

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.290818.31.87

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУ ЯКОСТІ МЕТАЛУ

ВОЛЧУК В. М.<sup>1</sup>, *д-р техн. наук, проф.*,

ШТАНДЕНКО М. С.<sup>2</sup>, *ліцеїст*

<sup>1</sup>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: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

<sup>2</sup>Києво-Печерський ліцей № 171 «Лідер», вул. Лейпцизька, 11-а, 01015, Київ, Україна, тел. +38 (044) 280-7506, e-mail: volchuky@gmail.com

**Анотація.** *Вступ.* На якість масивних виробів із металу впливає багато факторів, що зумовлює труднощі їх оцінювання неруйнівними методами контролю. Оскільки теорія фракталів дає можливість більш адекватно оцінювати структуру складних об'єктів різної природи, в статті розглянуто можливість застосування цієї теорії для більш адекватного оцінювання елементів структури металу на мікроструктурному рівні. **Методика.** Застосовується математичне моделювання критеріїв якості прокатних валків із чавуну на основі аналізу фрактальної розмірності елементів їх структури. Розрахунок фрактальної розмірності металу проводиться на основі розробленої методики. **Практичне значення.** Встановлено чутливість механічних властивостей чавунних валків до фрактальної розмірності елементів їх структури (перліту, карбідів, графіту). Найбільшу чутливість показників міцності зафіксовано до фрактальної розмірності карбідів та графіту. Такий підхід допоможе побудувати математичну модель, що дозволяє прогнозувати механічні властивості валків із похибкою 5-7 % на основі їх залежності від найбільш чутливих показників розмірності елементів структури. **Висновки.** Показано, що критерії якості чавунних валків можуть бути описані фрактальною моделлю на основі аналізу елементів їх структури.

**Ключові слова:** математична модель; метал; структура; теорія фракталів; критерії якості

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗА КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА

ВОЛЧУК В. Н.<sup>1</sup>, *д-р техн. наук, проф.*,

ШТАНДЕНКО М. С.<sup>2</sup>, *лицейст*

<sup>1</sup>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: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

<sup>2</sup>Києво-Печерський ліцей № 171 «Лідер», ул. Лейпцигская, 11-а, 01015, Киев, Украина, тел. +38 (044) 280-7506, e-mail: volchuky@gmail.com

**Аннотация.** *Введение.* На качество массивных изделий из металла влияет много факторов, что обуславливает трудности их оценки неразрушающими методами контроля. Поскольку теория фракталов позволяет более адекватно оценивать структуру сложных объектов различной природы, в работе рассмотрена возможность применения этой теории для более адекватной оценки элементов структуры металла на микроструктурном уровне. **Методика.** Применяется математическое моделирование критериев качества прокатных валков из чугуна на основе анализа фрактальной размерности элементов их структуры. Расчет фрактальной размерности металла проводился на основе разработанной методики. **Практическое значение.** Установлена чувствительность механических свойств чугунных валков к фрактальной размерности элементов их структуры (перлита, карбидов, графита). Наибольшая чувствительность показателей прочности зафиксирована в фрактальной размерности карбидов и графита. Такой подход позволил построить математическую модель, позволяющую прогнозировать механические свойства валков с погрешностью 5-7 % в основе их зависимости от наиболее чувствительных показателей размерности элементов структуры. **Выводы.** Показано, что критерии качества чугунных валков могут быть описаны фрактальной моделью на основе анализа элементов их структуры.

