

УДК 519.21

ПОИСК ПУТЕЙ ПРОГНОЗА КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА

БОЛЬШАКОВ В. И.¹, д. т. н., проф.,
ФОРТЫГИН А. А.^{2*}, маг.

¹ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: fortigin13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

Аннотация. Постановка проблемы. Установление взаимосвязи между структурой и свойствами материалов является одной из главных задач современного материаловедения. Эта проблема связана, в основном, с неполнотой формальной аксиоматики при идентификации структуры материалов. В работе предлагается для частичной компенсации неполноты формальной аксиоматики структуры использовать фрактальный анализ для прогноза механических характеристик трубных сталей. Актуальность выбора данного подхода обусловлена необходимостью проведения неразрушающего контроля данных характеристик труб в процессе их эксплуатации. **Объект исследования.** Ферритно-перлитная структура трубных сталей отечественного производства. **Материалы и методики исследований.** Для исследования ферритно-перлитной структуры трубных сталей использовалась оптическая микроскопия и запатентованная методика определения фрактальной размерности структуры металла. **Результаты и их обсуждение.** Определена фрактальная размерность феррита и перлита мало- и среднеуглеродистых сталей для трубного производства. Получены закономерности, описывающие соотношения между фрактальной размерностью ферритно-перлитной структуры трубных сталей различных марок и их твердостью. Установлено, что при возрастании фрактальной размерности перлита твердость металла повышается. Возрастание фрактальной размерности зерен перлита на рассматриваемой плоскости шлифа ($D \rightarrow 2$) обусловлено повышением их равноосности. Стали, имеющие строение зерен близкое к равноосным, обладают более высокими механическими свойствами по сравнению с неравноосными структурами. Получена математическая модель прогноза твердости трубных сталей с ферритно-перлитной структурой, погрешность которой составляет до 6 %. **Выводы.** Применение в качестве критерия для оценки структуры металла фрактальной размерности позволяет установить взаимосвязь между структурными составляющими и его механическими свойствами с минимальными затратами.

Ключевые слова: трубная сталь; твердость; ферритно-перлитная структура; фрактальный анализ; математическая модель

ПОШУК ШЛЯХІВ ПРОГНОЗУ ЯКОСТІ МЕТАЛУ

БОЛЬШАКОВ В. І.¹, д. т. н., проф.,
ФОРТИГІН А. А.^{2*}, маг.

¹ Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: fortigin13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

Анотація. Постановка проблеми. Встановлення взаємозв'язку між структурою і властивостями матеріалів – одне з головних завдань сучасного металознавства. Ця проблема пов'язана, в основному, з неповнотою формальної аксіоматики під час ідентифікації структури матеріалів. У статті пропонується для часткової компенсації неповноти формальної аксіоматики структури застосовувати фрактальний аналіз для прогнозу механічних характеристик трубних сталей. Актуальність вибору цього підходу зумовлена необхідністю проведення неруйнівного контролю даних характеристик труб у процесі їх експлуатації. **Об'єкт дослідження.** Феритно-перлітна структура трубних сталей вітчизняного виробництва. **Матеріали і методики досліджень.** Для дослідження феритно-перлітної структури трубних сталей застосовано оптичну мікроскопію і запатентовану методику визначення фрактальної розмірності структури металу. **Результати та їх обговорення.** Визначено фрактальну розмірність фериту і перліту мало- і середньовуглецевих сталей для трубного виробництва. Отримано закономірності, що описують співвідношення між фрактальною розмірністю феритно-перлітної структури трубних сталей різних марок та їх твердістю. Встановлено, що під час зростання фрактальної розмірності перліту твердість металу підвищується. Зростання фрактальної розмірності зерен перліту на розглянутій площині шліфу ($D \rightarrow 2$) зумовлене підвищенням їх рівноосності. Сталі, що мають будову зерен, близьку до рівноосної, мають більш високі механічні властивості порівняно з нерівновісними структурами. Отримано математичну модель прогнозу твердості трубних сталей з феритно-перлітною структурою, похибка якої не перевищує 6 %. **Висновки.** Застосування фрактальної розмірності, як критерій для оцінювання структури металу дозволяє встановити взаємозв'язок між структурними складовими та його механічними властивостями з мінімальними витратами.

