

УДК 519.21

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОБЛАСТИ КОМПРОМИССА ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ

ВОЛЧУК В. Н., *д. т. н., доц.*

Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [volchuky@yandex.ua](mailto:volchuky@yandex.ua), ORCID ID : 0000-0001-8717-6786

**Аннотация.** *Цель.* Многие из многопараметрических технологий [1], к которым относится технология производства прокатных валков, направлены, например, на реализацию процесса получения материала с заданно заданными свойствами. Некоторые из этих свойств по своей физической природе могут противоречить друг другу, например, увеличение твердости чугуна или стали противоречит увеличению пластичности и уменьшению хрупкости. В этой связи возникает задача определения области, которую в дальнейшем будем называть областью компромисса. В границах области компромисса противоречия между критериями находятся в допустимых для пользователя пределах. *Материал и методики исследований.* В качестве материала для данного исследования были приняты литые прокатные чугунные валки исполнения СШХН (выборка для 283 плавов общей массой ~ 800 т). При изготовлении валков использовали модификаторы (Foundrisil, Elmag-600, Elmag-900, V1 57 (M), Varinos, Elgraf). *Результаты.* На основании анализа результатов активного и пассивного экспериментов с применением графоаналитического метода определены области с наиболее эффективным сочетанием механических свойств для сортопрокатных валков (области компромисса критериев качества) в зависимости от их химического состава и параметров структуры. Для валков исполнения СШХН область компромисса объединяет области допустимых значений каждого из механических свойств :  $\sigma_B \approx 240 \dots 460$  МПа,  $\sigma_{изг} \approx 330 \dots 940$  МПа,  $KC \approx 9 \dots 33$  кДж/м<sup>2</sup>,  $HSD \approx 40 \dots 60$  с учетом всего диапазона применяемых условий охлаждения в металлической форме. *Научная новизна.* Впервые определена область компромисса с наиболее эффективным сочетанием свойств ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{изг}$ ,  $KC$  и  $HSD$ ) рабочей зоны бочек валков исполнений СШХН по определенным границам содержания компонентов химического состава и параметров структуры. *Практическая значимость.* Реализация этого метода позволяет устанавливать приоритет на комплекс механических свойств валка, прогнозировать изменения технологического процесса и автоматически корректировать его химический состав.

*Ключевые слова:* область компромисса, химический состав, чугун, механические свойства, графит.

## ДО ВИЗНАЧЕННЯ ОБЛАСТІ КОМПРОМІСУ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ МАТЕРІАЛІВ

ВОЛЧУК В. М., *д. т. н., доц.*

Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [volchuky@yandex.ua](mailto:volchuky@yandex.ua), ORCID ID : 0000-0001-8717-6786

**Анотація.** *Мета.* Багато з багатопараметричних технологій [1], до яких належить технологія виробництва прокатних валків, спрямовані, наприклад, на реалізацію процесу одержання матеріалу зі свідомо заданими властивостями. Деякі із цих властивостей за своєю фізичною природою можуть суперечити одна одній, наприклад, збільшення твердості чавуну або сталі суперечить збільшенню пластичності й зменшенню крихкості. У цьому зв'язку виникає завдання визначення області, яку надалі будемо називати областю компромісу. В межах області компромісу протиріччя між критеріями перебувають у припустимих для користувача межах. *Матеріал і методики досліджень.* Як матеріал для даного дослідження були прийняті литі прокатні чавунні валки виконання СШХН (вибірка для 283 плавов загальною масою ~ 800 т). Для виготовлення валків використовували модифікатори (Foundrisil, Elmag-600, Elmag-900, V1 57 (M), Varinos, Elgraf). *Результати.* На підставі аналізу результатів активного і пассивного експериментів із застосуванням графоаналітичного методу визначено області з найбільш ефективним поєднанням механічних властивостей для сортопрокатних валків (області компромісу критеріїв якості) залежно від їх хімічного складу і параметрів структури. Для валків виконання СШХН область компромісу об'єднує області допустимих значень кожної з механічних властивостей :  $\sigma_B \approx 240 \dots 460$  МПа,  $\sigma_{изг} \approx 330 \dots 940$  МПа,  $KC \approx 9 \dots 33$  кДж/м<sup>2</sup>,  $HSD \approx 40 \dots 60$  з урахуванням усього діапазону застосовуваних умов охолодження в металевій формі. *Наукова новизна.* Вперше визначено область компромісу з найбільш ефективним поєднанням властивостей ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{изг}$ ,  $KC$  і  $HSD$ ) робочої зони бочок валків виконань СШХН по певних межах умісту компонентів хімічного складу і параметрів структури. *Практична значимість.* Реалізація цього методу дозволяє встановлювати пріоритет на комплекс механічних властивостей валка, прогнозувати зміни технологічного процесу і автоматично коригувати його хімічний склад.

