

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.230321.49.734

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУ МІЦНОСТІ МАЛОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

КОТЕНКО Д. В., *магістр*

Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: dkotenko66@gmail.com

Анотація. Вступ. Використання різних математичних підходів до оцінки та прогнозу характеристик якості матеріалів різного призначення завжди є актуальним. Актуальність вирішення задач та проблем сучасного матеріалознавства із застосуванням методів математичного моделювання дозволяє оптимізувати технологічні процеси виробництва, визначати за короткий проміжок часу задані параметри з мінімальними часовими та матеріальними витратами. В роботі з використанням методики регресійного аналізу проведено оцінку критеріїв міцності маловуглецевої низьколегованої сталі залежно від характеристик структури. **Матеріали та методика.** В якості матеріалу для дослідження обрані зразки марки Ст3пс, виготовлені з кола діаметром 24 мм. Структура та механічні властивості досліджувались у трьох реперних точках : на відстані 0, 6 та 12 мм від центру зразка. Сталь досліджувалася в стані заводської поставки, та після двох режимів термічної обробки з отриманням феритно-перлітної та бейнітної структури. Визначалися наступні властивості : мікротвердість, межа міцності на розрив та межа плинності, твердість та ударна в'язкість за умови кімнатної температури. **Результати експерименту.** Із застосуванням регресійного аналізу отримані моделі оцінки механічних властивостей. Моделі, що описують зв'язок між мікротвердістю перліту та його площею ($R^2 = 0,8366$) в стані заводської поставки, мають відносно високий коефіцієнт кореляції; баловою оцінкою і межею міцності ($R^2 = 1,0$) й межею плинності ($R^2 = 0,8669$) сталі після охолодження у масляному середовищі; твердістю і площею перліту після гартування сталі в перлітній області ($R^2 = 0,7215$). **Висновки.** Практичне значення виконаної роботи полягає у можливості проводити експрес-аналіз властивостей металопрокату зі сталі Ст3пс на основі визначення площі елементів структури та їх балової оцінки. Однак слід відмітити, що існуюча розбіжність результатів експерименту та прогнозу з використанням отриманих моделей може зумовлюватись впливом інших факторів. До таких факторів можна віднести вплив хімічного складу, неповноту формальної аксіоматики, що виникає під час оцінки геометрії складних елементів структури.

Ключові слова: *низьколегована сталь; структура; хімічний склад; механічні властивості; регресійна модель; прогноз властивостей*

MATHEMATICAL MODEL OF FORECAST OF STRENGTH OF LOW CARBON STEEL

KOTENKO D.S., *Master of Engineering*

Department of Materials Science, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: dkotenko66@gmail.com

Abstract. Introduction. The use of different mathematical approaches to assessing and forecasting the quality characteristics of materials for different purposes is always relevant. The urgency of solving problems and problems of modern materials science with the use of methods of mathematical modeling allows to optimize technological processes of production, to determine in a short period of time the set parameters with minimal time and material costs. In the work using the method of regression analysis, the strength criteria of low-carbon low-alloy steel depending on the characteristics of the structure were evaluated. **Materials and methods.** Samples of Ст3пс steel grade made of a circle with a diameter of 24 mm were selected as the material for the study. The structure and mechanical properties were investigated at three reference points: at a distance of 0 mm from the center of the sample, 6 mm from the center of the sample and 12 mm from the center of the sample. The steel was investigated in the state of factory delivery, and after two modes of heat treatment to obtain ferritic-perlite and bainite structure. The following properties were determined: microhardness, tensile strength and yield strength, hardness and toughness at room temperature. **The results of the experiment.** Models for estimating mechanical properties were obtained using regression analysis. Models describing the relationship between the microhardness of pearlite and its area ($R^2 = 0.8366$) in the state of factory delivery have a relatively high correlation coefficient; the score and the ultimate strength ($R^2 = 1.0$) and yield strength ($R^2 = 0.8669$) of

steel after cooling in an oil medium; hardness and area of pearlite after hardening steel in the pearlite region ($R^2 = 0.7215$). **Conclusions.** The practical significance of the work performed is the ability to perform a rapid analysis of the properties of rolled metal from steel Ст3пс based on determining the area of the structural elements and their scoring. However, it should be noted that the existing discrepancy between the results of the experiment and the forecast using the obtained models may be due to the influence of other factors. Such factors include the influence of chemical composition, incompleteness of formal axiomatics, which occurs when estimating the geometry of complex structural elements.

