

УДК 669.017:620.17

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.231018.25.307

ДО ПРОГНОЗУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ

ВОЛЧУК В. М.¹, *д-р техн. наук, проф.*,

СИЗОВА О. Р.², *студ.*

¹Кафедра 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

²Кафедра 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: 00lena00@ro.ru

Анотація. *Вступ.* Прогнозування механічних властивостей металевих виробів зумовлене труднощами, пов'язаними з впливом багатьох факторів. Основні з них - багатопараметричність та багатокритеріальність технології виробництва. Для зменшення витрат на натурні експерименти запропоновано методику оцінювання механічних властивостей металу з використанням математичного апарату. **Методика.** Застосовується математичне планування експериментів для оцінювання межі міцності сталі Ст4кп на основі аналізу елементів її хімічного складу. **Результати експерименту.** Отримано математичну модель прогнозу межі міцності сталі Ст4кп, що дозволяє здійснювати її прогноз на заданому інтервалі показників хімічного складу. Згідно з критерієм Фішера $F = 1,187$ модель адекватна за рівня значимості $\alpha = 0,05$. **Висновки.** В рамках методики планування експериментів отримано модель прогнозування межі міцності сталі Ст4кп, що дозволяє оперативне прогнозувати якість металу неруйнівним методом. Цей підхід можна застосовувати як експрес-методику оцінювання критеріїв якості металопрокату.

Ключові слова: *планування експерименту; метал; хімічний склад; прогнозування; механічні властивості*

К ПРОГНОЗУ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА

ВОЛЧУК В. Н.¹, *д-р техн. наук, проф.*,

СИЗОВА Е. Р.², *студ.*

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

²Кафедра 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: 00lena00@ro.ru

Аннотация. *Введение.* Прогнозирование механических свойств металлических изделий обусловлено трудностями, связанными с влиянием многих факторов. Основными из факторов являются многопараметричность и многокритериальность технологии производства. Для уменьшения затрат на натурные эксперименты предложена методика оценки механических свойств металла с использованием математического аппарата. **Методика.** Применяется математическое планирование экспериментов для оценки предела прочности стали Ст4кп на основе анализа элементов ее химического состава. **Результаты эксперимента.** Получена математическая модель прогноза предела прочности стали Ст4кп, что позволяет осуществлять его прогноз на заданном интервале показателей химического состава. Согласно критерию Фишера $F = 1,187$ модель адекватна при уровне значимости $\alpha = 0,05$. **Выводы.** В рамках методики планирования экспериментов получена модель прогнозирования предела прочности стали Ст4кп, что позволяет оперативно прогнозировать качество металла неразрушающим методом. Данный подход можно применять в качестве экспрес-методики оценки критериев качества металлопроката.

Ключевые слова: *планирование эксперимента; металл; химический состав; прогнозирование; механические свойства*

TO THE FORECAST OF MECHANICAL PROPERTIES OF METAL

VOLCHUK V. M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

SIZOVA O. R.², *student*

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

²Department of Materials Science, State Higher Educational Establishment «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskoho str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: 00lena00@ro.ru

Annotation. Introduction. Forecasting the mechanical properties of metal products is due to the difficulties associated with the influence of many factors. The main factors are the multi-parameter and multi-criteria technology of production. A technique for evaluating the mechanical properties of a metal using a mathematical apparatus for reducing the cost of full-scale experiments is proposed. **Methodology.** Mathematical planning of experiments is used to evaluate the strength limit of steel type St4kp based on the analysis of the elements of its chemical composition. **Results of the experiment.** A mathematical model of the strength limit prediction of steel type St4kp is obtained, which makes it possible to carry out its prediction on a given range of chemical composition indicators. According to the F-test, $F=1.187$ is the model that is adequate at a significance level of $\alpha=0,05$. **Conclusions.** In the framework of the experiment planning methodology, a model for predicting the strength limit of steel type St4kp has been obtained, which makes it possible quickly predict the quality of the metal by a non-destructive method. This approach can be used as an express methodology for assessing the quality criteria of metal rolling.

