

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.94.1078

ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ЗАЛЕЖНО ВІД ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ В СПЛАВІ 40КХНМ

ПОПОВА К. В., *бакалавр*

Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 409-89-05, e-mail: 21447.popova@365.pdaba.edu.ua

Анотація. Вступ. Дослідження присвячене аналізу впливу хімічного складу сплаву 40КХНМ на його твердість. Механічні іспити вимагають значних матеріально-часових витрат. Для оперативного оцінення критеріїв якості металів у роботі запропоновано застосувати математичне моделювання. **Матеріали та методика.** Досліджено вплив хімічного складу на твердість у сплаві 40КХНМ, який відповідає вимогам державного стандарту 51397. **Результати експерименту.** У ході досліджень виявлено, що зміни хімічного складу сплаву 40КХНМ значно впливають на його механічні властивості, включаючи твердість і стійкість до ударних навантажень. Збільшення вмісту вуглецю, молібдену та хрому у сплаві сприяє підвищенню його твердості. Це з формуванням більш міцних карбідних і молібденових фаз у структурі сплаву, що поліпшує його механічні властивості. Підвищена твердість робить сплав більш стійким до зношування та підвищує його довговічність в умовах експлуатації. Збільшення вмісту нікелю у сплаві посилює його стійкість до ударних навантажень. Це зумовлено збільшенням пластичності та ударної в'язкості сплаву за підвищеного вмісту нікелю. Більш висока стійкість до ударних навантажень робить сплав придатним для застосування в умовах, що вимагають високої стійкості до ударів, наприклад, у виробництві частин машин і обладнання. Побудовано математичну модель залежності міцності сплаву від процентного вмісту компонентів хімічного складу, що дозволяє керувати показниками міцності сплаву в процесі його виготовлення. **Висновки.** Результати досліджень підтверджують, що зміни у хімічному складі сплаву 40КХНМ суттєво впливають на його механічні властивості. В результаті проведених експериментів встановлено, що хімічний склад металу значно впливає на твердість матеріалу. Шляхом зміни складу металу вдалося досягти значного підвищення твердості до рівнів, що відповідають вимогам стандартів якості. Ці результати – важливий крок до оптимізації процесів виробництва та поліпшенню властивостей кінцевої продукції зі сплаву 40КХНМ.

Ключові слова: сплав 40КХНМ; хімічний склад; твердість; пластичність; ударна в'язкість

PREDICTION OF STRENGTH DEPENDING ON THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION IN THE 40KXHM ALLOY

POPOVA K.V., *bachelor*

Department of Materials Science and Treatment of Materials, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 409-89-05, e-mail: 21447.popova@365.pdaba.edu.ua

Abstract. Introduction. The study is devoted to the analysis of the influence of the chemical composition of the 40KXHM alloy on its hardness. The relevance of the work lies in the fact that mechanical tests require significant material and time costs. For the operational assessment of metal quality criteria, it is proposed to apply mathematical modeling in the work. **Materials and methods.** A study of the effect of the chemical composition on the hardness of the 40KXHM alloy, which meets the requirements of the state standard 51397, was carried out. **The results of the experiment.** In the course of research, it was found that changes in the chemical composition of the 40KXHM alloy significantly affect its mechanical properties, including hardness and resistance to shock loads. An increase in the content of carbon, molybdenum and chromium in the alloy leads to an increase in its hardness. This is with the formation of stronger carbide and molybdenum phases in the structure of the alloy, which leads to an improvement in its mechanical properties. Increased hardness makes the alloy more resistant to wear and increases its durability in operating conditions. An increase in the nickel content in the alloy leads to an increase in its resistance to shock loads. This is caused by an increase in plasticity and impact toughness of the alloy with an increased nickel content. Higher resistance to shock loads makes the alloy suitable for use in conditions that require high resistance to shocks, for example, in the production of machine parts and equipment. A mathematical model of the dependence of the strength of

the alloy on the percentage content of the components of the chemical composition was built, which allows to control the indicators of the strength of the alloy in the process of its manufacture. **Conclusions.** The research results confirm that changes in the chemical composition of the 40KXHM alloy have a significant impact on its mechanical properties. As a result of the experiments, it was established that the chemical composition of the metal significantly affects the hardness of the material. By changing the composition of the metal, it was possible to achieve a significant increase in hardness to levels that meet the requirements of quality standards. These results are an important step in optimizing the production processes and improving the properties of the final products from the 40KXHM alloy.