**Ключевые слова:** математическая модель; металл; структура; теория фракталов; критерии качества

## MATHEMATICAL MODEL OF THE METAL QUALITY FORECAST

VOLCHUK V. M.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

SHTANDENKO M. S.<sup>2</sup>, *lyceum*

<sup>1</sup>Department of Materials Science, State Higher Educational Establishment «Pridneprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernishevskogo str., 24-a, Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

<sup>2</sup>Kyivo-Pecherskiylycee № 171 «LEADER», Leipzig str., 11-a, 01015, Kyiv, Ukraine, tel. +38 (044) 280-7506, e-mail: volchuky@gmail.com

**Abstract.** *Introduction.* The quality of massive metal products is influenced by many factors, which makes it difficult to assess them by non-destructive methods of control. Since the theory of fractals makes it possible to more

adequately evaluate the structure of complex objects of different nature, then the possibility of applying this theory to a more adequate assessment of elements of the structure of the metal at the microstructural level is considered. **Method.** The mathematical modeling of the quality criteria of cast iron rolls on the basis of analysis of the fractal dimension of elements of their structure is applied. The calculation of the fractal dimension of the metal was carried out on the basis of the developed methodology. **Practical meaning.** The sensitivity of the mechanical properties of cast-iron rollers to the fractal dimension of the elements of their structure (perlite, carbides, graphite) was established. The greatest sensitivity of the strength indicators was fixed to the fractal dimension of carbides and graphite. This approach allowed to construct a mathematical model that allows to predict the mechanical properties of rolls with an error of 5-7% based on their dependence on the most sensitive indicators of the dimension of structural elements. **Conclusions.** It is shown that the quality criteria of cast-iron rolls can be described by a fractal model based on the analysis of elements of their structure.

**Keywords:** *mathematical model; metal; structure; fractal theory; quality criteria*

**Вступ.** Важливе завдання сучасної металургії України полягає в забезпеченні стабільних показників якості металу, у першу чергу його твердості і зносостійкості, без проведення додаткових випробувань та з мінімальними матеріально-часовими витратами [1; 2].

Аналіз існуючих способів оцінювання структури та властивостей металів свідчить, що один із перспективних підходів для вирішення проблеми оперативного, необхідного для практичних цілей, оцінювання їх якісних характеристик із мінімальними витратами, - це методика, заснована на

створенні математичних моделей прогнозу цих характеристик залежно від хімічного складу та параметрів структури [3-5].

Для оцінювання характеристик якості металу з мінімальними витратами в статті запропоновано застосовувати теорію фракталів, що успішно використовується для оцінювання структури і властивостей різних матеріалів [6-10].

**Методика.** Досліджувався вплив фрактальної розмірності елементів структури чавуну марки СПХН (рис. 1) для виробництва валків на показники їх твердості.



Рис. 1. Чавунні валки виконання СПХН

Валки з чавуну марки СПХН-45 відносять за призначенням до сортопрокатних (С), за формою графітних включень у структурі є пластинчастий графіт (П), поверхня робочого шару легована хромом (Х) та нікелем (Н).

Із чавуну СПХН-45 виготовляють валки чорнових клітей, дрібно-, середньосортних і трубопрокатних станів; із чавуну СПХН-45 – валки обтискних та чорнових клітей сортопрокатних станів.

Ми досліджували вплив параметрів структури наведених вище марок чавуну на їх механічні властивості, зокрема на твердість.

У таблиці 1 наведено хімічний склад чавунів після двох плавок без термічної обробки.

Розмір чавунних валків марки СПХН-45 становить: діаметр бочки 520 довжиною 1 000 мм (520×1 000 мм); валків марки

СПХН-45: діаметр бочки 680 довжиною 1 000 мм (680×1 000 мм).

Таблиця 1

*Хімічний склад чавунів, % від маси*

Марка валка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
СПХН-45 (Плавка 1)	3,03	0,85	0,73	0,115	0,035	0,76	1,17	0,30
СПХН-45 (Плавка 2)	2,95	0,75	0,62	0,108	0,035	0,73	1,12	0,26

У таблиці 2 наведені значення твердості зразків, обчислені методом Шора (ГОСТ 23273-78). на Дніпровському заводі прокатних валків (ДЗПВ). Для визначення

твердості валків методом Шора контрольні заміри здійснювали в трьох точках, рівномірно розташованих по довжині бочки валка.

