

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.250619.63.324

## ВИЗНАЧЕННЯ ОБЛАСТІ КОМПРОМІСУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 40

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, e-mail: [fortigin13@gmail.com](mailto:fortigin13@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Випуск металопродукції з заданим комплексом механічних характеристик являє собою актуальне завдання сучасного матеріалознавства. Для його виконання запропоновано застосовувати математичний апарат, що дозволить без проведення натурних іспитів прогнозувати заданий комплекс властивостей виробів із металу з мінімальними витратами. *Об'єкт дослідження* – механічні властивості та хімічний склад середньовуглецевої сталі 40, що використовується в різних галузях народного господарства України. *Матеріали і методи досліджень.* Сталь 40 має феритно-перлітну структуру в стані заводської поставки. Крім того, вона має знижений вміст шкідливих елементів: сірки і фосфору. Структура сталі досліджувалася з використанням оптичної мікроскопії. *Результати.* Проведено аналіз впливу хімічного складу сталі 40 на її механічні властивості. Графо-аналітичним методом визначено робочу область параметрів залежно від властивостей, що дозволяє прогнозувати механічні властивості досліджуваної сталі. В робочій області параметрів визначено область компромісу механічних властивостей (область із субоптимальним співвідношенням характеристик міцності та пластичності). *Висновки.* Отримано область компромісу механічних властивостей сталі 40 залежно від хімічного складу. Такий підхід дозволяє обирати необхідне співвідношення властивостей залежно від вимог замовника.

*Ключові слова:* сталь 40; механічні властивості; хімічний склад; структура; область компромісу

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ КОМПРОМИССА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 40

ФОРТЫГИН А. А., *аспір.*

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](mailto:fortigin13@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

**Аннотация.** *Постановка проблемы.* Выход металлопродукции с заданным комплексом механических характеристик представляет собой актуальную задачу современного материаловедения. Для ее решения предложено применять математический аппарат, который позволит без проведения натурных испытаний прогнозировать заданный комплекс свойств изделий из металла с минимальными затратами. *Объект исследования* – механические свойства и химический состав среднеуглеродистой стали 40, используемой в различных областях народного хозяйства Украины. *Материалы и методики исследований.* Сталь 40 имеет ферритно-перлитную структуру в состоянии заводской поставки. Кроме того, она имеет пониженное содержание вредных элементов: серы и фосфора. Структура стали исследовалась с использованием оптической микроскопии. *Результаты.* Проведен анализ влияния химического состава стали 40 на ее механические свойства. Графо-аналитическим методом определена рабочая область параметров в зависимости от свойств, что позволяет прогнозировать механические свойства исследуемой стали. В рабочей области параметров определена область компромисса механических свойств (область с субоптимальным соотношением характеристик прочности и пластичности). *Выводы.* Получена область компромисса механических свойств стали 40 в зависимости от химического состава. Такой подход позволяет выбирать необходимое соотношение свойств в зависимости от требований заказчика.

*Ключевые слова:* сталь 40, механические свойства; химический состав; структура; область компромисса

## DETERMINATION OF THE AREA OF COMPROMISE OF MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL 40

FORTYHIN A.A., *Postgraduate Student*

Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [fortigin13@gmail.com](mailto:fortigin13@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

**Abstract. Problem statement.** The production of metal products with a given set of mechanical characteristics is an urgent task of modern materials science. To solve this problem, it was suggested that a mathematical apparatus should be used, it would allow, without conducting full-scale tests, to predict a given set of properties of metal products with minimal costs. **Object of study.** The object of research is the mechanical properties and chemical composition of medium carbon steel 40, used in various fields of the national economy of Ukraine. **Materials and methods.** Steel 40 (after factory delivery) has a ferrite-perlite structure containing perlite within 46 ... 56%. In addition, it has a lower content of harmful elements: sulfur and phosphorus (according to GOST 1050-88). The structure of the steel was investigated using the method of optical microscopy. **Results and discussion.** The analysis of the influence of elements of the chemical composition of steel 40 on its mechanical properties was carried out. The graph-analytical method defines the working areas of the selected technology parameters, depending on the properties, which allow to predict the mechanical properties of the investigated steel. In the working areas of the parameters, the compromise area of the mechanical properties is determined. The compromise area is an area with a suboptimal ratio of strength and plasticity characteristics. **Conclusions.** The area of the compromise of the mechanical properties of steel 40 is obtained, depending on the influence of the elements of the chemical composition. This approach allows us to determine the given complex of mechanical characteristics of the metal already in the process of its production, depending on the customer's requirements and regulatory documents on the quality of metal products.