Keywords: low-alloy steel; structure; chemical composition; mechanical properties; regression model; properties forecast

Вступ. Хімічний склад та структура значним чином впливають на механічні характеристики маловуглецевих низьколегованих сталей [1–5]. Для контролю якості металопрокату, що випускається на виробництві, застосовують різні технологічні прийоми (зміна в межах штатної технології хімічного складу, режимів термічної обробки металу, тощо), щоб досягти бажаного комплексу властивостей відповідно до нормативних вимог. Дотримання технологічних правил та норм стосовно випуску металопрокату є запорукою отримання металопродукції, якісної та конкурентоспроможної на світовому ринку. Але досягти точного прогнозу якості металопрокату не завжди вдається [6–8], оскільки несуттєва зміна режимів або порушення штатної технології виробництва призводять до зміни характеристик якості в більш широкому діапазоні їх робочої області значень [9; 10].

Для вирішення задачі покращення та прогнозування механічних властивостей готового металопрокату та виробів з нього на практиці застосовують різноманітні методики моделювання [11–15]. Як приклад,

можна навести використання теорії фракталів для оцінки структури матеріалів різного призначення [16–21], використання системного аналізу [22; 23], визначення областей з субоптимальними показниками міцності та пластичності виробів [24]. Крім того, широке застосування для визначення оптимальних значень керованих параметрів технології знайшли методи планування експериментів [25–29], тощо.

Створення математичної моделі прогнозу показників міцності маловуглецевої сталі в роботі показано на прикладі сталі широкого застосування в будівництві (сталі Ст3пс). Модель базується на оцінюванні впливу характеристик структури на показники мікротвердості, твердості, межі міцності, пластичності і ударної в'язкості.

Матеріали та методика. В якості матеріалу для дослідження обрано коло діаметром 24 мм, виготовлене із маловуглецевої низьколегованої сталі марки Ст3пс.

Сталь 3пс (клас Ат400С) мала наступний хімічний склад згідно з ГОСТ 380-2005 (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний склад сталі Ст3пс

Елементи хімічного складу	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
Вміст в % від маси	0,14... 0,22	0,05... 0,15	0,40... 0,65	до 0,30	до 0,05	до 0,04	до 0,30	до 0,30	до 0,08

Зразки зі сталі Ст3пс обирались як в стані поставки, так і після термічної обробки згідно до наступних режимів:

– після термічної обробки : нагрів до 930°C , витримка протягом 30 хв. із

наступним охолодженням у воді до температури перлітної області 650°C (дифузійний механізм);

– нагрів до 930 °С, витримка протягом 30 хв. із наступним охолодженням у масляному середовищі.

Структура сталі Ст3пс досліджувалася із застосуванням традиційних методів кількісного аналізу на металографічному мікроскопі Неофот-2 (Німеччина). Вміст перліту зафіксовано в інтервалі від 7 до 20 %; все інше припадало на ферит та виявлені окремі зерна верхнього бейніту в межах до 2...5 % (після заводської поставки та під час перерваного охолодження в воді до температури 650 °С). Під час охолодження в маслі отримано феритно-бейнітну структуру. Натурні іспити проводилися для визначення наступних механічних властивостей : межі міцності на розрив (σ_B), межі плинності (σ_T) та твердості за Брінелем (HRB) та мікротвердості за Віккерсом на приладі ПМТ-3 при навантаженні 10 г : фериту – H_{10}^C та перліту – H_{10}^T та показники ударної в'язкості КСУ, визначені за температури

+20 °С. Іспити проводилися за традиційними методиками досліджень, що регламентовані нормативними документами.

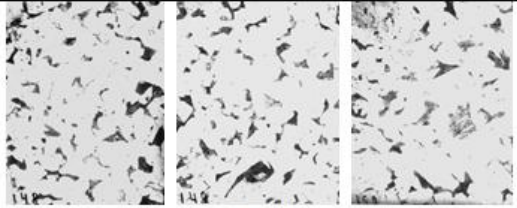
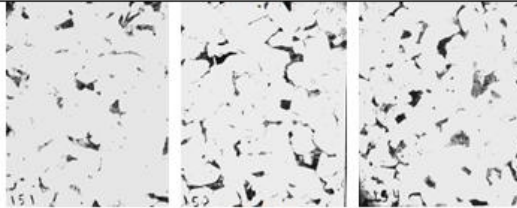
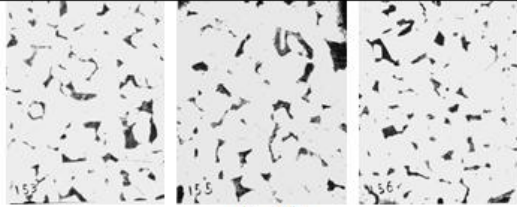
Результати експерименту. Встановлено зв'язок між механічними властивостями сталі Ст3пс та характеристиками її структури (площею перліту і фериту та баловою оцінкою).

