

27. Pask G. *Principy samoorganizacii* [The principles of self-organization]. *Model' `evolyucii : sb. dokl.* [Model of evolution : coll. of rep.]. Moscow : Mir, 1966, pp. 284–314. (in Russian).

28. Hamming R.W. Error-detecting and error-correcting codes. *Bell System Technical Journal*, 1950, vol. 29, no. 2, p. 147.

Поступила в редакцію 13.04.2018

Принята в печать 15.04.2018

УДК 519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240418.39.265

ПРОГНОЗ МЕХАНИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ Ст6сп

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. Для оцінювання механічних властивостей часто використовуються методи неруйнівного контролю. Перспективним напрямком у галузі прогнозу характеристик якості металу стало застосування математичних методів прогнозу, зокрема, планування експериментів. **Матеріал і методи.** Досліджувався прокат зі сталі Ст6сп у стані заводської поставки. За допомогою методики оптичної мікроскопії встановлено, що структура сталі феритно-перлітна. Вміст перліту в металі був у межах 50...60 %. **Результати та їх обговорення.** Застосовано методику планування експериментів для прогнозу механічних властивостей сталі Ст6сп в робочій області параметрів. Досліджувався вплив хімічного складу прокату зі сталі Ст6сп у стані заводської поставки на її механічні властивості в межах ГОСТ 535-2005. За результатами аналізу матриці планування отримано математичну модель прогнозу межі міцності, межі текучості, твердості та відносного подовження. Модель адекватна згідно з критеріями Фішера та Кохрена. Побудовано гістограму впливу елементів хімічного складу сталі Ст6сп на її механічні властивості. **Висновки.** Запропоновано методику прогнозу механічних властивостей сталі Ст6сп в робочій області її параметрів згідно з нормативними документами.

Ключові слова: механічні властивості; математична модель; матриця планування; хімічний склад; структура

ПРОГНОЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ Ст6сп

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. Для оценки механических свойств часто используются методы неразрушающего контроля. Перспективным направлением в области прогноза характеристик качества металла является применение математических методов прогноза, в частности, планирование экспериментов. **Материал и методики.** Исследовался прокат из стали Ст6сп в состоянии заводской поставки. С помощью методики оптической микроскопии установлено, что структура стали является ферритно-перлитной. Содержание перлита в металле находилось в пределах 50...60 %. **Результаты и их обсуждение.** В работе использовалась методика планирования экспериментов для прогноза механических свойств стали Ст6сп в рабочей области параметров. Исследовалось влияние химического состава проката из стали Ст6сп в состоянии заводской поставки на ее механические свойства в пределах ГОСТ 535-2005. По результатам анализа матрицы планирования получена математическая модель прогноза предела прочности, предела текучести, твердости и относительного удлинения. Модель адекватна согласно критериям Фишера и Кохрена. Построена гистограмма влияния элементов химического состава стали Ст6сп на ее механические свойства. **Выводы.** Предложена методика прогноза механических свойств стали Ст6сп в рабочей области ее параметров согласно нормативным документам.

Ключевые слова: механические свойства; математическая модель; матрица планирования; химический состав; структура

FORECAST OF MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL Ст6сп

FORTIHIN A.A. *, *Postgraduate student*

* Department of materials science and materials processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: fortigin13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

Abstract. Formulation of the problem. Non-destructive testing methods are often used to evaluate mechanical properties. A promising direction in the field of predicting the characteristics of metal quality is the use of mathematical methods for forecasting, in particular, planning experiments. **Material and methods.** Studied rolled steel Ст6сп in the state of factory delivery. Using the technique of optical microscopy, it was established that the structure of the steel is ferritic-pearlitic. The content of perlite in the metal was in the range of 50 ... 60 %. **Results and discussion.** We used the method of planning experiments to predict the mechanical properties of steel Ст6сп in the working area of parameters. The influence of the chemical composition of rolled steel Ст6сп in the condition of factory supply on its mechanical properties within the limits of ГОСТ 535-2005 was investigated. According to the results of the analysis of the planning matrix, a mathematical model was obtained for predicting the ultimate strength, yield strength, hardness and relative elongation. The model is adequate according to the criteria of Fisher and Cochren. A histogram of the influence of elements of the chemical composition of steel Ст6сп on its mechanical properties is built. **Conclusions.** The proposed method for predicting the mechanical properties of steel Ст6сп in the working area of its parameters in accordance with regulatory documents.

