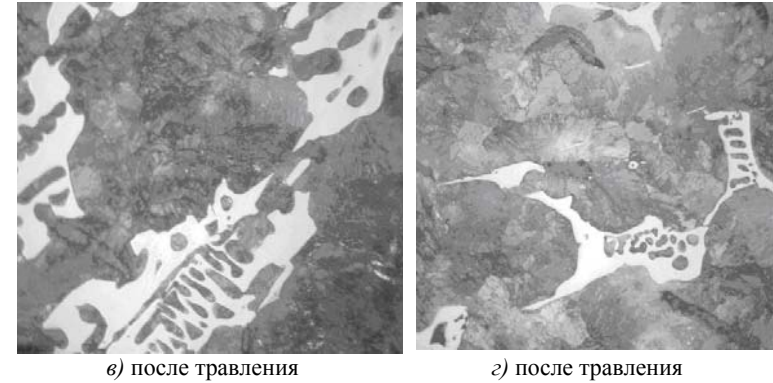


Рис. 1. Микроструктура валкового чугуна марки СПХН-45 на поверхности (а, в) и на расстоянии 10 мм от поверхности бочки валка (б, з), $\times 200$

С целью установления взаимосвязи между элементами структуры чугуна: перлитом, графитом, карбидами и выбранными механическими свойствами: пределом прочности на разрыв – σ_B и изгиб – $\sigma_{изг}$; ударной вязкостью – КС; твердостью – HSD авторами использовалась методика мультифрактального формализма [2–4]. Предлагаемая методика является наиболее приемлемой для количественной оценки большинства реальных структур, аппроксимация которых целочисленными фигурами Евклида, вносит определенную погрешность, в силу целочисленности их аппроксимации, и поэтому не всегда приемлема в практических задачах. Согласно предлагаемой методике, основанной на мультифрактальном формализме, каждый неоднородный объект, которым являются структуры большинства металлов, может характеризоваться спектром статистических размерностей Реньи [5]. Некоторые из размерностей уже имеют свою физическую (материаловедческую) трактовку. Например, в работах [6–9] показано практическое применение мультифрактального формализма в описании физики процесса формирования структуры различных материалов, а также связь их физико-механических свойств с размерными оценками фаз, например, для стали Ст3.

Согласно мультифрактальному подходу, каждый элемент структуры может характеризоваться следующим спектром обобщенных статистических размерностей:

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \cdot \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\ln \sum_{i=1}^N p_i^q}{\ln \delta}, \quad (1)$$

где δ – ячейка, являющаяся единичным элементом квадратной сетки, которой покрывают исследуемый объект для вычисления его размерности, p_i – представляет собой вероятность попадания точки, находящейся на исследуемом

объекте, в i -ю ячейку квадратной сетки с размером δ , $\sum_{i=1}^N p_i^q$ – обобщенная статистическая сумма, характеризуемая показателем степени q , который может принимать любые значения в диапазоне от $-\infty$ до $+\infty$.

Как показано в работе [7], размерности спектра $D_0, D_1, D_2, D_\infty, D_{-\infty}$ имеют следующий физический смысл: D_0 – однородный фрактал при $q=0$ (размерность Хаусдорфа – Безиковича); D_1 – информационная размерность при $q=1$ (информационная энтропия), характеризующая скорость роста количества информации и показывающая, как возрастает информация, необходимая для определения местоположения точки, находящейся на объекте исследования, при стремлении размера ячейки δ к нулю; D_2 – корреляционная размерность при $q=2$, характеризующая вероятность нахождения в одной и той же ячейке сетки двух точек находящихся на объекте наблюдения; D_∞ – размерность, характеризующая наиболее разреженное пространство в объекте наблюдения (светлые участки структуры); $D_{-\infty}$ – размерность, характеризующая наиболее концентрированное пространство (темные участки структуры). Алгоритм вычисления спектра размерностей микроструктуры с применением программы “Мультифрактал”, реализованной на ЭВМ в программной среде Delphi, был выбран следующий: все изображения структуры валкового чугуна марок СПХН размером 10×15 см при увеличениях $\times 200$, $\times 500$ и $\times 1\,000$ были переведены в электронный вид сканированием фотоснимков и увеличены в 4 раза для качественного отображения рельефа поверхности. Для каждого образца чугуна было получено по три фотоснимка микроструктуры при этих увеличениях в пяти произвольно выбранных полях на расстоянии 10 мм от рабочей поверхности бочки. На следующем этапе вычислялись пять основных размерностей $D_0, D_1, D_2, D_\infty, D_{-\infty}$ для каждого элемента структуры каждого фотоснимка (рис. 2). В качестве предельных значений для $D_{-\infty}$ и D_∞ взяты значения функции спектра от -200 до 200.