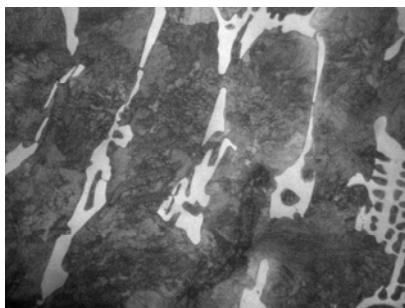
Таблиця 2

*Твердість зразків, визначена методом Шора*

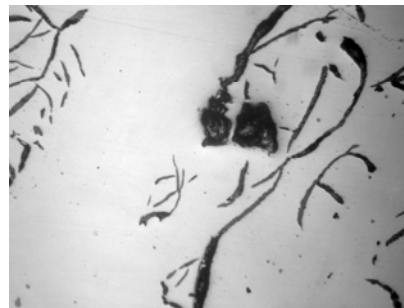
Чавун СПХН-45 (Плавка 1)		Чавун СПХН-45 (Плавка 2)	
№ зразка	Твердість робочої поверхні, HSD	№ зразка	Твердість робочої поверхні, HSD
1	48	1	47
2	49	2	49
3	46	3	46
4	48	4	48
5	47	5	47

Структура чавуну наведена на рисунку 2. Аналіз мікроструктури показав, що ми маємо перлітний чавун (75-80 %),

мікролегований хромом та нікелем, із пластинчастим графітом (до 3 %) та середнім змістом карбідів (Fe<sub>3</sub>C) – 18-22 %.



а



б

Рис. 2. Мікроструктура чавуну СПХН-45, ×200: а – перлітна матриця чавуну та карбіди; б – пластинчастий графіт

Фрактальна розмірність  $D$  елементів структури чавуну визначалася за формулою Хаусдорфа-Безіковича (1) (клітинний метод):

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

де  $N(\delta)$  – кількість кліток, що покрили об'єкт дослідження;  $\delta$  - лінійний розмір клітини [8].

**Практичне значення.** Для аналізу оцінки впливу елементів структури чавуну застосовували графік, наведений на рисунку 3.

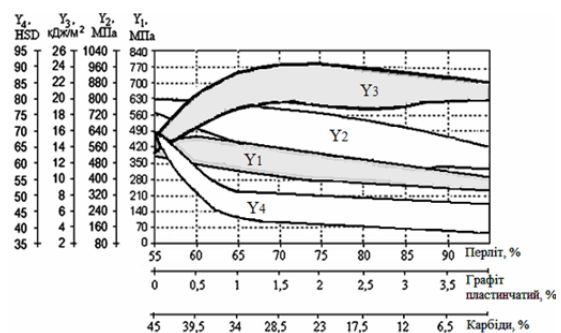


Рис. 3. Робоча область параметрів структури та механічних властивостей чавунних прокатних валків

виконання СПХН:  $Y1$  – межа міцності на розтяг;  
 $Y2$  – межа міцності на згин;  $Y3$  – ударна в'язкість  
та  $Y4$  – твердість

Оскільки елементи структури металу мають складну геометричну конфігурацію [11], як це видно з рисунка 2, для їх оцінювання застосовували мову фрактальної геометрії, що дозволяє оцінювати об'єкти різної складності.

Залежність показників фрактальної розмірності від елементів структури наведено на рисунку 4 (а–в). З цього рисунка випливає, що найбільша чутливість показників твердості спостерігається до фрактальної розмірності графіту та карбідів, про що відповідно свідчать коефіцієнти їх кореляції  $R^2 = 0,89$  та  $R^2 = 0,96$  відповідно. Слабка кореляція спостерігається між фрактальною розмірністю перлітної матриці та твердістю, оскільки ймовірно, що перлітна матриця має невисокі показники твердості порівняно з іншими структурами чавунів.

Відносна похибка отриманої фрактальної моделі прогнозування твердості металу становить 5–7 %.