Keywords: alloy 40KXHM; chemical composition; hardness; plasticity; impact toughness

Вступ. Прецизійні сплави – спеціальні матеріали, які мають певні фізичні та фізико-механічні характеристики. Ці властивості залежать від точного хімічного складу, ступеня чистоти сплаву від включень та небажаних домішок, структури матеріалу, а також високої точності процесу виготовлення [1].

Сплав на основі системи Co–Cr–Ni (40KXHM) відносять до деформаційно твердіючих сплавів. Деформаційно твердіючі сплави мають високі пружні та характеристики міцності, втомної міцності, твердості, опору зносу, немагнітності і корозійної стійкості в різних середовищах. Високих характеристик міцності та пружності сплав набуває після гартування на γ -твердий розчин із наступною холодною деформацією (близько 30 %) та старінням [2].

Сплав 40KXHM має високий опір до малих пластичних деформацій та релаксаційної стійкості в умовах статичного та циклічного навантаження. Він призначений для виготовлення заводних пружин пружинних двигунів та наручних годинників, кручених циліндричних пружин, кернів електровимірювальних приладів, хірургічних деталей, а також розтяжок та торсіонів [3].

Найбільш поширені матеріали, що застосовуються в металевих імплантатах, – це нержавіюча сталь (відповідна ASTM F138) [4], кобальт-хром-молібденові сплави

(ASTM F75 та F799) [5; 6] та титанові сплави. Кожен з них має свої переваги та недоліки (Cramer, 2003; Hermawan, 2011; Kunčická, 2017) [7–9]. Сплави Co–Cr–Mo, що не містять нікелю, широко застосовуються для виготовлення медичних виробів завдяки високій міцності, зносостійкості та біосумісності. Ці матеріали ідеальні для ортопедичних і зубних імплантатів, таких як тазостегнові та колінні протези, а також зубні імплантати (Disegi, 1999; Manama, 2017; Niinomi, 2012; Buford, 2004; Liao, 2012) [10–14].

Важливо, щоб ці матеріали задовольняли всім вимогам біосумісності, забезпечуючи високі механічні властивості, стійкість до втоми, зношування та корозії, забезпечуючи тривалий термін служби.

Матеріали та методика. До категорії цього сплаву пред'являються вимоги за спектром властивостей: високий чи, навпаки, низький модуль пружності, незначний температурний коефіцієнт модуля пружності або частоти, відносно малий пружний гістерезис і пружна післядія, висока втомна міцність, корозійна стійкість, немагнітність, електропровідність. Зменшення цих показників проводиться шляхом зміни температур експлуатації.

У таблиці 1 наведено хімічний склад, який включає дані про вміст у сплаві різних елементів.

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву 40KXHM в %

C	S	P	Mn	Cr	Ni	Fe	Mo	Co	Si
≤0,15	≤0,015	≤0,015	1–2,5	18,5–21,5	14,0–18,0	Залишок	6,5–8,0	39,0–42,0	1,0

Сплави повинні бути виконані із застосуванням спеціальних методів, таких як виплавка (вакуумно-індукційна), переплавка (вакуумно-дугова, електрошлакова) або їх комбінація. Метод виплавки та переплаву визначає виробник. На запит споживача виробник вказує метод виплавки у документі якості. Сплави, отримані спеціальними методами, можуть бути позначені через тире в копії найменування марки літерами: *ВІ* – вакуумно-індукційна виплавка; *ВД* – вакуумно-дугове переплавлення; *ЕШ* – електрошлакова переплавка.