Keywords: mechanical properties; mathematical model; planning matrix; chemical composition; structure

Постановка проблеми

Механічні властивості металу визначають, у першу чергу, хімічний склад та структура, на яку впливає значна кількість технологічних параметрів (хімічного складу, легуючих елементів, різних видів обробки, умов охолодження і т. ін.) [1–3]. Частина із цих параметрів може змінюватися в широкому діапазоні, що викликає зміни властивостей багатокритеріальної, багатопараметричної технології виробництва продукції з металу [4–6]. У зв'язку з цим виникає питання прогнозу механічних властивостей металопрокату згідно з нормативними документами та вимогами до його якості.

Крім того, слід зазначити, що якісне оцінювання механічних властивостей сталей та чавунів неруйнівними методами ускладнюється також неповнотою формальної аксіоматики, що виникає під час ідентифікації їх структури [7; 8]. Для часткової компенсації неповноти формальної аксіоматики [9; 10] застосовують різні підходи, зокрема, які включають застосування імітаційного моделювання [11]. Наприклад, у працях [12–16] для прогнозу механічних властивостей металу застосовується фрактальний формалізм, а також композиції топологічних і фрактальних інваріантів [17; 18]. Для оцінювання впливу хімічного складу на властивості застосовуються методи математичного моделювання [19; 20] та експертні оцінки [21; 22]. У праці [23] розглянуто метод вибору якісних показників металу на підставі аналізу інформаційної ентропії його структури.

Слід зазначити, що багато задач матеріалознавства, що пов'язані з оцінюванням та прогнозом властивостей матеріалів, згідно з Адамаром, некоректні [24; 25], тому це питання залишається відкритим.

У статті запропоновано для прогнозу механічних властивостей сталі Ст6сп застосувати методи математичного моделювання з урахуванням статистичної інформації та експертних оцінок.

Матеріал і методики

За матеріал для дослідження обрано лист зі сталі Ст6сп товщиною 10 мм. Вибір цієї марки зумовлений

тим, що з неї виготовляють сортовий і фасонний прокат, труби та інші вироби. Хімічний склад сталі досліджувався в інтервалі, обмеженому згідно з ГОСТ 380-2005 (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний склад сталі Ст6сп / Chemical composition of steel Ст6сп

Елементи	C	Si	Mn	Ni	S
вміст у %	0,38... 0,49	0,15... 0,30	0,50... 0,80	до 0,3	до 0,05
Елементи	P	Cr	N	Cu	As
вміст у %	до 0,04	до 0,30	до 0,008	до 0,30	до 0,08

Сталь у стані заводської поставки мала феритно-перлітну структуру.

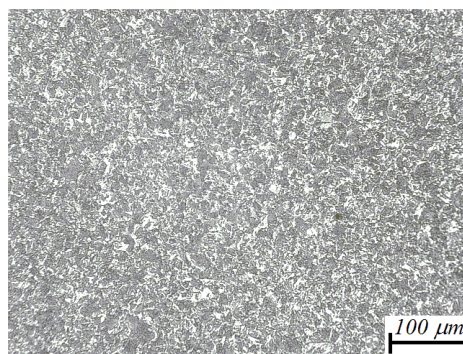


Рис. 1. Структура листа зі сталі Ст6сп товщиною 10 мм, ферит, перліт, травлення HNO₃ /

Fig. 1. Leaf structure of steel St6 with a wedge of 10 mm, ferrite, pearlite, etching HNO₃

Застосовуючи стандартні методики металографії (лінійний метод), установили, що вміст перліту в сталі коливався в межах 50...60 %.

Результати та їх обговорення

Для прогнозу механічних властивостей сталі Ст6сп реалізовувалась матриця планування експерименту з урахуванням експертних оцінок. Матриця планування експериментів на 16 стовпців реалізовувалася з експериментальними показниками функції мети $Y_{\text{екс}}$ та оцінками її прогнозу $Y_{\text{роз}}$ (табл. 2), де ЗР – загальний рівень значень аргументів ($X_1...X_7$); НР – нижній рівень; ВР – верхній рівень та

ІВ – інтервал варіювання аргументів. Аргументами функцій (механічних властивостей) виступали:

вуглець (X_1), кремній (X_2), марганець (X_3), нікель (X_4), сірка (X_5), фосфор (X_6) та хром (X_7).

