

УДК 669.18:519.21

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261218.77.451

ЗОНА КОМПРОМІСУ КРИТЕРІЇВ ЯКОСТІ СТАЛІ СТ6

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, fortigin13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

Анотація. Постановка проблеми. Коригування технологічного процесу випуску металопрокату потребує матеріально-часових витрат. У статті для поліпшення показників механічних властивостей сталей широкого призначення запропоновано застосувати методику визначення області компромісу властивостей металу. Ця методика базується на пошуку необхідного поєднання показників міцності та пластичності сталі. Об'єктом дослідження виступає процес оцінювання критеріїв якості сталі Ст6. Матеріалом для дослідження обрано сталь Ст6 у стані заводської поставки, що має феритно-перлітну структуру. Механічні властивості та хімічний склад досліджувалися у всій робочій області параметрів сталі. **Результати та їх обговорення.** Побудовано область компромісу механічних властивостей (σ_B , σ_T , HB та δ) залежно від показників їх хімічного складу (C, Si, Mn, Ni, S, P, Cr). Визначено співвідношення з найкращим поєднанням показників міцності та пластичності шляхом співставлення робочих областей заданих параметрів. **Висновки.** Для сталі Ст6 із використанням математичного моделювання розроблено методику визначення області компромісу механічних властивостей залежно від хімічного складу. Запропонована методика дозволяє з мінімальними часовими та матеріальними витратами прогнозувати критерії якості досліджуваної сталі в процесі її випуску.

Ключові слова: область компромісу; механічні властивості; хімічний склад; математичне моделювання; структура

ЗОНА КОМПРОМИССА КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА СТАЛИ СТ6

ФОРТЫГИН А. А., *аспир.*

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. Корректировка технологического процесса выпуска металлопроката требует материально-временных затрат. В работе для улучшения показателей механических свойств сталей широкого назначения предложено применить методику определения области компромисса свойств металла. Эта методика базируется на поиске необходимого сочетания показателей прочности и пластичности стали. Объектом исследования выступает процесс оценки критериев качества стали Ст6. Материалом для исследования выбрана сталь Ст6 в состоянии заводской поставки, которая имеет ферритно-перлитную структуру. Механические свойства и химический состав исследовались во всей рабочей области параметров стали. **Результаты и их обсуждение.** Построена область компромисса механических свойств (σ_B , σ_T , HB та δ) в зависимости от показателей их химического состава (C, Si, Mn, Ni, S, P, Cr). Определены соотношения с лучшим сочетанием показателей прочности и пластичности путем сопоставления рабочих областей заданных параметров. **Выводы.** Для стали Ст6 с использованием математического моделирования разработана методика определения области компромисса механических свойств в зависимости от химического состава. Предложенная методика позволяет с минимальными временными и материальными затратами прогнозировать критерии качества исследуемой стали в процессе ее выпуска.

Ключевые слова: область компромисса; механические свойства; химический состав; математическое моделирование; структура

ZONE OF COMPROMISE QUALITY CRITERIA OF ST6 STEEL

FORTIHIN A. A., *Postgraduate student*

Department of Materials Science, State Higher Educational Establishment «Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a Chernishevskogo st., Dnipro 49600, Ukraine, phone +38 (0562) 47-39-56, e-mail: fortigin13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

Abstract. Problem formulation Correction of the technological process of metal rolling is a task that requires material and time costs. In work to improve the indicators of mechanical properties of wide-use steels it is proposed to apply a method for determining the compromise region of the properties of the metal. This technique is based on finding the necessary combination of strength and plasticity indexes of steel. **Object of study.** The object of the research is the process of assessing the quality criteria of steel ST6. **Materials and methods.** Materials for research are selected steel ST6 in the state of factory delivery, which has a ferrite-perlite structure. Mechanical properties and chemical composition were studied in the whole working area of steel parameters. **Results.** An area of compromise between mechanical properties (σ_B , σ_T , HB and δ) has been constructed, depending on their chemical composition (C, Si, Mn, Ni, S, P, Cr). The relationships with the best combination of strength and plasticity are determined by comparing the working

areas of the given parameters. **Conclusions.** For steel ST6, using mathematical modeling, a method for determining the compromise area of mechanical properties, depending on the chemical composition, has been developed. The proposed method allows to predict the quality criteria of the investigated steel in the process of its release with minimum time and material costs.