*Ключові слова:* область компромісу, хімічний склад, чавун, механічні властивості, графіт.

## BY IDENTIFYING AREAS COMPROMISE PERFORMANCE MATERIALS QUALITY

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

Department of Materials Science, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail : [volchuky@yandex.ua](mailto:volchuky@yandex.ua), ORCID ID : 0000-0001-8717-6786

**Summary. Purpose.** Many of multiparameter technologies [1], which relates to the technology of production of rolls, are directed, for example, to implement the process of obtaining a material with a known set properties. Some of these properties by their physical nature may conflict with each other, for example, an increase in the hardness of iron or steel contrary to increase ductility and reduce brittleness. This raises the problem of determining the field, which will be called the area of compromise. Within the boundaries of the field of compromise contradiction between the criteria are valid for the user limits. **Material and methods of research.** The material for this study were taken cast iron mill rolls execution SSHHN (283 heats the sample to a total weight of 800 tons). In the manufacture of rolls used modifiers (Foundrisil, Elmag-600, Elmag-900, V1 57 (M), Barinoc, Elgraf). **Findings.** Based on the analysis results of the active and passive experiments with graphoanalytical method identifies areas with the most effective combination of mechanical properties for section rolling rolls (area compromise quality criteria), depending on their chemical composition and structure parameters. To roll performance SSHHN region compromise combines the tolerance range of each of the mechanical properties: tensile strength 240...460 MPa, flexural strength 330...940 MPa, resilience 9...33 kJ / m<sup>2</sup>, Shore hardness 40...60 taking into account the full range of cooling conditions used in metallic form. **Originality.** For the first time defined the area of compromise with the most effective combination of mechanical properties working area roll barrels performances SSHHN on certain borders of components of the chemical composition and structure parameters. **Practical value.** The implementation of this method allows you to set the priority of the complex mechanical properties of the roll, to predict changes the process and automatically adjust its chemical composition.

*Keyword* : compromise area, chemical composition, cast iron, the mechanical properties, graphite.

### Введение

Многие из многопараметрических технологий [1], к которым относится технология производства прокатных валков, направлены, например, на реализацию процесса получения материала с заданно заданными свойствами. Некоторые из этих свойств по своей физической природе могут противоречить друг другу, например, увеличение твердости чугуна или стали противоречит увеличению пластичности и уменьшению хрупкости. В этой связи возникает задача определения области, которую в дальнейшем будем называть областью компромисса. В границах области компромисса противоречия между критериями находятся в допустимых для пользователя пределах [2].

По поводу реализации этапа, направленного на определение области компромисса механических свойств для материала исследуемых валков, следует отметить, что большинство критериев, которые характеризуют работоспособность и эффективность технологии, задаются ДСТУ, штатной технологией и другими нормативными документами в допустимых пределах. Вероятно, это продиктовано тем, что разработчики нормативных документов стремятся выдержать технологический процесс, насколько это возможно, в конкретно выбранной части рабочей области параметров технологии.

### Материал и методики исследований

В качестве материала для данного исследования были приняты литые прокатные чугунные валки исполнения СШХН (выборка для 283 плавов общей массой ~ 800 т). Сортопрокатные (С) чугунные валки с шаровидной формой графита (Ш) легируют хромом (Х) и никелем (Н) для повышения их служебных характеристик, в частности, твердости и износостойкости. Валки исполнения СШХН (СШХН-41, СШХН-45, СШХН-47, СШХН-50) имели следующий химический состав: 3,00...3,40 % С, 1,45...1,80 % Si, 0,45...0,65 % Mn, 0,040...0,200 % P, 0,004...0,010 % S, 0,60...0,90 % Cr, 0,70...1,30 % Ni, 0,035...0,056 % Mg, 9...25 % карбидов, 0,5...2,5 % шаровидного графита, диаметр шаровидного графита составлял 45...180 единиц по шкале ШГд. Благодаря легированию хромом, никелем и молибденом эти валки получили широкое распространение в металлургическом производстве и эксплуатируются на обжимных, чистовых и предчистовых станах, требующих от валков высокой прочности. При изготовлении валков использовали модификаторы (Foundrisil, Elmag-600, Elmag-900, V1 57 (M), Barinoc, Elgraf).

