

УДК 669.017:530.191

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.271118.75.369

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ РОБОЧОЇ ЗОНИ ПАРАМЕТРІВ СТАЛІ 40

ФОРТИГІН А. А., *аспір*.

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:fortigin13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

**Анотація. Постановка проблеми.** Визначення впливу параметрів технології виробництва сталі та чавуну на їх властивості складне завдання. Ця складність пов'язана з багатопараметричністю та багатокритерійністю такої технології, де на критерії якості металу впливає багато факторів. Незначна зміна параметрів технології може викликати значні зміни якості металу. Тому дослідження впливу технологічних факторів на критерії якості металу в робочій області її параметрів являє собою актуальне завдання матеріалознавства. **Матеріали та методика.** Як матеріал для дослідження обрано сталь 40. Досліджувався вплив хімічного складу сталі та фрактальної розмірності елементів структури на її механічні властивості. Зразки вивчали з використанням оптичної мікроскопії для визначення фрактальної розмірності елементів структури. Фрактальну розмірність структури визначали за допомогою розробленої та запатентованої методики. **Результати експерименту.** Встановлено ступінь впливу кожного елемента хімічного складу на механічні властивості сталі 40 в межах робочої області параметрів: C→Mn→Si→P→Cr→S→Ni. Вплив структури на механічні властивості сталі 40 підтверджується їх чутливістю до фрактальної розмірності структурних елементів. **Висновки.** Установлено вплив елементів хімічного складу та структури сталі 40 на її механічні властивості в робочій області параметрів технології. Такий підхід дозволяє оцінювати характеристики якості сталей даного класу з мінімальними витратами на натурні випробування.

**Ключові слова:** робоча область параметрів, сталь 40, хімічний склад, фрактальна розмірність, механічні властивості

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ ПАРАМЕТРОВ СТАЛИ 40

ФОРТЫГИН А. А., *аспір*.

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:fortigin13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

**Аннотация. Постановка проблемы.** Определение влияния параметров технологии производства стали и чугуна на их свойства представляет собой сложную задачу. Эта сложность связана с многопараметричностью и многокритериальностью такой технологии, где на критерии качества металла влияет много факторов. Незначительное изменение параметров технологии может привести к значительному изменению качества металла. Поэтому исследование влияния технологических факторов на критерии качества металла в рабочей области ее параметров представляет собой актуальную задачу материаловедения. **Материалы и методика.** В качестве материала для исследования выбрана сталь 40. Исследовалось влияние химического состава стали и фрактальной размерности элементов структуры на ее механические свойства. Образцы стали исследовались с использованием оптической микроскопии для определения фрактальной размерности элементов структуры. Фрактальная размерность структуры определялась с помощью разработанной и запатентованной методики. **Результаты эксперимента.** Установлена степень влияния каждого элемента химического состава на механические свойства стали 40 в пределах рабочей области параметров: C→Mn→Si→P→Cr→S→Ni. Влияние структуры на механические свойства стали 40 подтверждается их чувствительностью к фрактальной размерности структурных элементов. **Выводы.** Установлено влияние элементов химического состава и структуры стали 40 на ее механические свойства в рабочей области параметров технологии. Такой подход позволяет оценивать характеристики качества сталей данного класса с минимальными затратами на натурные испытания.

**Ключевые слова:** рабочая область параметров, сталь 40, химический состав, фрактальная размерность, механические свойства

## IDENTIFICATION OF THE WORKING AREA OF STEEL PARAMETERS 40

FORTYHIN A. A., *graduate student*

Department of Materials Science, State Higher Education Establishment «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskogo st., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: fortigin13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

**Abstract. Introduction.** Determining the influence of the parameters of the technology of steel and iron production on their properties is a complex task. Its complexity is related to the multi-parameterity and multicriteria of such technology, where many factors influence the quality of the metal. A slight change in the parameters of the technology can lead to a significant change in the quality of the metal. Therefore, the study of the influence of

technological factors on the quality of the metal in the working area of its parameters is an actual problem of material science. **Materials and methods.** Steel 40 was chosen as the material for the study. The influence of the chemical composition of the steel and the fractal dimension of the structural elements on its mechanical properties was investigated. Steel samples were investigated using optical microscopy to determine the fractal dimension of the structural elements. The fractal dimension of the structure was determined by the developed and patented methodology. **Results of the experiment.** As a result of experiments and calculations, the degree of influence of each element of the chemical composition on the mechanical properties of steel 40 within the working area of parameters: C→Mn→Si→P→Cr→S→Ni was determined. The influence of the structure on the mechanical properties of steel 40 is confirmed by their sensitivity to the fractal dimension of structural elements. **Conclusions.** The influence of the chemical composition and steel structure 40 on its mechanical properties in the working area of the technology parameters is determined in the work. This approach allows us to assess the characteristics of the quality of steel grades of this class with a minimum cost of physical exam.

