

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.250918.36.194

## РАНЖУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ МЕТАЛУ

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

ЖИВИЦЯ О. Р.<sup>2</sup>, *студ.*

<sup>1</sup>Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

<sup>2</sup>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: Lelja200397@rambler.ru

**Анотація. Постановка проблеми.** Зв'язок між складом матеріалів, їх структурою та властивостями - одне з головних питань матеріалознавства. Вибір методик ідентифікації властивостей матеріалів визначається конкретними завданнями та інструментарієм. Для дослідження впливу хімічного складу матеріалів на механічні властивості у статті запропоновано методику ранжування елементів хімічного складу металу. **Матеріали та методика.** Ранжування елементів хімічного складу металу за їх впливом на критерії його якості проводилося на основі оцінки величини коефіцієнтів рівняння регресії, що описує їх залежність. **Результати експерименту.** Встановлено, що найбільше впливають на міцність сталі Стбпс вуглець (9,250), марганець (5,000) та хром (5,000). Для зменшення похибки у ранжуванні елементів хімічного складу враховувався їх фізико-хімічний вплив на показники міцності ( $\sigma_T$ ). Отримана математична модель адекватна згідно з критеріями Фішера ( $F = 1,580$ ) та Кочрена ( $F = 0,380$ ). **Висновки.** Проведено ранжування елементів хімічного складу сталі Стбпс відносно їх впливу на показники міцності. Такий підхід дозволяє регулювати показники міцності металопрокату в процесі його виробництва шляхом коригування вмісту елементів хімічного складу.

**Ключові слова:** ранжування; метал; хімічний склад; математична модель; твердість

## РАНЖИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕТАЛЛА

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

ЖИВИЦА Е. Р.<sup>2</sup>, *студ.*

<sup>1</sup>Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

<sup>2</sup>Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: Lelja200397@rambler.ru

**Аннотация. Постановка проблемы.** Связь между составом материалов, их структурой и свойствами является одним из главных вопросов материаловедения. Выбор методик идентификации свойств определяется конкретными задачами и инструментарием. Для исследования влияния химического состава материалов на механические свойства в работе предложена методика ранжирования элементов химического состава металла. **Материалы и методика.** Ранжирование элементов химического состава металла по их влиянию на критерии его качества проводилось на основе оценки величины коэффициентов уравнения регрессии, описывающего их зависимость. **Результаты эксперимента.** Установлено, что больше всего влияют на прочность стали Стбпс углерод (9,250), марганец (5,000) и хром (5,000). Для уменьшения погрешности при ранжировании элементов химического состава учитывалось их физико-химическое влияние на показатели прочности ( $\sigma_T$ ). Полученная математическая модель адекватна согласно критериям Фишера ( $F = 1,580$ ) и Кочрена ( $F = 0,380$ ). **Выводы.** Проведено ранжирование элементов химического состава стали Стбпс по отношению к их влиянию на показатели прочности. Такой подход позволяет регулировать показатели прочности металлопроката в процессе его производства путем корректировки содержания элементов химического состава.

**Ключевые слова:** ранжирование; металл; химический состав; математическая модель; твердость

## RANKING OF ELEMENTS OF CHEMICAL COMPOSITION OF METAL

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

ZHIVITSIA O. R.<sup>2</sup>, *student*

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

<sup>2</sup>Department of Materials Science, State Higher Educational Establishment «Pridneprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernishevskogo str., 24-a, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: Lelja200397@rambler.ru

**Abstract. Introduction.** The relationship between the composition of materials, their structure and properties is one of the main issues of materials science. The choice of methods for identifying properties is determined by specific tasks and tools. To study the influence of the chemical composition of materials on the mechanical properties, a method of ranking the elements of the chemical composition of the metal was proposed. **Materials and methods.** The ranking of the elements of the chemical composition of the metal according to their influence on the criteria of its quality was carried out on the basis of an assessment of the magnitude of the coefficients of the regression equation describing their dependence. **Results of the experiment.** It has been established that carbon (9,250), manganese (5,000) and chromium (5,000) have the greatest influence on the strength of St6ps steel. To reduce the error in the ranking of the elements of chemical composition, their physico-chemical effect on strength indicators ( $\sigma_T$ ) was taken into account. The resulting mathematical model is adequate according to the criteria of Fisher ( $F = 1,580$ ) and Kochren ( $F = 0,380$ ). **Conclusions.** The ranking of the elements of the chemical composition of St6ps steel in relation to their effect on strength indicators was carried out. This approach allows you to adjust the strength of the metal during its production by adjusting the content of elements of chemical composition.

