

УДК 004.891

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261218.25.443

О ПРИМЕНЕНИИ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

ДУБРОВ Ю. И., *д-р техн. наук, проф.*

Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

Аннотация. Введение. Актуальной задачей материаловедения является функциональное описание критериев качества материала на основании анализа влияния элементов структуры. Такая задача обусловлена сложностями в определении метрики для объекта идентификации в пространстве состояний. **Основная часть.** Рассмотрены пути решения задачи идентификации критериев качества металла с применением экспертных систем определенного класса. При этом учтены известные проблемы нелинейной динамики и их связь с гипотезой Уолфрема о неприводимых алгоритмах и теоремой Такенса о существовании функциональной связи между текущими и предшествующими результатами измерений. **Выводы.** Таким образом, показаны пути идентификации вычислительно неприводимых систем путем применения экспертной информации.

Ключевые слова: экспертная система; нелинейная динамика; метрика; объект идентификации; фрактальная размерность

ПРО ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСПЕРТНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

ДУБРОВ Ю. І., *д-р техн. наук, проф.*

Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

Анотація. Вступ. Актуальне завдання матеріалознавства - функціональний опис критеріїв якості матеріалу на підставі аналізу впливу елементів структури. Таке завдання зумовлене складнощами у визначенні метрики для об'єкта ідентифікації в просторі станів. **Основна частина.** Розглянуто шляхи розв'язання задачі ідентифікації критеріїв якості металу із застосуванням експертних систем певного класу. При цьому враховані відомі проблеми нелінійної динаміки та їх зв'язок із гіпотезою Уолфрема про незвідні алгоритми та теоремою Такенса про існування функціонального зв'язку між поточними і попередніми результатами вимірювань. **Висновки.** Таким чином, показано шляхи ідентифікації обчислювально незвідних систем шляхом застосування експертної інформації.

Ключові слова: експертна система; нелінійна динаміка; метрика; об'єкт ідентифікації; фрактальна розмірність

ABOUT EXPERT INFORMATION

DUBROV Yu. I., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

Department of Materials Science, State Higher Education Establishment «Pridneprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskogo st., Dnipro 49600, Ukraine, phone. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

Abstract. Introduction. The actual task of materials science is a functional description of the material quality criteria based on the analysis of the influence of structure elements. This task is due to the difficulties in determining the metrics for the identification object in the state space. **Main part.** Ways of solving the problem of identifying metal quality criteria using expert systems of a certain class are considered. Thus the known problems of nonlinear dynamics and their communication with the hypothesis Wallfrem about numerical irreducible algorithms and the theorem Takens about existence of functional communication between the current and previous results of measurements are taken into account. **Conclusions.** Thus, the ways of identification of computationally irreducible systems by applying expert information are shown.

Key words: expert system; nonlinear dynamics; metric; object of identification; fractal dimension

Введение. Формализация некоторых задач материаловедения с помощью применения математических методов представляется затруднительной, а иногда и невозможной [1]. К подобным задачам может относиться задача определения качественных характеристик металла исходя

из его состава и особенностей структуры [2-4]. Предполагается, что информация о структуре материала может определяться также с помощью традиционных методов количественной металлографии по растровому изображению шлифа. Сложность структурных составляющих

металла не всегда позволяет сделать функциональное описание объекта исследования и определить метрику в пространстве его состояний [5-7].

Основная часть. Отметим, что большинство гипотез, встречающихся в прикладных и фундаментальных науках – это, как правило, предположения о некоторой метрике пространства состояний объекта идентификации [1]. По мере углубления анализа изучаемых металлов стала возрастать сложность их формализованного описания. К этому добавляется необходимость учета изменений их свойств с течением времени (деформации, коррозии и т. д.).

Для иллюстрации сказанного обозначим через F – замкнутую выпуклую поверхность структуры металла, все точки которой представляют фазовые координаты, отражающие состояние объекта моделирования в момент времени t . Влияние на объект неизвестных и поэтому не учтенных в модели факторов будем интерпретировать деформацией этой поверхности под воздействием некоторого изгибающего поля. Пусть за некоторое время поверхность F деформируется в пространстве переменных так, что образуется бесконечная последовательность $F = F_1, F_2, \dots$ замкнутых выпуклых поверхностей, сходящихся к замкнутой выпуклой поверхности F^* .

Обозначим через ρ_n внутреннюю метрику поверхности F_n . По теореме А. Д. Александрова о сходимости метрик [8] последовательность метрик ρ_n сходится (даже равномерно!) к внутренней метрике поверхности F^* . Однако далеко не всегда возможно зафиксировать и аналитически описать всю бесконечную последовательность F_1, F_2, \dots . В то же время, из теоремы А. В. Погорелова об однозначной определенности выпуклых поверхностей [9] можно сделать следующий вывод.

