

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.261218.36.563

ОЦІНКА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 15пс

ДЕНИСЮК Д. А., *маг.*

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

Анотація. Постановка проблеми. Прогнозування механічних властивостей конструкційних вуглецевих сталей має велике наукове та практичне значення. Поряд із фізико-механічними методами оцінювання властивостей сталей активно впроваджуються математичні методи, що дає можливість заощаджувати кошти та час на проведення витратних іспитів. Актуальність цього дослідження зумовлена складнощами, що виникають у процесі оцінювання точності прогнозу реальних та модельних даних. Це пов'язано з багатофакторністю технології виробництва конструкційних вуглецевих сталей, де навіть незначна зміна параметрів технології може викликати значні зміни критеріїв якості цільового продукту. Запропоновано дослідити вплив елементів хімічного складу та структури на механічні властивості конструкційної сталі 15пс із застосуванням методів математичного аналізу. **Методика.** Об'єктом дослідження обрано конструкційну сталь 15пс (лист товщиною 14 мм згідно з ГОСТ 16523). Застосовано методіку планування експериментів за рівнів факторів +1 та -1 для оцінювання механічних властивостей сталі 15пс у стані заводської поставки на основі аналізу впливу елементів хімічного складу і структури. **Результати експерименту.** В результаті реалізації матриці планування експериментів отримано залежності, що описують вплив елементів хімічного складу та феритно-перлітної структури сталі на властивості. Коефіцієнти парної кореляції R^2 за прогнозу межі міцності на основі впливу елементів хімічного складу становлять 0,89, відносного видовження – 0,82. За прогнозу механічних властивостей на основі впливу феритно-перлітної структури – 0,77 та 0,75 відповідно. Розраховані критерії Фішера та Кохрена підтверджують адекватність отриманих результатів математичного моделювання властивостей. **Висновки.** Із застосуванням матриці планування експериментів побудовано математичну модель оцінювання механічних властивостей сталі 15пс. На основі аналізу коефіцієнтів рівнянь отримано гістограми, що описують вплив елементів хімічного складу на властивості металу. Розглянутий підхід дозволить без додаткових коштів здійснювати прогнозування межі міцності та відносного видовження сталі 15пс не тільки по закінченні основного технологічного циклу, а і в процесі виробництва металопрокату в межах штатної технології та нормативних документів.

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

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 15ПС

ДЕНИСЮК Д. А., *маг.*

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

Аннотация. Постановка проблемы. Прогнозирование механических свойств конструкционных углеродистых сталей имеет большое научное и практическое значение. Наряду с физико-механическими методами оценки свойств сталей активно внедряются математические методы, что позволяет экономить средства и время на проведение расходных испытаний. Актуальность данной работы обусловлена сложностями, возникающими при оценке точности прогноза реальных и модельных данных. Это связано с многофакторностью технологии производства конструкционных углеродистых сталей, где даже незначительное изменение параметров технологии может привести к значительному изменению критериев качества целевого продукта. В работе предложено исследовать влияние элементов химического состава и структуры на механические свойства конструкционной стали 15пс с использованием методов математического анализа. **Методика.** В качестве стали для исследования выбрана конструкционная сталь 15пс (лист толщиной 14 мм по ГОСТ 16523). Применяется методика планирования экспериментов при уровнях факторов +1 и -1 для оценки механических свойств стали 15пс в состоянии заводской поставки на основе анализа влияния элементов химического состава и структуры. **Результаты эксперимента.** В результате реализации матрицы планирования экспериментов получены зависимости, описывающие влияние элементов химического состава и ферритно-перлитной структуры стали на свойства. Коэффициенты парной корреляции R^2 при прогнозе предела прочности на основе влияния элементов химического состава составляют 0,89, относительного удлинения – 0,82. При прогнозе механических свойств на основе влияния ферритно-перлитной структуры – 0,77 и 0,75 соответственно. Рассчитанные критерии Фишера и Кохрена подтверждают адекватность полученных результатов математического моделирования свойств. **Выводы.** С применением матрицы планирования экспериментов построена математическая модель оценки механических свойств стали 15пс. На основе анализа коэффициентов уравнений получены гистограммы, описывающие влияние элементов химического состава на свойства металла. Рассмотренный подход позволит без дополнительных средств осуществлять прогнозирование предела прочности и относительного удлинения стали 15пс не только по окончании основного технологического цикла, но и в процессе производства металлопроката в пределах штатной технологии и нормативных документов.