Ключові слова: трубна сталь; твердість; феритно-перлітна структура; фрактальний аналіз; математична модель

METHOD OF METAL QUALITY PREDICTION

BOL'SHAKOV V.I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
FORTIGIN A.A.^{2*}, *Master*

¹ Department of Materials Science, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Department of Materials Science, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: fortigin13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

Abstract. Formulation of the problem. Establishing the relationship between the structure and properties of materials is one of the main tasks of modern materials science. This problem is mainly due to the incompleteness of formal axiomatics in the identification of the structure of materials. In this paper, it is proposed to use fractal analysis to predict the mechanical characteristics of tubular steels to partially compensate for the incompleteness of the formal structure axiomatics. The urgency of the choice of this approach is due to the need for non-destructive testing of these pipe characteristics during their operation. **Object of study.** Ferrite-pearlite structure of domestic steel tubes. **Materials and methods of research.** To study the ferrite-pearlite structure of tube steels, we used optical microscopy and a patented technique for determining the fractal dimension of the metal structure. **Results and its discussion.** The fractal dimension of ferrite and perlite of low- and medium-carbon steels for pipe production is determined. Regularities are obtained that describe the relationships between the fractal dimension of the ferrite-pearlite structure of tubular steels of various grades and their hardness. It is established that as the fractal dimension of perlite increases, the hardness of the metal increases. The increase in the fractal dimension of perlite grains on the considered plane of the section ($D \rightarrow 2$) is due to an increase in their equiaxiality. Steels having a grain structure close to equiaxial have better mechanical properties than non-equiaxed structures. A mathematical model is proposed for predicting the hardness of tubular steels with a ferrite-perlite structure, the error of which is up to 6%. **Conclusions.** Application as a criterion for estimating the structure of a metal of fractal dimension allows us to establish the relationship between structural components and their mechanical properties at minimal cost.

Keywords: tubular steel; hardness; ferrite-pearlite structure; fractal analysis; mathematical model

Постановка проблемы

Одной из основных задач материаловедения является определение связи между структурой материала и его свойствами. Выяснено, что структура материала определяет его свойства, поэтому изучение и внедрение новых методов исследования структуры материала позволяет определить и исследовать свойства этого материала, в частности, металла и его сплава. Изучение и совершенствования классических методов исследования структуры и определения качественных характеристик металлов и сплавов привело к рождению современного материаловедения. Благодаря внедрению и использованию современных компьютерных технологий стало доступно изучение и создание новых материалов с высокими прочностными и пластическими свойствами, что требует детального изучения их структуры. Применение дополняющих друг друга методов исследования структуры металлов позволяет извлечь информацию об изменениях в макроструктуре, микроструктуре и кристаллической структуре металлов и сплавов.

К основным методам исследования структуры металлов следует отнести оптическую микроскопию, рентгеноструктурный анализ, электронную микроскопию, ультразвуковую диагностику и методы неразрушающего контроля и др. Однако эти методики требуют специального материального обеспечения, решают узкоспециализированные

задачи, в которых практически отсутствует информация о механических свойствах исследуемого металла, что инициирует поиск методов оценки его механических свойств. Эти аспекты имеют прямое отношение и к трубной промышленности.

На сегодняшний день высокое качество труб и их компонентов является основным критерием в современном производстве трубной продукции, поэтому используется все разнообразие методик проверки качества трубной продукции. Это связано с тем, что в течение срока службы трубопроводы испытывают более 10^5 циклов, их разрушения носят типичный усталостный характер с длительным периодом стадии накопления повреждений [1].