Механічні властивості металопродукції в стані поставки повинні відповідати нормам. Щодо якості поверхні, термооброблена або напівзагартована стрічка повинна відповідати вимогам Держстандарту 14117, а напівзагартований дріт – Держстандарту 14118. По поверхні термообробленого дроту – за згодою. Величина дійсного зерна має не перевищувати 5-го номера за Держстандартом 5639. Для стрічки величина зерна визначається після термообробки. Результати контролю заносяться до Документа якості. Забрудненість металопродукції неметалевими включеннями в оцінці, попри найвищий бал, не має перевищувати норму [15].

Кожен компонент сплаву впливає на його фізико-механічні властивості. Завдяки точному складу стає можливим отримати матеріал із необхідними характеристиками міцності і пружності. Розглянемо вплив кожного компонента на властивості сплаву.

Со – основа металу, сприяє підвищенню жароміцності і ударної міцності. Відповідно до Держстандарту 51397-99, за узгодженням з органами охорони здоров'я допускаються незначні відхилення за масовою часткою елементів, зазначених у таблиці, які викликають зміни у структурі та механічних властивостей.

С – збільшує жорсткість та міцність сплаву за рахунок формування вуглецевих фаз у металевій матриці. За великих концентрацій може спричинити крихкість та підвищення в'язкості за високих температур.

Mn – поліпшує прожарювання сплаву, міцність та зміцнюваність за рахунок утворення твердих вуглецевих розчинів. Підвищує стійкість до утворення великих зерен під час кування та відпуску, а також знижує в'язкість за високих температур.

Ni – робить сплав пластичним і підвищує його міцність. Посилює стійкість до ударних навантажень та втомних руйнувань, а також корозійну стійкість.

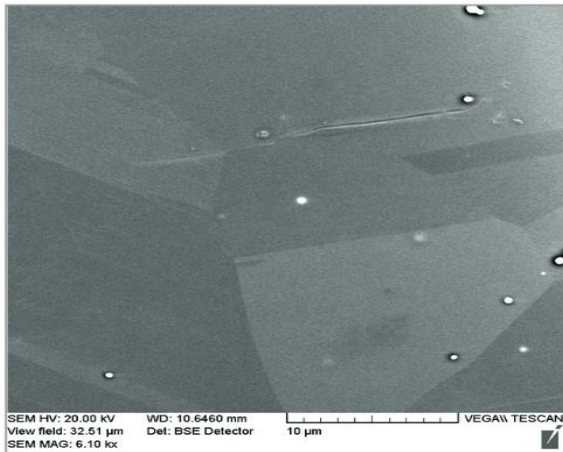
Mo – позитивно впливає на опір металу навантаженням розтягу, поліпшує жорсткість і зносостійкість, а також знижує чутливість до утворення зернової структури за високих температур.

Cr – збільшує жорсткість, зносостійкість та корозійну стійкість сталі. Утворює хромовмісні карбіди, які зміцнюють структуру та опираються зносу. Також посилює стійкість до окиснення та корозії.

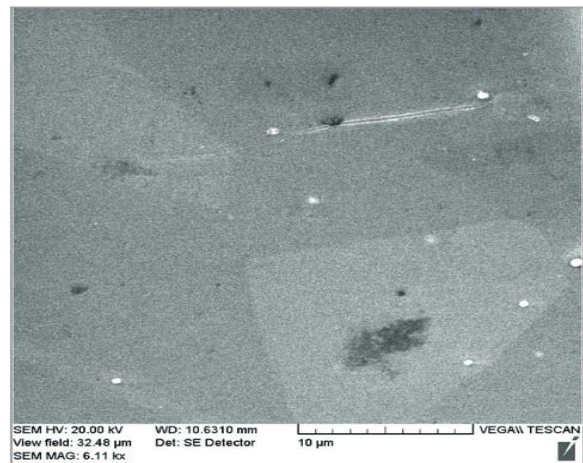
Si – підвищує міцність сталі. Цей елемент сприяє утворенню твердого розчину із залізом, що збільшує міцність матеріалу. Високі концентрації кремнію можуть також підвищувати межу плинності та межу міцності сталі. Додавання кремнію також може збільшити твердість сталі.