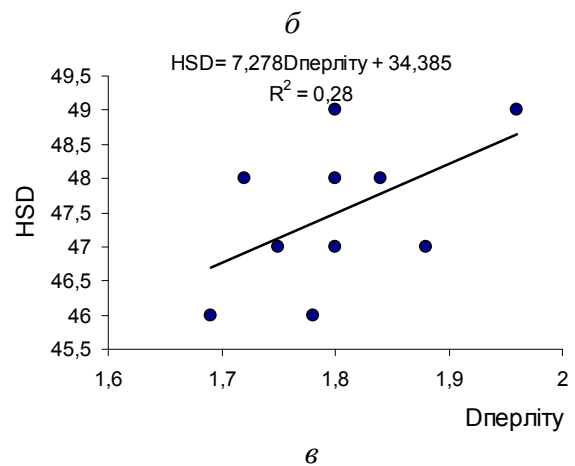
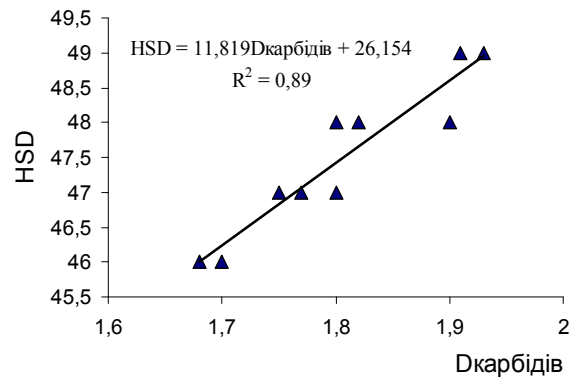
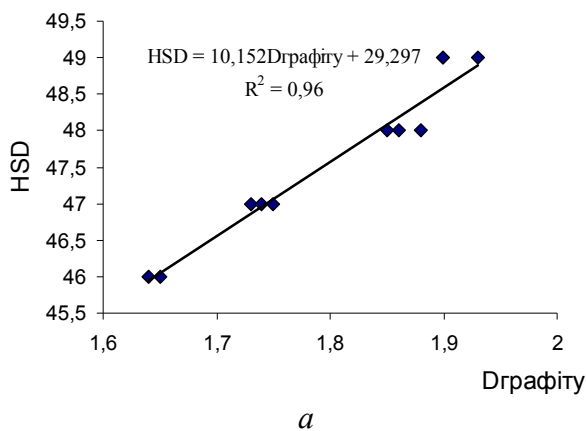


Рис. 4. Залежність твердості чавуну марки СПХН-45 від фрактальної розмірності  $D$  елементів його структури: а – графіту; б – карбідів; в – перліту

**Висновки.** Побудовано математичну модель прогнозу якості металу на прикладі чавунних валків із застосуванням теорії фракталів. Такий підхід дозволяє встановлювати зв'язок між фрактальною розмірністю структури металу та його твердістю.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бунин К. П. Основы металлографии чугуна / К. П. Бунин, Я. Н. Малиночка, Ю. Н. Таран. – Москва : Металлургия, 1969. – 416 с.
2. Прокатные валки из высокоуглеродистых сталей / Т. С. Скобло, Н. М. Воронцов, С. И. Рудюк [и др.] ; ред. Т. С. Скобло. – Москва : Металлургия, 1994. – 336 с.
3. 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 доступу: <https://hrcak.srce.hr/186657>. – Проверено: 26.06.2018.
4. 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 доступу: <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2014-11/14-11-13.pdf>.
5. Алгоритм проведения первичной статистической обработки массивов экспериментальных данных / Д. В. Лаухин, А. В. Бекетов, Н. А. Ротт, В. Д. Лаухин // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпро, 2017. – № 2. – С. 68–77.

