

УДК 669.017:519.21

## К ВОПРОСУ О ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА

БОЛЬШАКОВ В. И.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,ВОЛЧУК В. Н.<sup>2\*</sup>, д. т. н., доц.,ДУБРОВ Ю. И.<sup>3</sup>, д. т. н., проф.

<sup>1</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепропетровск, 49005, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепропетровск, 49005, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0001-8717-6786

<sup>3</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепропетровск, 49005, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

**Аннотация.** Для исследования структуры металлов и сплавов и ее влияния на их свойства широко используются традиционные методы макро- и микроанализа, рентгеновского, спектрального, термического, а также дефектоскопии (рентгеновской, магнитной, ультразвуковой). Они имеют собственный порог чувствительности, зачастую узкую направленность и применяются непосредственно в зависимости от назначения объекта исследования (трубы, прокатные валки, металлоконструкции и т. д.). Существующие на сегодняшний день математические модели прогноза качественных характеристик металлических изделий, основанные только на анализе статистических данных, не дают физико-химической интерпретации процессов, которые происходят при формировании структуры или которые могли бы однозначно учитывать влияние химического состава и других параметров технологии. Поэтому результаты прогноза не всегда могут удовлетворять предъявляемым требованиям. С целью получения приемлемых результатов прогноза характеристик качества производимого изделия разрабатываемая методика должна включать в себя использование как классических, так и современных методов оценки структуры. Так, для установления взаимосвязи между механическими свойствами и элементами структуры валкового чугуна планируется использование теории фракталов и мультифракталов. Предлагаемая методика является наиболее приемлемой для количественной оценки большинства реальных структур, аппроксимация которых целочисленными фигурами Евклида вносит определенную погрешность и поэтому не всегда приемлема в практических задачах современного материаловедения. В этой связи предполагается проведение специальных экспериментов, анализ которых позволяет выработать качественную оценку механических свойств исследуемых марок стали и чугуна. В результате анализа технологии производства стали и чугуна и научно-исследовательских работ, направленных на решение проблемы оценки механических свойств, сформулирована постановка задачи оперативного прогноза этих свойств и определены основные пути ее решения.

**Ключевые слова:** база данных, фрактал, сталь, чугун, прогноз, мультифрактал

## ДО ПИТАННЯ ПРО ПОСТАНОВКУ ЗАВДАННЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ФРАКТАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ

БОЛЬШАКОВ В. И.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,ВОЛЧУК В. М.<sup>2\*</sup>, д. т. н., доц.,ДУБРОВ Ю. И.<sup>3</sup>, д. т. н., проф.

<sup>1</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпропетровськ, 49005, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпропетровськ, 49005, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0001-8717-6786

<sup>3</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпропетровськ, 49005, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

**Анотація.** Для дослідження структури металів і сплавів та її впливу на їх властивості широко застосовуються традиційні методи макро- і мікроаналізу, рентгенівського, спектрального, термічного, а також дефектоскопії (рентгенівської, магнітної, ультразвукової). Вони мають власний поріг чутливості, часто вузьку спрямованість і застосовуються безпосередньо залежно від призначення об'єкта дослідження (труби, прокатні валки, металлоконструкції тощо). Існуючі на сьогоднішній день математичні моделі прогнозу якісних

характеристик металевих виробів, засновані тільки на аналізі статистичних даних, не дають фізико-хімічної інтерпретації процесів, які відбуваються під час формування структури або які могли б однозначно враховувати вплив хімічного складу та інших параметрів технології. Тому результати прогнозу не завжди можуть задовольняти вимогам, що пред'являються. З метою отримання прийнятних результатів прогнозу характеристик якості виробів методика, яка розробляється, повинна включати в себе застосування як класичних, так і сучасних методів оцінки структури. Так, для встановлення взаємозв'язку між механічними властивостями та елементами структури валкового чавуну планується застосування теорії фракталів та мультифракталів. Запропонована методика є найприйнятніша для кількісної оцінки більшості реальних структур, апроксимація яких цілочисельними фігурами Евкліда вносить певну похибку і тому не завжди прийнятна в практичних завданнях сучасного матеріалознавства. У зв'язку з цим передбачається проведення спеціальних експериментів, аналіз яких дозволяє отримати якісну оцінку механічних властивостей досліджуваних марок сталі і чавуну. В результаті аналізу технології виробництва сталі та чавуну і науково-дослідницьких робіт, спрямованих на вирішення проблеми оцінки механічних властивостей, сформульовано постановку завдання оперативного прогнозу цих властивостей і визначено основні шляхи її розв'язання.