S і *P* – технологічні домішки, що впливають на властивості сплаву.

Фото на рисунку 1 демонструє результати електронної сканувальної мікроскопії. Виявлено, що поверхня імплантатів з *Со–Cr*, підданих різним термічним режимам (в діапазоні від 1 050 до 1 150 °С у вакуумі) та електрохімічній обробці, набуває мікрорельєфу з характерним ромбоподібним малюнком, що характеризується мозаїчною структурою [16].



a



б

Рис. 1. Результати сканувальної електронної мікроскопії ділянки обробленої поверхні зразка Co–Cr-імплантата після термічної та електрохімічної обробки (а – від відбитих електронів; б – від вторинних електронів)

Результати експерименту. Для обчислень використано програму «Експерт», розроблену В. М. Волчуком, Ю. І. Дубровим та Ф. В. Кріулним і реалізовану в програмному середовищі *Delphi*.

Для побудови моделі прогнозу дослідник визначав такі параметри: назву та мету роботи, задаючи незалежні змінні (температура повітря, тиск навколишнього середовища), які не впливають на параметри, що вивчаються.

Також визначалися залежні змінні (наприклад, хімічний склад, режим термообробки), що впливають на мету дослідження, якою виступала жорсткість чавуну.

Наразі в матеріалознавстві активно впроваджуються експертні оцінки та нові методики для прогнозування критеріїв якості матеріалів (наприклад, фрактальний підхід [17–22]).

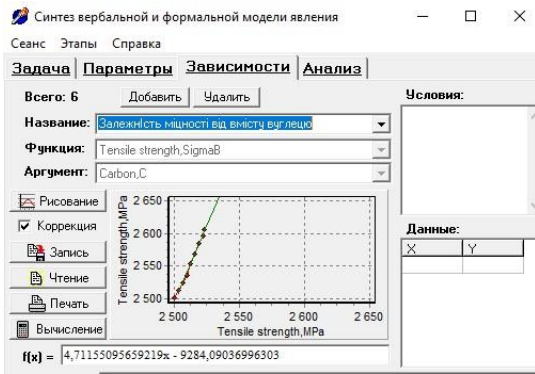
Наступним етапом досліджень було експертне оцінення, засноване на статистичних та літературних даних. Дослідник будував функцію експертним

методом, потім отриману залежність порівнювали із залежністю, отриманою аналітичним методом із використанням програми Excel.

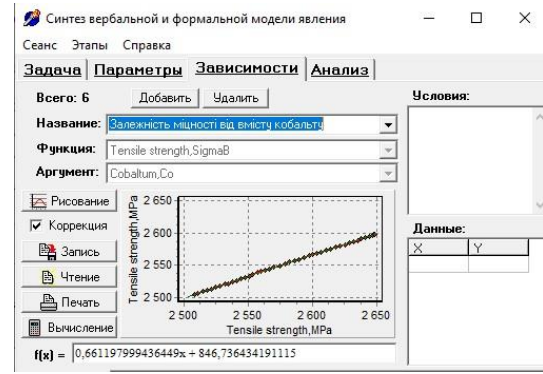
Після цього вибирали контрольні точки та проводили експерименти з метою коригування значень експертної моделі на основі експериментальних та статистичних оцінок. Отриману математичну модель можна було коригувати для досягнення необхідної точності, що дозволяло враховувати вирішальний людський чинник після ухвалення остаточного рішення.

Для отримання лінії тренду використано програму Excel, у якій отримали математичні моделі. Шляхом аналізу отриманих рівнянь регресії будувалися гістограми впливу параметрів функцію мети.