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

ESTIMATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL 15пс

DENYSIUK D.A., *Master of Engineering*

Department of Materials Science and Material Processing, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com

Abstract. Formulation of the problem. Predicting the mechanical properties of structural carbon steels is of great scientific and practical importance. Along with the physical-mechanical methods of evaluating the properties of steels, mathematical methods are being actively implemented, which allows to save money and time for conducting cost exams. The relevance of this work is due to the difficulties that arise in assessing the accuracy of the prediction of real and model data. This is due to the multifactorial carbon steel manufacturing technology where even a slight change in the technology parameters can lead to a significant change in the quality criteria of the target product. The paper proposes to investigate the influence of elements of chemical composition and structure on the mechanical properties of structural steel 15пс using the methods of mathematical analysis. **Method.** Constructional steel 15пс (sheet thickness 14 mm according to ГОСТ 16523) was selected as the steel for the study. The technique of planning experiments at the levels of factors +1 and -1 is used to evaluate the mechanical properties of steel 15пс in the state of factory delivery on the basis of the analysis of the influence of elements of chemical composition and structure. **Results of the experiment.** As a result of the implementation of the experiment planning matrix, dependencies were obtained describing the influence of the elements of the chemical composition and ferrite-pearlitic structure of the steel on the properties. The pairwise correlation coefficients of R^2 for predicting the tensile strength based on the effect of the elements of the chemical composition are 0,89, a relative elongation of 0,82. When forecasting mechanical properties based on the influence of ferrite-pearlite structure 0,77 and 0,75 respectively. The calculated Fisher and Cochran criteria confirm the adequacy of the obtained results of mathematical modeling of properties. **Conclusions.** Using the experiment planning matrix, a mathematical model for estimating the mechanical properties of 15пс steel was constructed. Based on the analysis of the coefficients of the equations, histograms were obtained describing the influence of the elements of the chemical composition on the properties of the metal. This approach will allow, without additional funds, to predict the tensile strength and elongation of steel 15пс not only at the end of the main technological cycle, but also in the process of production of rolled metal within the standard technology and regulatory documents.

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

Постановка проблеми

Прогноз механічних властивостей матеріалів різного призначення зумовлений пошуком можливостей їх оперативного оцінювання з мінімальними затратами, оскільки технологія їх виробництва буває як багатопараметричною, так і багатокритеріальною [1–5]. Це може свідчити про те, що навіть невелика зміна значень параметрів технології може викликати значні зміни якості металопрокату. Зазвичай контроль показників якості сталей та чавунів проводиться після закінчення технологічного циклу виготовлення цільового продукту [6; 7], але існуючі наразі підходи дозволяють оцінювати окремі характеристики якості на різних стадіях виробництва [8; 9] завдяки оцінюванню ключових параметрів. До таких параметрів також належать хімічний склад та елементи структури металів [10–12].

Для оцінювання та прогнозу механічних властивостей сталей та чавунів застосовуються різні методи моделювання [13–16]. Наприклад, застосування способів фрактального моделювання дало можливість прогнозувати механічні властивості

металів [17; 18]; проводити їх ранжування [19]; кількісно оцінювати структури різної складності [20; 21]. Застосування математичного моделювання дозволяє оцінювати властивості різних матеріалів завдяки аналізу експериментальних даних та обробці масивів статистичних даних [22]. Однак розбіжності результатів прогнозу із даними натурних досліджень ініціюють використання різних методик моделювання структури та властивостей матеріалів.

У цій статті запропоновано застосувати методику планування експериментів із метою оцінювання механічних властивостей сталі 15пс шляхом дослідження впливу на них хімічного складу та структури.