**Key words:** working area of parameters; steel 40; chemical composition; fractal dimension; mechanical properties

**Вступ.** Актуальним завданням народного господарства України став випуск конкурентоспроможної продукції. Випуск матеріалів із поліпшеними властивостями допомагає збільшити термін їх експлуатації та заробляти кошти від їх експорту. Отож розроблення методик оцінювання критеріїв якості металопрокату - актуальне завдання [1-3].

Для його реалізації наразі застосовуються різні методики структурного аналізу, натурних іспитів у поєднанні з математичними моделями прогнозу якості різних матеріалів [4-8]. Наприклад, у працях [9; 10] встановлено область компромісу механічних властивостей чавунних сортопрокатних валків; в [11] – вплив хімічного складу валків на їх критерії якості; в [12; 13] розглядаються способи прогнозу механічних властивостей металу в робочій області параметрів технології.

Перспективний напрямок дослідження структури матеріалів - використання фрактального формалізму [14-16]. Його успіш-

но застосовують для вимірювання середніх розмірів зерен металу [17], в задачах прогнозування залишкового ресурсу конструкцій літаків [18], для прогнозу механічних властивостей металу [19-21], ранжування критеріїв якості багатопараметричних технологій [22].

У статті розглянуто підхід до ідентифікації робочої області параметрів багатокритерійної технології з використанням фрактальної геометрії, що дозволить прогнозувати критерії якості з мінімальними витратами. Методика ідентифікації робочої області параметрів розглянута на прикладі дослідження впливу хімічного складу та структури сталі 40 на її механічні властивості в цій області, що обмежена нормативними документами (ГОСТ 1050-88 для прокату сталі 40).

**Матеріали та методика.** Як матеріал для дослідження обрано сталь 40 (прокат товщиною до 80 мм) в стані заводської поставки. Вибір цієї сталі зумовлений тим, що з неї виготовляються листи, штаби, стрічки, а також труби. Хімічний склад сталі 40 наведено в таблиці.

Таблиця

**Вміст елементів хімічного складу сталі 40 (ГОСТ 1050-88), %**

| Склад    | C           | Si          | Mn          | Ni     | S       | P       | Cr     |
|----------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|---------|--------|
| Сталь 40 | 0,38 – 0,49 | 0,05 – 0,15 | 0,50 – 0,80 | до 0,3 | до 0,05 | до 0,04 | до 0,3 |

Межа міцності ( $\sigma_B$ ) змінювалася в межах 550...590 МПа, межа текучості ( $\sigma_T$ ) – в межах 315...355 МПа, твердість ( $HB$ ) – 197...237, відносне подовження ( $d_5$ ) – 17...21 %, відносне звуження ( $\psi$ ) – 43...47 %. Сталь 40 у стані заводської поставки (рис. 1) мала феритно-перлітну структуру, що має частково перлітну смужкуватість.

Структура сталі, показана на рисунку 1, складається із зерен фериту та витягнутих уздовж прокатки зерен перліту.

Фрактальна розмірність перліту розраховувалася за допомогою методики, що базується на збіжності результатів клітинного та крапкового способів [16].