Keywords: *experiment planning; metal; chemical composition; forecasting; mechanical properties*

Вступ. Для прогнозування механічних властивостей металопрокату нині застосовуються різні методики. Серед них окремо можна відмітити математичні методи [1-5], зокрема, теорії фракталів та мультифракталів [6-10], неруйнівні методи контролю [11]. Всі вони застосовуються для кожного конкретного випадку окремо залежно від поставленої мети. Труднощі вибору тієї чи іншої моделі для оцінювання критеріїв якості сталей та чавунів пов'язані в першу чергу з багатопараметричністю та багатокритеріальністю технології їх виробництва і впливом різних факторів [12, 13]. Сюди слід віднести вплив хімічного складу та структури на властивості матеріалу [14].

Особливо слід відмітити математичні методики оцінювання критеріїв якості різ-

них матеріалів. Їх застосування для прогнозу властивостей металів особливо актуальне, оскільки для їх визначення неможливо застосувати детермінований підхід, що базується на причинно-наслідкових зв'язках. Серед існуючих методик методика планування експериментів особливо часто використовується для прогнозу того чи іншого складного об'єкта дослідження.

Оцінювання критеріїв якості сталей з точністю, що може задовольняти вимогам замовника та нормативним документам, запропоновано проводити з допомогою методики планування експериментів.

Методика. Досліджувався вплив хімічного складу сталі Ст4кп на її межу міцності (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 4кп

Вміст в % відповідно до маси	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
Ст4кп	0,18 -0,27	до 0,05	0,40 - 0,70	до 0,3	до 0,05	до 0,05	до 0,3	до 0,008	до 0,3	до 0,08



Рис. Мікроструктура сталі 4кп, збільшення 100

Межа міцності визначалася для труб у стані заводської поставки відповідно до ГОСТ 535-2005. Згідно з нормативними документами показники міцності становлять 400...510 МПа.

Сталь 4кп у стані заводської поставки має феритно-перлітну структуру (див. рисунок). Перліт розміщується по межах зерен фериту, його вміст у досліджуваних мікроструктурах сталі 4кп становив за підрахунками 25-30 %.

Результати експерименту. В таблиці 2 наведено матрицю планування експериментів для сталі Ст4кп з експериментальними показниками функції мети $Y_{\text{екс}}$ та оцінками її

прогнозу $Y_{роз}$, що розраховувалися за допомогою рівняння регресії (1).

$$Y_{роз} = 243,79 + 477,78 \cdot X_1 + 1216,67 \cdot X_2 + 95 \cdot X_3 + 600 \cdot X_4 \quad (R^2=0,89) \quad (1)$$

У матриці планування експерименту загальний рівень (ЗР), інтервал варіювання (ІВ), нижній рівень (НР) та верхній рівень (ВР) числових значень змінних (елементів хімічного складу) вибирались згідно з експертною оцінкою.

Таблиця 2

Матриця планування експериментів

ЗР		0,225	0,035	0,55	0,035	Межа міцності σ_B , МПа	
ІВ		0,045	0,015	0,15	0,015		
ВР		0,27	0,05	0,7	0,05		
НР		0,18	0,02	0,4	0,02		
№	X_0	$X_1(C)$	$X_2(Si)$	$X_3(Mn)$	$X_4(Ni)$	$Y_{екс}$	$Y_{роз}$
1	+	+	+	+	+	520	530
2	+	+	+	+	-	500	512
3	+	+	+	-	+	505	502
4	+	+	+	-	-	485	484
5	+	+	-	+	+	498	494
6	+	+	-	+	-	483	476
7	+	+	-	-	+	478	465
8	+	+	-	-	-	440	447
9	+	-	+	+	+	488	487
10	+	-	+	+	-	500	469
11	+	-	+	-	+	460	459
12	+	-	+	-	-	425	441
13	+	-	-	+	+	440	451
14	+	-	-	+	-	422	433
15	+	-	-	-	+	420	422
16	+	-	-	-	-	410	404