Із використанням методики регресійного аналізу отримані моделі, що описують зв'язок між вище переліченими характеристиками металу.

В таблицях 2–4 наведені наступні характеристики сталі : мікроструктура за збільшення $\times 500$, показники механічних властивостей, твердості, мікротвердості та ударної в'язкості залежно від відстані R до центру шліфу : 0; 6 та 12 мм. Всього в цих трьох реперних точках проведено по три іспити, що підвищує точність отриманих експериментальних даних.

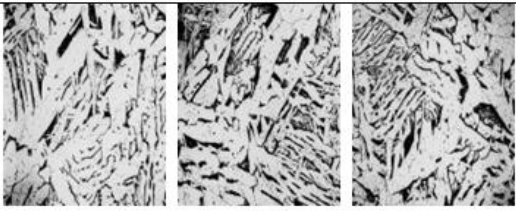
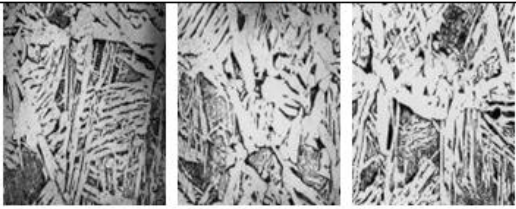
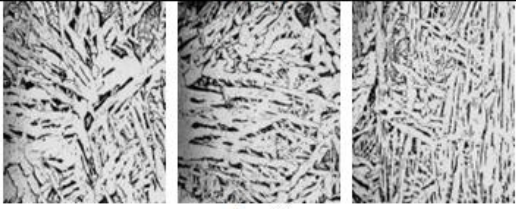
Таблиця 2

Структура та властивості сталі 3пс в стані заводської поставки

R (мм)	H_{10}^C , МПа	H_{10}^T , МПа	HRB	σ_B , МПа	σ_T , МПа	КСУ ⁺²⁰ , Дж/см ²	Співвідношення фаз, %	
							ферит	перліт
 $R = 0$	1450	1970	67	445	270	18	85	15
	1500	2110	68	445	270	18	87	13
	1400	2100	66	445	280	18	89	11
	1450	2060	67	445	270	18	87	13
 $R = 6$	1360	2140	68	450	285	17	91	10
	1360	2260	68	450	285	17	93	10
	1400	2060	67	450	285	17	87	13
	1380	2153	68	450	285	17	90	11
 $R = 12$	1430	2140	65	455	290	17	89	11
	1430	2140	64	455	290	17	88	10
	1310	2210	64	455	295	17	91	9
	1390	2163	64	455	292	17	89	10

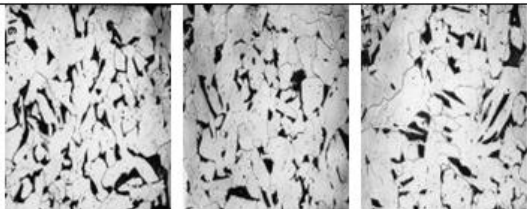
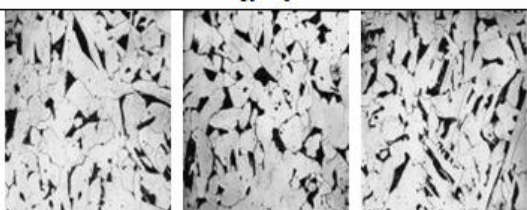
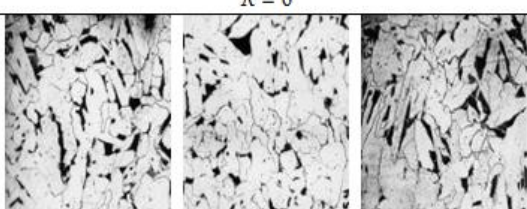
Таблиця 3

Структура та властивості сталі 3пс після охолодження в маслі

R (мм)			H_{10}^c , МПа	H_{10}^T , МПа	HRB	σ_B , МПа	σ_T , МПа	КСУ ⁺²⁰ , Дж/см ²	Балл зерна
 <p>R = 0</p>	1270	1540	74	445	316	16	4...6		
	1300	1570	75	445	316	16			
	1260	1540	74	445	316	16			
	1280	1550	74	445	316	16			
 <p>R = 6</p>	1220	1570	75	510	365	15			
	1150	1580	75	510	365	15			
	1260	1640	76	510	365	15			
	1380	1600	75	510	365	15			
 <p>R = 12</p>	1390	1600	77	540	365	15			
	1440	1690	78	540	365	15			
	1380	1630	77	540	365	15			
	1400	1640	77	540	365	15			

Таблиця 4

Структура та властивості сталі 3пс після перерваного охолодження в воді до 650 °С

