УДК 669.017:519.21
DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.271222.32.908

ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСПЕРТНИХ ТА ФРАКТАЛЬНИХ ОЦІНОК ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ

БОЛЬШАКОВ В. І.[1], *докт. техн. наук, проф.*,
КОТОВ М. А.[2*], *канд. техн. наук, доц.*,
ІЛЬЄВ І. М.[3], *канд. техн. наук, доц.*,
ЗАГОРОДНІЙ О. Б.[4], *ст. виклад.*

[1] Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov.volodymyr@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000–0002–2624–4666
[2*] Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 261-85-34, e-mail: kotov.nykolay@ pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0233-0663
[3] Кафедра комп'ютерних наук, інформаційних технологій та прикладної математики, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-10, e-mail: il'ev@ ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4488-1279
[4] Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: zagorodnii.oleksii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740

Анотація. ***Вступ.*** Для дослідження структури та властивостей конструкційних сталей застосовують різні підходи. Властивості сталей визначають за допомогою традиційних методик (фізичні методи, натурні іспити, рентгенівський аналіз, мікроскопія тощо). Дослідження структури також здійснюють за допомогою традиційних способів, що базуються на цілочисловій геометрії Евкліда. Подібна апроксимація елементів структури фігурами Евкліда спричинює зменшення точності моделей прогнозу через складну форму її елементів. Причиною цьому служить фрактальність (дробність розмірності) більшості елементів будови матеріалів. У роботі запропоновано підхід, що базується на поєднанні експертних та фрактальних оцінок для створення моделі прогнозу якості будівельної сталі. ***Матеріали та методика.*** Досліджувалася конструкційна сталь 20 в режимі заводської поставки. Сталь мала ферито-перлітну структуру. Механічні іспити та визначення хімічного складу проводили згідно з існуючими нормативними документами (ДСТУ 7809). Вміст перліту в сталі коливався в межах 10…18 % залежно від кількості вуглецю. Ферит займав всю іншу долю досліджуваної під оптичним мікроскопом Неофот-2 площі шліфа. ***Результати експерименту.*** Експертна оцінка застосовувалася для прогнозу механічних показників міцності з метою зменшення матеріально-часових витрат на проведення натурних іспитів зі зразками металу. Шляхом співставлення фрактальних оцінок структури з показниками механічних іспитів досліджено вплив феритно-перлітної структури на механічні характеристики міцності. Встановлено, що збільшення фрактальної розмірності перліту позитивно впливає на зростання показників міцності сталі 20. Подібний ефект певним чином пов'язаний зі зміною форми зерен перліту в процесі зміни кількості вуглецю у сталі в межах нормативних документів. ***Висновки.*** Для будівельної сталі 20 отримано моделі оцінки її механічних характеристик з використанням фрактальних розмірностей елементів структури та експертних оцінок. Коефіцієнти парної кореляції регресійних рівнянь зафіксовані в діапазоні 0,65…0,85. Отримані результати можна застосовувати для прогнозу показників міцності сталі, що особливо актуально для оцінювання її залишкового ресурсу в процесі експлуатації.

Ключові слова: *сталь 20; хімічний склад; механічні властивості; структура; експертна оцінка; модель*

APPLICATION OF EXPERT AND FRACTAL ASSESSMENTS IN FORECASTING THE QUALITY OF CONSTRUCTION STEEL

BOLSHAKOV V.I.[1], *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KOTOV M.A.[2*], *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
ILIEV I.M.[3], *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
ZAGORODNY O.B.[4], *Senior Lecturer*

[1] Department of Materials Science, Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. + 38 (056) 745-23-72, e-mail: bolshakov.volodymyr@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000–0002–2624–4666
[2*] Department of Reinforced-Concrete and MasonryConstructions, Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 261-85-34, e-mail: kotov.nykolay@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0233-0663
[3] Department of Computer Sciences, Information Technologies and Applied Mathematics, Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.+38 (0562) 47-16-10, e-mail: il'ev@ ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4488-1279
[4] Department of Materials Science, Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. + 38 (056) 745-23-72, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: zagorodnii.oleksii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740