**Keywords:** ranking; metal; chemical composition; mathematical model; hardness

**Вступ.** Для встановлення зв'язку між складом, структурою та властивостями матеріалів застосовуються різні фізичні методи: прямі іспити на об'єктах дослідження; структурний та фазовий аналізи із застосуванням оптичних та рентгенівських методів, різноманітні види моделювання тощо [1-6]. Для дослідження впливу параметрів технології на властивості матеріалів у деяких випадках проводять їх ранжування.

Ранжування тих чи інших параметрів здійснюється, здебільшого, для встановлення зв'язків між досліджуваними величинами. Критерії ранжування механічних, службових та інших властивостей, хімічного, мінерального та фазового складу, елементів структури на різних масштабних

рівнях для різних матеріалів вибираються залежно від поставленої мети. Найчастіше ці критерії можуть формуватися залежно від потреб замовника, числових показників коефіцієнтів рівнянь, аналізу області самоподібності параметрів технології та багатьох інших вимог [7-12].

У статті розглянуто методику ранжування елементів хімічного складу металу залежно від їх впливу на міцність сталі Ст6пс. Вибір цієї марки сталі зумовлений тим, що з неї виготовляються сортовий та фасонний прокат: листи, штаби, стрічки, а також труби.

**Матеріали та методика.** Сталь Ст6пс досліджувалася в стані заводської поставки. Хімічний склад сталі Ст6пс наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Зміст елементів хімічного складу сталі Ст6пс, % (ГОСТ 380-2005)

Вміст у % відповідно до маси	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
Ст6пс	0,38 – 0,49	0,05 – 0,15	0,50 – 0,80	до 0,3	до 0,05	до 0,04	до 0,3	до 0,008	до 0,3	до 0,08

Межа текучості  $\sigma_T$  змінювалася в інтервалі 295...315 МПа згідно з нормативними документами. Досліджувалася сталь із феритно-перлітною

структурою, що найчастіше зустрічається в стані заводської поставки (рис. 1).

Структура, наведена на рисунку 1, складається з феритної сітки по границях зерен та пластинчатого перліту.

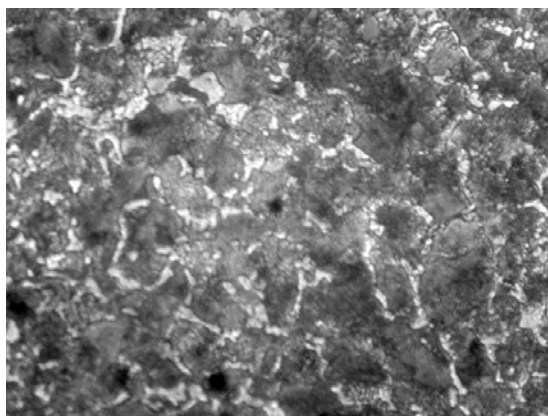


Рис. 1. Феритно-перлітна структура сталі Стбпс,  $\times 800$

**Результати експерименту.** В роботі застосовувався статистичний підхід планування експериментів, коли одночасно змінюються багато факторів, що досліджуються. Такий підхід дозволяє досліджувати динаміку зміни функції мети. Матриця планування експериментів на 16 стовпців реалізовувалася з експериментальними показниками функції мети  $Y_{\text{екс}}$  та оцінками її прогнозу  $Y_{\text{роз}}$  (див. табл. 2), де ЗР – загальний рівень значень аргументів ( $X_1 \dots X_{10}$ ); НР – нижній рівень; ВР – верхній рівень та ІВ – інтервал варіювання аргументів. Аргументами функції (межі текучості) виступали вуглець ( $X_1$ ), кремній ( $X_2$ ), марганець ( $X_3$ ), нікель ( $X_4$ ), сірка ( $X_5$ ), фосфор ( $X_6$ ), хром ( $X_7$ ), азот ( $X_8$ ), мідь ( $X_9$ ) та миш'як ( $X_{10}$ ).