*Keywords:* steel 40, mechanical properties; chemical composition; structure; compromise area

### Постановка проблеми

Комплекс механічних властивостей металопрокату намагаються формувати у процесі його виготовлення [1]. Після виготовлення цільового продукту визначають комплекс його механічних властивостей, а потім, за необхідності, змінюють його за допомогою різних режимів обробки [2]. Від правильного вибору комплексу властивостей залежить термін експлуатації тієї чи іншої деталі. Але задати наперед необхідне співвідношення механічних властивостей – важке завдання, оскільки сама технологія виробництва металопрокату багатопараметрична та багатofункціональною [3–5]. Тому цьому питанню слід приділяти належну увагу.

Як показано у працях [6; 7], для вирішення цього питання доцільно застосовувати математичний апарат. Механічні властивості металу можна оцінювати шляхом моделювання [8; 9], застосування теорії фракталів [10–13], або, наприклад, визначати область компромісу механічних властивостей [14–16]. Під областю компромісу слід розуміти області з субоптимальним поєднанням механічних

властивостей, тобто таку, де ці властивості мінімально суперечать одна одній (наприклад, підвищення твердості металу спричинює до зниження показників його пластичності і т. ін.).

Постає завдання застосувати методику визначення області компромісу, що дасть змогу прогнозувати для деталі необхідне поєднання механічних властивостей залежно від вимог замовника.

### Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження виступають механічні властивості та хімічний склад середньовуглецевої сталі 40 в робочій області параметрів, що змінюються в межах нормативних характеристик.

### Матеріали та методика

Сталь 40 досліджувалася в стані заводської поставки з таким хімічним складом згідно з ГОСТ 1050-88 (табл.):

*Таблиця*

**Вміст елементів хімічного складу сталі 40 / Content of elements of the chemical composition of steel 40**

Хімічний склад	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
Вміст у %	0,37–0,45	0,17–0,37	0,5–0,8	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,3	до 0,08

Сталь 40 у стані заводської поставки має феритно-перлітну структуру (рис. 1). Для дослідження структури шліфи полірувались та травились у 4 % розчині азотної кислоти в спирті. Кількість перліту, залежно від

процентного вмісту вуглецю, коливалась у межах 46...56 %.