Для перевірки гіпотези про однорідність оцінок дисперсій використовували критерій Кохрена G_{max} [1], заснований на законі розподілу відношень максимальної емпіричної дисперсії S_{max} до суми всіх дисперсій (2):

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

де $s_g^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{l=1}^m (y_{g,l} - \bar{y}_g)^2$. При цьому $m = 16$ – число паралельних дослідів; $y_{g,l}$ – по-

точне значення функції; \bar{y}_g – середнє значення функції. Невідтворюваність експериментів, як правило, є наслідком наявності неврахованих і, як результат, вплив неконтрольованих змінних, що створюють на виході об'єкта планування великий рівень «шуму».

Математична модель адекватна за критерієм Фішера $F = 1,187$ за рівня значимості $\alpha = 0,05$. Аналіз рівняння регресії (1) підтверджує той факт, що найсильніший зв'язок спостерігається між функцією мети (показником якості

Y) та аргументами x_1 (вуглець), x_2 (кремній) і x_4 (нікель). Це підтверджується найбільш високими серед розглянутих коефіцієнтами кореляції, що обґрунтовується фізико-хімічною інтерпретацією їх впливу.

Висновки. Отримано регресійну модель прогнозу показників межі міцності сталі Ст4кп на основі аналізу впливу елементів її хімічного складу. Модель прогнозу якості

металу адекватна за критерієм Фішера $F = 1,187$ за рівня значимості $\alpha = 0,05$.

Запропонований підхід дозволяє оперативно та з мінімальними витратами прогнозувати якість металопрокату, що випускається з даної марки сталі, залежно від хімічного складу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – Москва : Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
2. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures / A. Mishutn, S. Kroviakov, O. Pishev, B. Soldo // Tehnicki Glasnik/Technical Journal. – 2017. – Vol. 11. – № 3. – P. 121–124. – Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/186657>. – Перевірено: 07.02.2019.
3. Алгоритм проведения первичной статистической обработки массивов экспериментальных данных / Д. В. Лаухин, А. В. Бекетов, Н. А. Ротт, В. Д. Лаухин // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпро, 2017. – № 2. – С. 68–77.
4. Дубров Ю. И. Применение экспертной информации при формировании активного эксперимента в материаловедении / Ю. И. Дубров, В. Н. Волчук, В. И. Большаков // Моделирование и оптимизация в материаловедении : мат. 40-го междунар. семинара по моделированию и оптимизации композитов МОК'40, 25-26 апр. 2001 г. – Одесса : АстроПринт, 2001. – С. 25–26.
5. Композиция метода планирования экстремальных экспериментов и экспертной информации для формирования системы прогноза качества материалов / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Л. Н. Дейнеко, Ю. И. Дубров // Перспективные задачи инженерной науки : сб. науч. тр. междунар. конф. – Днепропетровск : GAUDEAMUS, 2001 – Вып. 2. – С. 203–208.
6. Bol'shakov V. Fractals and properties of materials : monograph / V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 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: 07.02.2019.
7. 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 7.02.2019.
8. Большаков В. И. Основы организации фрактального моделирования : монография / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров. – Киев : Академперіодика, 2017. – 170 с.
9. Журавель І. М. Вибір налаштувань під час обчислення поля фрактальних розмірностей зображення / І. М. Журавель // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук. пр. / Нац. лісотехн. ун-т України. – Львів, 2018. – Т. 28. – № 2. – С. 159–163. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15421/40280230>. – Перевірено: 07.02.2019.
10. 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. 126–128. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/135345>. – Перевірено 7.02.2019.
11. Білокур І. П. Елементи дефектоскопії при вивченні неруйнівного контролю : навч. посіб. / І. П. Білокур. – Київ : НМК ВО, 1990. – 252 с.
12. 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 доступу: <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2014-11/14-11-13.pdf>. – Перевірено: 07.02.2019.
13. Большаков В. И. Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2013. – № 4. – С. 5–11.
14. Investigation of Acicular Ferrite Structure and Properties of C-Mn-Al-Ti-N Steels / O. Uzlov, A. Malchere, V. Bolshakov, C. Esnouf // Advanced Materials Research. – 2007. – Vol. 23. – P. 209–312. – Режим доступу: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.23.209>. – Перевірено 7.02.2019.