Методика

Об'єктом сталі для проведення експериментів обрано конструкційну сталь 15пс. Вивчалися механічні властивості листа товщиною 14 мм, хімічний склад розглядався в межах ГОСТ 1050-88 (табл. 1.)

Таблиця 1

Хімічний склад в % сталі 15пс / Chemical composition in % steel 15пс

Хімічні елементи	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
Вміст, %	0,12...0,19	0,05...0,17	0,35...0,65	до 0,30	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,30	до 0,08

Таблиця 2

Матриця планування експериментів для сталі 15пс / Experiment planning matrix for steel 15пс

ЗР		0,155	0,110	0,500	0,150	0,030	0,025	0,200	0,150	0,040	Межа міцності σ_B , МПа		Відносне видовження δ , %	
ІВ		0,035	0,060	0,150	0,150	0,010	0,010	0,050	0,150	0,040				
ВР		0,190	0,170	0,650	0,300	0,040	0,035	0,250	0,300	0,080				
НР		0,120	0,050	0,350	0,000	0,020	0,015	0,150	0,000	0,000				
№	X_0	X_1 (C)	X_2 (Si)	X_3 (Mn)	X_4 (Ni)	X_5 (S)	X_6 (P)	X_7 (Cr)	X_8 (Cu)	X_9 (As)	$Y_{екс 1}$	$Y_{роз 1}$	$Y_{екс 2}$	$Y_{роз 2}$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	440	464	20,0	19,3
2	+	+	+	+		+	+	+	-	+	425	442	21,0	20,2
3	+	+	+	-		+	-	-	+	-	430	3,6	21,2	22,1
4	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	405	384	21,5	22,7
5	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	420	44	21,0	20,0
6	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	400	411	21,7	21,2
7	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	390	376	22,0	22,8
8	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	360	364	23,6	23,4
9	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	410	437	21,8	20,5
10	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	420	413	20,8	21,1
11	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	370	353	23,0	23,5
12	+	-	+	-	-	-	+	-	+	+	330	341	24,0	23,9
13	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	340	356	23,5	23,1
14	+	-	-	+	-	+	-	-	+	-	325	343	24,5	23,5
15	+	-	-	-	+	+	+	+	-	+	320	294	24,5	25,6
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	315	282	25,0	26,0

Сталь мала феритно-перлітну структуру, де кількість пластинчастого перліту змінювалася від 14 до 24 % згідно зі зміною кількості вуглецю від 0,12 до 0,19 %. На частку фериту припадала вся решта відсоткового вмісту.

Механічні властивості сталі 15 пс змінювалися в таких межах: межа міцності $\sigma_B = 315 \dots 440$ МПа; відносне видовження $\delta = 20 \dots 25$ %.

Результати експерименту

Для побудови матриці планування визначали загальний рівень (ЗР), інтервал варіювання (ІВ), нижній (НР) та верхній (ВР) рівні значень аргументів (елементів хімічного складу) в межах ГОСТ 1050-88.

У результаті реалізації матриці планування експериментів побудовано математичні моделі (1) та (2) оцінювання механічних властивостей сталі 15пс залежно від впливу елементів її хімічного складу

(табл. 2). Як функцію Y обирали механічні властивості металу – σ_B та δ , а як аргументи – такі хімічні елементи: C, Si, Mn, Ni, Cr, S .

У матриці планування використовували показники функції мети (механічних властивостей) $Y_{екс}$, що визначали експертним шляхом, та значення їх прогнозу $Y_{роз}$, які визначали за допомогою отриманих моделей (1) і (2).

Рівняння функцій в нормованій формі:

$$Y_{роз 1} = 87,679X_0 + 1113,095X_1 + 836,310X_2 + 108,333X_3 + 58,333X_4 - 6,25,000X_5 + 750,000X_6 + 130,000X_7 + 16,667X_8 - 93,750X_9 - 2976,190X_1X_2 \quad (1)$$

$$Y_{роз 2} = 32,851X_0 - 37,768X_1 - 28,244X_2 - 4,375X_3 - 2,125X_4 + 20,625X_5 - 19,167X_6 - 5,250X_7 - 0,875X_8 + 2,031X_9 + 98,214X_1X_2 \quad (2)$$