Keywords: compromise area; mechanical properties; chemical composition; mathematical modeling; structure

Постановка проблеми. Процес виготовлення металопрокату пов'язаний зі значними матеріально-часовими витратами. Якість готової продукції можна визначати, зазвичай, після завершення технологічного циклу. Тому вже в процесі виробництва намагаються формувати критерії якості металу шляхом регулювання керованих змінних у межах їх робочої області, що обмежена штатною технологією [1; 2]. До таких змінних відносять елементи хімічного складу, температурні режими обробки виробів та інші характеристики. Але результати прогнозу властивостей металопрокату із застосуванням різних методик не завжди збігаються з результатами натурних іспитів. Причиною цьому служать багатопараметричність та багатокритеріальність технології виробництва металопрокату [3-5], де підвищення одних показників якості спричинює погіршення інших.

Для пошуку завдання вибору субоптимального співвідношення властивостей металу застосовують системний підхід [6; 7], включаючи імітаційне моделювання [8], методики планування експериментів [9; 10],

теоретико-інформаційний підхід [11], регресійний аналіз [12] та ін. Для прогнозу механічних характеристик металів застосовують також фрактальне моделювання [13-16]. У працях [17; 18] розкрито методику визначення області компромісу критеріїв якості багатопараметричних технологій. Під областю компромісу слід розуміти область із субоптимальним поєднанням критеріїв, тобто область, де вони мінімально суперечать одне одному (наприклад, підвищення твердості зумовлює зниження показників пластичності).

У статті запропоновано для визначення необхідного поєднання показників міцності та пластичності досліджуваної марки сталі визначати область їх компромісу.

Об'єктом дослідження виступає процес оцінювання критеріїв якості сталі Стбсп залежно від впливу елементів її хімічного складу в робочій області параметрів (ГОСТ 380-2005 та ГОСТ 535-2005).

Матеріали та методика. В якості матеріалу для дослідження обрано сталь Стбсп, хімічний склад якої наведено в таблиці згідно з ГОСТ 380-2005.

Таблиця

Вміст елементів хімічного складу сталі Стбсп

Хімічний склад	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
Вміст, %	0,38 – 0,49	0,15 – 0,30	0,50 – 0,80	до 0,3	до 0,05	до 0,04	до 0,30	до 0,30	до 0,08

Структура сталі Стбсп у стані заводської поставки складалася з фериту та перліту (див. рис. 1). Для дослідження структури шліфи полірувались та травились у 4 % розчині азотної кислоти в спирті. В результаті кількісного аналізу структури встановлено, що кількість перліту в сталі перебувала межах 50...60 %, інша частка припадала на вміст фериту.

Робоча область критеріїв якості сталі Стбсп перебувала в таких межах: межа міцності $\sigma_B = 570...610$ МПа; межа плинності $\sigma_T = 295...315$ МПа; твердість

НВ = 175...217; відносне видовження $\delta = 12...15$ %.

Результати. Для визначення області компромісу механічних властивостей сталі Стбсп визначалися окремо робочі області показників якості та елементів хімічного складу (див., наприклад, рис. 2). Відомо, що збільшення показників міцності викликає зниження показників пластичності. Тому при співставленні графіків робочих областей обраних критеріїв якості отримана область їх компромісу (область, де критерії якості мінімально вступають у протиріччя одне з одним) (рис. 3).