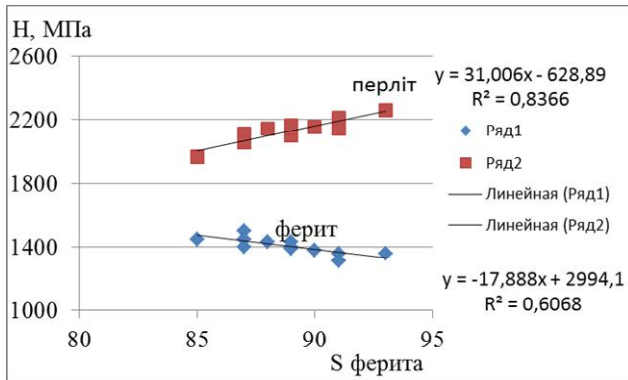
R (мм)			H_{10}^c , МПа	H_{10}^T , МПа	HRB	σ_B , МПа	σ_T , МПа	КСУ ⁺²⁰ , Дж/см ²	Співвідношення фаз, %	
									ферит	перліт
 <p>R = 0</p>	1270	1600	75	455	295	20	83	17		
	1350	1700	77	460	300	20	87	13		
	1330	1700	77	460	295	20	86	14		
	1317	1640	76	458	295	20	85	15		
 <p>R = 6</p>	1390	1720	77	457	300	18	86	14		
	1340	1690	75	455	300	18	84	16		
	1350	1650	75	455	300	18	83	17		
	1360	1690	76	456	300	18	84	16		
 <p>R = 12</p>	1430	1740	78	460	300	18	87	13		
	1400	1750	78	460	310	18	91	9		
	1400	1700	78	460	300	18	86	14		
	1410	1740	78	460	310	18	88	12		

Аналіз отриманих в таблицях 2–4 результатів дозволив побудувати моделі регресійного аналізу, що описують залежності механічних властивостей від процентного вмісту фериту і перліту в межах нормативних документів (рис. 1–3).

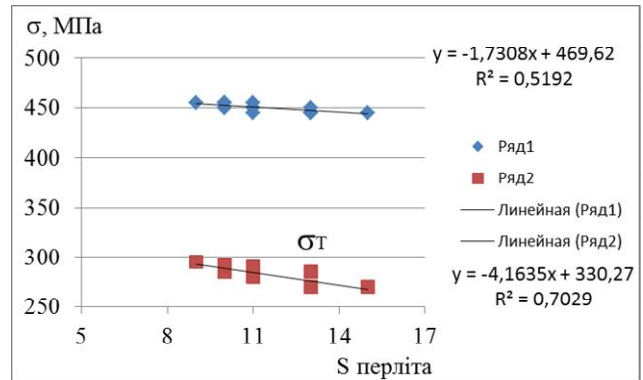
Залежність мікротвердості перліту та фериту і показників міцності сталі від процентного вмісту цих структурних

складових в сталі доволі суттєва, що підтверджується отриманими на рисунку 1 а та б коефіцієнтами кореляції. Дещо нижчі коефіцієнти кореляції зафіксовані для показників ударної в'язкості та твердості (рис. 1 в), що можна частково пояснити недостатньою виборкою даних в межах проведеного експерименту.

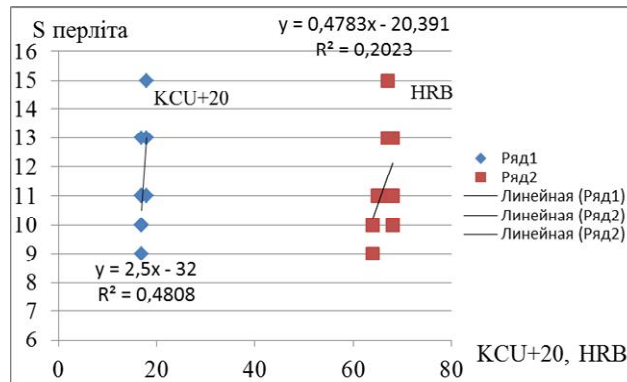
Сталь 3пс в стані заводської поставки



а



б



в

Рис. 1. Залежність механічних характеристик від вмісту перліту та фериту

Термічна обробка підвищує комплекс механічних властивостей, що

підтверджується графіками на рисунках 2 та 3.