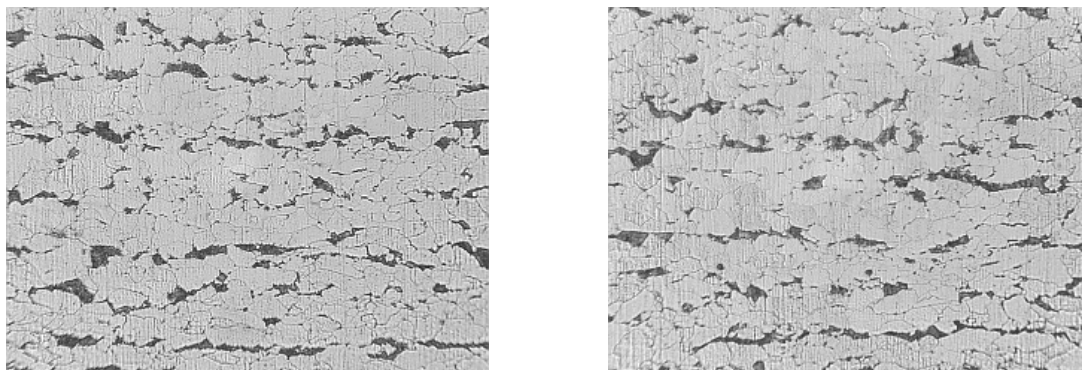


Рис. 1. Структура сталі 40,  $\times 400$

За допомогою клітинного способу фрактальна розмірність  $D$  розраховувалася за формулою Хаусдорфа [15]:

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

де  $N(\delta)$  – кількість клітин, що покрили об’єкт дослідження;  $\delta$  – лінійний розмір клітини покриття.

Крапковий спосіб обчислення фрактальної розмірності об’єкта дослідження  $D$  базується на формулі обчислення середнього розміру клітини  $\tilde{N}(L)$  [15]:

$$\tilde{N}(L) = \sum_{m=1}^K (1/m) P(m, L) \sim L^{-D}, \quad (2)$$

де  $P(m, L)$  дорівнює числу клітин розміром  $L$ , що містять  $m$  точок,  $m = 1, \dots, M$ , поділеному на  $M$ .

$\sum_{m=1}^M P(m, L) = 1$  – ймовірність попадання однієї точки об’єкта в клітину розміром  $L$ .

#### Результати експерименту.

Досліджувалася робоча область параметрів сталі 40, обмежена числовими значеннями її хімічного складу та механічних властивостей (ГОСТ 1050-88).

Із застосуванням методики регресійного аналізу отримано математичні моделі прогнозу механічних властивостей сталі 40 залежно від процентного вмісту елементів хімічного складу та фрактальної розмірності перліту (3-7), який значною мірою впливає на розглянуті властивості:

$$\sigma_B = 404,314 + 267,187 \cdot X_1 + 29,375 \cdot X_2 + 32,917 \cdot X_3 + 38,750 \cdot X_4 - 43,750 \cdot X_5 + 375,000 \cdot X_6 + 17,500 \cdot X_7. \quad (3)$$

Модель (3) адекватна згідно з критеріями Фішера ( $F_{\text{спостережень}} = 1,155$ ;  $F_{\text{критич}} = 2,400$ ) та Кохрена ( $F_{\text{спостережень}} = 0,354$ ;  $F_{\text{критич}} = 0,547$ ) за рівня значимості  $\alpha = 0,05$ .

$$\sigma_T = 167,567 + 275,000 \cdot X_1 + 30,000 \cdot X_2 + 33,333 \cdot X_3 + 37,500 \cdot X_4 - 50,000 \cdot X_5 + 383,333 \cdot X_6 + 10,000 \cdot X_7. \quad (4)$$

Модель (4) адекватна згідно з критеріями Фішера ( $F_{\text{спостережень}} = 1,154$ ;  $F_{\text{критич}} = 2,400$ ) та Кохрена ( $F_{\text{спостережень}} = 0,356$ ;  $F_{\text{критич}} = 0,547$ ) за рівня значимості  $\alpha = 0,05$ .

$$HB = 50,717 + 268,750 \cdot X_1 + 28,750 \cdot X_2 + 32,500 \cdot X_3 + 40,000 \cdot X_4 - 37,500 \cdot X_5 + 366,667 \cdot X_6 + 20,000 \cdot X_7. \quad (5)$$

Модель (5) адекватна згідно з критеріями Фішера ( $F_{\text{спостережень}} = 1,151$ ;  $F_{\text{критич}} = 2,400$ ) та Кохрена ( $F_{\text{спостережень}} = 0,359$ ;  $F_{\text{критич}} = 0,547$ ) за рівня значимості  $\alpha = 0,05$ .

$$d_5 = 34,473 - 27,187 \cdot X_1 - 2,875 \cdot X_2 - 3,333 \cdot X_3 - 4,500 \cdot X_4 + 5,000 \cdot X_5 - 31,667 \cdot X_6 + 1,500 \cdot X_7. \quad (6)$$