Таблиця 2

Матриця планування експериментів / Experiment planning matrix

ЗР	Фактори							Межа міцності σ_B , МПа	Межа текучості σ_T , МПа	Твердість, HV		Відносне подовження δ_5 , %				
	X_0	X_1 (C)	X_2 (Si)	X_3 (Mn)	X_4 (Ni)	X_5 (S)	X_6 (P)							X_7 (Cr)		
ІВ	0,11	0,15	0,30	0,10	0,03	0,02	0,10									
ВР	0,49	0,30	0,80	0,30	0,05	0,04	0,30									
НР	0,38	0,15	0,50	0,20	0,02	0,02	0,20									
	X_0	X_1 (C)	X_2 (Si)	X_3 (Mn)	X_4 (Ni)	X_5 (S)	X_6 (P)	X_7 (Cr)	$Y_{\text{екс}}$	$Y_{\text{роз}}$	$Y_{\text{екс}}$	$Y_{\text{роз}}$	$Y_{\text{екс}}$	$Y_{\text{роз}}$	$Y_{\text{екс}}$	$Y_{\text{роз}}$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	610	615	315	313	217	217	12,0	11,9
2	+	+	+	+	-	+	+	+	599	614	310	312	207	213	12,4	12,1
3	+	+	+	-	+	+	-	-	607	601	312	309	212	206	12,7	13,1
4	+	+	+	-	-	+	-	-	605	604	305	308	202	204	13,2	12,9
5	+	+	-	+	+	-	-	-	606	611	313	314	209	214	13,4	12,9
6	+	+	-	+	-	-	-	-	609	606	314	313	211	209	13,1	13,4
7	+	+	-	-	+	-	+	+	605	599	307	307	207	202	13,3	13,6
8	+	+	-	-	-	-	+	+	600	603	306	306	199	201	13,5	13,4
9	+	-	+	+	+	-	-	+	587	590	304	305	193	195	13,8	13,6
10	+	-	+	+	-	-	-	+	595	585	303	303	195	190	14,0	14,2
11	+	-	+	-	+	-	+	-	577	576	302	301	183	184	14,6	14,8
12	+	-	+	-	-	-	+	-	572	575	300	300	179	181	14,7	14,9
13	+	-	-	+	+	+	-	-	581	578	302	304	188	188	14,3	14,6
14	+	-	-	+	-	+	-	-	583	578	304	302	189	185	14,4	14,7
15	+	-	-	-	+	+	+	+	570	575	295	297	175	180	14,8	14,5
16	+	-	-	-	-	+	+	+	571	574	298	296	177	177	15,0	14,7

Нижче наведено рівняння регресії (1–4), що дозволяють прогнозувати механічні властивості прокату зі сталі Ст6пс в робочій області параметрів хімічного складу згідно з ГОСТ 535-2005.

$$\sigma_B = 460,996 + 240,909 \cdot X_1 + 45,000 \cdot X_2 + 29,167 \cdot X_3 + 2,500 \cdot X_4 - 100,000 \cdot X_5 + 225,000 \cdot X_6 + 2,500 \cdot X_7. \quad (1)$$

Модель (1) адекватна згідно з критеріями Фішера ($F_{\text{спостережень}} = 1,034$; $F_{\text{критич}} = 2,400$) та Кохрена ($F_{\text{спостережень}} = 0,342$; $F_{\text{критич}} = 0,547$) за рівня значимості $\alpha = 0,05$.

$$\sigma_T = 258,587 + 84,091 \cdot X_1 + 15,000 \cdot X_2 + 16,667 \cdot X_3 + 4,167 \cdot X_4 - 50,000 \cdot X_5 - 5,833 \cdot X_6 + 12,500 \cdot X_7. \quad (2)$$

Модель (2) адекватна згідно з критеріями Фішера ($F_{\text{спостережень}} = 1,083$; $F_{\text{критич}} = 2,400$) та Кохрена ($F_{\text{спостережень}} = 0,377$; $F_{\text{критич}} = 0,547$) за рівня значимості $\alpha = 0,05$.

$$HV = 78,614 + 210,227 \cdot X_1 + 41,250 \cdot X_2 + 31,250 \cdot X_3 + 10,417 \cdot X_4 - 56,250 \cdot X_5 - 1,250 \cdot X_6 + 93,750 \cdot X_7. \quad (3)$$