Существует большое количество литературных источников, где рассматриваются способы оценки влияния длительности эксплуатации на повреждаемость металла труб [2; 3]. Однако эти методы оценки влияния длительности эксплуатации, из числа тех, которые основаны на реализации их без разрушения исследуемой конструкций, основаны на исследовании характеристик, которые в основном не используются в расчетных методах (твердость, повреждаемость и т. д.), а если и применяются, то носят косвенный характер. Эти методики имеют свои недостатки и погрешности, что снижает точность прогноза механических свойств. Широко применяемые на практике различные варианты метода акустической эмиссии не могут дать сведений по механическим свойствам металла труб, требуют применения дорогостоящего оборудования,

приборного обеспечения и сложной процедуры обработки результатов измерений. Метод твердости характеризуется недостаточной информативностью и низкой точностью, поскольку корреляция между твердостью и механическими свойствами не всегда отражает полную картину изменения этих свойств, а корреляция между ними не всегда может быть однозначной.

Трудности с установлением соответствия между механическими свойствами и параметрами структуры металла обусловлены в большей степени неполнотой формальной аксиоматики, проявляющейся при идентификации структуры.

В работе предлагается для частичной компенсации неполноты формальной аксиоматики

структуры трубных сталей с целью оценки их механических свойств использовать язык фрактальной геометрии [4–16].

Объект исследования

Объектом для исследований выступают ферритно-перлитные структуры трубных сталей отечественного производства.

Материалы и методики исследований

Трубные стали отбирались в состоянии поставки и имели состав, приведенный в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых марок сталей / Chemical composition of test steels

Нормативный документ	Сталь	C	Mn	Si	Cr	S	P	Ni	Cu
					не более				
ГОСТ 1050	10	0,07–0,14	0,35–0,65	0,17–0,37	0,15	0,040	0,035	0,30	0,30
ГОСТ 1050	20	0,17–0,24	0,35–0,65	0,17–0,37	0,25	0,040	0,035	0,30	0,30
ГОСТ 1050	35	0,32–0,40	0,50–0,80	0,17–0,37	0,25	0,040	0,035	0,30	0,30
ГОСТ 4543	40X	0,36–0,44	0,50–0,80	0,17–0,37	0,80-1,10	0,035	0,035	0,30	0,30
ГОСТ 1050	45	0,42–0,50	0,50–0,80	0,17–0,37	0,25	0,040	0,035	0,30	0,30

Для исследования ферритно-перлитной структуры трубных сталей использовалась оптическая микроскопия и запатентованная методика определения фрактальной размерности структуры

металла [17]. Поверхность шлифов подвергали травлению в 4 % растворе азотной кислоты в спирте. На рисунке 1 представлена микроструктура исследуемых марок сталей.