Модель (6) адекватна згідно з критеріями Фішера ( $F_{\text{спостережень}} = 1,100$ ;  $F_{\text{критич}} = 2,400$ ) та Кохрена ( $F_{\text{спостережень}} = 0,349$ ;  $F_{\text{критич}} = 0,547$ ) за рівня значимості  $\alpha = 0,05$ .

$$\psi = 60,649 - 27,344 \cdot X_1 - 2,813 \cdot X_2 - 3,292 \cdot X_3 - 3,875 \cdot X_4 + 3,125 \cdot X_5 - 39,167 \cdot X_6 + 1,250 \cdot X_7. \quad (7)$$

Модель (7) адекватна згідно з критеріями Фішера ( $F_{\text{спостережень}} = 1,142$ ;  $F_{\text{критич}} = 2,400$ ) та Кохрена ( $F_{\text{спостережень}} = 0,356$ ;  $F_{\text{критич}} = 0,547$ ) за рівня значимості  $\alpha = 0,05$ .

У рівняннях (3-7) вуглець ( $X_1$ ), кремній ( $X_2$ ), марганець ( $X_3$ ), нікель ( $X_4$ ), сірка ( $X_5$ ), фосфор ( $X_6$ ), хром ( $X_7$ ).

На основі аналізу коефіцієнтів рівнянь (3-7) отримано гістограми впливу досліджуваних параметрів  $X_1$ - $X_7$  на функції мети (рис. 2).