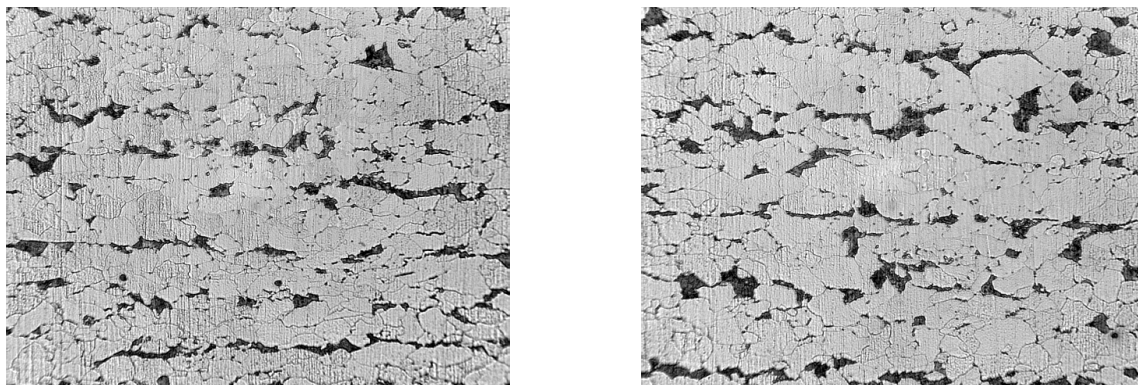


Рис. 1. Структура сталі 40, × 400 / Fig. 1. Structure of steel 40, × 400

Механічні властивості сталі 40 змінювалися в таких межах: межа міцності  $\sigma_B = 560...590$  МПа; межа плинності  $\sigma_T = 330...370$  МПа; твердість НВ = 215...240; відносне видовження  $\delta = 18...21$  %; відносне звуження  $\psi = 44...47$  %.

### Результати

Визначення області компромісу механічних властивостей сталі 40 проводилося в два етапи. На першому етапі досліджень визначалася робоча область параметрів технології. Однак зміна значень однієї характеристики може викликати одночасне поліпшення чи погіршення тієї чи іншої характеристики [10–13]. Тому на другому етапі визначалася область компромісу на перетині робочих областей обраних параметрів. Область перетину графіків робочих областей являє собою область компромісу властивостей (рис. 2).

Робоча область параметрів для кожної механічної характеристики визначалася на основі аналізу впливу на неї елементів хімічного складу.

Для визначення області компромісу механічних властивостей сталі 40 були обрані керовані змінні та критерії якості. Побудова області компромісу проводилося за методикою, що розкрита у працях [14–16]. Як змінні обрані елементи хімічного складу, а як критерії – механічні властивості: межа міцності на розрив, межа плинності, твердість, відносне видовження та звуження. Вибір даних механічних характеристик мовлений тим, що вони найчастіше використовуються у приймально-здавальних роботах. Для побудови області компромісу обрані 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.

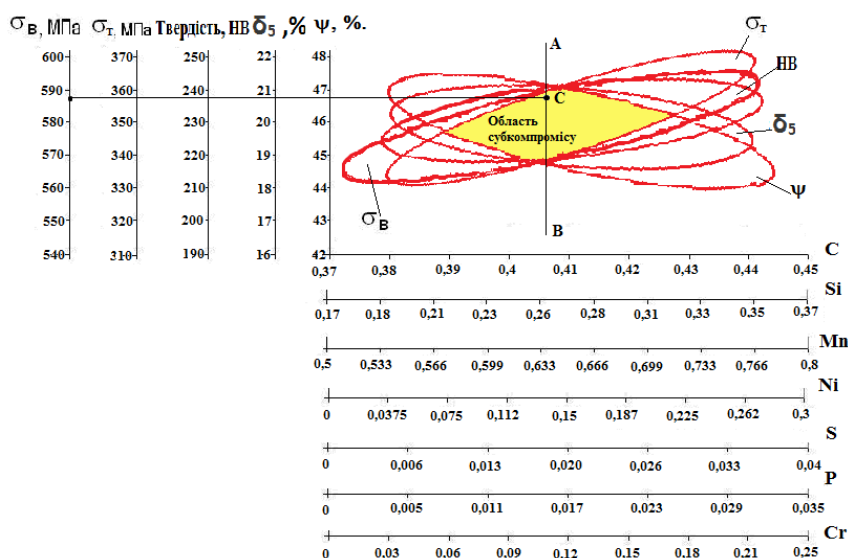


Рис. 2. Область компромісу механічних властивостей сталі 40 / Fig. 2. Compromise area of mechanical properties of steel 40

З рисунку 2 випливає, що зростання показників міцності здебільшого зумовлене збільшенням вмісту вуглецю і кремнію, а також нікелю та хрому. На пластичні характеристики найбільший позитивний вплив мають хром та нікель.

Приклад практичного застосування отриманої області компромісу такий. Віддаючи перевагу одному з показників обраних механічних властивостей (наприклад, межі текучості – на рис. 2 в точці С), необхідно провести вертикаль АВ, що дозволить визначити хімічний склад сталі та прогнозувати інтервал існування інших механічних властивостей.