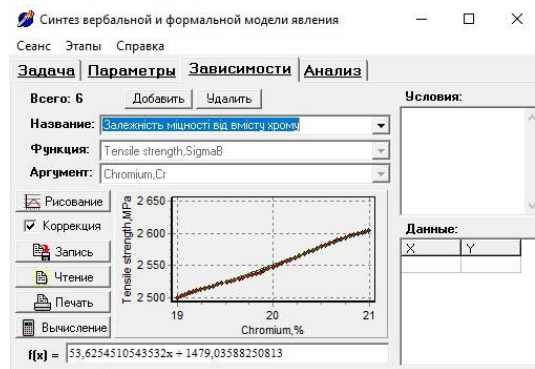
Далі наведено результати розрахунків впливу елементів хімічного складу досліджуваної марки валків на показники їх твердості, згідно з даними таблиці 1 (рис. 2).



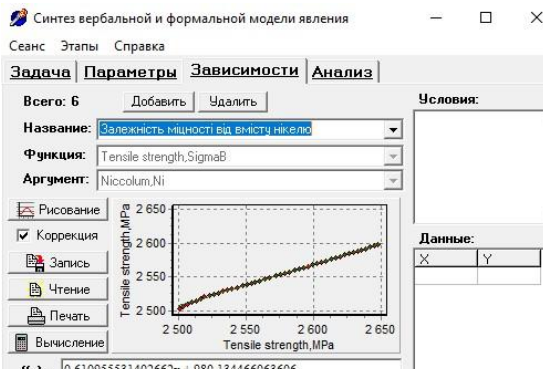
а



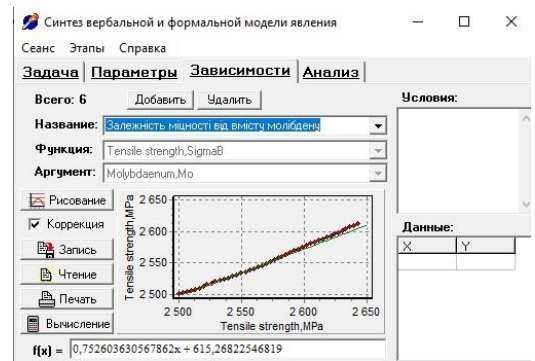
б



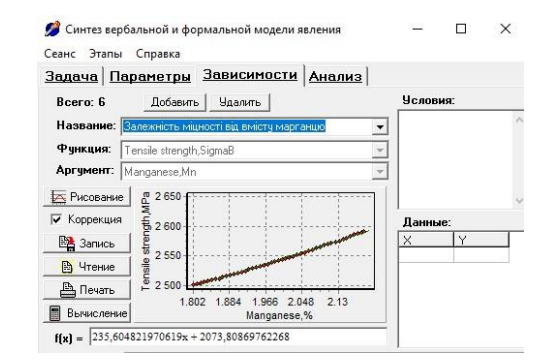
в



г



д



е



ж

Рис. 2. Залежність твердості сплаву 40КХНМ від хімічного складу

Отримано рівняння регресії, що показники твердості та коригувати їх у дозволяють оперативно визначати процесі виплавки сплаву 40КХНМ

Висновки

Проаналізовано вплив хімічного сплаву 40КХНМ на його твердість. Побудовані математичні моделі залежності хімічного складу дозволили провести ранжування цих елементів залежно від їх впливу на твердість.