Abstract. ***Introduction.*** Different approaches are used to study the structure and properties of structural steels. The properties of steels are determined using traditional methods (physical methods, field tests, X-ray analysis, microscopy, etc.). Structure studies are also carried out using traditional methods based on Euclid's integer geometry. A similar approximation of structural elements by Euclid's figures leads to a decrease in the accuracy of forecast models due to the complex shape of its elements. The reason for this is the fractality (fine dimensionality) of most elements of the material structure. The paper proposes an approach based on a combination of expert and fractal assessments when creating a forecast model for the quality of construction steel. ***Materials and methods.*** Construction steel 20 in the mode of factory delivery was studied. The steel had a ferrite-pearlite structure. Mechanical tests and determination of chemical composition were carried out in accordance with the existing regulatory documents (DSTU 7809). The content of pearlite in steel ranged from 10 to 18 %, depending on the amount of carbon. Ferrite occupied the entire other part of the area of the slide examined under the Neophot-2 optical microscope. ***The results of the experiment.*** Expert assessment was used to predict mechanical indicators of strength with the aim of reducing material and time costs for conducting field tests with metal samples. The effect of the ferrite-pearlite structure on the mechanical characteristics of strength was investigated by comparing the fractal evaluations of the structure with the indicators of mechanical tests. It has been established that an increase in the fractal dimension of pearlite has a positive effect on the growth of strength indicators of steel 20. A similar effect is, in a certain way, associated with the change in the shape of pearlite grains in the process of changing the amount of carbon in steel within the limits of regulatory documents. ***Conclusions.*** For structural steel 20, models for assessing its mechanical characteristics were obtained using the fractal dimensions of structural elements and expert assessments. Coefficients of pairwise correlation of regression equations are recorded in the range of 0.65...0.85. The obtained results can be used to forecast strength indicators of steel, which is especially relevant when assessing its residual resource during operation.

Keywords*: steel 20; chemical composition; mechanical properties; structure; expert assessment; model*

Вступ

Для опису складних процесів та об'єктів різної природи, до яких певною мірою належать матеріали та їх будова, застосовують сучасні підходи та засоби досліджень [1−7]. Із цією метою застосовують експертні оцінки [8] та нові підходи, що допомагають оптимізувати алгоритми розв'язання прикладних задач.

У матеріалознавстві проблема встановлення зв'язку між структурою та властивостями вирішується з використанням різноманітних підходів. Відносно недовгий час одну з провідних позицій у розв'язанні задач опису складних структур займає теорія фракталів [9].

Її застосування, зокрема, зумовлене довільним вибором метрики досліджень [10], що в кінцевому рахунку впливає на точність ідентифікації досліджуваних будов багатьох матеріалів.

Зокрема, теорія фракталів успішно застосовується для регуляризації задач металургії [11], прогнозу властивостей чавунів [12], сталей [13] та бетонів [14], пошуку області компромісу низьковуглецевих сталей [15] й оцінювання складної структури голчастого фериту сталі після термічної обробки [16], в аналізі залишкового ресурсу сталей, що застосовується в атомних реакторах [17] та впливу на них корозії [18].

Виходячи з вищезазначеного, для оцінювання механічних властивостей конструкційної сталі в роботі запропоновано застосовувати експертні оцінки та теорію фракталів.

Матеріали та методика

Сталь 20 згідно з нормативними документами належить до вуглецевих сталей, що застосовуються для виготовлення металоконструкцій та різних виробів, які експлуатуються в температурному діапазоні −40…450 ^{0}C (ДСТУ 7809).

Хімічний склад сталі 20 наведено згідно з ДСТУ 7809 у таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 20 в % /

C	Mn	Si	Ni	S	P	Cr	Cu
0,17−0,24	0,35−0,65	0,17−0,37	до 0,3	до 0,035	до 0,04	до 0,25	до 0,3

Механічні іспити за відомими методиками проводилися для визначення таких характеристик: межа міцності на розтяг $\sigma_в$ (410…450 МПа), межа плинності $\sigma_{0,2}$ (245…270).