**Ключові слова:** база даних, фрактал, сталь, чавун, прогноз, мультифрактал

## STATEMENT ON THE ISSUE OF THE PROBLEM IDENTIFICATION OF FRACTAL METAL STRUCTURES

BOL'SHAKOV V. I.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
VOLCHUK V. M.<sup>2\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), As. Prof.*,  
DUBROV Yu. I.<sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

<sup>1</sup> Department of Materials Science, State Higher Educational Establishment «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Department of Materials Science, State Higher Educational Establishment «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0001-8717-6786

<sup>3</sup> Department of Materials Science, State Higher Educational Establishment «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

**Summary.** To study the structure of metals and alloys and its influence on their properties are widely used traditional methods of macro- and microanalysis, X-ray, spectral, thermal and inspection (X-ray, magnetic, ultrasonic). They have their own threshold, often narrowly focused and applied directly depending on the purpose of the research object (pipe, forming rolls, metal, etc.). Currently existing mathematical models of forecasting the qualitative characteristics of metal products based only on an analysis of statistical data do not provide physical-chemical interpretation of the processes that occur during the formation of the structure or who could definitely take into account the effect of the chemical composition and other parameters of the technology. Therefore, the forecast results can not always meet the requirements. In order to obtain acceptable quality results produced by the product specifications developed by the forecast methodology should include the use of both classical and modern methods of structure evaluation. So, to determine the relationship between mechanical properties and structure elements of cast iron roll is planned to use the theory of fractals and multifractal. The proposed method is the most appropriate to quantify the majority of real structures, which the integer approximation of the figures of Euclid introduces some uncertainty, and therefore not always acceptable in practical problems of modern materials. In this regard, it is assumed conducting special experiments, the analysis of which allows to develop a qualitative evaluation of the mechanical properties of the investigated steels and cast iron. As a result of analysis of the production technology of steel and iron and research work aimed at solving the problem of evaluating the mechanical properties of the formulated problem statement of operational forecasting of these properties and the basic ways of its solution.

**Keywords:** database, fractal, steel, cast iron, forecast, multifractal

Развитие методов оценки структуры материалов для прогноза характеристик качества, с учетом научно-технического прогресса, вывело на новую ступень возможность проводить их количественную и качественную оценки. Для получения этой оценки применяются традиционные методы

рентгеноструктурного анализа, электронной микроскопии, термического анализа, микро-рентгеноспектрального зондирования, ядерно-магнитного резонанса (ЯМР), Оже-спектроскопии и др. Взаимосвязь между параметрами структуры металлов и комплексом их физико-механических свойств

интересовала и интересуется в настоящее время многих авторов. В работе [1] отмечается, что И. В. Тананаев, развивая представления Н. С. Курнакова о фазовых диаграммах и диаграммах «состав — свойство», заметил необходимость замены триады (состав — структура — свойства) квадригой, в которую входят еще структурные характеристики и дисперсность составляющих структуры. Данный подход позволяет учитывать влияние элементов структуры металла на его свойства. Однако сложности, заключающиеся в получении такого рода результатов, состоят в том, что многие элементы структуры металла, благодаря своей сложной конфигурации, трудно поддаются качественному описанию [2], что приводит к потере важной информации о тандеме «структура — свойства».

По нашему мнению, к таким характеристикам можно отнести существующую в данное время оценку зеренных структур, которая состоит из вычисления среднего размера зерна, плотности границ зерен, статистического распределения зерен по размерам, пористости и др. Также остаются недостаточно изученными процессы структурообразования металла и взаимосвязь этих процессов с его характеристиками качества. Для металла наличие субъективной (например, балловой) оценки параметров его структуры наблюдается, например, при количественной оценке влияния игольчатого феррита, игл мартенсита, видманштеттового феррита, верхнего и нижнего бейнита, троостита, границ зерен и т. д., что объясняется сложной конфигурацией их структуры. А феррито-бейнитная или феррито-бейнитно-мартенситная структуры требуют дальнейшего изучения в плане изменения сопротивления вязкому и хрупкому разрушению, хладоустойчивости, коррозионной стойкости, при сваривании высокопрочных конструкций [3]. Для оценки таких структур необходимо введение количественного показателя, отображающего особенности структуры.