Сталь 3пс після термічної обробки : нагрівання до 930⁰С, витримка протягом 30 хв. із наступним охолодженням у масляному середовищі

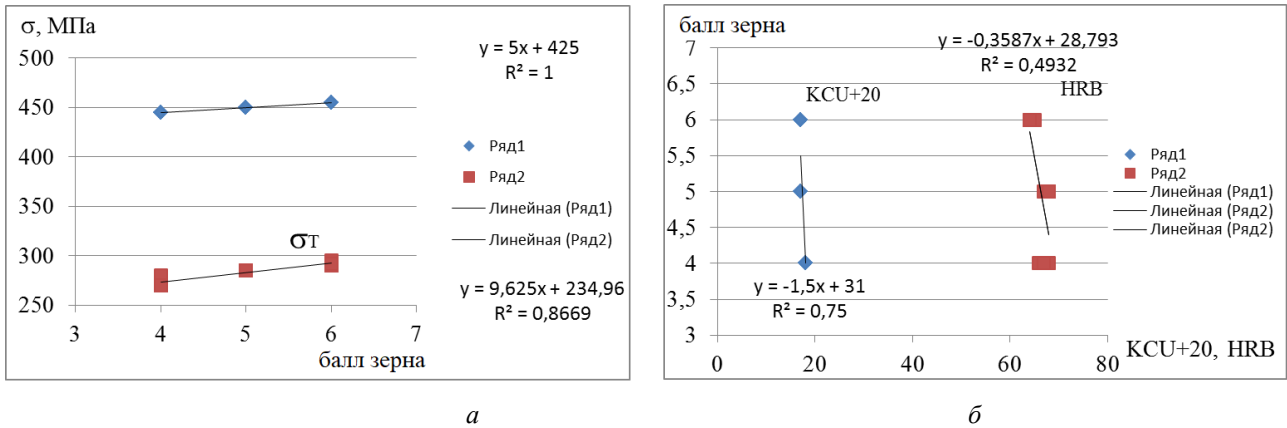


Рис. 2. Залежність механічних властивостей від балу зерна металу

Залежно від вибору оцінки того чи іншого критерію якості необхідно також враховувати комплексний вплив елементів хімічного складу, які, особливо в умовах заводської поставки сталі, значною мірою

впливають на механічні характеристики. Проте в межах даної роботи дослідження такого впливу не проводилося, бо ці результати висвітлені в багатьох дослідженнях.

Сталь 3пс після термічної обробки : нагрівання до 930⁰С, витримка протягом 30 хв. із наступним охолодженням у воді до температури 650⁰С