Теорема. *Если изгибающее поле изменяется во времени произвольным образом, то преобразование, переводящее поверхность F в F^* , может не сохранять меру поверхности F на поверхности F^* .*

Доказательство. Если бы на выпуклых поверхностях F и F^* при переходе от одной поверхности к другой внутренняя мера сохранялась, то, согласно теореме Погорелова, поверхности F и F^* совпадали бы, что говорило бы об отсутствии деформации при действии изгибающего поля на поверхность F . Это противоречие доказывает теорему.

Задачи, решаемые только с помощью неприводимых алгоритмов, результаты которых невозможно предсказать, не выполнив их полностью, согласно упоминаемой гипотезе С. Уолфрема [10], естественно называть вычислительно неприводимыми. Гипотезу о вычислительной неприводимости задачи идентификации качественных характеристик материалов можно сформулировать следующим образом: разрешающую функцию, областью определения которой является множество растровых изображений шлифов материала, а областью значений – множество векторов качественных характеристик материала, можно построить лишь путем применения алгоритма полного перебора. Вполне очевидно, что, учитывая технические и организационные трудности на этом пути, на данном этапе научно-технического прогресса следует, по крайней мере, временно отказаться от попыток решения этой задачи с помощью «чисто» аналитического аппарата.

Во многих случаях весьма привлекательный (а в некоторых и единственный) способ решения задач такого рода состоит в применении экспертных систем (ЭС) [11-13], включающих алгоритмы полного перебора. Но тогда возникает вопрос: какую ЭС следует выбрать для решения задачи идентификации качественных характеристик материалов? Какая идеология построения ЭС обеспечит наиболее адекватное ее применение? От какой ЭС следует ожидать наиболее достоверных результатов идентификации?

Следует отметить, что классические ЭС, основанные на реализации правил

логического вывода, как правило, излишне громоздки и дорогостоящи. Кроме того, они требуют больших усилий для того, чтобы подготовить исходную базу знаний (БЗ).

Одним из подходов, позволяющих компенсировать невозможность полной формализации сложной задачи, являются результаты, полученные в нелинейной динамике Такенсом [14].

Основное предположение, которое делается в теории нелинейной динамики, состоит в том, что измеренные величины являются функциями состояния некоторой динамической системы

$$\mathbf{x}(t + \tau) = \mathbf{f}^{\tau}(\mathbf{x}(t)),$$

где $\mathbf{x}(t)$ – вектор n -мерного евклидова пространства.

Другое предположение состоит в том, что измеряемая величина является функцией состояния приведенной выше динамической системы, т. е. результаты измерения a_i удовлетворяют соотношению

$$a_i = h(\mathbf{x}(t_i)).$$

Согласно теореме Такенса, почти для всех τ , h , f и $m \geq 2n + 1$ должно существовать функциональное соотношение между измерениями $a_{i-1}, a_{i-2}, \dots, a_{i-m}$ и x_i , которому можно придать следующий вид [14]:

$$a_i = \Phi(P_n(a_{i-1}, a_{i-2}, \dots, a_{i-m})),$$

где P_n – проектор на n локальных координат, зависящих от точки $(a_{i-1}, a_{i-2}, \dots, a_{i-m})$. Таким образом, для многих динамических систем функция, прогнозирующая их поведение, в качестве одной из составляющих содержит функцию проецирования. В [14] показано, что требованию теоремы Такенса: проецирование + аппроксимация удовлетворяют некоторые виды нейронных сетей. Этот факт объясняет, почему при помощи нейронных сетей иногда оказываются возможны предсказания в ситуациях, безнадежных с точки зрения других методов нелинейной динамики.

Проводя параллель с приведенными выше выводами из теоремы Такенса, естественно рассмотреть в качестве инструмента для решения задачи идентификации свойств материала специализированные ЭС, принцип работы которых является идеологически близким к нейронным сетям. Одной из таких ЭС является специализированная многопараметрическая система [14].

Подобно тому, как по обучающей выборке происходит корректировка значений синапсов нейронов, на основе знаний экспертов многопараметрическая система формирует уравнения, составляющие БЗ. Для подготовки информации по формированию БЗ эксперту достаточно оценить вероятностные значения качественных характеристик материала в зависимости от входных показателей по его составу. Данные оценки формируются с учетом информации о фрактальных (дробных) размерностях структурных составляющих материала [15-17]. При этом объем данных, вводимых экспертом, фиксирован, поскольку значения входных показателей находятся в пределах заданных ограничений.