Модель (3) адекватна згідно з критеріями Фішера ($F_{\text{спостережень}} = 1,023$; $F_{\text{критич}} = 2,400$) та Кохрена ($F_{\text{спостережень}} = 0,340$; $F_{\text{критич}} = 0,547$) за рівня значимості $\alpha = 0,05$.

$$d_5 = 22,523 - 13,636 \cdot X_1 - 5,500 \cdot X_2 - 1,833 \cdot X_3 - 0,583 \cdot X_4 - 10,000 \cdot X_5 - 18,750 \cdot X_6 - 0,667 \cdot X_7. \quad (4)$$

Модель (4) адекватна згідно з критеріями Фішера ($F_{\text{спостережень}} = 1,153$; $F_{\text{критич}} = 2,400$) та Кохрена ($F_{\text{спостережень}} = 0,357$; $F_{\text{критич}} = 0,547$) за рівня значимості $\alpha = 0,05$.

На рисунку 2 наведено гістограми впливу елементів хімічного складу сталі Ст6пс на її механічні властивості, отримані на основі аналізу коефіцієнтів рівнянь (1–4). Діаграми описують фізико-хімічний вплив цих елементів. В усіх випадках найбільшу «вагу» під час дослідження впливу на властивості має вуглець (X_1). Інші елементи хімічного складу вносять не такий значний вклад у підвищення чи зниження властивостей завдяки їх незначному вмісту.

Кремній, марганець, нікель та хром підвищують показники міцності сталі Ст6пс (рис. 2 а-в), та знижують показники пластичності (рис. 2 з). Сірка (X_5) та фосфор (X_6), являють собою шкідливі домішки, підвищений вміст яких негативно впливає на механічні властивості металу. Сірка не розчиняється в залізі, тому утворює сульфід FeS, що

спричинює червоноламкість сталі за температури 800 °С через дію низькоплавких сульфідних евтектик, що виникають на границях зерен. У свою чергу, фосфор надає крихкості сталі в холодному стані, та розчиняючись у фериті, на відміну від сірки, в невеликих кількостях може підвищувати міцність сталі (рис. 2 а).