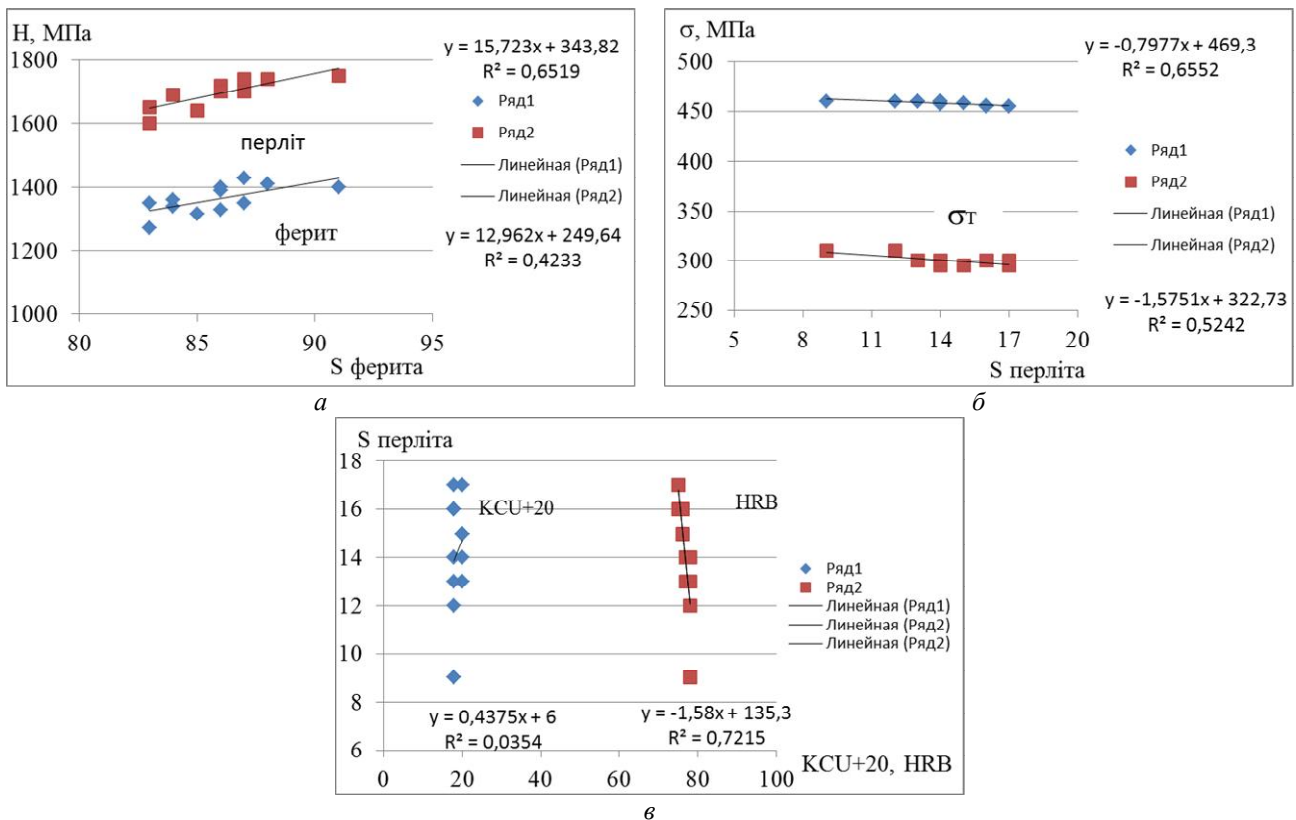


Рис. 3. Залежність механічних характеристик від вмісту перліту та фериту

Результати дослідження можна застосовувати для контролю якості металопрокату зі сталі Ст3пс на основі отриманих кореляційних співвідношень, що є актуальним в умовах виробництва.

Висновки. Проведено аналіз впливу структури на механічні властивості сталі Ст3пс в стані заводської поставки та після термічної обробки, з гартуванням у воді та масляному середовищі.

Отримані рівняння регресії, що дозволяють описувати властивості із визначеним коефіцієнтом парної кореляції R^2 ,

значення якого коливаються в межах 0,03...1,0.

Отримані результати прогнозу механічних властивостей металу, які свідчать про неповноту формальної аксіоматики при застосуванні геометрії Евкліда для опису елементів структури.

Як показано в роботах [16–19] та [30–32], частково збільшити точність прогнозу критеріїв якості матеріалів можна шляхом застосування теорії фракталів, мультифракталів та шляхом визначення області компромісу критеріїв якості досліджуваного металу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Uzlov O., Malchere A., Bolshakov V. I., C. Esnouf. Investigation of Acicular Ferrite Structure and Properties of C – Mn – Al – Ti – N Steels. *Advanced Materials Research*. 2007, vol. 23, pp. 209–312. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.23.209>
2. Білокур І. П. Елементи дефектоскопії при вивченні неруйнівного контролю. Київ : НМК ВО, 1990. 252 с.
3. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2013. № 4. С. 5–11.
4. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях. *Доповіді НАН України*. 2014. № 11. С. 77–81. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
5. Волчук В. Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 5. С. 12–18. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>
6. Волчук В. Н. К определению области компромисса характеристик качества материалов. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2015. № 3. С. 21–25. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
7. Дубров Ю., Большаков В., Волчук В. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. 236 с.
8. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Пути прогноза механических свойств прокатных валков. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2014. № 1. С. 19–40. URL : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/19-40>
9. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov Yu. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, № 9. Pp. 1165–1171. URL: DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165
10. Большаков Вад. И., Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Системный анализ технологии производства массивного металлического лиття. *Вісник НАН України*. 2015. № 9. С. 69–73. URL: <http://dx.doi.org/10.15407/vsn2015.09.069>
11. 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, № 2. Pp. 93–97. URL: <https://doi.org/10.31803/tg-20180302115027>
12. Bol'shakov V., Volchuk V., Dubrov Yu. Fractals and properties of materials : monograph. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. 140 p. URL: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
13. Волчук В. М. Модель оцінювання твердості чавунних валків СПХН-43 та СПХНФ-47. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 4. С. 22–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMNTM.2413.241219.22.597>
14. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Parhomenko O. F. Evaluation of High Strength Steel Fatigue. UDCS'19 : Fourth International Iron and Steel Symposium. April 4–6, 2019. Karabuk University, Karabuk, Turkey. 2019. Vol. 4. Pp. 415–417. URL: <https://drive.google.com/open?id=1jfwEhSuR1-3bGcv-dG7CzYnmMh7KcVT>
15. Волчук В. Н. Применение вейвлет-анализа для оценки зеренной структуры металлов. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2009. № 4. С. 24–32. URL : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>