У ході пасивного експерименту отримано математичну модель прогнозу межі текучості сталі Стбпс:

$$Y_{\text{роз}} = 244,928 + 102,273 \cdot X_1 + 94,091 \cdot X_2 + 16,667 \cdot X_3 + 4,167 \cdot X_4 - 50,000 \cdot X_5 - 12,500 \cdot X_6 + 16,667 \cdot X_7 + 312,500 \cdot X_8 + 5,833 \cdot X_9 + 6,250 \cdot X_{10} - 181,818 \cdot X_1 \cdot X_2.$$

Коефіцієнт парної кореляції становив  $R^2 = 0,91$ .

Ранжування елементів хімічного складу сталі Стбпс проводилося на основі аналізу оцінки їх впливу на досліджувану характеристику міцності (див. рис. 2). На гістограмі рисунка наведено 2 числові значення «ваги» впливу кожного з елементів хімічного складу на межу текучості, отримані шляхом нормування коефіцієнтів рівняння регресії.

Аналіз наведеного вище рівняння регресії підтверджує той факт, що найсильніший зв'язок спостерігається між функцією мети (показником межі текучості  $Y$ ) та аргументами  $x_1$  (вуглець),  $x_3$  (марганець) і  $x_7$  (хром). Сірка ( $X_5$ ) та фосфор ( $X_6$ ), як шкідливі домішки, знижують міцність, оскільки за їх вмісту понад 0,045 % сталь за підвищених температур робиться червоноламкою та холодноламкою відповідно. Зв'язок підтверджується відносно високим коефіцієнтом кореляції ( $R^2 = 0,91$ ), що обґрунтовується фізико-хімічною інтерпретацією впливу складу металу на його властивості. Вуглець, що міститься в сталі зазвичай у вигляді хімічної сполуки  $\text{Fe}_3\text{C}$  (карбід заліза), зі збільшенням його вмісту до 1,2 % підвищує твердість, міцність і пружність сталі та зменшує в'язкість і здатність її до зварюваності.

У свою чергу, марганець, що міститься в звичайній вуглецевій сталі в межах від 0,3 до 0,8 %, зменшує шкідливий вплив кисню та сірки, підвищує твердість і міцність сталі, її різальні властивості, але при цьому знижує здатність опору металу до динамічних навантажень, зокрема, до ударних. Хром підвищує міцність, загартованість і жаростійкість, різальні та трибологічні властивості, але знижує в'язкість і теплопровідність металу [1].

Незначний вплив інших елементів: Si (коефіцієнт впливу згідно з розрахунками становить 1,500), Ni (1,250), Cu (1,750) та As (0,500) на міцність сталі Стбпс компенсується частково дією більш «вагомих» елементів хімічного складу, наприклад, С (9,250). Крім того, ці елементи за своїм призначенням можуть більше впливати на інші службові характеристики. Так, Si і Mn вводяться у сталь як активні розкислювачі і не чинять більш помітного впливу на властивості [1].

Для перевірки на працездатність та адекватність отриману математичну модель оцінювали за критеріями Фішера та Кочрена. Згідно з критерієм Фішера модель адекватна:

$$F_{\text{спостережень}} = 1,580; F_{\text{критич}} = 2,400.$$

Згідно з критерієм Кочрена модель також адекватна:

$$F_{\text{спостережень}} = 0,380; F_{\text{критич}} = 0,547.$$

Таблиця 2

Матриця планування експериментів для сталі Стбс

ЗР		0,44	0,10	0,65	0,15	0,04	0,03	0,15	0,004	0,15	0,04	Межа текучості $\sigma_T$ , МПа	
ІВ		0,05	0,05	0,15	0,15	0,01	0,01	0,15	0,004	0,15	0,04		
ВР		0,49	0,15	0,80	0,30	0,05	0,04	0,30	0,008	0,30	0,08		
НР		0,38	0,05	0,50	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00		
№	$X_0$	$X_1$ (C)	$X_2$ (Si)	$X_3$ (Mn)	$X_4$ (Ni)	$X_5$ (S)	$X_6$ (P)	$X_7$ (Cr)	$X_8$ (N)	$X_9$ (Cu)	$X_{10}$ (As)	$Y_{\text{екс}}$	$Y_{\text{роз}}$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	31 5	31 8
2	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	31 0	31 3
3	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	31 2	30 7
4	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	30 5	30 2
5	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	31 3	31 6
6	+	+	-	+	-	-	-	-	+	-	+	31 4	31 5
7	+	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	30 7	30 5
8	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	30 6	30 5
9	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	30 4	30 9
10	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	-	30 3	30 6
11	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	30 2	29 9
12	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	30 0	29 7
13	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	30 2	30 2
14	+	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	30 4	30 5
15	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	29 5	29 3
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	29 8	29 6