Механические свойства ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{изг}$ , КС и HSD) определялись для рабочей зоны бочек литых сортопрокатных чугунных валков исполнения СШХН (глубиной до ~50 мм) с гладкой бочкой на стандартизованном оборудовании : машина испытательная «INSTRON», маятниковый копер ПСВ 5, машина испытательная ЦД-40, твердомер –

склероскоп Шора. Образцы для механических испытаний вырезали в тангенциальном направлении с поверхностного слоя отливок к чугунным валкам.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение**

На основании анализа результатов активного и пассивного экспериментов с применением

графоаналитического метода определены области с наиболее эффективным сочетанием механических свойств для сортопрокатных валков (области компромисса критериев качества) в зависимости от их химического состава и параметров структуры [3–13], которые приведены на рисунке.

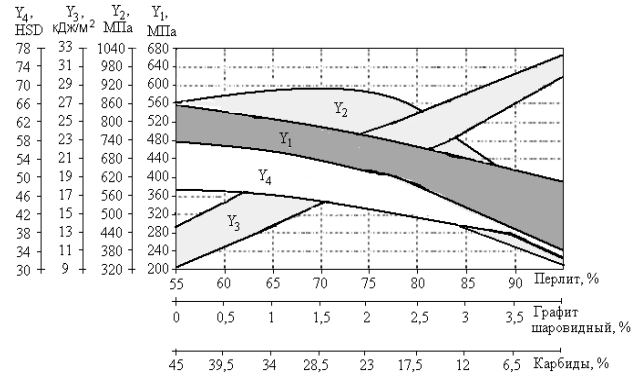
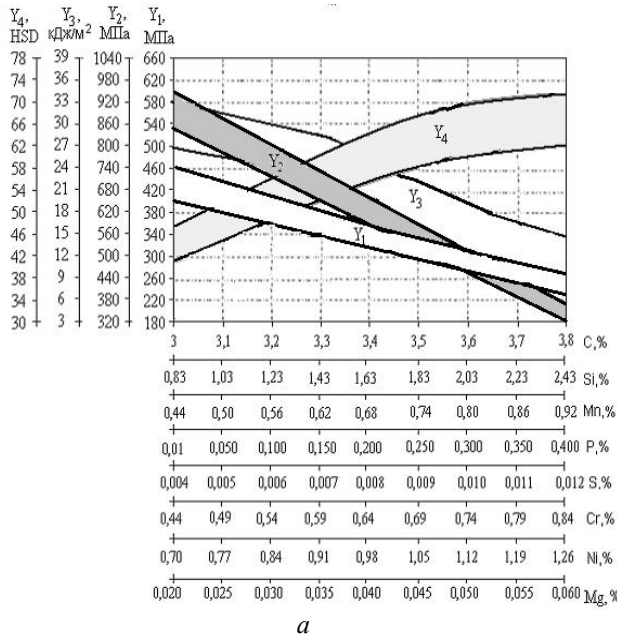


Рис. Области с наиболее эффективным сочетанием механических свойств сортопрокатных валков (области компромисса) с шаровидной формой графита в зависимости от химического состава (а) и параметров структуры (б) / Fig. Areas with the most effective combination of mechanical properties of the section rolling rolls (compromise area) with spherical graphite form depending on the chemical composition (a) and structure parameters (b)

Для валков исполнения СШХН (рис.) эта область объединяет области допустимых значений каждого из механических свойств :  $\sigma_B \approx 240...460$  МПа ( $Y_1$ ),  $\sigma_{изг} \approx 330...940$  МПа ( $Y_2$ ),  $KC \approx 9...33$  кДж/м<sup>2</sup> ( $Y_3$ ),  $HSD \approx 40...60$  ( $Y_4$ ) с учетом всего диапазона применяемых условий охлаждения в металлической форме. Средний разброс экспериментальных значений по химическому составу для валков исполнения СШХН составил  $\pm 0,22$  % по массе, а средний разброс значений прогнозируемого состава –  $\pm 0,24$  % по массе. При этом погрешность значений механических свойств валков исполнения СШХН, определенных путем натурных испытаний, не превышает 4,6 %, а погрешность прогнозируемых значений этих свойств – не превышает 7,8 %.