REFERENCES

1. Voznesenskiy V.A. *Statisticheskiye metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyakh* [Statistical methods of experiment planning in technical and economic research]. Moscow: Finansy i statistika, 1981, 263 p. (in Russian).
2. Mishutn A., Kroviakov S., Pishev O. and Soldo B. *Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures*. Tehnicki Glasnik. Technical Journal. 2017, vol. 11, no. 3, pp. 121–124. Available at: <https://hrcak.srce.hr/186657>. [Accessed 7 February 2019]. (in Russian).
3. Laukhin D.V., Beketov A.V., Rott N.A. and Laukhin V.D. *Algorithm provedeniya pervichnoy statisticheskoy obrabotki massivov eksperimental'nykh dannykh* [Algorithm of primary statistical analysis of arrays of experimental data]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnitstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipro, 2017, no. 2, pp. 68–77. Available at: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/111314>. [Accessed 7 February 2019]. (in Russian).
4. Dubrov Yu.I., Volchuk V.N. and Bol'shakov V.I. *Primeneniye ekspertnoy informatsii pri formirovani i aktivnogo eksperimenta v materialovedenii* [Application of expert information in the formation of an active experiment in materials science]. *Modelirovaniye i optimizatsiya v materialovedenii: mat. 40-go mezhdunar. seminaru po modelirovaniyu i optimizatsii kompozitov MOK'40* [The modeling and optimization in materials science. Proceedings of 40th Int. seminar on modeling and optimization of IOC'40 composites]. Odessa: AstroPrint, 2001, pp. 25–26. (in Russian).
5. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N., Dejneko L.N. and Dubrov Yu.I. *Kompozitsiya metoda planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov i ekspertnoj 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]. *Perspektivnye zadachi inzhenernoj nauki* [Perspective tasks of engineering science]. Dnepropetrovsk: GAUDEAMUS, 2001, iss. 2. pp. 203–208. (in Russian).
6. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p. Available at: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>. [Accessed 6 February 2019].
7. 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.
8. Bol'shakov 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. Zhuravel I.M. *Vybir nalashтуvan pid chas obchyslennia polia fraktal'nykh rozmirnostei zobrazhennia* [The choice of parameters when calculating the fractal dimension of the image]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy* [Scientific Bulletin of UNFU]. Lviv, 2018, vol. 28, no 2, pp. 159–163. Available at: <https://doi.org/10.15421/40280230>. [Accessed 7 February 2019]. (in Ukrainian).
10. Zhuravel I.M. and Svirska L.M. *Vymiriuvannia userednenoho rozmiru zeren metalu z vykorystanniam fraktalnoi 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. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/135345>. [Accessed 7 February 2019]. (in Ukrainian).
11. Bilokur I.P. *Elementy defektoskopii pry vyvchenni neruinivnoho kontroliu* [Elements of defectoscopy during studying of non-destructive control]. Kyiv: NMK VO, 1990, 252 p. (in Ukrainian).
12. Bol'shakov 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]. Kyiv, 2014, no. 11, pp. 77–81. Available at: <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2014-11/14-11-13.pdf>. [Accessed 7 February 2019]. (in Russian).
13. 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).
14. Uzlov O., Malchere A., Bolshakov V.I., 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. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.23.209>. [Accessed 7 February 2019].

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

Надійшла до редколегії: 10.07.2018 р.