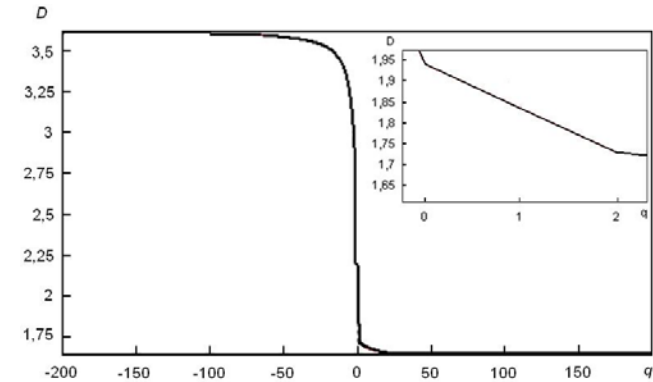


Рис. 2. Спектр размерностей, вычисленных для пластинчатого графита чугуна марки СПХН- 45:

$$D_0 = 1,94; D_1 = 1,84; D_2 = 1,73; D_{200} = 1,65; D_{-200} = 3,62$$

При описании сложной конфигурации элементов структуры и формы исследуемого металла, количественная оценка его размерности, при изменении масштаба его изображения, практически не изменяется. Так, при увеличении изображения элементов структуры валкового чугуна (перлита, графита и карбидов) от $\times 200$ до $\times 1\ 000$ было установлено, что фрактальная размерность этого изображения изменялась в пределах погрешности опыта $5\div 7\%$, что свидетельствует об ее универсальности, надежности и экономическом выигрыше, с точки зрения оснащенности заводских лабораторий металлографическими микроскопами с высоким разрешением.

После определения всех статистических размерностей исследуемых микроструктур были получены графики, описывающие соотношения между ними и механическими свойствами. На рисунках 3–5 приведены графики зависимостей, полученные при наибольшем коэффициенте корреляции.

Приведенные закономерности являются индикатором степени влияния элемента структуры на конкретное свойство, что подтверждают полученные результаты.

