

УДК 519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240418.10.261

РАНЖИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА

ВОЛЧУК В. Н.^{1*}, д. т. н., доц.,
 ДУБРОВ Ю. И.², д. т. н., проф.,
 БОЛЬШАКОВ В. И.³, д. т. н., проф.

^{1*} 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: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

² 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: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

³ 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: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

Аннотация. Постановка задачи. В основном, ранжирование критериев качества материалов проводится согласно их служебному назначению. Однако при этом не учитывается область их стабильности, которая не всегда может совпадать с определяющим параметром согласно выдвигаемым требованиям. Ранжирование критериев по их важности должно гарантировать стабильную работу технологии в пределах, заданных нормативными документами. **Результаты и их обсуждение.** Предложено решать задачу ранжирования при помощи фрактального подхода: в зависимости от величины области самоподобия определяющего параметра можно производить ранжирование критериев. При этом область самоподобия определялась стабильностью определяющего параметра в минимальных пределах изменений. Путем сравнения относительных величин областей самоподобия определяющих параметров критериев выбирался тот критерий, у которого область самоподобия определяющего параметра относительно больше, чем у остальных критериев. Определены коэффициенты самоподобия для механических свойств чугунов валков СПХН. Установлено, что коэффициент самоподобия для $K_{св}$ равен 0,42, $K_{свзг} = 0,54$, $K_{КС} = 0,68$ и $K_{НСД} = 0,43$. Этот факт свидетельствует о более устойчивом характере функционирования технологии производства чугунных валков при выборе предпочтения к одному из рассматриваемых критериев качества. **Выводы.** Предложенная методика позволяет в зависимости от величины области самоподобия определяющего параметра оценивать степень значимости критериев качества чугунов валков.

Ключевые слова: ранжирование; критерии качества; определяющий параметр; область самоподобия; структура; фрактальный подход

РАНЖУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ МЕТАЛУ

ВОЛЧУК В. М.^{1*}, д. т. н., доц.,
 ДУБРОВ Ю. І.², д. т. н., проф.,
 БОЛЬШАКОВ В. І.³, д. т. н., проф.

^{1*} Кафедра металознавства 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

² Кафедра металознавства 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: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

³ Кафедра металознавства 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: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

Анотація. Постановка завдання. В основному, ранжування критеріїв якості матеріалів проводиться відповідно до їх службового призначення. Однак при цьому не враховується область їх стабільності, яка не завжди може збігатися з визначальним параметром згідно з висунутими вимогами. Ранжування критеріїв за їх важливістю повинно гарантувати стабільну роботу технології в межах, заданих нормативними документами. **Результати та їх обговорення.** Запропоновано виконувати завдання ранжування за допомогою фрактального підходу: залежно від величини області самоподібності визначального параметра можна проводити ранжування критеріїв. При цьому область самоподібності визначального параметра можна проводити ранжування критеріїв. При цьому область самоподібності визначального параметра визначалася стабільністю визначального параметра в мінімальних межах змін. Шляхом порівняння відносних величин областей самоподібності визначальних параметрів критеріїв вибирався той критерій, у якого область самоподібності визначального параметра відносно більша, ніж в інших критеріїв. Визначено коефіцієнти самоподібності для механічних властивостей

чавунних валків СПХН. Установлено, що коефіцієнт самоподібності для K_{σ_B} рівний 0,42, $K_{\sigma_{згин}} = 0,54$, $K_{K_C} = 0,68$ та $K_{HSD} = 0,43$. Цей факт свідчить про більш стійкий характер функціонування технології виробництва чавунних валків при виборі переваги до одного з розглянутих критеріїв якості. **Висновки.** Запропонована методика дозволяє залежно від величини області самоподібності визначального параметра оцінювати ступінь значущості критеріїв якості чавунних валків.

Ключові слова: ранжування; критерії якості; визначальний параметр; область самоподібності; структура; фрактальний підхід

THE RANKING OF THE QUALITY CRITERIA OF THE METAL

VOLCHUK V.M.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), As. Prof.*,
DUBROV Yu.I.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BOL'SHAKOV V.I.³, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