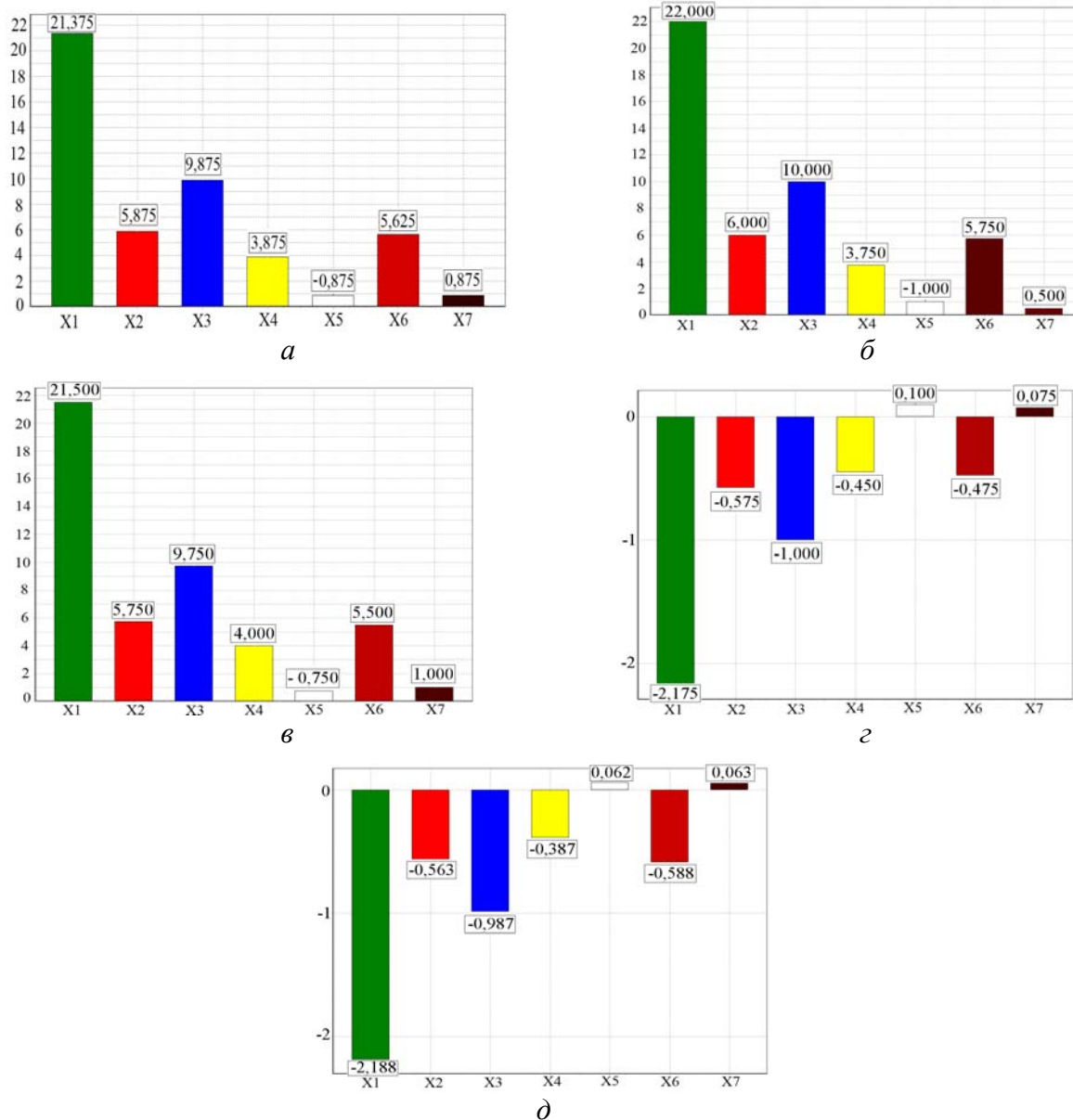


Рис. 2. Гістограми впливу елементів хімічного складу на механічні властивості сталі 40:  
 а - межу міцності; б- межу текучості; в – твердість;  
 г - відносне подовження; д - відносне звуження

Вплив елементів хімічного складу на механічні властивості металу підтверджується загальновідомою фізико-хімічною інтерпретацією їх впливу, що розкрита, наприклад, в [1].

На основі аналізу отриманих гістограм впливу елементів хімічного складу на механічні властивості сталі 40 в межах робочої області параметрів проведено їх ранжування:  $C \rightarrow Mn \rightarrow Si \rightarrow P \rightarrow Cr \rightarrow S \rightarrow Ni$ .

Зв'язок між фрактальною розмірністю перліту та механічними властивостями

сталі наведено на рисунку 3.