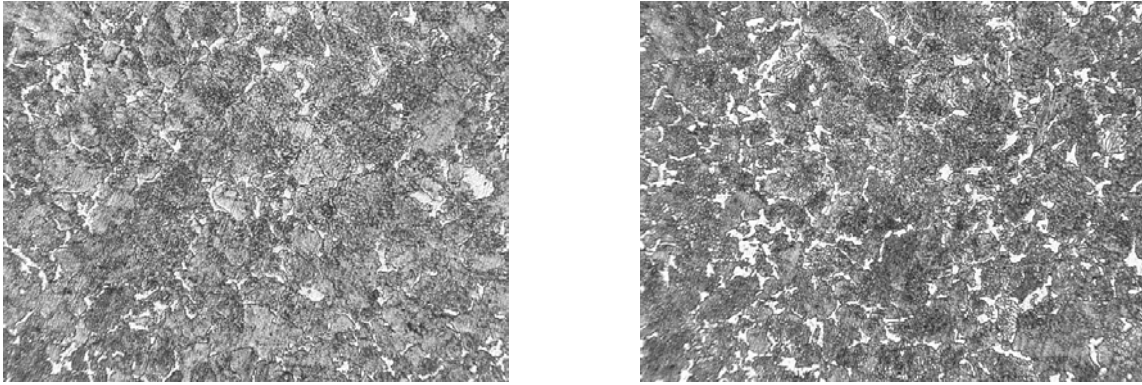


Рис. 1. Структура сталі Стбсп, $\times 400$

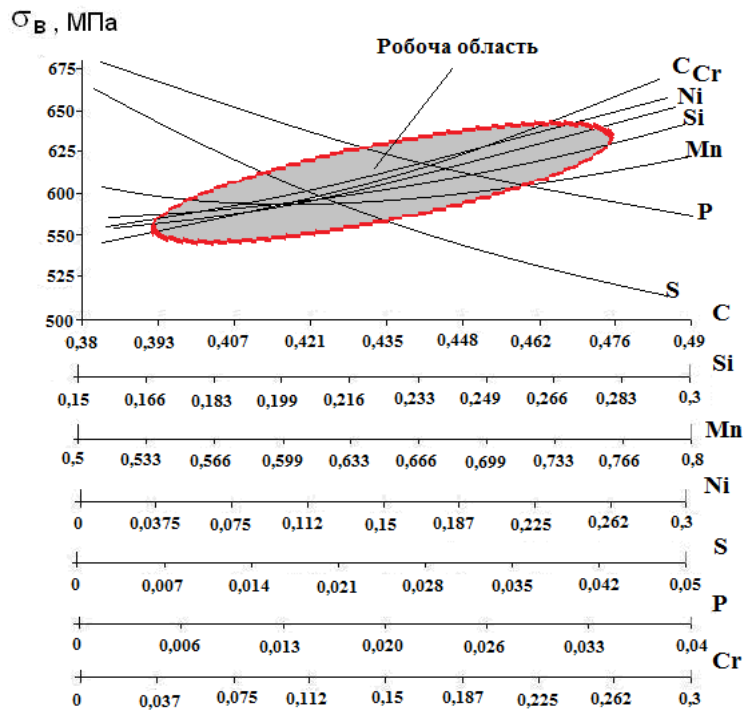


Рис. 2. Робоча область показників межі міцності

За змінні обрано елементи хімічного складу, а як критерії – такі механічні властивості: межа міцності на розрив, межа плинності, твердість, відносне видовження. За критерії обиралися одні з основних механічних властивостей сталі, що визначають якість металу та його придатність до експлуатації. Для побудови області компромісу обрано ті елементи хімічного складу, що найбільше впливають на механічні характеристики. Область компромісу властивостей визначена графо-аналітичним методом, що полягає в нормованому поданні змінних, наведених у відсотках.

Аналіз робочої області механічних властивостей та хімічного складу досліджуваної сталі (рис. 3) свідчить про

зростання показників міцності (σ_B , σ_T) та твердості (НВ) завдяки збільшенню вмісту вуглецю і кремнію, а також нікелю та хрому. Збільшення пластичних характеристик металу (δ_5) пов'язане зі збільшенням вмісту хрому з 0,040 до 0,30 % та нікелю з 0,038 до 0,30 %.

Область компромісу можна застосовувати для вибору властивостей міцності та пластичності залежно від вимог замовника на комплекс механічних властивостей металопрокату зі сталі Стбсп. Такий підхід можливо реалізувати шляхом зміни кількісних показників обраних параметрів технології (елементів хімічного складу).