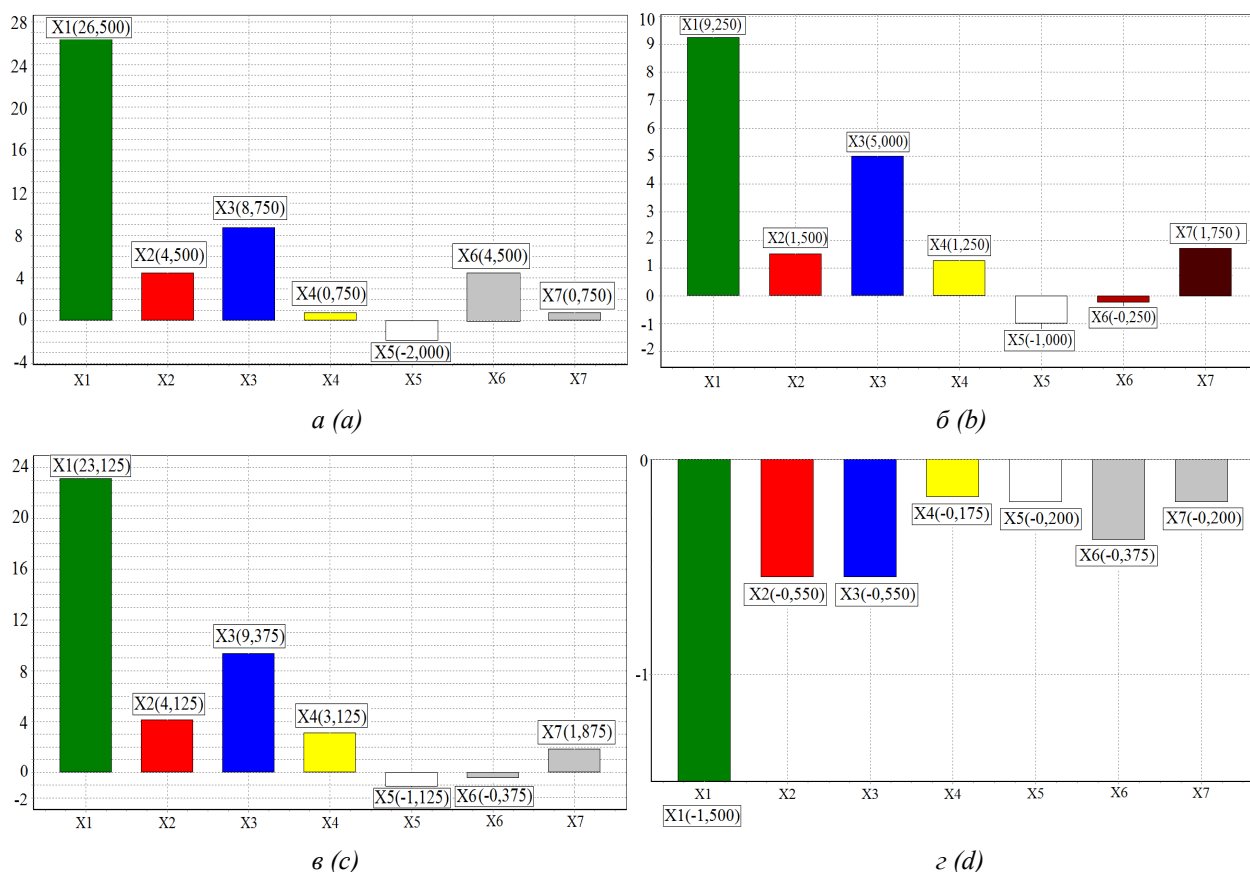


Рис. 2. Гістограма впливу хімічного складу на механічні властивості сталі Ст6пс : а – σ_B ; б – σ_T ; в – HB; з – δ_5 / Fig. 2. Histogram of the influence of the chemical composition on the mechanical properties of the steel Ст6пс : а – σ_B ; б – σ_T ; в – HB; з – δ_5

Отримані рівняння (1–4) являють собою базу даних, що дозволяє у процесі випуску металопродукату зі сталі Ст6пс прогнозувати її механічні властивості згідно з вимогами ГОСТ 535-2005.

Висновки

Розроблено методику прогнозу механічних властивостей прокату зі сталі Ст6пс (σ_B , σ_T , HB та δ_5) згідно до вимог ГОСТ 535-2005. Методика дозволяє

оцінювати властивості цієї марки сталі з феритно-перлітною структурою залежно від її хімічного складу в стані заводської поставки без термічної обробки. Цей підхід відрізняється від традиційних тим, що базується на експертно-статистичному аналізі, який враховує фізико-хімічний вплив досліджуваних параметрів на функцію мети. Адекватність моделей підтверджується критеріями Фішера та Кохрена.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Новиков И. И. Теория термической обработки / И. И. Новиков. – Москва : Metallurgiya, 1978. – 392 с.
- Гуляев А. П. Металловедение / А. П. Гуляев – Москва : Metallurgiya, 1986. – 542 с.
- Uzlov O. 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 доступу : <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.23.209>

4. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография / [Ю. Дубров, В. Большаков, В. Волчук]. – Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 236 с. – Режим доступа : <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
5. 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.
6. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2017. – Т. 39. – № 3. – С. 949–957. – Режим доступа : <http://mfint.imp.kiev.ua/abstract/v39/i07/0949.html>
7. 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>
8. Пути применения теории фракталов : монография / [В. Большаков, В. Волчук, Ю. Дубров]. – Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2016. – 146 с. – Режим доступа : <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
9. Большаков Вад. І. Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу / Вад. І. Большаков В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // *Вісник НАН України*. – 2014. – № 12. – С. 45–48. – Режим доступа : <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73434>
10. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения частичной компенсации неполноты формальной аксиоматики / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. – 2015. – № 5. – С. 10–16. – Режим доступа : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/47385/43497>
11. Большаков В. И. О применении имитационного моделирования в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Металлознавство та термічна обробка металів*. – 2015. – № 4. – С. 26–31. – Режим доступа : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/26-31>
12. 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. – № 3. – Pp. 418–420.
13. 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.
14. 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 // *Металлознавство та термічна обробка металів*. – 2004. – № 1. – С. 43–54.
15. Volchuk V. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism / V. Volchuk, I. Klymenko, S. Kroviakov, M. Orešković // *Tehnički glasnik – Technical Journal*. – 2018. – Vol. 12. – № 2. – Pp. 93–97. – Режим доступа : <https://doi.org/10.31803/tg-20180302115027>
16. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств малоуглеродистой стали / В. И. Большаков, В. Н. Волчук // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2011. – Т. 33. – № 3. – С. 347–360.
17. Большаков В. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Доповіді НАН України*. – 2017. – № 4. – С. 42–48. – Режим доступа : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.04.00>
18. Большаков В. И. Композиція топологічних і фрактальних інваріантів для ідентифікації структури / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Металлознавство та термічна обробка металів*. – 2017. – № 3. – С. 10–15.
19. Mishutn A. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures / A. Mishutn, S. Kroviakov, O. Pishev, B. Soldo // *Technical Journal*. – 2017. – Vol. 11. – № 3. – P. 121–124. – Режим доступа : <https://hrcak.srce.hr/186657>
20. 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>
21. 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>
22. Большаков В. И. 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. сем. по моделированию и оптимизации композитов*. – Одесса : АстроПринт, 2006. – С. 146–150.
23. 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*. – 2014. – № 8. – С. 4–9. – Режим доступа : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/4134>
24. Tikhonov A. N. Solutions of Ill-Posed Problems / A. N. Tikhonov, V. Yu. Arsenin. – New York : Winston, 1977. – 258 p.
25. Bolshakov V. I. Regularization of One Conditionally Ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy / V. I. Bolshakov, V. M. Volchuk, Yu. I. Dubrov // *Металлофизика і Новеішкі Тєхнології*. – 2018. – Vol. 40. – № 9. – Pp. 1165–1171. – Режим доступа : <https://DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165>