В валках диаметром от 300 до 1 100 мм с перлитно-графитно-цементитным рабочим слоем концентрацию углерода следует понижать до  $< 2,8$  %. Это обусловлено тем, что большая часть углерода идет на создание графитных включений и поэтому увеличение его содержания ведет к снижению и прочности и пластичности. Связанный углерод при содержании до 1,2 % в легированном чугуне повышает твердость и прочность, стабилизирует перлит, увеличивает количество основной

упрочняющей фазы и повышает твердость и снижает пластичность. Показано влияние углерода в пределах 2,6–3,6 % на механические свойства рабочего слоя бочек. Увеличение содержания углерода (рис. а) снижает прочностные показатели и ударную вязкость: прочность на изгиб уменьшилась с 940 до 330 МПа, а ударная вязкость – с 33 до 9 кДж/м<sup>2</sup> в рассматриваемом интервале значений химического состава и параметров структуры.

Повышение содержания углерода на каждые 0,1 % приводит к снижению прочностных характеристик до 20 МПа, что на 3...5 единиц меньше, чем для валков исполнения СПХН. Присадка магния оказывает обессеривающее, раскисляющее и карбидизирующее воздействие на валковые расплавы, а при его содержании  $\geq 0,03$  % приводит к образованию графитных включений шарообразной формы, повышает износостойкость, термостойкость и прочность валков. Показано влияние присадки магния при его содержании от 0,03 до 0,056 %. При содержании кремния 0,2...0,4 % его используют в качестве достижения необходимой степени графитизации валков. При увеличении концентрации до 2,4 % он укрепляет

феррит и уменьшает количество углерода в перлите, что приводит к уменьшению прочности. При содержании никеля до 1,3 % он легирует феррит и уменьшает включения графита в серой зоне и перлитно-графитно-цементитном рабочем слое и таким образом снижает твердость, но повышает прочность и износостойчивость чугуновых валков.

На повышение ударной вязкости положительно влияет легирование никелем в пределах 1,12...1,26 % масс., который заметно измельчает металлическую матрицу валков, придавая ей структуру тонкого перлита. При совместном влиянии с хромом никель повышает твердость валков, а в количествах до 1 % повышает прочность и износостойкость валков. Фосфор уменьшает показатели прочности валков благодаря появлению твердых и хрупких фосфидных эвтектик:  $Fe_3P-Fe_3C$ , нарушающих сплошность металлической матрицы. Чтобы не допустить понижение показателей прочности, содержание фосфора в валках допускают до 0,5 %. Сера образует тугоплавкие соединения с марганцем, магнием и кислородом. Повышение ее содержания уменьшает прочность чугуна, но способствует повышению глубины отбела, твердости и хрупкости валков. В отбеленных валках содержание не должно превышать 0,1 %. При этом содержание серы составляло 0,008 % масс.

Повышение количества пластинчатого перлита в структуре валков до 90 %, при содержании до 6,5 %

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Большаков В. І. Етапи ідентифікації багатопараметричних технологій та шляхи їх реалізації / В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // Вісник НАН України. – 2013. – № 8. – С. 66–72.

Bolshakov V. I. Etapy identyfikatsiyi bahatoparametrychnykh tekhnolohiy ta shlyakhy yikh realizatsiyi / V. I. Bolshakov, V. N. Volchuk, Yu. I. Dubrov // Visnyk NAN Ukrayiny. – № 8. – 2013. – Pp. 66–72.

<http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/67873>

2. Большаков В. І. Способ определения области компромисса критериев качества многокритериальных технологий / В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров / Свідотство про реєстрацію авторського права України на твір № 53769 від 18.02.2014 р. – 5 с.

Bolshakov V. I. Sposob opredeleniya oblasti kompromissa kriteriev kachestva mnogokriterial'nyh tehnologiy / V. I. Bolshakov, V. N. Volchuk, Yu. I. Dubrov / Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskogo prava na tvir № 53769 vid 18.02.2014.

[http://sips.gov.ua/ua/authors\\_rights.html](http://sips.gov.ua/ua/authors_rights.html)

3. Мерло О. Е. Качество чугуновых прокатных валков / О. Е. Мерло. – Москва : Металлургия, 1966. – 247 с.