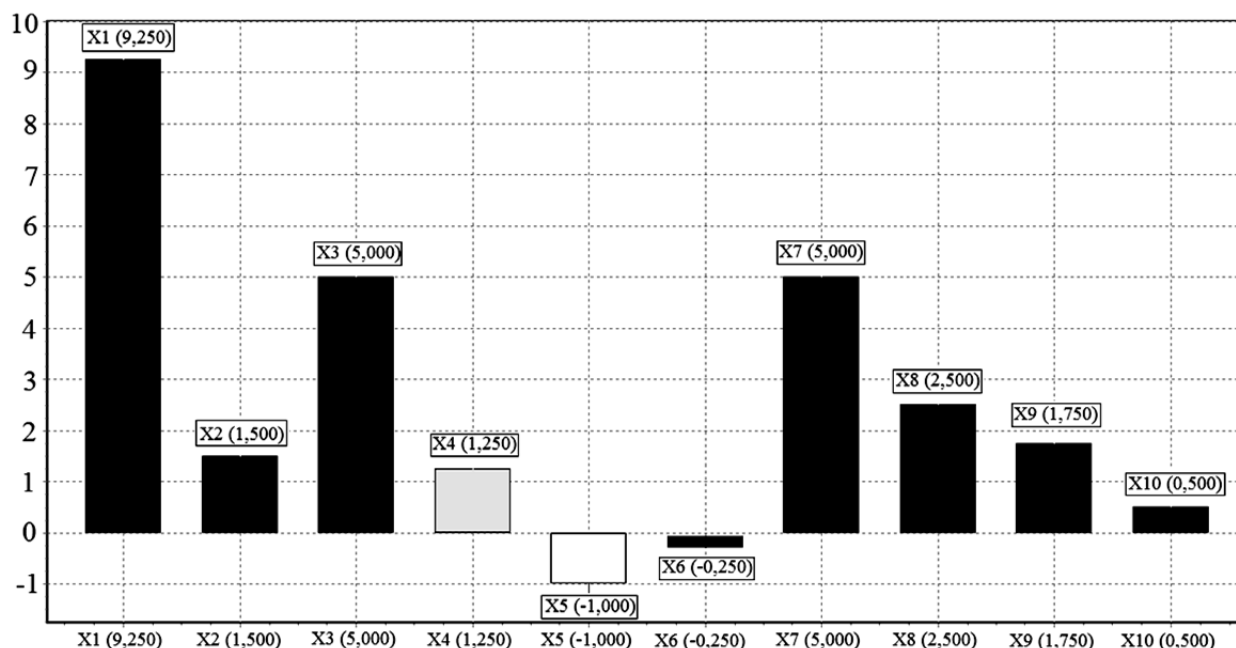


Рис. 2. Гістограма впливу змінних на функцію мети (межу текучості)

**Висновки.** Ранжування показників хімічного складу сталі Ст6пс проведено на основі аналізу їх фізико-хімічного впливу на показники межі текучості залежно від величини коефіцієнтів отриманої матема-