В настоящее время с возникновением теории фракталов появилась возможность наряду с традиционными геометрическими

оценками структуры определять их размерностные оценки. Именно фрактальная геометрия показала пути формирования этого прогноза. Так как внутренняя метрика шлифа является функцией его фрактальной размерности, то в ней, вероятно, отображаются характеристики качества металла [4]. Для получения этих характеристик необходимо получить фрактальную размерность структуры материала, что является непростой задачей при создании системы прогноза. Так как металлы различаются характеристиками их качества и особенностями структуры, возникает задача формирования индивидуальной системы прогноза. В этой связи надежда на то, что можно было бы сформировать общую базу данных (БД) для прогноза качества металлов не представляется возможным.

Таким образом, мы утверждаем, что со временем такая БД, включающая большинство металлов, будет создана в зависимости от существующих потребностей и позволит прогнозировать те или иные их свойства.

В этой связи нами создана программа, включающая фрактальный подход и способствующая формированию БД, реализованной на ЭВМ [5], которая содержит следующие этапы:

1. Металлографический анализ структуры металла согласно действующим Госстандартам, включая балл зерна, соотношение фаз, длину межфазных и внутрифазных границ.

2. Определение фрактальной размерности параметров структуры металла (стали, чугуна и т. д.) [6].

3. Анализ прогноза характеристик качества исследуемого металла с применением композиции топологического [7] и фрактального [8] подходов.

4. Корректировку существующей БД новыми результатами прогноза характеристик качества металла.

Для примера на рисунке приведена мнемоническая схема, применяемая для прогноза механических свойств чугунных сортопрокатных (С) валков со структурой

пластинчатого (П) графита, легированных хромом (Х) и никелем (Н) – СПХН, производимых на ПАО «Днепропетровский завод прокатных валков» (ПАО ДЗПВ).

**Механические свойства чугунных валков (ПАО ДЗПВ)** [X]

Марка валка: СПХН-4Б

Химический состав в % по массе (за ТУ Ч 14-2-1188)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
3	0.76	0.53	0.006	0.009	0.5	1.03	0	0	0

Область валка: низ бочки

Металлографический анализ (по ГОСТу 3443)

Перлит, %	Феррит, %	Карбиды, %	Графит, %	Бейнит, %
89	0	10	1	0

Твердость по Шору, HSD (ГОСТ 23273): 45

Мартенсит, %	Аустенит остаточный, %	Сорбит, %	Графит (Шкала 1Б и Шкала 3Б)
0	0	0	ПГд90

[Вычислить] [Печать]

Механические свойства чугунного валка :

Предел прочности на растяжение: 320 МПа  
с учетом погрешности (P=0,03) доверительный интервал находится в пределах ±10(МПа)

Предел прочности на изгиб: 578 МПа  
с учетом погрешности (P=0,03) доверительный интервал находится в пределах ±17(МПа)

Ударная вязкость: 18,6 кгм/см<sup>2</sup>  
с учетом погрешности (P=0,03) доверительный интервал находится в пределах ±1(кгм/см<sup>2</sup>)

Рис. Мнемоническое изображение компьютерной реализации программы внедрения

В настоящее время разрабатывается методика прогноза качества сталей и чугунов специального назначения с применением теории мультифракталов.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев. – Москва : Наука, 1994. – 383 с. – Режим доступа: <http://www.mash.oglib.ru/bgl/9313.html>.
2. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография (стереология металлических материалов) / С. А. Салтыков. – Москва : Металлургия, 1976. – 270 с. – Режим доступа: [http://www.materialscience.ru/subjects/materialovedenie/knigi/stereometricheskaya\\_metallografiya\\_\\_saltikov\\_s\\_a\\_m\\_\\_metallurgiya\\_1976\\_\\_270\\_s\\_04\\_03\\_2010/](http://www.materialscience.ru/subjects/materialovedenie/knigi/stereometricheskaya_metallografiya__saltikov_s_a_m__metallurgiya_1976__270_s_04_03_2010/).
3. Большаков В. И. Термическая и термомеханическая обработка строительных сталей / В. И. Большаков, В. Н. Рычагов, В. К. Флоров. – Днепропетровск : Січ, 1994. – 232 с.
4. Большаков В. И. Об оценке применимости языка фрактальной геометрии для описания качественных трансформаций материалов / В. И. Большаков, Ю. И. Дубров // Доповіді Національної академії наук України. – 2002. – № 4. – С. 116-121.
5. Спосіб визначення фрактальної розмірності зображення : пат. 51439А України, МПК G06K 9/00 / Большаков В. І., Дубров Ю. І., Криулін Ф. В., Волчук В. М ; патентовласник Придніпр. держ акад. буд-ва та архітектури. – № 2002042586 ; заявл. 02.04.02 ; опубл. 15.11.02, Бюл. № 11. – 4 с.
6. Большаков В. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді Національної академії наук України. – 2008. – № 11. – С. 99–107. – Режим доступа: <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2008-11/>.
7. Большаков В. И. Микроструктура стали как определяющий параметр при прогнозе ее механических характеристик / В. И. Большаков, Ю. И. Дубров, О. С. Касьян // Доповіді Національної академії наук України. – 2010. – № 6. – С. 89–96. – Режим доступа: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/29277>.
8. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств малоуглеродистой стали / В. И. Большаков, В. Н. Волчук // Металлофизика и новейшие технологии. – 2011. – Т. 33, вып. 3. – С. 347–360.