16. Волчук В. М., Іванцов С. В., Тютєєв І. А. Дослідження впливу вуглецю на фрактальну розмірність сталі. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 3. С. 31–39. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.070720.31.638>
17. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M., Kryzhanovskiy V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. In : *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd., 2019. Vol. 968. Pp. 20–25. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.20>
18. Volchuk V., Ivantsov S., Tiutieriev I., Fortyhin A. Search for the Evaluation of ‘strength-plasticity’ Relation in Constructional Steel. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. Pp. 211–216. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.211>
19. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M. Fractal Model of the Influence of Expanded Clay Concrete Macrostructure on its Strength. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. Pp. 43–52. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.43>
20. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Ivantsov S. V., Tiutieriev I. A. Fractal model of structure-properties effect of low carbon steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021. T. 1100, №. 1. C. 012034. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1100/1/012034/meta#references>
21. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Ivantsov S. V. Fractals Theory Application for Evaluation of Influence of Non Metallic inclusions on Mechanical Properties of S355J2 Steel. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021. Vol. 1021, №. 1. C. 012053. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1021/1/012053/meta>
22. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дейнеко Л. Н., Дубров Ю. И. Композиция метода планирования экстремальных экспериментов и экспертной информации для формирования системы прогноза качества материалов. Под общ. ред. акад. МИА, д. т. н., проф. Большакова В. И. *Перспективные задачи инженерной науки*. Вып. 2. Днепропетровск : GAUDEAMUS, 2001. С. 203–208.
23. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дейнеко Л. Н., Дубров Ю. И. Формирование модели прогноза качества материала, основанной на экспертной оценке и активном эксперименте. *Компьютерное материаловедение и обеспечение качества* : матер. к 45-му Междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов. Одесса : АстроПринт, 2006. С. 146–150.
24. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Определение области компромисса критериев качества чугуновых валков. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 11. С. 4–7.
25. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. К определению класса металла. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2016. № 1. С. 26–31. URL : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/24-31/62203>
26. Дубров Ю. И., Волчук В. Н., Большаков В. И. Применение экспертной информации при формировании активного эксперимента в материаловедении. *Моделирование и оптимизация в материаловедении*: матер. к 40 междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов. Одесса : АстроПринт, 2001. С. 25–26.
27. Kroviakov S., Zavoloka M., Dudnik L., Kryzhanovskiy V. Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant portland cement and portland cement with pozzolana additive. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*. 2019. Vol. 10, № 19. P. 81–86. URL: <https://doi.org/10.13167/2019.19.8>
28. Lyashenko T., Voznesensky V., Krovyakov S. Analysis of water effect on fracture toughness in cement-based composites using computational materials science methods. *International symposium on brittle matrix composites*. 2000. Pp. 210–219. URL: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=1141801>
29. Volchuk V. M., Parhomenko O. F. Fractal approach in assessing the quality of steel 20. *Innovative Lifecycle Technologies of Housing, Industrial and Transportation Objects : collective monograph / under the general editorship Savytskyi M. Dnipro : SHEE “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”*; Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2018. Pp. 48–53. URL : <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/1380>
30. Волчук В. М., Штанденко М. С. Математична модель прогнозу якості металу. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 2. С. 31–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.290818.31.87>
31. Волчук В., Токосов С. Спосіб прогнозу механічних властивостей чавунних валків. *ScienceRise*. 2018. T. 11. С. 57–61. URL: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.150342>
32. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Прогнозирование и управление качественными характеристиками прокатных валков. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 9. С. 9–14. URL : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/42101>

REFERENCES

1. 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.
2. Bilokur I. P. *Elementy defektoskopiyi pry vyvchenni neruynivnoho kontrolyu* [Elements of defectoscopy in the study of non-destructive control]. Kyiv : NMK VO, 1990, 252 p. (in Ukrainian).