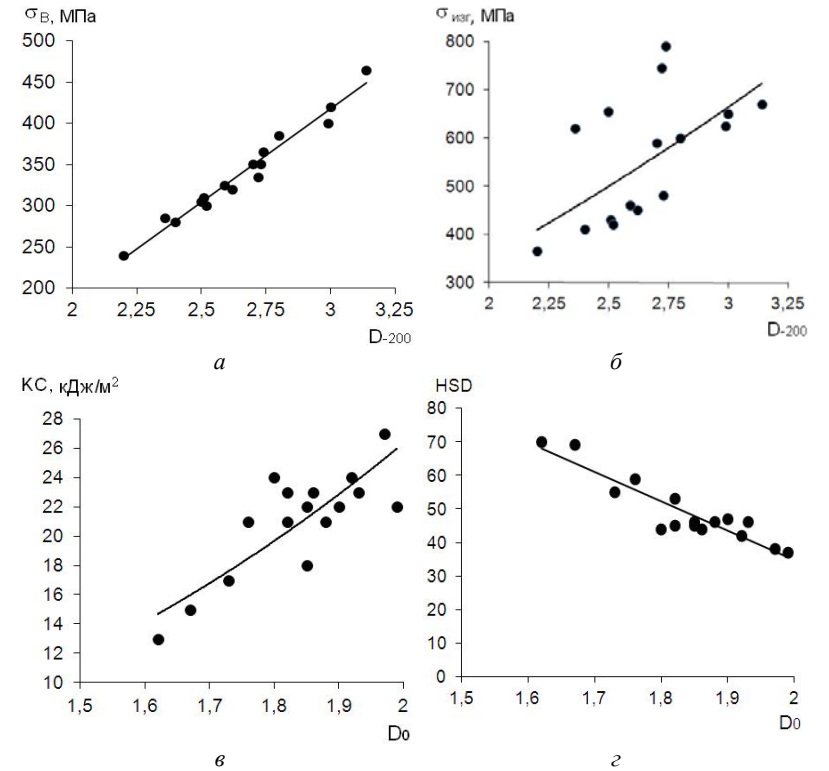


Рис. 3. Взаимоотношение между механическими свойствами чугунов марки СПХН и спектром размерностей структуры перлита

Уравнения (2–5), описывающие эти зависимости, делают возможным их применение для прогноза механических характеристик чугуна:

$$\sigma_{\text{в}} = 226,11 \cdot D_{-200} - 261,26, \quad R^2 = 0,97 \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{изг}} = 119,58 \cdot D_{-200}^{1,5598}, \quad R^2 = 0,38 \quad (3)$$

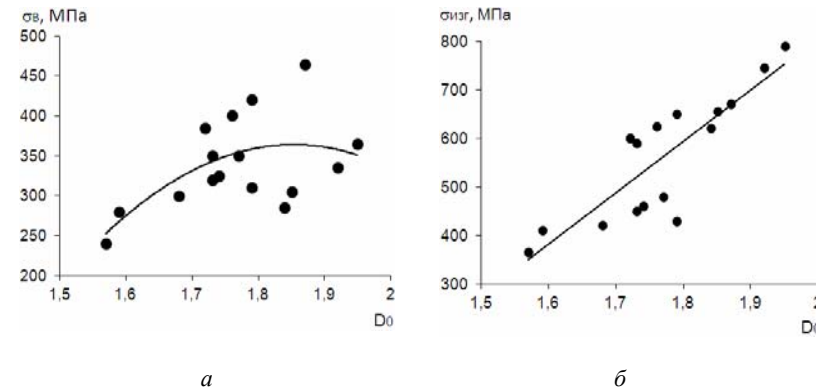
$$КС = 3,8414 \cdot D_0^{2,7778}, \quad R^2 = 0,69 \quad (4)$$

$$HSD = - 87,194 \cdot D_0 + 209,18, \quad R^2 = 0,84 \quad (5)$$

Из графиков рисунка 3 видно, что при увеличении прочностных характеристик чугуна (рис. 3 а, б), размерность D_{-200} перлита возрастает (уравнения 2, 3). Это обусловлено тем, что эта размерность описывает темные участки структуры пластинчатого перлита – цементит, который характеризуется

высокими прочностными характеристиками по сравнению со светлыми участками – ферритом. Ударная вязкость возрастает по степенному закону (рис. 3 в, уравнение (4)) при увеличении фрактальной размерности структуры перлита, что подтверждается количественным возрастанием перлита от 53 до 88 % и снижением содержания фосфора от 0,108 до 0,31 % по массе. Повышение вязкости приводит зачастую в валковом чугуна к снижению твердости (рис. 3 з), что отражается на снижении фрактальной размерности структуры перлита.