¹ Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

² Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

³ Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

Abstract. Formulation of the problem. Basically, the ranking of the quality criteria of materials is carried out according to their official purpose. However, this does not take into account the area of their stability, which may not always coincide with the determining parameter according to the requirements put forward. The ranking of criteria according to their importance should ensure the stable operation of the technology within the limits specified by regulatory documents. **Results and discussion.** It is proposed to solve the ranking problem with the help of the fractal approach: depending on the size of the self-similarity domain of the determining parameter, the criteria can be ranked. At the same time, the region of self-similarity was determined by the stability of the determining parameter in the minimum limits of change. By comparing the relative values of the self-similarity domains of the determining parameters of the criteria, the criterion was chosen whose self-similarity domain of the determining parameter is relatively larger than that of the other criteria. The coefficients of self-similarity for the mechanical properties of the SPHN cast iron rolls are determined. It was established that the coefficient of self-similarity for K_{σ_B} is equal to 0,42, $K_{\sigma_{згин}} = 0,54$, $K_{K_C} = 0,68$ and $K_{HSD} = 0,43$. This fact testifies to a more stable character of the functioning of the production technology of cast iron rolls when choosing a preference for one of the considered quality criteria. **Conclusions.** The proposed method allows, depending on the size of the self-similarity region of the determining parameter, to assess the degree of significance of the quality criteria for cast iron rolls.

Keywords: ranging; quality criteria; determining parameter; self-similarity; structure; fractal approach

Постановка задачі

На сьогоднішній день остро стоїть проблема оперативної оцінки якості масивних металічних отливок, в частині, прокатних валків. Аналіз традиційних методів прогнозу їх якості, включаючи неразрушуючий контроль, кількісну металлографію, аналіз математических моделей, базуючихся, в основному, на статистических даних, показали, що ці методи порівняно затратні і нерідко приводять до результатам, розходящимся з вимогами нормативних документів. Це пов'язано з тим, що реалізувати найбільш очевидний, детермінований підхід, застосовуваний для оцінки механіческих властивостей валків, оснований на аналізі причинно-слідственних зв'язів і відношень, не представляється можливим, оскільки технологія їх виробництва є багатопараметрическою і багатокритеріальною [1–4]. Внаслідок цього, на якість металу впливає значительне вплив

большое количество параметров технологии (химического состава, легирующих элементов, условий охлаждения и т. д.), сильно взаимосвязанных между собой.

Даже незначительное изменение части этих переменных существенно изменяет свойства металла в относительно широком диапазоне. Задача идентификации качества целевого продукта осложняется еще и тем, что по своей физической природе некоторые критерии, зачастую, противоречат друг другу. Улучшая один критерий, мы часто ухудшаем другой. Большинство альтернативных критериев назначаются в допустимых, относительно малых интервалах, оказывающих сравнительно небольшое влияние на величину этих критериев. Вероятно, это продиктовано тем, что разработчики технологического процесса, стремясь выдержать его, насколько это возможно, в конкретно заданной области параметров технологии, устанавливают предельные значения этих критериев.

В этой связи возникает задача ранжирования по значимости критериев качества многопараметрических технологий. До недавнего времени, в основном, ранжирование критериев качества материалов проводилось согласно их служебному назначению. Однако при этом не учитывалась область их стабильности, которая не всегда может совпадать с определяющим параметром согласно требованиям заказчика. Ранжирование критериев по их важности для многопараметрической технологии должно гарантировать ее стабильную работу в пределах, заданных нормативными документами.

Задача может решаться при помощи фрактального формализма, где в зависимости от величины области самоподобия определяющих параметров можно производить ранжирование критериев. При этом область самоподобия определяется стабильностью определяющего параметра в минимальных пределах изменений.

При определении области самоподобия используются принципы теории фракталов [5–13]. Применение фрактального формализма при идентификации объектов исследования до настоящего времени осуществляется, в основном, на микроуровне, где величина области самоподобия способствует выявлению диапазона минимально изменяющейся величины определяющего параметра.

Диапазон самоподобия оценивается масштабом представления структуры, при котором фрактальные размерности элементов минимально различаются [14–16]. Подобный подход связан с определенными временными и другими затратами.

В настоящей работе в качестве примера приводится оценка степени значимости критериев качества многопараметрической технологии производства сортопрокатных чугуновых валков, в зависимости от величины области самоподобия определяющего параметра. Такой подход позволяет применять его для ранжирования критериев качества широкого спектра различных многопараметрических технологий.

Результаты и их обсуждение

В качестве объекта идентификации рассматривались чугуновые сортопрокатные (С) валки с пластинчатой формой графита (П), легированные хромом (Х) и никелем (Н), исполнения СПХН (СПХН-41, СПХН-43, СПХН-45, СПХН-49, СПХН-51, СПХН-60 и СПХН-65) с гладкой поверхностью бочек. На рисунке 1 показана структура валкового чугуна, не подвергнутого термической обработке. Плавка металла для отливки валков осуществлялась в печах ИЧТ-6, ИЧТ-20.