Коефіцієнти парної кореляції R^2 для рівняння (1) становлять 0,89, для рівняння (2) – 0,82. Отримані

рівняння перевіряли на адекватність за допомогою критерію Кохрена G_{max} , що описує відношення максимальної емпіричної дисперсії S_{max} до суми всіх дисперсій (3):

$$G_{max} = \frac{s_g^2 \max}{\sum_{g=1}^N s_g^2}, \quad (3)$$

де $s_g^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{l=1}^m (y_{g,l} - \bar{y}_g)^2$, $m = 16$ – число експериментів; $y_{g,l}$ – поточне значення функції; \bar{y}_g – середнє значення функції.

Математична модель прогнозу межі міцності (1) адекватна за критерієм Фішера $F = 1,461$ за $F_{крит} = 2,400$ та рівні значимості $\alpha = 0,05$. Модель прогнозу відносного видовження (2) також адекватна за критерієм Фішера $F = 1,557$ ($F_{крит} = 2,400$, $\alpha = 0,05$).

Шляхом нормування коефіцієнтів рівнянь побудовано гістограми впливу елементів хімічного складу на механічні властивості металу (рис. 1).

Найбільший вплив на σ_B та δ серед розглянутих аргументів X здійснюють C , Si , Mn , Ni , що підтверджується їх фізико-хімічним механізмом впливу на механічні властивості сталей. Вуглець міститься в залізо-вуглецевих сплавах у вигляді сполуки Fe_3C . Збільшення C (до 1,2 %) викликає до підвищення показників міцності та твердості, але при цьому знижуються пластичні властивості, включаючи в'язкість, та здатність сталі до зварюваності. Додавання Mn зумовлене потребами зменшення шкідливого впливу кисню і сірки, що, у свою чергу, підвищує показники міцності сталі та різальні властивості, але зменшує її опір до ударних навантажень.

Cr також викликає зростання показників твердості та жаростійкості, зносостійкості металевих виробів, але негативно впливає на показники теплопровідності і в'язкості. S та P в основному знижують твердість та міцність сталі, якщо їх уміст перевищує 0,045 %, то у сталі у разі зростання температури спостерігаються такі негативні явища як червоно- та холодноламкість [23].

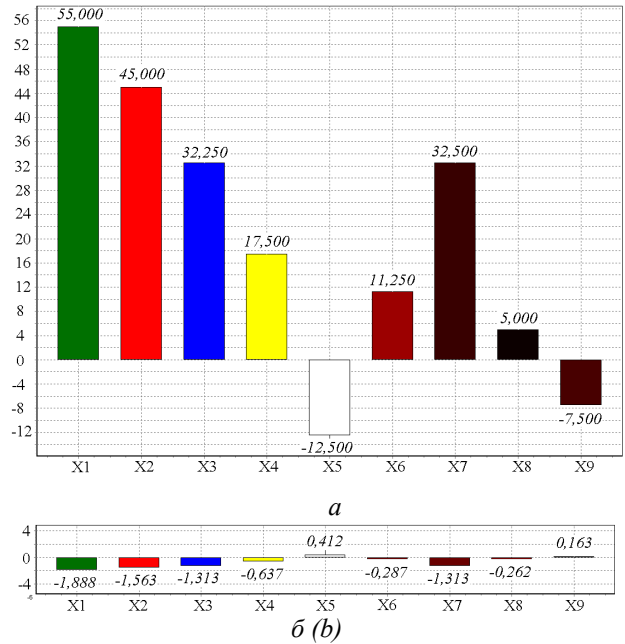


Рис. 1. Гістограма впливу елементів хімічного складу сталі 15пс на межу міцності (а), відносне видовження (б) / Fig. 1. Histogram of the influence of elements of the chemical composition of steel 15пс on the tensile strength (а), relative extension (б)

З аналізу даних гістограми (рис. 1) випливає, що незначний процентний вміст таких хімічних елементів як мідь (до 0,3 %) та миш'як (до 0,08 %) не значно впливає на розглянуті механічні властивості сталі 15пс.