тичної моделі. Такий підхід дозволяє регулювати, за необхідності, показники міцності металу в процесі його виробництва шляхом коригування вмісту елементів хімічного складу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Большаков В. И. Субструктурное упрочнение конструкционных сталей / В. И. Большаков. – Изд. 2 е, доп. и перераб. – Канада, Торонто : Базилиан Пресс, 1998. – 316 с.
2. Большаков В. И. Влияние структуры аустенита и продуктов его распада на квазихрупкое разрушение высокопрочного толстолистового проката для строительства / В. И. Большаков, Д. В. Лаухин, С. В. Иванцов // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднпр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2016. – Вып. 89 : Серия : Стародубовские чтения. – С. 30–36.
3. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures / A. Mishutin, S. Kroviakov, O. Pishev, B. Soldo // Tehnički glasnik. – 2017. – Vol. 11, № 3. – P. 121–124. – Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/186657>. – Перевірено 1.11.2017.
4. 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. – P. 93–97. – Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/202359>. – Перевірено 1.11.2017.
5. Журавель І. М. Вимірювання усередненого розміру зерен металу з використанням фрактальної розмірності / І. М. Журавель, Л. М. Свірська // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – Т. 46. – № 3. – С. 126–12. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/135345>. – Перевірено 1.11.2017.
6. Uzlov O. Investigation of Acicular Ferrite Structure in HSLA Steel / O. Uzlov, V. Bolshakov // Proceedings of the "Materials Week 2002". Frankfurt, Germany : Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2002.
7. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // Металлофизика и новейшие технологии. – 2017. – Т. 39. – Вып 7. – С. 949–957. – Режим доступу: <http://mfint.imp.kiev.ua/abstract/v39/i07/0949.html>. – Проверено: 26.10.2018.
8. Большаков В. И. Основы организации фрактального моделирования : монография / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров. – Киев : Академперіодика, 2017. – 170 с.
9. Дубров Ю. Пути индентификации периодических многокритериальных технологий : монография / Ю. Дубров, В. Большаков, В. Волчук. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 236 с. – Режим доступу: <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>. – Перевірено 1.11.2017.

10. 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.
11. Волчук В. Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства / В. Н. Волчук // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури* : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2014. – № 5. – С. 12–18. – Режим доступу: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>. – Перевірено 1.11.2017.
12. Большаков В. И. Способ определения области компромисса критериев качества многокритериальных технологий / В. И. Большаков, А. А. Фортигин // *Металлознавство та термічна обробка металів*. – 2016. – № 2. – С. 40–46.

## REFERENCES

1. Bol'shakov V.I. *Substrukturnoye uprochneniye konstruksionnykh staley* [Substructural strengthening of structural steels]. Ed. 2, Kanada, Toronto: Bazilian Press, 1998, 316 p. (in Russian).
2. Bol'shakov V.I., Lauhin D.V. and Ivantsov S.V. *Vliyaniye struktury austenita i produktov ego raspada na kvazikhрупкое razrusheniye vysokoprochnogo tolstolistovogo prokata dlya stroitel'stva* [Influence of austenite structure and its decay products on the quasi-brittle fracture of high strength plate for building construction]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashynostroeniye* [Building, materials science, mechanical engineering]. *Pridnepr. gos. akad. stroitel'stva i arhitektury* [Pridneprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipropetrovsk, 2016, no. 89, pp. 30–36. (in Russian).
3. Mishutin A., Kroviakov S., Pishev O. and Soldo B. *Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures*. Technical Journal. 2017, vol. 11, no. 3, pp. 121–124. Available at: <https://hrcak.srce.hr/186657>
4. 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.
5. Zhuravel I.M. and Svirskaya L.M. *Vymiryuvannya userdnenogo rozmiru zeren metaly z vykorystanniam fraktaloi rozmirnosti* [Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions]. *Fizyko – khimichna mekhanika materialiv* [Materials Science]. 2010, vol. 46, no 3, pp. 418–420. (in Ukrainian).
6. Uzlov O., and Bolchakov V. *Investigation of Acicular Ferrite Structure in HSLA Steel*. Proceedings of the „Material Week 2002“. Werkstoffwoche-Partnerschaft GbR, Publisher: Werkstoff-Informationsgesellschaft, Frankfurt, 2002.
7. Volchuk V.M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovanii kriteriyev kachestva mnogoparametricheskikh tekhnologiy* [Concerning 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. Available at: <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>. (in Russian).
8. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Osnovy organizatsii fraktal'nogo modelirovaniya* [Fundamentals of fractal modeling]. Kiev: Akadempriodika, 2017, 170 p. (in Russian).
9. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Ways of periodic identification of multi-criteria technology]. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing. 2015, 236 p. Available at: <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>. (in Russian).
10. 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]. *Metalloznaustvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no. 4. pp. 5–11. (in Russian).
11. 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's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).
12. Bolshakov V.I. and Fortigin A.A. *Sposob opredeleniya oblasti kompromissa kriteriyev kachestva mnogokriterial'nykh tekhnologi* [The field determining method of the quality criteria compromise of multicriteria technology]. *Metalloznaustvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 2, pp. 40–46. (in Russian).

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

Надійшла до редколегії: 16.03.2018 р.