6. Большаков В. И. Основы организации фрактального моделирования : монография / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров. – Киев : Академперіодика, 2017. – 170 с.
7. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2017. – Т. 39. – Вып. 7. – С. 949–957. – Режим доступа: <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>. – Проверено: 26.06.2018.
8. Журавель І. М. Вибір налаштувань під час обчислення поля фрактальних розмірностей зображення / І. М. Журавель // *Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук. пр. / Нац. лісотехн. ун-т України*. – Львів, 2018. – Т. 28. – № 2. – С. 159–163. – Режим доступа: <https://doi.org/10.15421/40280230>. – Проверено: 26.06.2018.
9. Zhuravel' I. M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions / I. M. Zhuravel', L. M. Svir'ska // *Materials Science*. – 2010. – Vol. 46, no. 3. – P. 418–420.
10. Штофель О. А. Использование мультифрактального анализа для оценки свойств конструкционных сталей / О. А. Штофель, М. Д. Рабкина // *Universum: Технические науки*. – 2016. – № 10 (31). – Режим доступа: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/3791>. – Проверено: 26.06.2018.
11. Investigation of Acicular Ferrite Structure and Properties of C-Mn-Al-Ti-N Steels / O. Uzlov, A. Malchere, V. I. Bolshakov, C. Esnouf // *Advanced Materials Research*. – 2007. – Vol. 23. – P. 209–312. – Режим доступа: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.23.209>. – Проверено: 26.06.2018.

## REFERENCES

1. Bunin K.P., Malinochka Ya.N. and Taran Yu.N. *Osnovy metallografii chuguna* [Foundations of metallurgy of cast iron]. Moskva: Metallurgiya, 1969, 416 p. (in Russian).
2. Skoblo T.S., Vorontsov N.M., Budagyants N.A. and others. *Prokatnye valki iz vysokouglerodistykh staley* [Rolling rolls made of high-carbon steels]. Moskva: Metallurgiya, 1994, 336 p. (in Russian).
3. Mishutin A., Kroviakov S., Pisev 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>. (Accessed on June 26, 2018).
4. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O prognozirovanii kachestva celevogo produkta v periodicheskikh texnologiyax* [Predicting the quality of a desired product in periodic technologies]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. Kyiv, 2014, no. 11, pp. 77–81. Available at: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771> (in Russian).
5. Laukhin D.V., Beketov O.V., Rott N.O. and Laukhin V.D. *Algoritm provedeniya pervichnoj statisticheskoy obrabotki massivov eksperimental'nykh dannykh* [Algorithm of primary statistical analysis of arrays of experimental data]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnitstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipro, 2017, no. 2, pp. 68–77. (in Russian).
6. 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).
7. Volchuk V.M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovanii kriteriev kachestva mnogoparametricheskikh texnologij* [On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies]. *Metallofizika i noveyshiye texnologii* [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>. (Accessed on June 26, 2018). (in Russian).
8. Zhuravel' I.M. *Vybir nalashтуvan pid chas obchyslennia polia fraktal'nykh rozmirnostei zobrazhennia* [The choice of parameters when calculating the fractal dimension of the image] *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy* [Scientific Bulletin of UNFU]. Nats. lisotekhn. un-t Ukrainy [National Forestry University of Ukraine]. Lviv, 2018, vol. 28, no. 2, pp. 159–163. Available at: <https://doi.org/10.15421/40280230>. (Accessed on June 26, 2018). (in Ukrainian).
9. Zhuravel' I.M. and Svir'ska L.M. *Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions*. *Materials Science*. 2015, vol. 46, no. 3, pp. 418–420.
10. Shtofel' O. A. and Rabkina M.D. *Ispol'zovanie mul'tifraktal'nogo analiza dlya ocenki svoystv konstruktsionnykh staley* [The use of a multifractal analysis for property evaluation of constructional steels]. *Universum: Tekhnicheskiye nauki* [Universum: Engineering]. 2016, vol. 31, no. 10. Available at: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/3791>. (Accessed on June 26, 2018). (in Russian).
11. Uzlov O., Malchere A., Bolshakov V.I. and Esnouf C. *Investigation of Acicular Ferrite Structure and Properties of C-Mn-Al-Ti-N Steels*. *Advanced Materials Research*. 2007, vol. 23, pp. 209–312. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.23.209>. (Accessed on June 26, 2018).

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

Надійшла до редколегії: 28.12.2017 р.