Отримані гістограми впливу елементів хімічного складу сплаву 40КХНМ на його твердість та математичні моделі дозволяють проводити контроль якості цього сплаву без механічних іспитів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бялік О. М., Черненко В. С., Писаренко В. М., Москаленко Ю. Н. *Металознавство* : підруч., 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : Політехніка, 2006. 384 с.
2. Дурягіна З. А., Лизун О. Я., Пілюшенко В. Л. *Сплави з особливими властивостями*. Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2007. 236 с.
3. Бойко І. А. та ін. Особливості використання та обробки функціональних покриттів деталей авіаційних двигунів. *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту–2023* : зб. тез доп. III-ї Міжнар. науково-техн. конф. Вінниця, 1–3 черв. 2023 р. С. 252–253.
4. Standard Specification for Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673).
5. Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy Castings and Casting Alloy for Surgical Implants (UNS R30075).
6. Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy Forgings for Surgical Implants (UNS R31537, R31538, R31539).
7. Cramer S. D., Covino B. S. *ASM Handbook*. Vol. 13A. Corrosion : Fundamentals, Testing and Protection. Materials Park, OH USA, ASTM International. 2003.
8. Hermawan H., Ramdan D., Djuansjah J. R. P. *Biomedical Engineering. Metal for Biomedical Applications*. In: Tech Ed. Rijeka, Croatia, 2011.
9. Kunčická L., Lowe T. C., Kocich R. *Advances in Metals and Alloys for Joint Replacement*. *Progress in Materials Science*. № 88. 2017. Pp. 232–280.
10. Disegi J. A., Kennedy R. L., Pilliar R. *Cobalt-Base Alloys for Biomedical Applications*, STP1365. 1999.
11. Manama N. S., Harunb W. S. W., Shrib D. N. A., Ghanib, Kurniawanc T., Ismaild M. H., Ibrahim M. H. I. *Study of corrosion in biocompatible metals for implants : a review*. *J. Alloys and Compounds*. Vol. 701. 2017. Pp. 698–715.
12. Niinomi M., Nakai M., Hieda J. *Development of new metallic alloys for biomedical applications*. *Acta Biomater*. № 8. 2012. Pp. 3888–3903.
13. Buford A., Goswami T. *Review of wear mechanisms in hip implants : paper I*. *General. Mater. Des.* 25, 2004. Pp. 385–393.
14. Liao Y., Pourzal R., Stemmer P., Wimmer M. A., Jacobs J. J., Fischer A., Marks L. D. *New insights into hard phases of CoCrMo metal-on-metal hip replacements*. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* № 12. 2012. Pp. 39–49.
15. ДЕРЖСТАНДАРТ 51397-99. Стрічка і дріт із спеціальних сплавів для з'єднувальних і вживлюваних елементів виробів для серцево-судинної хірургії.
16. *FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY 4'2022* URL: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-108-114>
17. Большаков Вад. І., Большаков В.І., Волчук В. М., Дубров Ю. І. *Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу*. *Вісник НАН України*. 2014. № 12. С. 45–48. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/73434>
18. Большаков В., Волчук В., Дубров Ю. *Пути применения теории фракталов : монография*. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2016. 146 с.
19. Большаков В. І., Волчук В. М., Котов М. А., Фісуненко Д. П. *Аспекти застосування фрактального моделювання*. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2022. № 2 (97). С. 7–18. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.050722.7.858>
20. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. *О применении имитационного моделирования в материаловедении*. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2015. № 4. С. 26–31. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/26-31>
21. Volchuk V. M., Kotov M. A. *Fractal express methods evaluation of a breaking stress of concrete*. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*. 2021. Vol. 1926, № 1. Pp. 012023. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012023>
22. Volchuk Volodymyr, Bolshakov Volodymyr, Kotov Mykola, Konoplyanik Alexander, Chaikovska Hanna. *Influence of the multifractal characteristics of a macrostructure on cement mortar strength*. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2678. Pp. 020024. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0118682>