Таким образом, оценки экспертов составляют обучающую выборку фиксированного объема, на основе которой создается БЗ. Такой подход к созданию БЗ позволяет представить ее в виде уравнений, наличие которых исключает применение машины логического вывода. Тем самым пространство состояний объекта идентификации дважды «проецируется» в пространство решений задачи: один раз – неформально, посредством экспертных оценок, а второй раз – с помощью уравнений, содержащихся в БЗ.

Сравнивая многопараметрическую ЭС [14] с нейронными сетями, следует отметить ряд ее преимуществ, к которым относятся:

- четко определенный объем обучающей выборки;
- возможность оценивания уровня компетентности экспертов и учета информации, продуцируемой некомпетентными экспертами;

- гибкость, простота и прозрачность ЭС;
- сравнительно невысокая цена и возможность доработки программы, реализующей ЭС.

Эксперименты по определению фрактальной размерности структурных составляющих и связи этих размерностей с показателями качества материалов [18-23] и создали предпосылку для формирования соответствующего программного комплекса.

Выводы. Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о целесообразности применения наряду с физическими методами исследования специализированных экспертных систем. Использование подобных систем предоставит возможности для более эффективной оценки характеристик качества материалов на предварительном этапе их исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пути решения задач идентификации качественных характеристик материалов на основе экспертных систем / В. И. Большаков, Ю. И. Дубров, А. Н. Ткаченко, В. А. Ткаченко // Доповіді Національної академії наук України. – 2006. – № 4. – С. 97–102.
2. Системний аналіз технології виробництва масивного металевого лиття / Вад. І. Большаков, В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // Вісник Національної академії наук України. – 2015. – № 9. – С. 69–73. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/87380>. – Проверено: 21.05.2019.
3. Большаков В. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді Національної Академії наук України. – 2014. – № 11. – С. 77–81. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2014_11_15. – Проверено: 21.05.2019.
4. Большаков В. И. О применении имитационного моделирования в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2015. – № 4. – С. 26–31. – Режим доступа: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/26-31>. – Проверено: 21.05.2019.
5. Большаков В. И. Применение теоретико-информационного подхода для идентификации структуры металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2014. – № 8. – С. 4–9. – Режим доступу: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/41345/37760>. – Проверено: 21.05.2019.
6. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism / Volodymyr Volchuk, Ievgenii Klymenko, Sergii Kroviakov, Matija Orešković // Tehnički glasnik / Technical Journal. – 2018. – Vol. 12. – № 2. – P. 93–97. – Режим доступа: <https://hrcak.srce.hr/202359>. – Проверено: 21.05.2019.
7. Bol'shakov V. 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>. – Проверено: 21.05.2019.
8. Александров А. Д. Внутренняя геометрия выпуклых поверхностей / А. Д. Александров. – Москва-Ленинград : Гос. изд-во технико-теорет. лит-ры, 1948. – 388 с.
9. Погорелов А. В. Внешняя геометрия выпуклых поверхностей / А. В. Погорелов. – Москва : Наука, 1969. – 760 с.
10. Wolfram S. New Kind of Science / S. Wolfram. – Wolfram Media, Inc., 2002. – 1192 p.
11. Большаков В. И. Етапи ідентифікації багатопараметричних технологій та шляхи їх реалізації / В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // Вісник Національної академії наук України. – 2013. – № 8. – С. 66–72. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/67873>. – Проверено: 21.05.2019.
12. Дубров Ю. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий на примере технологии производства прокатных валков : монография / Юрий Дубров, Владимир Большаков, Владимир Волчук. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 236 с.
13. Формирование модели прогноза качества материала, основанной на экспертной оценке и активном эксперименте / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Л. Н. Дейнеко, Ю. И. Дубров // Компьютерное материаловедение и обеспечение качества : матер. к 45-му Междунар. семинару по моделированию и оптимизации композитов. МОК'45, 28–29 апр. 2006 г. – Одесса : АстроПринт, 2006. – С. 146–150.
14. Дубров Ю. Вычислительно неприводимые системы и пути их идентификации : монография / Ю. Дубров. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2016. – 188 с.
15. Большаков В. И. Основы организации фрактального моделирования : [монография] / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров ; ГВУЗ "Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры". – Киев : Академперіодика, 2017. – 170 с.