REFERENCES

1. Novikov I.I. *Teoriya termicheskoy obrabotki* [Theory of heat treatment]. Moscow : Metallurgy, 1978, 392 p. (in Russian).
2. Gulyayev A.P. *Metallovedeniye* [Metallography]. Moscow : Metallurgy, 1986, 542 p. (in Russian).

3. Uzlov O., Malchere A., Bolshakov V.I., Esnouf C. *Advanced Materials Research*. 2007, vol. 23, pp. 209–312. (in English).
4. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. (in Russian).
5. 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).
6. 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 noveyshiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no. 3, pp. 949–957. (in Russian).
7. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
8. 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).
9. 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).
10. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Materialovedcheskiye aspekty primeneniya chastichnoy kompensatsii nepolnoty formal'noy aksiomatiki* [Material aspects of use of partial compensation of incompleteness of formal axiomatics]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 5, pp. 10–16. (in Russian).
11. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O primenenii imitatsionnogo modelirovaniya v materialovedenii* [The application simulated modelling in materials science]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 4, pp. 26–31. (in Russian).
12. Zhuravel' I.M. and Svirsk'a 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.
13. 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.
14. 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).
15. 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.
16. Bolshakov V.I. and Volchuk V.N. *Materialovedcheskiye aspekty primeneniya veyvletno-mul'tifraktal'nogo podkhoda dlya otsenki struktury i svoystv malouglerodistoy stali* [Material science aspects of the use of wavelet and multifractal approach for assessing of the structure and properties of low-carbon steel]. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2011, vol. 33, no. 3, pp. 347–360. (in Russian).
17. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Topologicheskkiye i fraktal'nyye invarianty struktury dlya otsenki kachestva metalla* [Topological and fractal invariants of a structure to assess the quality of a metal]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 4, pp. 42–48. (in Russian).
18. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Kompozitsiya topologicheskikh i fraktal'nykh invariantiv dlya identyfikatsiyi struktury* [Composition of topological and fractal invariants in the identification of structure]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2017, no. 3, pp. 10–15. (in Russian).
19. Mishutn 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.
20. 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]. 2016, no. 2, pp. 40–46. (in Russian).
21. 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).
22. 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 optimizatsii 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).
23. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Primeneniye teoretiko-informatsionnogo podkhoda dlya identifikatsiyi struktury metalla* [The use of information–theoretic approach to identify the structure of the metal]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 8, pp. 4–9. (in Russian).
24. Tikhonov A.N. and Arsenin V.Yu. *Solutions of Ill-Posed Problems*. New York: Winston, 1977, 258 p.
25. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. Regularization of One Conditionally Ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveyshiye Tekhnologii*. 2018, vol. 40, no. 9, pp. 1165–1171.

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. Ю. І. Дубровим (Україна), д-ром техн. наук, доц. В. М. Волчуком (Україна).

Надійшла до редакції 15.04.2018. Прийнята до друку 19.04.2018.