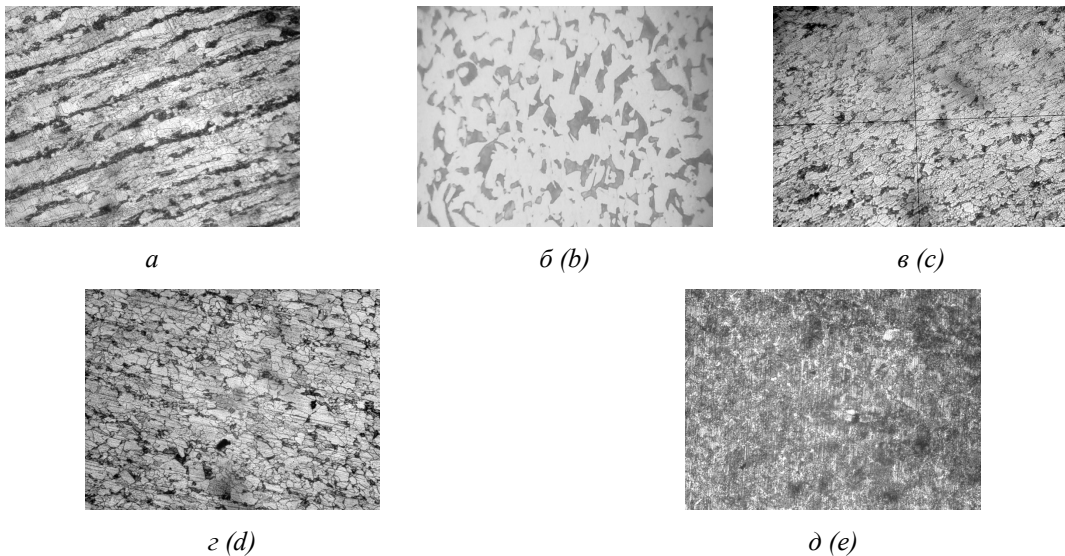


Рис. 1. Структура трубных сталей марок 10 (а), × 500; 20 (б), × 100; 35 (в) × 500; 40X (г), × 500; 45 (д), × 500 / Fig. 1. Structure of tubular steels 10 (a), 20 (b), 35 (c), 40X (d), 45 (e), × 100

Фрактальная размерность D элементов структуры вычислялась согласно формуле (1) [4] по разработанной методике [17]:

$$D = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln \delta}, \quad (1)$$

где $N(\delta)$ – количество клеток, покрывших исследуемый объект; δ – размер клетки.

Результаты и их обсуждение

Механические свойства сталей 10, 20, 35, 40X, 45 и фрактальные размерности феррита и перлита приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры испытаний металла и фрактальная размерность его структуры / Parameters of metal tests and fractal dimension of its structure

Марка стали (трубы ГОСТ 8731-87)	Твердость, НВ 10 ⁻¹ , МПа	Предел прочности, σ _B , МПа	Относительное удлинение, δ ₅ , %	Фрактальная размерность, D	
				перлита	феррита
10	137	353	24	1,652	1,926
20	156	412	21	1,735	1,885
35	187	510	17	1,834	1,814
40X	269	657	9	1,897	1,686
45	207	588	14	1,955	1,465

Установлено, что с повышением фрактальной размерности перлита показатели твердости и прочности повышаются (рис. 2 а, б, ряд 2), что обусловлено как повышением его процентного содержания, так и изменением формы зерен перлита с более геометрически “деформированной” на менее “деформированную”. Такая форма зерен обусловлена процессами формирования структуры, происходящими в открытой системе. Пока образовавшиеся кристаллы растут свободно, они имеют более или менее правильную геометрическую форму. Однако при столкновении их правильная форма нарушается, так как в этих участках рост граней

прекращается. Рост продолжается только в тех направлениях, где есть свободный доступ “питающей” жидкости.

Нарушение правильной формы образовавшихся кристаллов регистрируется с помощью изменения фрактальной размерности, что обуславливает возможность применения фрактальной геометрии для анализа структур различных материалов [18–23]. И наоборот, показатели твердости и прочности снижаются при возрастании фрактальной размерности зерен феррита как более пластичной фазы (рис. 2 а, б, ряд 1).