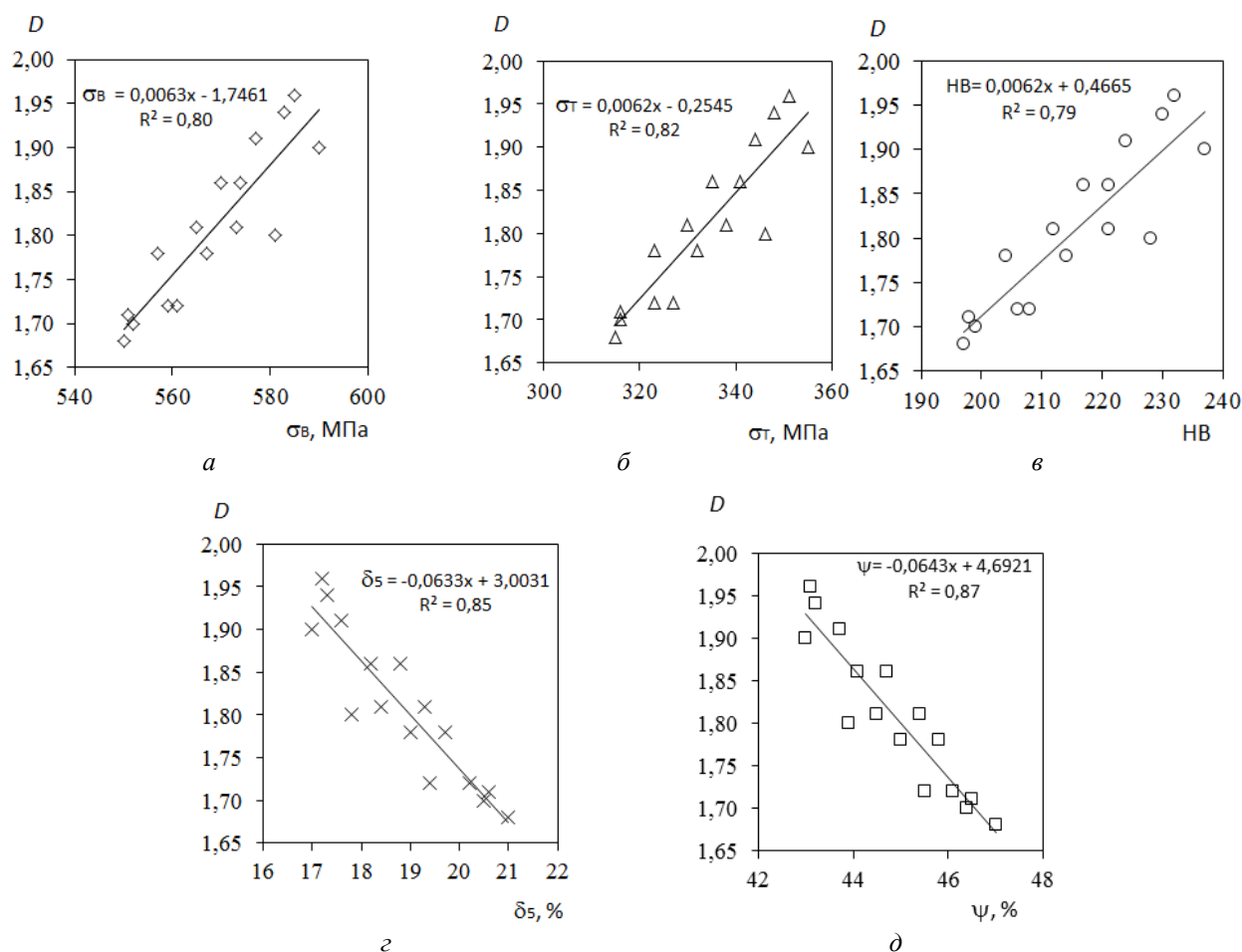


Рис. 3. Співвідношення між фрактальною розмірністю перліту та механічними властивостями сталі 40: а - межею міцності; б - межею текучості; в – твердістю; г - відносним подовженням; д - відносним звуженням

З аналізу рисунка 3 випливає, що збільшення фрактальної розмірності зерен перліту сприяє зростанню характеристик міцності ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $HB$ ) та зменшенню пластичних властивостей ( $\delta_5$ ,  $\psi$ ). Цей факт погоджується з теоретичними розрахунками, оскільки збільшення кількості перліту до певних меж спричиняє підвищення показників міцності сталі та зниження показників її пластичності. Збільшення фрактальної розмірності перліту до топологічної на площині шліфа ( $D \rightarrow 2$ ) можна пояснити як підвищенням його процентного вмісту, так і зміною форми його зерен до більш рівновісної.

**Висновки.** Проведено дослідження впливу хімічного складу та структури сталі 40 на її

механічні властивості в межах робочої області параметрів згідно з ГОСТ 1050-88. Завдяки отриманим результатам здійснено ранжування критеріїв якості залежно від ступеня впливу елементів хімічного складу. Крім того, встановлено нові закономірності між фрактальною розмірністю перліту сталі 40 та її механічними властивостями.