На рисунку 2 наведено залежності між властивостями та структурою сталі та рівняння, що їх описують. Вміст перліту S у феритно-перлітній сталі сильно впливає на показники міцності (рис. 2 а) та пластичності (рис. 2 б).

Межа міцності пластинчатого перліту згідно [23] перебуває в межах 800 МПа, а показники пластичності становлять 10...12 %.

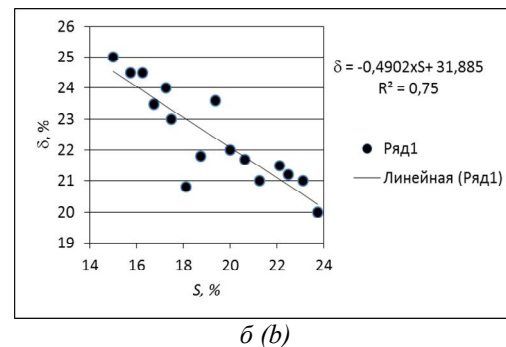
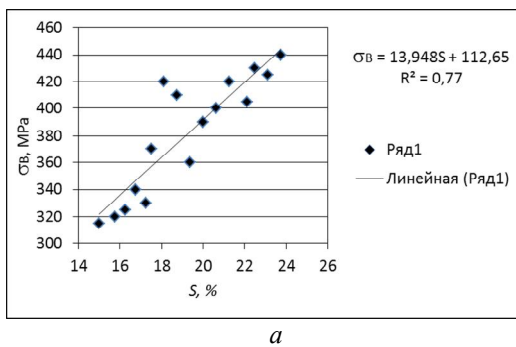


Рис. 2. Співвідношення між механічними властивостями та вмістом перліту в сталі 15пс / Fig. 2. The ratio between the mechanical properties and the content of perlite in steel 15пс

Висновки

Досліджено вплив хімічного складу та структури сталі 15пс на її механічні властивості. Аналіз результатів дозволив провести ранжування елементів хімічного складу залежно від їх впливу на межу міцності та відносне видовження.

Отримані математичні моделі дозволяють здійснювати прогнозування механічних властивостей сталі 15пс як під час технологічного процесу, так і після його закінчення, що дозволить знизити кількість натурних іспитів до мінімуму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Большаков В. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2014. – № 11. – С. 77–81. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
2. Mishutin A. V. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled floating structures / A. V. Mishutin, S. O. Kroviakov, N. V. Mishutin, V. L. Bogutsky // Proceeding of the Second International Conference on Concrete Sustainability (ICCS16), held in Madrid, Spain on 13–15 June 2016. – Barcelona, Spain: International Center for Numerical Method in Engineering, 2016. – Pp. 743–749.
3. Kroviakov S. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures / S. Kroviakov, A. Mishutin // The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimanya. – 2017. – Vol. 1. – № 4. – Pp. 2–10.
4. Большаков Вад. І. Системний аналіз технології виробництва масивного металевого лиття / Вад. І. Большаков, В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // Вісник НАН України. – 2015. – № 9. – С. 69–73. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.15407/visn2015.09.069>
5. Большаков В. І. Етапи ідентифікації багатопараметричних технологій та шляхи їх реалізації / В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // Вісник НАН України. – 2013. – № 8. – С. 66–72. – Режим доступу : <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/67873>
6. Большаков В. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2008. – № 11. – С. 99–107. – Режим доступу: <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2008-11/08-11-17.pdf>
7. Основы организации фрактального моделирования : монография / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров]. – Киев : Академперіодика НАН України, 2017. – 170 с.
8. Волчук В. Н. Определение чувствительности мультифрактальных характеристик металла / В. Н. Волчук // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – № 12. – С. 10–14. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/58941>
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 доступу : <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73434>
10. Волчук В. Н. Исследования влияния химического состава чугуных прокатных валков на их механические свойства / В. Н. Волчук // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 5. – С. 12–18. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>
11. Волчук В. Н. Применение вейвлет-анализа для оценки зеренной структуры металлов / В. Н. Волчук // Металознавство та термічна обробка металів. – 2009. – № 4. – С. 24–32. – Режим доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
12. Волчук В. Н. Фрактальный анализ балловой системы / В. Н. Волчук // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2018. – № 5. – С. 47–53. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/58941>
13. Bolshakov V. I. Regularization of One Conditionally Ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy / V. I. Bolshakov, V. M. Volchuk, Yu. I. Dubrov // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2018. – Vol. 40. – № 9. – Pp. 1165–1171. – Режим доступу : <https://DOI:10.15407/mfint.40.09.1165>
14. 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 доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/4134>
15. 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 доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/26-31>
16. Волчук В. Н. К определению области компромисса характеристик качества материалов / В. Н. Волчук // Металознавство та термічна обробка металів. – 2015. – № 3. – С. 21–25. – Режим доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
17. 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 доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/12-19>
18. 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 доступу : <https://doi.org/10.31803/tg-20180302115027>
19. 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 доступу : <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>
20. Fractals and properties of materials : monograph / [V. Bolshakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov]. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p.
21. Большаков В. И. Фрактальный подход при идентификации сложных систем / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2017. – № 6. – С. 46–50. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.06.00>
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. Ferrous materials: Steel and Cast Iron : monograph / [H. Berns, W. Theisen]. – Berlin Heidelberg : Springer, 2008. – 418 p.