16. Большаков В. И. Фрактальный подход при идентификации сложных систем / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді Національної академії наук України. – 2017. – № 6. – С. 46–50.
17. Bolshakov V. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy / V. I. Bolshakov, V. M. Volchuk, Yu. I. Dubrov // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2018. – Vol. 40. – № 9. – Рр. 1165–1171. – Режим доступа : <https://DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165>. – Проверено: 21.05.2019.
18. Большаков В. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді Національної академії наук України. – 2017. – № 4. – С. 42–48. – Режим доступа : <http://dopovidi-nanu.org.ua/ru/archive/2017/4>. – Проверено: 21.05.2019.
19. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств малоуглеродистой низколегированной стали / В. И. Большаков, В. Н. Волчук // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2011. – Т. 33. – Вып. 3. – С. 347–360.
20. 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>. – Проверено: 21.05.2019.
21. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2017. – Т. 39. – № 7. – С. 949–957. – Режим доступа: <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>. – Проверено: 21.05.2019.
22. Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу / Вад. І. Большаков, В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // Вісник Національної академії наук України. – 2014. – № 12. – С. 45–48. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73434>. – Перевірено: 21.05.2019.
23. 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://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/6255>. – Проверено: 21.05.2019.

REFERENCES

1. Bolshakov V.I., Dubrov Yu.I., Tkachenko A.N. and Tkachenko B.A. *Puti reshenia zadach identifikatsii kachestvennykh karakteristik materialov na osnove ekspertnykh sistem* [Ways of solving problems of identification of the qualitative characteristics of materials on the basis of expert systems]. *Dopovidi NAN Ukraini* [Reports National Academy of Sciences of Ukraine]. 2006, no. 4, pp. 97 (in Russian).
2. Bol'shakov Vad.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnystva masyvnoho metalevoho lyttya* [System analysis techniques of producing solid metal castings]. *Visnyk Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2015, no. 9, pp. 69–73. (in Ukrainian).
3. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O prognozirovanii kachestva tselevogo produkta v periodicheskikh tekhnologiyakh* [Predicting the quality of a desired product in periodic technologies]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 11, pp. 77–81. (in Russian).
4. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O primenenii imitatsionnogo modelirovaniya v materialovedenii* [The application simulated modelling in materials science]. *Metallознаvstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 4, pp. 26–31. (in Russian).
5. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Primeneniye teoretiko-informatsionnogo podkhoda dlya identifikatsii struktury metalla* [The use of information-theoretic approach to identify the structure of the metal]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 8, pp. 4–9. (in Russian).
6. 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, no. 2, pp. 93–97.
7. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
8. Aleksandrov A.D. *Vnutrennyaya geometriya vypuklykh poverkhnostey* [Internal geometry of convex surfaces]. Moskva: Gostekhizdat, 1948, 387 p. (in Russian).
9. Pogorelov A.V. *Vneshnyaya geometriya vypuklykh poverkhnostey* [External geometry of convex surfaces]. Moskva : Nauka, 1969, 760 p. (in Russian).
10. Wolfram S.A. *New Kind of Science*. Wolfram Media, Inc., 2002. 1192 p.
11. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N., Dubrov Yu.I. *Etapy identyfikatsiyi bahatoparametrychnykh tekhnolohiy ta shlyakhy yikh realizatsiyi* [Stages multiparameter identification technologies and ways of their implementation]. *Visnyk Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. Kyiv, 2013, no. 8, pp. 66–72. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/67873>. (in Ukrainian).

12. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. Available at: <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>. (in Russian).
13. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N., Dubrov Yu.I. and Deyneko L.N. *Formirovanie modeli prognoza kachestva materiala, osnovannoy 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 : Astro-Print, 2006, pp. 146–150. (in Russian).
14. Dubrov Yu. *Vychislitel'no neprivodimye sistemy i puti ikh identifikatsii* [Computationally irreducible systems and the ways to identify them]. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2016, 190 p. (in Russian).
15. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Osnovy organizacii fraktal'nogo modelirovaniya* [Fundamentals of fractal modeling]. Kiev: Akadempriodika, 2017, 170 p. (in Russian).
16. 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]. Kyiv, 2017, no. 6, pp. 46-50. Available at: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.06.00> (in Russian).
17. 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.
18. Bolshakov V. I., Volchuk V. M. and Dubrov Yu. I. *Topologicheskije 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).
19. 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 noveyshije tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2011, vol. 33, no. 3, pp. 347–360. (in Russian).
20. Volchuk V. N. K voprosu o primeneniі 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).
21. Volchuk V. M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovaniі kriteriyev kachestva mnogoparametricheskikh tekhnologiy* [On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies]. *Metallofizika i noveyshije tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949-957. (in Russian).
22. Bol'shakov Vad. I., Bolshakov V. I., Volchuk V. N. and Dubrov Yu.I. *Chastkova kompensatsiya nepovnoty formal'noyi aksiomatyky pry identyfikatsiyi struktury metalu* [The partial compensation of incompleteness of formal axiomatics in the identification of the metal structure]. *Visnyk akademiyi nauk Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 12, pp. 45–48. (in Ukrainian).
23. 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).

Рецензент: Большаков В.І., д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 20.12.2018 р.