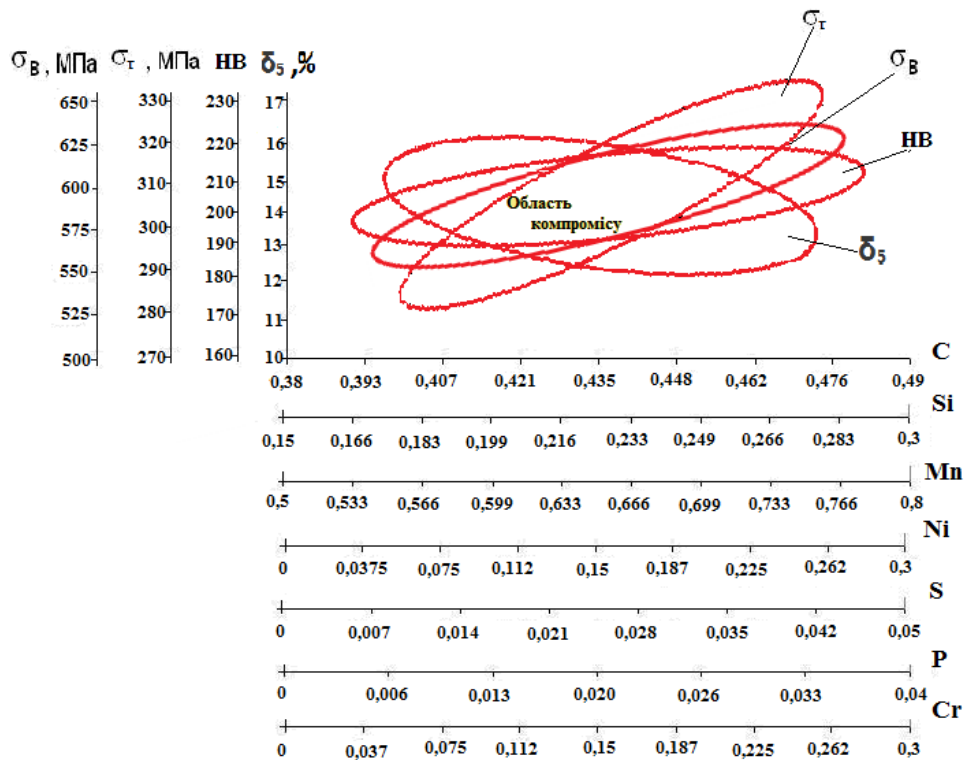


Рис. 3. Область компромісу механічних властивостей сталі Ст6сп

Висновки. Визначено область компромісу зі найбільш ефективним поєднанням механічних властивостей (σ_B , σ_T , HB та δ_5) прокату зі сталі Ст6сп згідно з ГОСТ 535-2005 по встановлених межах вмісту компонентів хімічного складу. Область компромісу критеріїв якості визначена на основі да-

них пасивного експерименту. Реалізація цього методу дозволяє встановлювати пріоритет на комплекс механічних властивостей прокату досліджуваної марки сталі, прогнозувати зміни технологічного процесу шляхом коригування його хімічного складу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сильман Г. И. Термодинамика и термокинетика структурообразования в чугунах и сталях / Г. И. Сильман. – Москва : Машиностроение, 2007. – 302 с.
2. 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/16-22/119658>. – Проверено 25.04.2019.
3. Дубров Ю. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий на примере технологии производства прокатных валков / Юрий Дубров, Владимир Большаков, Владимир Волчук. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 244 с. – Режим доступа: <https://www.palmarium-publishing.ru/#>. – Проверено: 24.04.2019.
4. 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.
5. Большаков В. И. Этапы ідентифікації багатопараметричних технологій та шляхи їх реалізації / В. И. Большаков, В. М. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник Національної академії наук України. – 2013. – № 8. – С. 66–72. – Режим доступа : <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/67873>. – Перевірено: 05.04.2019.
6. Системний аналіз технології виробництва масивного металевого лиття / Вад. І. Большаков, В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // Вісник Національної академії наук України. – 2015. – № 9. – С. 69–73. – Режим доступа: http://www.visnyk-nanu.org.ua/archive/2015_9. – Перевірено: 05.04.2019.
7. Большаков В. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді Національної академії наук України. – 2014. – № 11. – С. 77–81. – Режим доступа : http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2014_11_15. – Проверено: 24.04.2019.