## REFERENCES

1. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Z. and Oksogoyev A.A. *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii* [Synergy and fractals in material]. Moscow: Science, 1994. 383 p. Available at: <http://www.mash.oglib.ru/bgl/9313.html>.
2. Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya (stereologiya metallicheskikh materialov)* [Stereometric metallography (Stereology of metallic materials)]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 270 p. Available at: [http://www.materialscience.ru/subjects/materialovedenie/knigi/stereometricheskaya\\_metallografiya\\_\\_saltikov\\_s\\_a\\_m\\_\\_metallurgiya\\_1976\\_\\_270\\_s\\_04\\_03\\_2010/](http://www.materialscience.ru/subjects/materialovedenie/knigi/stereometricheskaya_metallografiya__saltikov_s_a_m__metallurgiya_1976__270_s_04_03_2010/) (in Russian).
3. Bol'shakov V.I., Rychagov V.N. and Florov V.K. *Termicheskaya i termomekhanicheskaya obrabotka stroitel'nykh staley* [Thermal and thermomechanical processing of construction steel]. Dnepropetrovsk: Sich, 1994, 232 p. (in Russian).
4. Bol'shakov V.I. and Dubrov Yu.I. *Ob otsenke primenimosti yazyka fraktal'noj geometrii dlya opisaniya kachestvennykh transformatsiy materialov* [An estimate of the applicability of fractal geometry to describe the language of qualitative transformation of materials]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2002, no. 4, pp. 116-121. (in Russian).
5. Bolshakov V.I., Dubrov Yu.I., Kryulin F.V. and Volchuk V.M. *Sposib vyznachennia fraktalnoi rozmirnosti zobrazhennia: pat. 51439A Ukrainy, MPK G06K 9/00* [Method of determining the fractal dimension image: patent 51439A of Ukraine, MPK G06K 9/00]. 2002. (in Ukrainian).
6. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Osobennosti primeneniya mul'tifraktal'nogo formalizma v materialovedenii* [Features of the multifractal formalism in materials science]. *Dopovidi Nacional'noi akademii nauk Ukraïni* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2008, no. 11, pp 99-107. Available at: <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2008-11/>(in Russian).
7. Bol'shakov V.I., Dubrov Yu.I. and Kasian O.S. *Mikrostruktura stali kak opredelyayushchij parametr pri prognoze ee mekhanicheskikh kharakteristik* [Steel microstructure as a defining parameter in the prediction its mechanical properties]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2010, no. 6, pp. 89-107. Available at: <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2008-11/> (in Russian).
8. Bolshakov V.I. and Volchuk V.N. *Materialovedcheskiye aspekty primeneniya veyvletno-mul'tifraktal'nogo podkhoda dlya otsenki struktury i svoystv malouglerodistoy stali* [Material science aspects of the use of wavelet and multifractal approach for assessing of the structure and properties of low-carbon steel]. *Metallofizika i noveyshie tekhnologii* [Metal physics and advanced technologies]. 2011, vol. 33, iss. 3, pp 347-360. (in Russian).

Рецензент: д-р. фіз.-мат. н. Башев В. Ф.

Надійшла до редколегії: 12.03.2016 р. Прийнята до друку: 26.03.2016 р.