Карбиды, которые представляют собой в данном случае цементит, возникают, в основном, в поверхностных слоях валков при интенсивном отводе тепла от заливаемого в форму жидкого чугуна, и имеют твердость по Шору 80–100 единиц, но при этом повышают его хрупкость. Влияние сложной формы, того или иного элемента структуры, на физико-механические свойства до конца не изучено, но полученные зависимости, показанные на рисунке 4, свидетельствуют о том, что такая связь присутствует. Наблюдаемая тенденция повышения прочностных характеристик валкового чугуна с увеличением фрактальной размерности цементита (рис. 4 а, б) характеризует, по-видимому, то, что изменение его формы от геометрически сложной к более простой положительно влияет на эти характеристики. Корреляцию между характеристикой вязкости и информационной размерностью D_1 карбидов (рис. 4 в), описывающую информационную энтропию, можно объяснить с позиций термодинамики процессов, происходящих при формировании структуры, а зависимость (8) указывает на степень влияния карбидов на эту характеристику. На рисунке 4 з показана взаимосвязь между статистической размерностью карбидов D_{-200} и твердостью, которая свидетельствует о возрастании твердости при увеличении участков карбидов с наиболее плотной упаковкой.



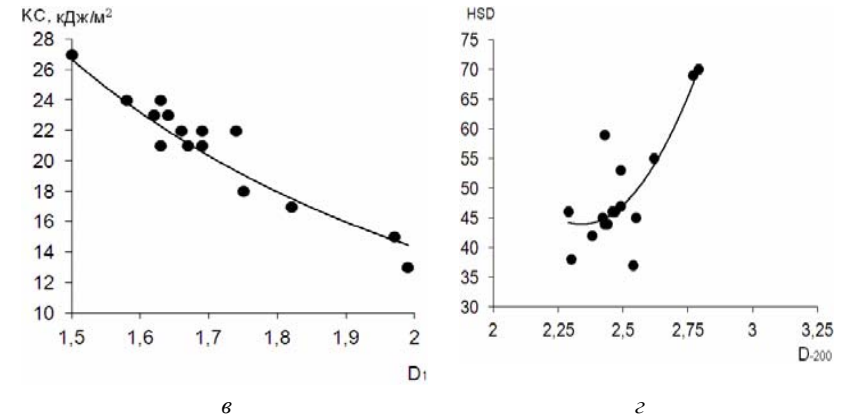


Рис. 4. Взаимоотношение между механическими свойствами чугунов марки СПХН и спектром размерностей карбидов

Уравнения (6–9), описывающие зависимости на рисунке 4, приведены ниже:

$$\sigma_B = -1386 \cdot D_0^2 + 5137,7 \cdot D_0 - 4397,3, \quad R^2 = 0,33 \quad (6)$$

$$\sigma_{изг} = 1055,6 \cdot D_1 - 1307,1, \quad R^2 = 0,72 \quad (7)$$

$$КС = 64,257 \cdot D_1^{-2,1695}, \quad R^2 = 0,86 \quad (8)$$

$$HSD = 127,74 \cdot D_{-200}^2 - 597,71 \cdot D_{-200} + 742,99, \quad R^2 = 0,68 \quad (9)$$

Влияние на механические свойства чугуна обусловлены, главным образом, количеством графитной составляющей в его структуре и ее особенностями [10], что учитывается при оценке влияния графита на эти свойства чугуна согласно ГОСТу 3443–87. Чем меньше графитных включений, чем они мельче и больше степень их изолированности, тем выше прочность чугуна при одной и той же металлической основе. Связь между структурой графита и механическими свойствами находит свое отражение в его фрактальной размерности. Как показал опыт, фрактальная размерность элемента структуры металла оказалась чувствительной [6] к изменениям формы этого элемента a , соответственно, и к комплексу его механических свойств. Так, например, корреляция (10–11), показывает, что увеличение формы и размеров включений пластинчатого графита, границы которого служат концентраторами микронапряжений и распространения трещин, отражается в их фрактальной размерности, приводит к разупрочнению металлической матрицы и, соответственно, снижает прочностные характеристики валкового чугуна. Экспериментально установлено, что при увеличении фрактальной размерности пластинчатого графита от 1,58 до 1,97 снижаются показатели прочности на разрыв на 200 МПа, а прочности на изгиб – на 400 МПа, что обусловлено возрастанием

его линейных размеров – от балла ПГД45 до ПГД180 и арельных – от 2 до 5 %.