8. 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 доступу: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/26-31>. – Проверено: 24.04.2019.
9. Kroviakov S. Management of the Properties of Shipbuilding Expanded Clay Lightweight Concrete / S. Kroviakov, A. Mishutin, O. Pishev // *International Journal of Engineering & Technology*. – 2018. – Vol. 7 – № 3.2. – P. 245–249. – Режим доступу: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/14412/5842>. – Проверено: 05.04.2019.
10. Волчук В. М. Ранжування елементів хімічного складу металу / В. М. Волчук, О. Р. Живиця // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. – 2018. – № 3. – С. 36–41. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250918.36.194>. – Перевірено: 05.04.2019
11. 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* : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2014. – № 8. – С. 4–9. – Режим доступу: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/41345/37760>. – Проверено 05.04.2019.
12. 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 25.04.2019.
13. Bolshakov V. Fractals and properties of materials : monographies / V. Bolshakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 148 p. – Режим доступу: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>. – Перевірено: 25.04.2019.
14. Большаков В. И. Основы организации фрактального моделирования : монография / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров. – Киев : Академперіодика, 2017. – 170 с.
15. Bolshakov V. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy / V. I. Bolshakov, V. M. Volchuk, Yu. I. Dubrov // *Металлофізика и новейшие технологии = Metallofizika i noveishie tekhnologi*. – 2018. – Vol. 40, iss. 9. – P. 1165–1171. – Режим доступу: <https://DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165>. – Проверено 05.04.2019.
16. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // *Металлофізика новейшие технологии*. – 2017. – Т. 39. – № 3. – С. 949–957. – Режим доступу: <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>. – Проверено 25.04.2019.
17. Большаков В. И. Способ определения области компромисса критериев качества многокритериальных технологий / В. И. Большаков, А. А. Фортыгин // *Металлознавство та термічна обробка металів*. – 2016. – № 2. – С. 40–46. – Режим доступу: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/40-46/66434>. – Проверено 25.04.2019.
18. Волчук В. Н. К определению области компромисса характеристик качества материалов / В. Н. Волчук // *Металлознавство та термічна обробка металів*. – 2015. – № 3. – С. 21–25. – Режим доступу: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30/54119>. – Проверено 25.04.2019.

REFERENCES

1. Sil'man G.I. *Termodinamika i termokinetika strukturoobrazovaniya v chugunakh i stalyakh* [Thermodynamics and thermokinetics of structure formation in iron and steel]. Moskva: Mashinostroyeniye, 2007, 302 p. (in Russian).
2. Bolshakov V. I. and Fortigin A. A. *Poisk putey prognoza kachestva metalla* [The method of the metal quality prediction]. *Metalloznnavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 4, pp. 16–22. Available at: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/16-22>. (in Russian).
3. 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).
4. 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]. *Metalloznnavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013. № 4. pp. 5-11. (in Russian).
5. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Etapy identyfikatsiyi bahatoparametrychnykh tekhnologiy ta shlyakhyy 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. Bol'shakov Vad.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnologiyi vyrobnystva 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).

7. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O prognozirovanii 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).
8. 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).
9. Kroviakov S., Mishutin A. and Pishev O. Management of the Properties of Shipbuilding Expanded Clay Lightweight Concrete. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, [S.1.], vol. 7, no. 3.2, pp. 245–249.
10. Volchuk V.M. and Zhivitsa O.R. *Ranzhuvannya elementiv khimichnoho skladu metalu* [Ranking of elements of chemical composition of metal]. *Visnyk Prydniprovs'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 3, pp. 36–41. (in Ukrainian).
11. 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 Prydniprovs'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 8, pp. 4–9. (in Russian).
12. 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.
13. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
14. 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).
15. 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.
16. 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).
17. 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]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016. no. 2. pp. 40–46. (in Russian).
18. 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).

Рецензент: Волчук В. М., д-р техн. наук, доц.

Надійшла до редколегії: 14.12.2018 р.