Для дослідження мікроструктури сталі після заводської поставки застосовувався металографічний мікроскоп Неофот-2. Шліфи сталі 20 виготовлялися згідно з такими операціями: 1) процес травлення у 4 % розчині азотної кислоти в спирті; 2) процес шліфування на абразивних кругах дисперсністю 400…1 200 мкм; 3) процес полірування з використанням алмазної пасти дисперсністю 5 мкм.

Без термічної обробки структура сталі феритно-перлітна (рис. 1) [37]. Вміст перліту залежав від вмісту вуглецю в сталі і змінювався в межах від 10…18 %. Остання доля структури припадала на феритну складову. На рисунку 1 показано мікроструктуру шліфа сталі.

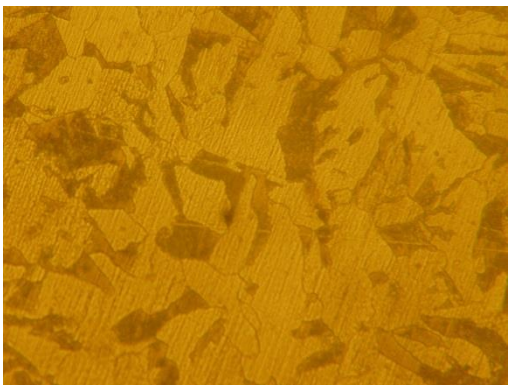


Рис. 1. Структура сталі 20 у стані заводської поставки при 0,18 % С, ×400

У дослідженні застосовувалися результати шістнадцяти натурних експериментів для вивчення впливу фрактальної розмірності перліту на показники міцності сталі 20 залежно від кількості вуглецю в межах нормативних документів (ДСТУ 7809).

Результати експерименту. Фрактальну розмірність перліту розраховували за допомогою запатентованої програми (автори патенту проф. В. І. Большаков, Ю. І. Дубров, В. М. Волчук та інж. Ф. В. Криулін), алгоритм якої описано в [9] та реалізованої за допомогою мови програмування *Delphi*.

Для обчислення фрактальної розмірності перліту D застосовували клітинний (1) та точковий (2) методи [9]:

$$D = tg\alpha = \frac{ln\,N(\delta)}{ln\,\delta}, \qquad (1)$$

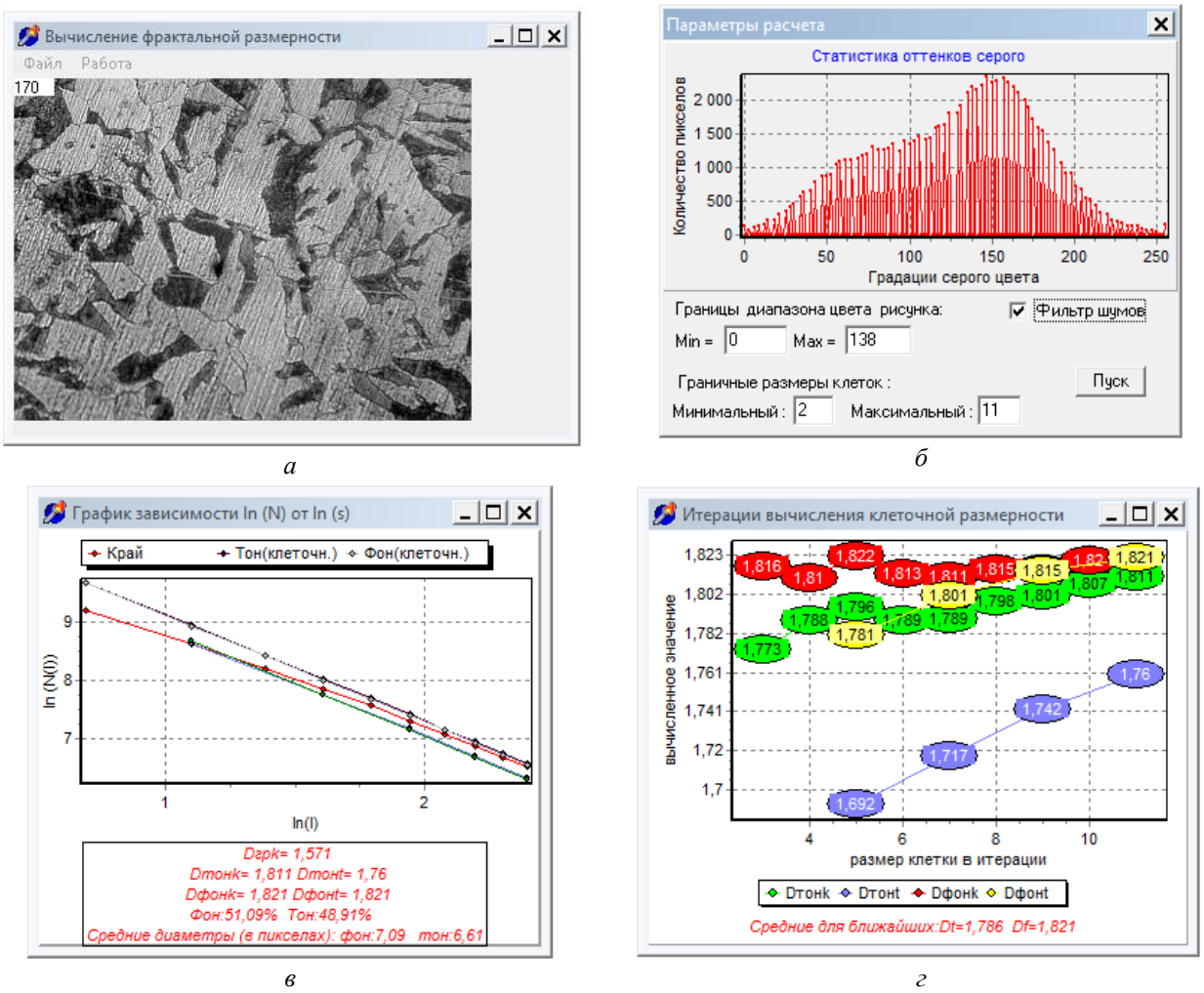
де $N(\delta)$ – кількість клітинок, що покривають площу перліту; δ – лінійний розмір клітинки.

$$\tilde{N}(L) = \sum_{m=1}^{K}(1/m)P(m,L), \qquad (2)$$

де кількість клітинок N розміром L, що містять m точок досліджуваного об’єкту; K – кількість точок у заданій клітинці розміром L.

Методика визначення фрактальної розмірності досліджуваного об'єкта побудована на пошуку збіжності результатів фрактальної розмірності, що обчислюється за допомогою клітинного та точкового методів.

На рисунку 2 (*а–г*) наведено результати розрахунку фрактальної розмірності перліту з рисунка 1 із використанням розробленої програми.