Отримані результати дозволяють як коригувати показники якості сталі 40 у процесі її виробництва, завдяки отриманим гістограмам впливу хімічного складу (рис. 2), так і проводити прогнозування цих показників якості шляхом аналізу фрактальної розмірності її структури.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гуляев А. П. *Металловедение : учеб для вузов / А. П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1986. – 544 с.*
2. Большаков В. И. Поиск путей прогноза качества металла / В. И. Большаков, А. А. Фортыхин // *Металлознавство та термічна обробка металів. – 2017. – № 4. – С. 16–22. – Режим доступа: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/16-22/119658>. – Проверено 05.04.2019.*
3. Большаков В. И. Способ определения области компромисса критериев качества многокритериальных технологий / В. И. Большаков, А. А. Фортыхин // *Металлознавство та термічна обробка металів. – 2016. – № 2. – С. 40–46. – Режим доступа: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/40-46/66434>. – Проверено 05.04.2019.*
4. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures / A. Mishutin, S. Kroviakov, O. Pishev, B. Soldo // *Tehnicki Glasnik/Technical Journal. – 2017. – Vol. 11. – № 3. – P. 121–124. – Режим доступа: <https://hrcak.srce.hr/186657>. – Проверено: 05.04.2019.*
5. Kroviakov S. Management of the Properties of Shipbuilding Expanded Clay Lightweight Concrete / S. Kroviakov, A. Mishutin, O. Pishev // *International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7 – №. 3.2. – P. 245–249. – Режим доступа: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/14412/5842>. – Проверено: 05.04.2019.*
6. Kroviakov S. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures / S. Kroviakov, A. Mishutin // *The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimanyia. – 2017. – Vol. 1. – Iss. 4. – P. 2–10. – Режим доступа: <http://mx.ogasa.org.ua/handle/123456789/4444?locale=ru>. – Проверено: 04.04.2019.*
7. Дубров Ю. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий на примере технологии производства прокатных валков / Юрий Дубров, Владимир Большаков, Владимир Волчук. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 244 с. – Режим доступа: <https://www.palmarium-publishing.ru/#>. – Проверено: 04.04.2019.
8. Большаков В. И. Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Металлознавство та термічна обробка металів. – 2013. – № 4. – С. 5–11.*
9. Большаков В. И. Твір наукового характеру «Способ определения области компромисса критериев качества многокритериальных технологий» / Большаков В. И., Волчук В. М., Дубров Ю. И. : літерат. письм. твір наук. характеру : свідоцтво про реєстрацію автор. права на твір № 53769 ; дата реєстрації автор. права 18.02.2014. – Режим доступа: <http://www.me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=11c1271e-eb9e-470a-ba8e-43b4e5301bee&title=OfitsiiniBiuletentavtorskePravoIsumizhniPrava>. – Перевірено: 05.04.2019.
10. Волчук В. Н. К определению области компромисса характеристик качества материалов / В. Н. Волчук // *Металлознавство та термічна обробка металів. – 2015. – № 3. – С. 21–25. – Режим доступа: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30/54119>. – Проверено 05.04.2019.*
11. Волчук В. Спосіб прогнозу механічних властивостей чавунних валків / В. Волчук, С. Токосов // *ScienceRise. – 2018. – Т. 11. – С. 57–61. – Режим доступа : <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.150342>. – Проверено 05.04.2019.*
12. Bolshakov V. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy / V. I. Bolshakov, V. M. Volchuk, Yu. I. Dubrov // *Металлофізика и новейшие технологии = Metallofizika i noveishie tekhnologii. – 2018. – Vol. 40, iss. 9. – P. 1165–1171. – Режим доступа: <https://DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165>. – Проверено 05.04.2019.*
13. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // *Металлофізика новейшие технологии. – 2017. – Т. 39. – № 3. – С. 949–957. – Режим доступа: <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>. – Проверено 05.04.2019.*
14. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism / V. Volchuk, I. Klymenko, S. Kroviakov, M. Orešković // *Tehnicki glasnik–Technical Journal. – 2018. – Vol. 12. – № 2. – P. 93–97. – Режим доступа: <https://hrcak.srce.hr/202359>. – Перевірено 7.02.2019.*
15. Большаков В. И. Основы организации фрактального моделирования : монография / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров. – Киев : Академперіодика, 2017. – 170 с.
16. Bolshakov V. Fractals and properties of materials : monographies / V. Bolshakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 148 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>. – Перевірено: 05.04.2019.
17. Журавель І. М. Вимірювання усередненого розміру зерен металу з використанням фрактальної розмірності / І. М. Журавель, Л. М. Свірська // *Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – Т. 46. – № 3. – С. 126–128. – Режим доступа: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/135345>. – Проверено 05.04.2019.*

18. Карускевич М. В. Застосування фрактальної геометрії в задачах прогнозування залишкового ресурсу авіаційних конструкцій / М. В. Карускевич, І. М. Журавель, Т. П. Маслак // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2011. – Т. 47 – № 5. – С. 48–52. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/138234/07-Karuskevych.pdf?sequence=1>. – Перевірено: 05.04.2019.
19. 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 доступу: [file:///D:/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BA%D0%B8/dnanu\\_2017\\_4\\_9.pdf](file:///D:/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BA%D0%B8/dnanu_2017_4_9.pdf). – Проверено 05.04.2019.
20. Большаков В. Пути применения теории фракталов : монография / В. Большаков, В. Волчук, Ю. Дубров. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2016. – 156 с. – Режим доступу: <https://www.morebooks.de/store/gb/book/%D0%9F%D1%83%D1%82%D0%B8-%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F-%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%B8-%D1%84%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2/isbn/978-3-659-72264-6>. – Перевірено: 05.04.2019.
21. 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.
22. Дубров Ю. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий на примере технологии производства прокатных валков / Юрий Дубров, Владимир Большаков, Владимир Волчук. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 244 с. – Режим доступу: <https://www.palmarium-publishing.ru/>. – Проверено: 05.04.2019.