3. Bol'shakov 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).
4. 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).
5. Volchuk V.N. *Issledovaniya vliyaniya khimicheskogo sostava chugunnykh prokatnykh valkov na ikh mekhanicheskiye 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).
6. 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).
7. 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).
8. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Puti prognoza mekhanicheskikh svoystv prokatnykh valkov* [Ways to forecast the mechanical properties of the rolls]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 1, pp. 19–40. (in Russian).
9. 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.
10. Bol'shakov Vad.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnytstva masyvnoho metalevoho lyttya* [System analysis techniques of producing solid metal castings]. *Visnyk Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2015, no. 9, pp. 69–73. (in Ukrainian).
11. 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.
12. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. Fractals and properties of materials. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p. (in English).
13. Volchuk V.M. *Model' otsinyuvannya tverdosti chavunnykh valkov CIIKH-43 ta CIIKHΦ-47* [Model of assessment of the hardness of the iron rollers CIIKH-43 and CIIKHΦ-47]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian)
14. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Parhomenko O.F. Evaluation of High Strength Steel Fatigue. UDCS'19: Fourth International Iron and Steel Symposium, April 4–6, 2019, Karabuk University, Karabuk, Turkey, 2019, vol. 4, pp. 415–417.
15. 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).
16. Volchuk V. M. *Doslidzhennya vplyvu vuhletsyu na fraktal'nu rozmirnist' stali* [Study of the effect of carbon on the fractal dimension of steel]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, no. 3, pp. 31–39. (in Russian).
17. Kroviakov S., Volchuk V., Zavaloka M., and Kryzhanovskyi V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2019, vol. 968, pp. 20–25.
18. Volchuk V., Ivantsov S., Tiutieriev I. and Fortyhin A. Search for the Evaluation of 'strength-plasticity' Relation in Constructional Steel. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 864, pp. 211–216.
19. Kroviakov S., Volchuk V. and Zavaloka M. Fractal Model of the Influence of Expanded Clay Concrete Macrostructure on its Strength. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 864, pp. 43–52.
20. Volchuk V.M., Uzlov O.V., Puchikov O.V., Ivantsov S.V. and Tiutieriev I.A. Fractal model of structure-properties effect of low carbon steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021. T. 1100, no. 1, pp. 012034. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1100/1/012034/meta#references>
21. Volchuk V.M., Uzlov O.V., Puchikov O.V. and Ivantsov S.V. Fractals Theory Application for Evaluation of Influence of Non Metallic inclusions on Mechanical Properties of S355J2 Steel. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, vol. 1021, no. 1, pp. 012053. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1021/1/012053/meta>
22. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N., Deyneko L.N. and Dubrov Yu.I. *Kompozitsiya metoda planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov i ekspertnoy informatsii dlya formirovaniya sistemy prognoza kachestva materialov* [Composition of a method for planning extreme experiments and expert information for the formation of a material quality prediction system]. *Perspektivnyye zadachi inzhenernoy nauki* [Prospective Tasks of Engineering Science].

Edited by dr. sc. (tech.), prof. Bol'shakov V.I. Dnipropetrovsk : GAUDEAMUS, 2001, vol. 2. pp. 203–208. (in Russian).

23. Dubrov Yu.I., Volchuk V.N. and Bol'shakov V.I. *Primeneniye ekspertnoy informatsii pri formirovaniy aktivnogo eksperimenta v materialovedenii* [Application of expert information in the formation of an active experiment in materials science]. *Komp'yuternoe materialovedenie i obespechenie kachestva : mater. k 45-mu Mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizacii kompozitov* [The modeling and optimization in materials science : materials for the 45th International workshop on Modeling and Optimization of Composites]. Odessa : Astroprint Publ., 2001, pp. 25–26. (in Russian).

24. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Opredeleniye oblasti kompromissa kriteriyev kachestva chugunnykh valkov* [Scoping compromise quality criteria of cast iron rolls]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 11, pp. 4–7. (in Russian).

25. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K opredeleniyu klassa metalla* [To the definition of a class of metal]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 1, pp. 26–31. (in Russian).

26. Dubrov Yu.I., Volchuk V.N. and Bol'shakov V.I. *Primeneniye ekspertnoy informatsii pri formirovaniy aktivnogo eksperimenta v materialovedenii* [Application of expert information in the formation of an active experiment in materials science]. *Komp'yuternoe materialovedenie i obespechenie kachestva : mater. k 45-mu Mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizacii kompozitov* [The modeling and optimization in materials science : materials for the 45th International workshop on Modeling and Optimization of Composites]. Odessa : Astroprint Publ., 2001, pp. 25–26. (in Russian).

27. Kroviakov S., Zavoloka M., Dudnik L. and Kryzhanovskiy V. Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant portland cement and portland cement with pozzolana additive. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*. 2019, vol. 10, no. 19, pp. 81–86.

28. Lyashenko T., Voznesensky V. and Krovyakov S. Analysis of water effect on fracture toughness in cement-based composites using computational materials science methods. In : *International symposium on brittle matrix composites*. 2000, pp. 210–219.

29. Volchuk V.M. and Parhomenko O.F. *Fractal approach in assessing the quality of steel*. *Innovative Lifecycle Technologies of Housing, Industrial and Transportation Objects : collective monograph*. Under the general editorship Savytskyi M. Dnipro : SHEE “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”; Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2018, pp. 48–53.

30. Volchuk V.M. and Shtandenko M.S. *Matematychna model prohnozu yakosti metalu* [Mathematical model of the metal quality forecast]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 2, pp. 31–35. (in Ukrainian).

31. Volchuk V. and Tokosov S. *Sposib prohnozu mekhanichnykh vlastyvostry chavunnykh valkov* [Method of forecasting mechanical properties of cast-iron rolls]. *ScienceRise*. 2018, vol. 11, pp. 57–61. (in Ukrainian).

32. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Prognozirovaniye i upravleniye kachestvennyymi kharakteristikami prokatnykh valkov* [Prediction and control of quality characteristics rolls]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 9, pp. 9–14. (in Russian).

Надійшла до редакції: 03.03.2021