а *б*

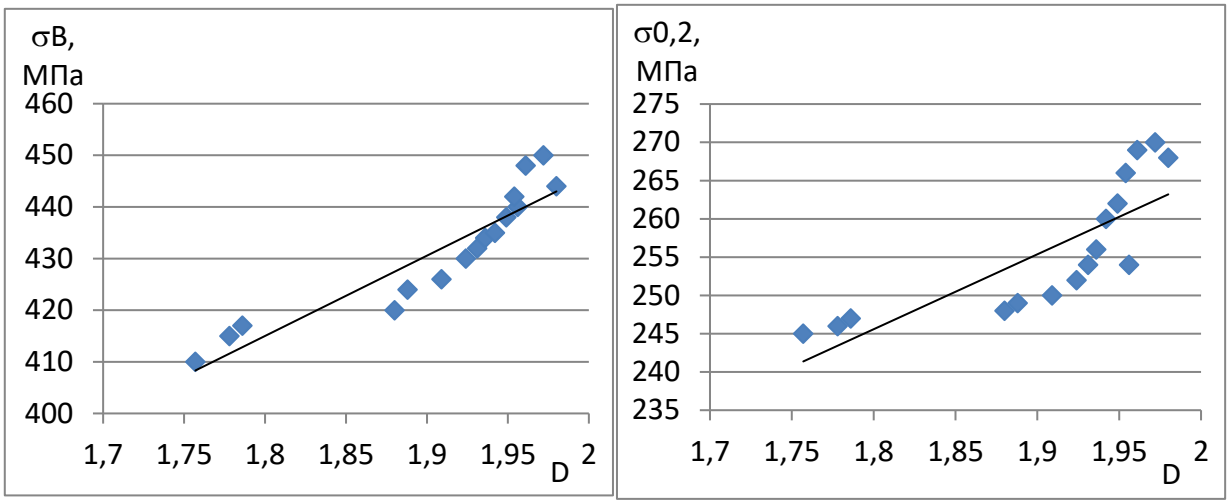
в *г*

Рис. 2. Алгоритм розрахунку фрактальної розмірності структури

На першому етапі розрахунків фрактальної розмірності (рис. 2 *а*) визначали межі кольорової гами феритно-перлітної структури. Рисунок переводився в 256-кольорову гаму. В даному випадку колір 170 (рис. 2 *а*) відповідає кольору фериту. На другому етапі (рис. 2 *б*) задається діапазон зміни кольорів (в конкретному випадку це колір перліту від 0 до 138). На третьому етапі будували графіки, за якими розраховували значення фрактальної розмірності, де *Dгрк* – фрактальна розмірність меж зерен; *Dтонк*– фрактальна розмірність перліту, обчислена клітинним методом; *Dтонт* – фрактальна розмірність перліту, обчислена точковим методом; *Dфонк* – фрактальна розмірність фериту, обчислена клітинним методом; *Dфонт* – фрактальна розмірність фериту, обчислена точковим методом.

На рисунку 2 *г* (четвертий етап розрахунків) *Dt* = 1,786 – фрактальна розмірність перліту; *Df* = 1,821 – фрактальна розмірність фериту.

З використанням методики регресійного аналізу побудовано залежності, що описують вплив фрактальної розмірності перліту на межі міцності (рис. 3 *а*) та плинності (рис. 3 *б*).



а *б*

Рис. 3. Залежність межі міцності (а) та плинності (б) сталі 20 від фрактальної розмірності перліту D

Фрактальні моделі мають лінійний характер, що свідчить про існування взаємно однозначної відповідності між фрактальною розмірністю перліту сталі 20 та характеристиками її міцності.

Коефіцієнти парної кореляції R^2 = 0,85 (3) та R^2 = 0,65 (4) підтверджують існування зв'язку між фрактальною структурою та механічними властивостями досліджуваного металу.

$$\sigma_в = 155{,}53D + 135{,}05, \qquad R^2 = 0{,}85 \qquad (3)$$

$$\sigma_{0,2} = 97{,}879D + 69{,}4, \qquad R^2 = 0{,}65 \qquad (4)$$

Наприклад, у [19] з використанням теорії фракталів установлено, що внесок у міжзеренне зміцнення аустеніту для характеристик міцності труб-оболонок зі сталі 026Х16Н15М3Б після холодної прокатки становить 38…54 %, а для меж зерен становить 46…62 %. У [20; 21] показано, що коефіцієнти кореляції моделей прогнозу бетонів зафіксовані на рівні 0,7…0,9, що узгоджується з фізичними поясненнями впливу елементів структури на показники міцності. У [22] виявлено, що наноструктуроване покриття ZrN поліпшує властивості тонкостінних різальних інструментів. Морфологія поверхні ZrN теоретично обґрунтована також із застосуванням теорії фракталів.

Наведені шляхи застосування фрактальних алгоритмів [23] допомагають установлювати нові зв'язки між структурою та властивостями матеріалів.

Підсумовуючи отримані результати, слід зазначити, що моделі (3), (4) дозволяють прогнозувати характеристики міцності сталі 20 з феритно-перлітною структурою із задовільною для практичних вимог точністю на основі оцінки фрактальної розмірності перліту.