## Висновки

Шляхом аналізу робочих областей параметрів технології побудована область компромісу механічних властивостей сталі 40 у стані заводської поставки залежно від впливу елементів її хімічного складу.

Запропонована методика є актуальною та може застосовуватися для контролю якості металопродукату в процесі його виробництва залежно від заданого комплексу механічних властивостей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ferrous materials: Steel and Cast Iron : monograph / [H. Berns, W. Theisen]. – Berlin Heidelberg : Springer, 2008. – 418 p.
2. Волчук В. Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства / В. Н. Волчук // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 5. – С. 12–18. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>
3. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография / [Ю. Дубров, В. Большаков, В. Волчук]. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 236 с.
4. 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.
5. Большаков В. И. Этапы идентификации многопараметрических технологий та шляхи їх реалізації / В. И. Большаков, В. М. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник НАН України. – 2013. – № 8. – С. 66–72. – Режим доступу : <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/67873>
6. Большаков В. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2014. – № 11. – С. 77–81. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
7. Большаков В. И. К определению метрики объекта идентификации / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2016. – № 4. – С. 10–14. Режим доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/10-14/85306>
8. Большаков В. И. О применении имитационного моделирования в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2015. – № 4. – С. 26–31. – Режим доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/26-31>
9. 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. – 2014. – № 8. – С. 4–9. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/4134>
10. Fractals and properties of materials : monograph / [V. Bolshakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov]. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p.
11. Volchuk V. 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. – Pp. 93–97. – Режим доступу : <https://doi.org/10.31803/tg-20180302115027>
12. Основы организации фрактального моделирования : монография / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров]. – Киев : Академперіодика НАН України, 2017. – 170 с.
13. Bolshakov V. I. Regularization of One Conditionally Ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy / V. I. Bolshakov, V. M. Volchuk, Yu. I. Dubrov // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2018. – Vol. 40. – № 9. – Pp. 1165–1171. – Режим доступу : <https://DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165>
14. Большаков В. И. Способ определения области компромисса критериев качества многокритериальных технологий / В. И. Большаков, А. А. Фортыхин // Металознавство та термічна обробка металів. – 2016. – № 2. – С. 40–46.
15. Волчук В. Н. К определению области компромисса характеристик качества материалов / В. Н. Волчук // Металознавство та термічна обробка металів. – 2015. – № 3. – С. 21–25. – Режим доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
16. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // Металлофизика и новейшие технологии. – 2017. – Т. 39. – № 3. – С. 949–957. – Режим доступу : <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>

## REFERENCES

1. Berns H. and Theisen W. Ferrous materials : Steel and Cast Iron. Berlin Heidelberg : Springer, 2008, 418 p.
2. 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).

3. 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).
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]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no. 4, pp. 5–11. (in Russian).
5. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Etapy identyfikatsiyi bahatoparametrychnykh tekhnolohiy ta shlyakhy 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. 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).
7. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K opredeleniyu metriki ob'yekta identifikatsii* [To the definition of the identity metric]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 4, pp. 10–14. (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. 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 Prydniprov'skoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 8, pp. 4–9. (in Russian).
10. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
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, no. 2, pp. 93–97.
12. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Osnovy organizatsii fraktal'nogo modelirovaniya* [Fundamentals of fractal modeling]. Kyiv, Ukraine : PH "Akademperiodyka" National Academy of Sciences of Ukraine, 2017, 170 p. (in Russian).
13. 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.
14. Bolshakov V.I. and Fortigin A.A. *Sposob opredeleniya oblasti kompromissa kriteriyev kachestva mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [The field determining method of the quality criteria compromise of multicriteria technology]. *Metaloznavstvo ta termichna obrabotka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016. no. 2, pp. 40–46. (in Russian).
15. 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).
16. Volchuk V.M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovani 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).

Надійшла до редакції 15.05.2019.