Merlo O. Ye. Kachestvo chugunnykh prokatnykh valkov / O. Ye. Merlo. – Moskva : Metallurgiya, 1966. – 247 p.

[http://www.visnyk-nanu.org.ua/archive/2015\\_9](http://www.visnyk-nanu.org.ua/archive/2015_9)

4. Бунин И. Н. Металлография чугуна / И. Н. Бунин. – Москва : Металлургиздат, 1962. – 392 с.

Bogachev I. N. Metallografija chuguna. – Moskva : Metallurgizdat, 1962. – 392 p.

[http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vpabia\\_2014\\_5\\_5.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vpabia_2014_5_5.pdf)

карбидов приводит к возрастанию показателей ударной вязкости до 33 кДж/м<sup>2</sup> (рис. б).

#### Научная новизна

Впервые определена область компромисса с наиболее эффективным сочетанием механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{изг}$ , КС и HSD) рабочей зоны бочек сортопрокатных чугуновых валков исполнений СШХН (СШХН-41, СШХН-45, СШХН-47, СШХН-50) по определённым границам содержания компонентов химического состава и параметров структуры (% содержания шаровидного графита, пластинчатого перлита и карбидов).

#### Практическая значимость

Реализация этого метода позволяет устанавливать приоритет на комплекс механических свойств валка, прогнозировать изменения технологического процесса и автоматически корректировать его химический состав.

Даны рекомендации в действующие заводские ТУ по наиболее эффективному сочетанию механических свойств  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{изг}$ , КС и HSD по определённым границам содержания компонентов химического состава.

5. Кривошеев А. Е. Литые валки / А. Е. Кривошеев. – Москва : Металлургиздат, 1957. – 360 с.  
Krivosheev A. E. Litye valki / A. E. Krivosheev. – Moskva : Metallurgizdat, 1957. – 360 p.

<http://nmetau.edu.ua/ru/mdiv/i2018/p49>

6. Гуляев А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – Москва : Металлургия, 1986. – 544 с.

Gulyayev A. P. Metallovedeniye / A. P. Gulyayev. – Moskva : Metallurgiya, 1986. – 544 p.

<http://lib-bkm.ru/load/2-1-0-2109>

7. Metals Reference Book / ed. Colin J. Smithells. Butterworths, 1976. – 1566 p.

<http://www.worldcat.org/title/metals-reference-book/oclc/62743363?ht=edition&referer=di>

8. Бунин К. П. Строение чугуна / К. П. Бунин, Ю. Н. Таран. – Москва : Металлургия, 1972. – 160 с.

Bunin K. P. Stroenie chuguna / K. P. Bunin, Ju. N. Taran. – Moskva : Metallurgija, 1972. – 160 p.

[http://cgntb.dp.ua/menu\\_157.html](http://cgntb.dp.ua/menu_157.html)

9. Лахтин Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва : Машиностроение, 1990. – 528 с.

Lakhtin Yu. M. Materialovedeniye / Yu. M. Lakhtin, V. P. Leont'yeva. – Moskva : Mashinostroyeniye, 1990. – 528 p.

<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D1%83%D0%B3%D1%83%D0%BD>

10. Durand-Charre, M. Microstructure of steels and cast irons / M. Durand-Chaire. Springer, 2004. – 404 p.

<http://www.springer.com/us/book/9783540209638>

11. Berns H., Theisen W. Ferrous Materials: Steel and Cast Iron / H. Berns, W. Theisen. Springer, 2008. – 418 p.

<https://books.google.com.ua/books?id=6ZgvRtOvMvUC&r>

12. Joseph R. D. Cast Irons / R. D. Joseph. ASM International, 1996. – 494 p.

[https://books.google.com.ua/books/about/Cast\\_Irons.html?id=NbgtNLo7jhwC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ua/books/about/Cast_Irons.html?id=NbgtNLo7jhwC&redir_esc=y)

13. Elliott R. Cast iron technology / R. Elliott. Butterworths, 1988. – 244 p.

[https://books.google.com.ua/books/about/Cast\\_iron\\_technology.html?id=xwpUAAAAMAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ua/books/about/Cast_iron_technology.html?id=xwpUAAAAMAAJ&redir_esc=y)

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); д-ром техн. наук, проф. Ю. И. Дубровым (Украина)*

Статья поступила в редколлегию 3.09.2015