Висновки

Проведено дослідження, що мають на меті встановлення зв'язку між структурою та механічними характеристиками з використанням фрактального аналізу. Шляхом розрахунку фрактальної розмірності перліту із використанням експертних оцінок установлено співвідношення з межею міцності та плинності сталі 20, що дають можливість застосовувати теорію фракталів у неруйнівних методиках прогнозу якості конструкційних сталей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sandhya Y. B., Rao K. S., Rajesh P. S., Giri N. C., Das S., Bhadoria V. S. Statistical Assessment of Sustainable Energy for the Lowest Feasible Levelized Cost of Electricity. *In: 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*. April, 2022. Pp. 1106−1109. URL: https://doi.org/10.1109/ICACITE53722.2022.9823748

2. Taran A. V., Garkusha I. E., Romaniuk S. P., et al. Influence of plasma-based ion implantation and deposition on the structure, internal stress, mechanical properties of nanocrystalline ZrN coatings. *Nanotechnology Percept*. 2020. Vol. 16, № 1. Pp. 56–63.

3. Taran A., Garkusha I., Taran V., Timoshenko A., Misiruk I., Starikov V., Baturin A., Skoblo T., Romaniuk S., Mamalis A.G. Nanostructured ZrO_2 ceramic PVD coatings on Nd−Fe−B permanent magnets. Nanotechnol Percept. 2019. Vol. 15, № 1. Pp. 13−20. URL: https://doi.org/10.4024/N23TA18A.ntp.15.01

4. Konoplianyk O., Kotov N., Iliev I. Specific Design Features of Prefabricated Fire-Resistant Floor Slabs Made from Lightweight Concrete. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2022. Vol. 30, № 1. Pp. 1−7. URL: https://doi.org/10.2478/sjce-2022-0001

5. Savytskyi M., Nikiforova T., Nosenko O., Kotov N., Papirnyk R. Construction technology for affordable housing with the use of space-braced concrete-filled steel tubular framing. *In: E3S Web of Conferences.* 2021. Vol. 280. Pp. 03003. URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128003003

6. Vakhrusheva V. S., et al. Increasing the corrosion resistance of heat-resistant alloys for parts of power equipment. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*. 2022. Vol. 140. № 4. Pp. 137−140. URL: https://doi.org/10.46813/2022-140-137

7. Hlushkova D. B., et al. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*. 2022. Vol. 140, № 4. Pp. 125−130. URL: https://doi.org/10.46813/2022-140-125

8. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дейнеко Л. Н., Дубров Ю. И. Формирование модели прогноза качества материала, основанной на экспертной оценке и активном эксперименте. *Компьютерное материаловедение и обеспечение качества : матер. к 45-му Междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов*. Одесса: АстроПринт, 2006. С. 146–150.

9. Пути применения теории фракталов : монография [В. Большаков, В. Волчук, Ю. Дубров]. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2016. 146 с.

10. Volchuk V., Kroviakov S., Kryzhanovskyi V. Strength assessment of lightweight concrete considering metric variance of the structural elements. *Revista Română de Materiale/Romanian Journal of Materials*. 2022. Vol. 52 (2). Pp. 185–193.

11. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov Yu. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, № 9. Pp. 1165−1171. URL: https://doi.org/10.15407/mfint.40.09.1165

12. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S., Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik − Technical Journal*. 2018. Vol. 12, № 2. Pp. 93–97. URL: https://doi.org/10.31803/tg-20180302115027

13. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Ivantsov S. V. Fractals Theory Application for Evaluation of Influence of Nonmetallic inclusions on Mechanical Properties of S355J2 Steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* IOP Publishing, 2021. Vol. 1021, № 1. P. 012053. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1021/1/012053/meta

14. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M., Kryzhanovskyi V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd., 2019. Vol. 968. Pp. 20−25. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.20

15. Volchuk V., Ivantsov S., Tiutieriev I., Fortyhin A. Search for the Evaluation of 'strength-plasticity' Relation in Constructional Steel. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. Pp. 211–216. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.211

16. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Zotov D. S., Sokoliuk V. I. Fractal model of mechanical properties evaluation of C−Mn−Al−Ti−N steel with acicular ferrite structure for railway freight cars. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2021. Vol. 2389, № 1. P. 080002. URL: https://doi.org/10.1063/5.0063496

17. Bausk E. A., Volchuk V. M., Uzlov O. V. Remaining Service Life Evaluation of Nuclear Power Plants Construction Steel Elements. *Journal of Physics : Conference Series*. IOP Publishing, 2021. Vol. 1926, № 1. P. 012050. URL: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012050

18. Bausk E. A., Volchuk V. M., Uzlov O. V. Multifractal analysis of the S235J2 steel structure with corrosion wear. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2022. Vol. 2656, № 1. P. 020030. URL: https://doi.org/10.1063/5.0106464

19. Vakhrusheva V. S., Volchuk V. M., Hruzin N. V., Tiutieriev I. A. Fractal model of estimating quality of cold worked fuel cladding tubes. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*. 2021. Vol. 135, № 5. Pp. 57−63. URL: https://doi.org/10.46813/2021-135-057

20. Volchuk V. M., Kotov M. A. Fractal express methods evaluation of a breaking stress of concrete. *Journal of Physics : Conference Series.* IOP Publishing, 2021. Vol. 1926, № 1. P. 012023. URL: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012023

21. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M. Fractal Model of the Influence of Expanded Clay Concrete Macrostructure on its Strength. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. Pp. 43–52. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.43

22. Romaniuk S. P., et al. Characterization of ARC-PVD ZRN nanostructured coatings by using the fractals theory. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*. 2022. Vol. 142, № 6. Pp. 123−128. URL: https://doi.org/10.46813/2022-142-123

23. Большаков В. І., Волчук В. М., Котов М. А., Фісуненко Д. П. Аспекти застосування фрактального моделювання. *Металознавство та термічна обробка металів.* 2022. № 2 (97). С. 7−18. URL: https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.050722.7.858

REFERENCES

1. Sandhya Y.B., Rao K.S., Rajesh P.S., Giri N.C., Das S. and Bhadoria V.S. Statistical Assessment of Sustainable Energy for the Lowest Feasible Levelized Cost of Electricity. In: 2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE). April, 2022, pp. 1106−1109. URL: https://doi.org/10.1109/ICACITE53722.2022.9823748

2. Taran A.V., Garkusha I.E., Romaniuk S.P., et al. Influence of plasma-based ion implantation and deposition on the structure, internal stress, mechanical properties of nanocrystalline ZrN coatings. Nanotechnology Percept. 2020, vol. 16, no 1, pp. 56–63.

3. Taran A., Garkusha I., Taran V., Timoshenko A., Misiruk I., Starikov V., Baturin A., Skoblo T., Romaniuk S. and Mamalis A.G. Nanostructured ZrO_2 ceramic PVD coatings on Nd−Fe−B permanent magnets. Nanotechnol Percept. 2019, vol. 15, no 1, pp. 13−20. URL: https://doi.org/10.4024/N23TA18A.ntp.15.01

4. Konoplianyk O., Kotov N. and Iliev I. Specific Design Features of Prefabricated Fire-Resistant Floor Slabs Made from Lightweight Concrete. Slovak Journal of Civil Engineering. 2022, vol. 30, no. 1, pp. 1−7. URL: https://doi.org/10.2478/sjce-2022-0001

5. Savytskyi M., Nikiforova T., Nosenko O., Kotov N. and Papirnyk R. Construction technology for affordable housing with the use of space-braced concrete-filled steel tubular framing. In: E3S Web of Conferences. 2021, vol. 280, pp. 03003. URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128003003

6. Vakhrusheva V.S., et al. Increasing the corrosion resistance of heat-resistant alloys for parts of power equipment. Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki. 2022, vol. 140, no. 4, pp. 137−140. URL: https://doi.org/10.46813/2022-140-137

7. Hlushkova D.B., et al. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel. Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki. 2022, vol. 140, no. 4, pp. 125−130. URL: https://doi.org/10.46813/2022-140-125

8. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N., Dubrov Yu.I. and Deyneko L.N. *Formirovanie modeli prognoza kachestva materiala, osnovannoj na `ekspertnoj ocenke i aktivnom `eksperimente* [Formation of a model for predicting the quality of a material based on expert judgment and an active experiment]. *Komp'yuternoe materialovedenie i obespechenie kachestva : mater. k 45-mu mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizacii kompozitov* [Computer Science and Quality Assurance : mater. to the 45th Intern. sem. on modeling and optimization of composites]. Odessa : AstroPrint, 2006, pp. 146−150. (in Russian).