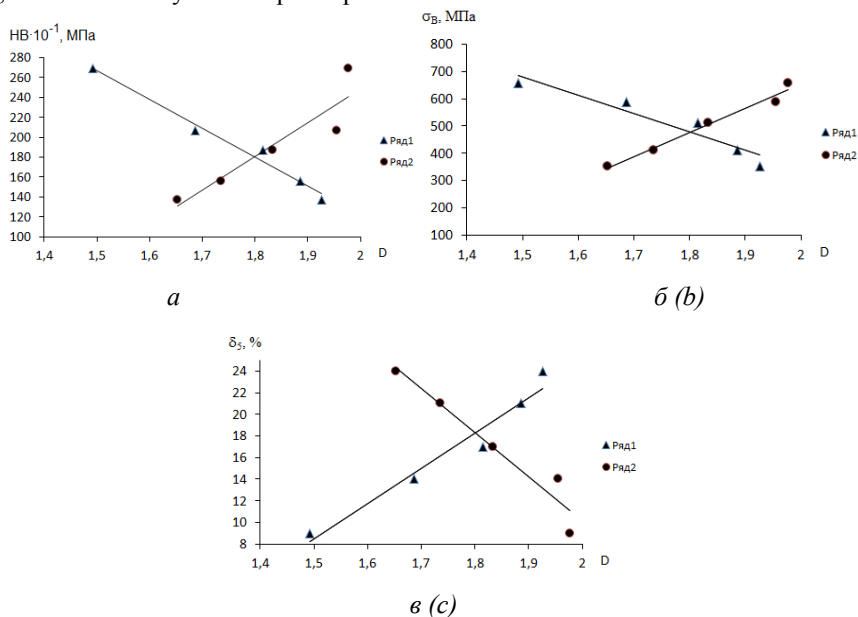


Рис. 2. Зависимость показателей твердости (а), предела прочности (б) и относительного удлинения (в) от фрактальной размерности феррита (Ряд 1) и перлита (Ряд 2) / Fig. 2. Dependence of the hardness (а), tensile strength (б) and elongation (с) on the fractal dimension of ferrite (Row 1) and perlite (Row 2)

Експериментально встановлено, що при підвищенні фрактальної розмірності феррита показателі відносительного удлиннения возрастають (рис. 2 в, ряд 1), а при підвищенні фрактальної розмірності перлита як більшій міцній структурній складовою – знижуються (рис. 2 в, ряд 2).

$$\begin{aligned} \text{HB} &= -288,86 \cdot D_{\text{феррита}} + 699,76 & R^2 &= 0,90, & (2) \\ \text{HB} &= 338,74 \cdot D_{\text{перлита}} - 428,84 & R^2 &= 0,84, & (3) \\ \sigma_B &= -676,38 \cdot D_{\text{феррита}} + 1694,80 & R^2 &= 0,89, & (4) \\ \sigma_B &= 881,73 \cdot D_{\text{перлита}} - 1109,90 & R^2 &= 0,91, & (5) \\ \delta_5 &= 32,64 \cdot D_{\text{феррита}} - 40,47 & R^2 &= 0,93, & (6) \\ \delta_5 &= -40,80 \cdot D_{\text{перлита}} + 91,69 & R^2 &= 0,86. & (7) \end{aligned}$$

Выводы

В ходе работы исследовано влияние реальной формы элементов ферритно-перлитной структуры трубных сталей. Определенные закономерности

ниже приведены уравнения прогноза механических свойств трубных сталей на основании фрактального анализа их ферритно-перлитной структуры.