## REFERENCES

1. Gulyayev A.P. *Metallovedeniye* [Metal science]. Moskva: Metallurgiya, 1986, 544 p. (in Russian).
2. Bolshakov V.I. and Fortigin A.A. *Poisk putey prognoza kachestva metalla* [The method of the metal quality prediction]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2017, no. 4, pp. 16–22. Available at: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/16-22>. (in Russian).
3. Bolshakov V.I. and Fortigin A.A. *Sposob opredeleniya oblasti kompromissa kriteriyev kachestva mnogokriterial'nykh tekhnologii* [The field determining method of the quality criteria compromise of multicriteria technology]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 2. pp. 40–46. Available at: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/40-46/66434>. (in Russian).
4. Mishutin A., Kroviakov S., Pishhev O. and Soldo B. *Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures*. Technical Journal. 2017, vol. 11, no. 3, pp. 121–124. Available at: <https://hrcak.srce.hr/186657>
5. Kroviakov S., Mishutin A. and Pishhev O. *Management of the Properties of Shipbuilding Expanded Clay Lightweight Concrete*. International Journal of Engineering & Technology. 2018, vol. 7, no. 3.2, pp. 245–249. Available at: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/14412/5842>.
6. Kroviakov S. and Mishutin A. *Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures*. The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimanyia. 2017, vol. 1, iss. 4, pp. 2–10.
7. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Ways of identification of periodic of multi-criteria technology]. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. Available at: <https://www.palmarium-publishing.ru/> (in Russian).
8. Bolshakov V. I., Volchuk V. N. and Dubrov Yu. I. *Identifikatsiya mnogoparametricheskikh, mnogokriterial'nykh tekhnologiy i puti ikh prakticheskoy realizatsii* [Multiparameter identification, multicriteria techniques and ways of their implementation]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no. 4. pp. 5–11. (in Russian).
9. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Sposob opredeleniya oblasti kompromissa kriteriev kachestva mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [The method for determining the area of compromise quality criteria of multi-criteria Technology]. Certificate of Copyright 53769, 18.02.2014. Available at: <http://www.me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=11c1271e-eb9e-470a-ba8e-43b4e5301bee&title=OfitsiiniBiuletentavtorskePravoIsumizhniPrava>. (in Russian).
10. Volchuk V.N. *K opredeleniyu oblasti kompromissa kharakteristik kachestva materialov* [By the definition of the field of compromise materials quality characteristics]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 3, pp. 21–25. Available at: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30/54119> (in Russian).
11. Volchuk V. and Tokosov S. *Sposib prohnozu mekhanichnykh vlastyvostey chavunnykh valkiv* [Method of forecasting mechanical properties of cast-iron rolls]. *ScienceRise*. 2018, vol. 11. pp. 57–61. (in Ukrainian).

12. 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, iss. 9, pp. 1165–1171. Available at: <https://DOI:10.15407/mfint.40.09.1165>
13. Volchuk V. *M.K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovanii kriteriyev kachestva mnogoparametricheskikh tekhnologiy* [On the application of fractal formalism for ranging criteria of quality of multiparametric technologies ]. *Metallofizika i noveyskiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949–957. Available at: <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>. (in Russian).
14. 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. Available at: <https://hrcak.srce.hr/202359>.
15. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Osnovy organizatsii fraktal'nogo modelirovaniya* [Fundamentals of fractal modeling]. Kiev: Akadempriodika, 2017, 170 p. (in Russian).
16. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrucken: Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p. Available at: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
17. Zhuravel' I.M. and Svir'ska L.M. *Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions*. *Materials Science*. 2010, vol. 46, no. 3, pp. 418-420. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/135345>. (in Russian).
18. Karuskevych M. V., Zhuravel' I. M. and Maslak T.P. *Application of Fractal Geometry to the Problems of Prediction of the Residual Service Life of Aircraft Structures*. *Materials Science*, 2012, vol. 47, no. 5, pp. 621-626.
19. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Topologicheskiye 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. Available at: [https://file:///D:/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BA%D0%B8/dnanu\\_2017\\_4\\_9.pdf](https://file:///D:/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BA%D0%B8/dnanu_2017_4_9.pdf). (in Russian).
20. 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. Available at: <https://www.morebooks.de/store/gb/book/%D0%9F%D1%83%D1%82%D0%B8-%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F-%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%B8-%D1%84%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2/isbn/978-3-659-72264-6>. (in Russian).
21. 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).
22. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Ways of periodic identification of multi-criteria technology]. Saarbrucken: Palmarium Academic Publishing. 2015, 236 p. Available at: <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>. (in Russian).

Рецензент: Дубров Ю. І., д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 16.09.2018 р.