REFERENCES

1. Bialik O.M., Chernenko V.S., Pisarenko V.M. and Moskalenko Yu.N. *Metaloznavstvo : pidruchnyk 2-he vyd., pererob. i dop.* [Metallurgy : textbook, 2nd ed., revision. and additional]. Kyiv : Polytechnic Publ., 2006, 384 p. (in Ukrainian).
2. Duryagina Z.A., Lyzun O.Ya. and Pilyushenko V.L. *Splavy z osoblyvymy vlastyvostyamy* [Alloys with special properties]. Lviv : Publication of the Lviv Polytechnic National University, 2007, 236 p. (in Ukrainian).
3. Boyko I.A. et al. *Osoblyvosti vykorystannya ta obrobky funktsional'nykh pokryttiv detaley aviatsiynykh dvyhuniv* [Features of the use and processing of functional coatings of aircraft engine parts]. *Perspektyvy rozvytku mashynobuduvannya ta transportu-2023 : zb. tez dop. III-yi Mizhnar. nauk.-tekhn. konf.* [Perspectives for the development of mechanical engineering and transport-2023 : coll. thes. add. III Intern. sc. and tech. conf.]. Vinnytsia, June 1–3, 2023, pp. 252–253. (in Ukrainian).
4. Standard Specification for Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673).
5. Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy Castings and Casting Alloy for Surgical Implants (UNS R30075).
6. Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy Forgings for Surgical Implants (UNS R31537, R31538, R31539).
7. Cramer S.D. and Covino B.S. *ASM Handbook. Vol 13A. Corrosion : Fundamentals, Testing and Protection.* Materials Park, OH USA, ASTM International. 2003.
8. Hermawan H., Ramdan D. and Djuansjah J.R.P. *Biomedical Engineering, Metal for Biomedical Applications.* In: Tech Ed. Rijeka, Croatia, 2011.
9. Kunčická L., Lowe T.C. and Kocich R. *Advances in Metals and Alloys for Joint Replacemente.* Progress in Materials Science. No. 88, 2017, pp. 232–280.
10. Disegi J.A., Kennedy R.L. and Pilliar R. *Cobalt-Base Alloys for Biomedical Applications.* STP1365. 1999.
11. Manama N.S., Harunb W.S.W., Shrib D.N.A., Ghanib, Kurniawanc T., Ismaild M.H. and Ibrahim M.H.I. *Study of corrosion in biocompatible metals for implants : a review.* J. Alloys and Compounds. No. 701, 2017, pp. 698–715.
12. Niinomi M., Nakai M. and Hieda J. *Development of new metallic alloys for biomedical applications.* Acta Biomater. No. 8, 2012, pp. 3888–3903.
13. Buford A. and Goswami T. *Review of wear mechanisms in hip implants : paper I. General.* Mater. Des. 25, 2004, pp. 385–393.
14. Liao Y., Pourzal R., Stemmer P., Wimmer M.A., Jacobs J.J., Fischer A. and Marks L.D. *New insights into hard phases of CoCrMo metal-on-metal hip replacements.* J. Mech. Behav. Biomed. Mater. No. 12, 2012, pp. 39–49.
15. *State standard 51397-99. Tape and wire from special alloys for connecting and implantable elements of products for cardiovascular surgery.* (in Ukrainian).
16. *FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY 4'2022* URL: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-108-114>
17. Bol'shakov Vad.I., Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Chastkova kompensatsiya nepovnoty formal'noyi aksiomatyky pry identyfikatsiyi struktury metalu* [The partial compensation of incompleteness of formal axiomatics in the identification of the metal structure]. *Visnyk akademiyi nauk Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 12, pp. 45–48. (in Ukrainian).
18. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Puti primeniya teorii fraktalov* [Ways of applying the theory of fractals]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2016, 146 p. (in Russian).
19. Bolshakov V.I., Volchuk V.M., Kotov M.A. and Fisunen D.P. *Aspekty zastosuvannya fraktalnoho modeliuвання* [Aspects of the application of fractal modeling]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2022, vol. 2, no. 2 (97), pp. 7–18. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.050722.7.858>. (in Ukrainian).
20. 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).
21. Volchuk V.M. and Kotov M.A. *Fractal express methods evaluation of a breaking stress of concrete.* Journal of Physics : Conference Series. IOP Publishing. 2021, vol. 1926, no. 1, pp. 012023.
22. Volchuk Volodymyr, Bolshakov Volodymyr, Kotov Mykola, Konoplyanik Alexander and Chaikovska Hanna. *Influence of the multifractal characteristics of a macrostructure on cement mortar strength.* AIP Conference Proceedings. Vol. 2678, pp. 020024, 15.02.2023. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0118682>

Надійшла до редакції: 12.03.2024.