представляют собой базу знаний, позволяющую с установленной относительной погрешностью до 6 % прогнозировать механические характеристики исследуемых марок сталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Большаков В. И. Термомеханическая обработка конструкционных сталей : монография / [В. И. Большаков]. – Канада: Базилиан Пресс, 1998. – 316 с.
2. Сосновский Л. А. Влияние длительной эксплуатации на сопротивление усталости трубной стали / Л. А. Сосновский, В. В. Воробьев // Проблема прочности. – 2000. – № 6. – С. 44–53.
3. Котречко С. А. Влияние длительности эксплуатации на вязкость трубной стали 17ГС / С. А. Котречко, А. Я. Красовский, Ю. Я. Мешков, Г. С. Меттус, Ю. А. Полушкин, В. М. Тороп // Проблемы прочности. – 2002. – № 6. – С. 21–30.
4. Mandelbrot B. V. The Fractal Geometry of Nature : monograph / [B. V. Mandelbrot]. – New-York, San Francisco : Freeman, 1982. – 480 p. – Режим доступа : <http://www.amazon.com/Fractal-Geometry-Nature-Benoit-Mandelbrot/dp/0716711869>
5. Большаков В. И. Фрактальный подход при идентификации сложных систем / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2017. – № 6. – С. 46–50. – Режим доступа : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.06.00>
6. Большаков В. И. К вопросу о постановке задачи идентификации фрактальной структуры металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – № 5. – С. 35–39. – Режим доступа : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/68905/63995>
7. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения частичной компенсации неполноты формальной аксиоматики / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – № 5. – С. 10–16. – Режим доступа : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/47385/43497>
8. Волчук В. Н. О возможности применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств стали / В. Н. Волчук // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2010. – № 38. – С. 115–121.
9. Большаков В. И. К определению метрики объекта идентификации / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2016. – № 4. – С. 10–14. Режим доступа : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/10-14/85306>
10. Большаков В. И. К определению класса металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2016. – № 1. – С. 26–31. – Режим доступа : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/24-31/62203>
11. Волчук В. Н. К вопросу о применении теории мультифракталов для оценки механических свойств металла / В. Н. Волчук // Металознавство та термічна обробка металів. – 2014. – № 3. – С. 12–19. – Режим доступа : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/12-19>
12. Фракталы в материаловедении : учебное пособие / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров] Днепропетровск: ПГАСА, 2006. – 253 с.
13. Большаков Вад. І. Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу / Вад. І. Большаков В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // Вісник НАН України. – 2014. – № 12. – С. 45–48. – Режим доступа : <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73434>
14. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография / [Ю. Дубров, В. Большаков, В. Волчук]. – Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 236 с. – Режим доступа : <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
15. Пути применения теории фракталов: монография / [В. Большаков, В. Волчук, Ю. Дубров]. – Саарбрюккен: Palmarium Academic Publishing, 2016. – 146 с. – Режим доступа : <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
16. Fractals and properties of materials : monograph / [V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov] – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p. – Режим доступа : <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>

17. Большаков В. И., Дубров Ю. И., Криулин Ф. В., Волчук В. М. Патент на винахід № 51439А. Спосіб визначення фрактальної розмірності зображення. – Бюл. № 11. – 15.11.2002.
18. 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. – 2004. – № 1. – С. 43–54.
19. Большаков В. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2008. – № 11. – С. 99–107. – Режим доступа : <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2008-11/08-11-17.pdf>
20. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств малоуглеродистой стали / Большаков В. И., Волчук В. Н. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2011. – Т. 33. – № 3. – С. 347–360.
21. Большаков В. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2017. – № 4. – С. 42–48. – Режим доступа : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.04.00>
22. Большаков В. И. Исследование микроструктурной однородности стали У8 с применением мультифрактального анализа / В. И. Большаков, В. Н. Волчук // Металознавство та термічна обробка металів. – 2010. – № 4. – С. 31–38.
23. Большаков В. И. К вопросу о постановке задачи идентификации фрактальной структуры металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – № 5. – С. 35–39. – Режим доступа : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/68905/63995>