9. Bol'shakov 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).

10. Volchuk V., Kroviakov S. and Kryzhanovskyi V. Strength assessment of lightweight concrete considering metric variance of the structural elements. Revista Română de Materiale/Romanian Journal of Materials. 2022, vol. 52 (2), pp. 185−193.

11. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. Regularization of One Conditionally ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. 2018, vol. 40, no. 9, pp. 1165−1171. URL: https://doi.org/10.15407/mfint.40.09.1165

12. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S. and Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. Tehnički glasnik − Technical Journal. 2018, vol. 12, no. 2, pp. 93–97. URL: https://doi.org/10.31803/tg-20180302115027

13. Volchuk V.M., Uzlov O.V., Puchikov O.V. and Ivantsov S.V. Fractals Theory Application for Evaluation of Influence of Nonmetallic inclusions on Mechanical Properties of S355J2 Steel. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021, vol. 1021, no. 1, pp. 012053. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1021/1/012053/meta

14. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M. and Kryzhanovskyi V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. In: Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2019, vol. 968, pp. 20−25. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.20

15. Volchuk V., Ivantsov S., Tiutieriev I. and Fortyhin A. Search for the Evaluation of 'strength-plasticity' Relation in Constructional Steel. Key Engineering Materials. 2020, vol. 864, pp. 211–216. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.211

16. Volchuk V.M., Uzlov O.V., Puchikov O.V., Zotov D.S. and Sokoliuk V.I. Fractal model of mechanical properties evaluation of C−Mn−Al−Ti−N steel with acicular ferrite structure for railway freight cars. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2021, vol. 2389, no. 1, pp. 080002. URL: https://doi.org/10.1063/5.0063496

17. Bausk E.A., Volchuk V.M. and Uzlov O.V. Remaining Service Life Evaluation of Nuclear Power Plants Construction Steel Elements. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, vol. 1926, no. 1, p. 012050. URL: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012050

18. Bausk E.A., Volchuk V.M. and Uzlov O.V. Multifractal analysis of the S235J2 steel structure with corrosion wear. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2022, vol. 2656, no. 1, pp. 020030. URL: https://doi.org/10.1063/5.0106464

19. Vakhrusheva V.S., Volchuk V.M., Hruzin N.V. and Tiutieriev I.A. Fractal model of estimating quality of cold worked fuel cladding tubes. Problems of Atomic Science and Technology. 2021, vol. 135, no. 5, pp. 57−63. URL: https://doi.org/10.46813/2021-135-057

20. Volchuk V.M. and Kotov M.A. Fractal express methods evaluation of a breaking stress of concrete. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, vol. 1926, no. 1, pp. 012023. URL: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012023

21. Kroviakov S., Volchuk V. and Zavoloka M. Fractal Model of the Influence of Expanded Clay Concrete Macrostructure on its Strength. Key Engineering Materials. 2020, vol. 864, pp. 43−52. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.43

22. Romaniuk S.P., et al. Characterization of ARC-PVD ZRN nanostructured coatings by using the fractals theory. Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki. Vol. 142, no. 6, pp. 123−128. URL: https://doi.org/10.46813/2022-142-123

23. Bolshakov V.I., Volchuk V.M., Kotov M.A. and Fisunenko D.P. *Aspekty zastosuvannya fraktal'noho modelyuvannya* [Aspects of fractal modelling application]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2022, no. 2 (97), pp. 7−18. URL: https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.050722.7.858 (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.11.2022.