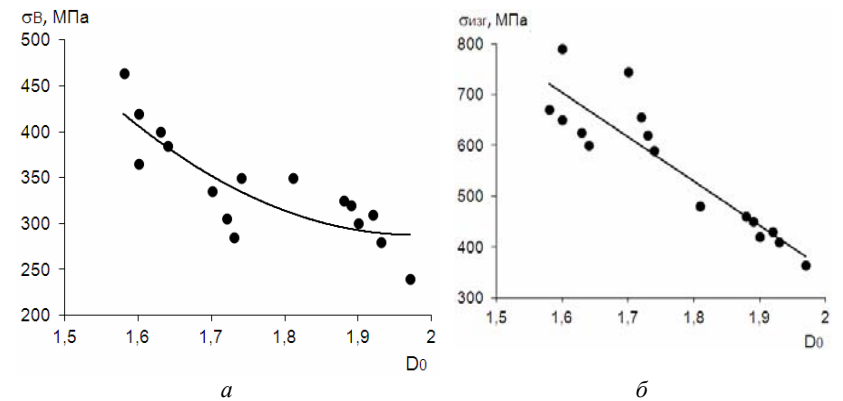


Рис. 5. Взаимоотношение между механическими свойствами чугунов марки СГХН и фрактальной размерностью пластинчатого графита

Уравнения (10–11), описывающие зависимости на рисунке 5, приведены ниже:

$$\sigma_{\text{в}} = 834,03 \cdot D_0^2 - 3299,1 \cdot D_0 + 3550, \quad R^2 = 0,70 \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{изг}} = -874,36 \cdot D_0 + 2103,2, \quad R^2 = 0,83. \quad (11)$$

Таким образом, размерностные оценки целесообразно применять для детального анализа влияния элементов структуры со сложной геометрической конфигурацией на свойства металла наряду с традиционными металлографическими методиками.

Литература

1. Большаков В. И. Решение многокритериальной задачи металловедения с качественно неоднородными критериями / В. И. Большаков, Ю. И. Дубров // Доповіді НАНУ. – 2004. – № 11. – С. 95–102.
2. Федер Е. Фракталы. – М. : Мир, 1991. – 261 с.
3. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Фракталы в материаловедении. – Дн-вск: ПГАСА, 2006. – 254 с.
4. Божокин С. В., Паршин Д. А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск : НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. – 127 с.
5. Фракталы в физике: труды 6-го международного симпозиума по фракталам в физике. – М. : Мир, 1988. – 672 с.

6. Большаков В. И. Об оценке применимости языка фрактальной геометрии для описания качественных трансформаций материалов / В. И. Большаков, Ю. И. Дубров // Доповіді НАНУ. – 2002. – № 4. – С. 116–121.
7. Большаков В. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАНУ. – 2008. – № 11. – С. 99–107.
8. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств малоуглеродистой стали / В. И. Большаков, В. Н. Волчук // Металлофиз. и новейшие технологии. – 2011. – Т. 33. – № 3. – С. 347–360.
9. Большаков В. И. Разработка и исследование метода определения механических свойств металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – Дн-вськ : ПДАБтаА, 2004. – № 1. – С. 43–54.
10. Кривошеев А. Е. Литые валки. – М. : Металлургиздат, 1957. – 360 с.

УДК 519.21

К вопросу о применении теории мультифракталов для оценки механических свойств металла / В. Н. Волчук // Металлознание та термічна обробка металів: науков. та інформ. журнал / Д. : ДВНЗ ПДАБА, 2014. – № 3. – С. – . – Рис. 5. – Бібліогр. : (10 назв).

В работе рассмотрено применение теории мультифракталов для количественной оценки структуры и механических свойств металлов, на примере ее применения для чугуновых валков.

В роботі розглянуто застосування теорії мультифракталів для кількісної оцінки структури і механічних властивостей металів, на прикладі її застосування для чавунних валків.

On the question of the application of multifractal theory to evaluate the mechanical properties of the metal.