REFERENCES

1. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O prognozirovani 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).
2. Mishutin A.V., Kroviakov S.O., Mishutin N.V. and Bogutsky V.L. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled floating structures. Proceeding of the Second International Conference on Concrete Sustainability (ICCS16), held in Madrid, Spain on 13–15 June 2016, Barcelona, Spain : International Center for Numerical Method in Engineering, 2016, pp. 743–749.
3. Kroviakov S. and Mishutin A. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures. *The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimaniya*. 2017, vol. 1, no. 4, pp. 2–10.
4. Bolshakov Vad.I., Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnyctva masynnoho 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).
5. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Etapy identyfikatsiyi bahatoparmetrychnykh 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]. 2013, no. 8, pp. 66–72. (in Ukrainian).
6. 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).
7. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Fundamentals of fractal modeling*. Kyiv, Ukraine : PH "Akademperiodyka" National Academy of Sciences of Ukraine, 2017, 170 p. (in Russian).
8. Volchuk V.M. *Opredeleniye chuvstvitel'nosti mul'tifraktal'nykh kharakteristik metalla* [Determining the sensitivity of the multifractal characteristics of metals]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 12, pp. 10–14. (in Russian).
9. Bolshakov Vad.I., Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Chastkova kompensatsiya nepovnoti formalnoy aksiomatiki pri identifikatsiyi struktury metaly* [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. Volchuk V.N. *Issledovaniya vliyaniya khimicheskogo sostava chugunnykh prokatnykh valkov na ikh mekhanicheskoye svoystva* [Studies of the influence of the chemical composition of cast iron rolls on their mechanical properties]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).
11. Volchuk V. N. *Primeneniye veyvlet-analiza dlya otsenki zerennoy struktury metallov* [The use of wavelet analysis to assess the grain structure of metals]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2009, no. 4, pp. 24–32. (in Russian).
12. Volchuk V.M. *Fraktal'nyy analiz ballovoy sistemy* [Fractal analysis of the point system]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 5, pp. 47–53. (in Russian).
13. 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.
14. 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 Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 8, pp. 4–9. (in Russian).
15. 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).
16. Volchuk V.N. *K opredeleniyu oblasti kompromissa kharakteristik kachestva materialov* [By identifying areas compromise performance materials quality]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 3, pp. 21–25. (in Russian).
17. Volchuk V.N. *K voprosu o primenenii 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).
18. 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.
19. Volchuk V.M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovani kriteriyev kachestva mnogoparmetrychnykh tekhnologiy* [On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies]. *Metallofizika i noveishye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949–957. (in Russian).
21. Bolshakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
21. 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]. 2017, no. 6, pp. 46–50. (in Russian).
22. Bolshakov V.I., Volchuk V.N., Dubrov Yu.I. and Deyneko L.N. *Formirovani 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*