REFERENCES

1. Bolshakov V.I. *Termomekhanicheskaya obrabotka konstruksionnykh staley* [Thermomechanical treatment of structural steels]. Kanada : Bazilian Press Publ., 1998, 316 p. (in Russian).
2. Sosnovskiy L.A. and Vorob'yov V.V. *Vliyaniye dlitel'noy ekspluatatsii na soprotivleniye ustalosti trubnoy stali* [Influence of long-term operation on fatigue resistance of pipe steel]. *Problemy prochnosti* [Problems of Strength.]. 2000, no. 6, pp. 44–53. (in Russian).
3. Kotrechko S.A., Krasovskii A.Ya., Meshkov Yu.Ya., Mettus G.S., Polushkin Yu.A. and Torop V.M. *Vliyaniye dlitel'nosti ekspluatatsii na вязкость' trubnoy stali 17ГC* [Effect of operating time on the viscosity of 17ГC pipe steel]. *Problemy prochnosti* [Problems of Strength.]. 2002, no. 6, pp. 21–30. (in Russian).
4. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. New-York, San Francisco : Freeman, 1982, 480 p.
5. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Fraktal'nyy podkhod pri identifikatsii slozhnykh sistem* [Fractal approach to the identification of complex systems]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 6, pp. 46–50. (in Russian).
6. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K voprosu o postanovke zadachi identifikatsii fraktal'noy struktury metalla* [Statement on the issue of the problem identification of fractal metal structures]. *Visnyk Prydniprovs'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 5, pp. 35–39. (in Russian).
7. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Materialovedcheskiye aspekty primeneniya chastichnoy kompensatsii nepolnoy formal'noy aksiomatiki* [Material aspects of use of partial compensation of incompleteness of formal axiomatics]. *Visnyk Prydniprovs'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 5, pp. 10–16. (in Russian).
8. Volchuk V.N. *O vozmozhnosti primeneniya veyvletno-mul'tifraktal'nogo podkhoda dlya otsenki struktury i svoystv stali* [On the possibility of using the wavelet-multifractal approach to evaluate the structure and properties of steel]. *Visnyk Odes'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2010, no. 38, pp. 115–121. (in Russian).
9. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K opredeleniyu metriki ob'yekta identifikatsii* [To the definition of the identity metric]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 4, pp. 10–14. (in Russian).
10. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K opredeleniyu klassa metalla* [To the definition of a class of metal]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 1, pp. 26–31. (in Russian).
11. Volchuk V.N. *K voprosu o primenenii teorii mul'tifraktalov dlya otsenki mekhanicheskikh svoystv metalla* [On the application of the theory of multifractals for the evaluation of the mechanical properties of a metal]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian).
12. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Fraktaly v materialovedenii* [Fractals in materials]. Dnipropetrovsk : PSACEA, 2005, 253 p. (in Russian).
13. Bol'shakov Vad.I., Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Chastkova kompensatsiya nepovnoty formal'noy aksiomatyky pry identyfikatsiyi struktury metalu* [The partial compensation of incompleteness of formal axiomatics in the identification of the metal structure]. *Visnyk akademiyi nauk Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 12, pp. 45–48. (in Ukrainian).
14. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. (in Russian).
15. Bolshakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Puti primeneniya teorii fraktalov* [Ways of applying the theory of fractals]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2016, 146 p. (in Russian).
16. Bolshakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.

17. Bol'shakov V.I., Dubrov Yu.I., Kryulin F.V. and Volchuk V.N. *Sposib vyznachennya fraktal'noyi rozmirnosti zobrazhennya* [Method for Determining the Dimensionality of Images]. Patent product no. 51439A, UA. MPK 7 G06K9/00, bulletin no. 11, 2002. (in Ukrainian).

18. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Razrabotka i issledovaniye metoda opredeleniya mekhanicheskikh svoystv metalla na osnove analiza fraktal'noy razmernosti yego mikrostruktury* [Development and study of the method for determining the mechanical properties of a metal based on an analysis of the fractal dimension of its microstructure]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2004, no. 1, pp. 43–54. (in Russian).

19. 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]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2008, no. 11, pp. 99–107. (in Russian).

20. 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 noveyshiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2011, vol. 33, no 3, pp. 347–360. (in Russian).

21. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Topologicheskkiye i fraktal'nyye invarianty struktury dlya otsenki kachestva metalla* [Topological and fractal invariants of a structure to assess the quality of a metal]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 4, pp. 42–48. (in Russian).

22. Bolshakov V.I. and Volchuk V.N. *Issledovaniye mikrostrukturnoy odnorodnosti stali Y8 s primeneniyyem mul'tifraktal'nogo analiza* [Investigation of the microstructural homogeneity of Y8 steel with the use of multifractal analysis]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2010, no. 4, pp. 31–38. (in Russian).

23. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K voprosu o postanovke zadachi identifikatsii fraktal'noy struktury metalla* [Statement on the issue of the problem identification of fractal metal structures]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 5, pp. 35–39. (in Russian).

Статья рекомендована к публикации в журнале «Д-ром техн. наук, проф. В. Н. Волчуком (Украина); д-ром техн. наук, проф. Ю. И. Дубровым (Украина)».

Поступила в редколлегию 24.11.17

Принята к печати 30.11.17