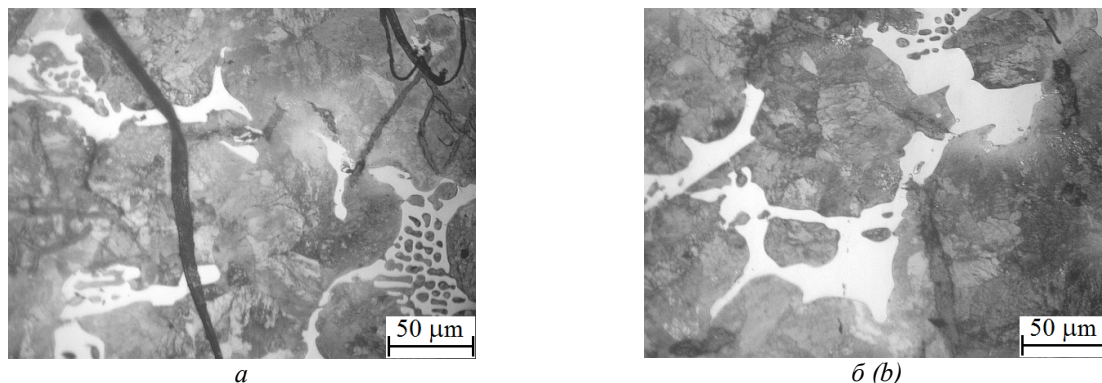


Рис. 1. Структура рабочего слоя бочек чугуновых валков СПХН-45 (а) и СПХН-49 (б) на расстоянии 10 мм от поверхности: колонии ледебурита, графитной эвтектики, перлитная матрица, травление HNO_3 / Fig. 1. Structure of the working layer of cast iron roll barrels SPHN-45 (a) and SPHN-49 (b) at the distance of 10 mm from the surface: colonies of ledeburite, graphite eutectic, pearlite matrix, HNO_3 etching

В рабочей зоне бочек валков исполнения СПХН количество карбидов в виде цементита ледебуритной эвтектики изменялось от 8 до 37 %, что соответствует эталону Ц25 согласно ГОСТ 3443. Содержание пластинчатого графита, который следует одновременно рассматривать как структурную составляющую, неметаллическое включение, изменялось приблизительно от 0 до 3 %, что соответствует баллу ПГ2, с длиной пластин, оцениваемых баллами ПГД45÷ПГД180. Анализ микроструктуры литых валков вследствие изменения их химического состава позволил зафиксировать изменения формы графитных включений в

относительно узких пределах: с ПГф1 до ПГф2; распределения включений графита с ПГр1 до ПГр2. Площадь, занимаемая пластинчатым перлитом, составляла 60...85 %, что соответствует эталонам П70 и П85 соответственно.

Механические свойства валкового чугуна (предел прочности на разрыв – σ_B , предел прочности на изгиб – $\sigma_{изг}$, ударная вязкость – КС, твердость – HSD) согласно ГОСТу 27208 определяли с применением испытательной машины INSTRON, маятникового копра ПСВ 5, машины испытательной ЦД-40, склероскопа Шора. Из литых проб отбирались заготовки, из которых изготавливались образцы для

натурных испытаний. Образцы вырезались из рабочей зоны гладких металлических бочек валков в тангенциальном направлении, а также изготавливались из отдельно отлитых проб в отливках – образцов-свидетелей. Ударная вязкость чугуна определялась на образцах без надреза размером 10 × 10 × 55 мм.

Для оценки уровня прочности при изгибе использовались образцы 10 × 10 × 90 мм, а при испытаниях на растяжение – образцы диаметром 25 мм, при расчетной длине 50 мм. В таблице приведены механические свойства исследуемых валков.

Таблица

Механические свойства чугунных валков / Mechanical properties of the cast iron rolls

№ п/п	Исполнение валка	σ_B , МПа	$\sigma_{изг}$, МПа	КС, кДж/м ²	HSD
1	СПХН-43	330	670	14	45
2	СПХН-49	320	440	15	51
3	СПХН-45	370	480	17	46
4	СПХН-45	420	600	19	47

В результате статистического анализа в работе использовались данные по результатам натурных испытаний тангенциальных образцов. Выборка осуществлялась по 320 плавкам общей массой ~900 т для валков исполнения СПХН, отлитых на ПАО ДЗПВ (г. Днепро) [17].

Рабочие области критериев, в зависимости от их химического состава согласно ТУ У 14-2-1188-97 (рис. 2), определялись графоаналитическим методом, заключающимся в нормированном представлении переменных, величина которых приведена в

процентах, см., к примеру, [18–21]. Области значений механических свойств регулировались параметрами технологии: скоростью отвода тепла при остывании валков, способом изготовления – литье в песчаную форму, металлическую, центробежное литье и т. д.

На рисунке 2 приведены рабочие области механических свойств валков с учетом всего диапазона применяемых условий охлаждения в металлической форме.

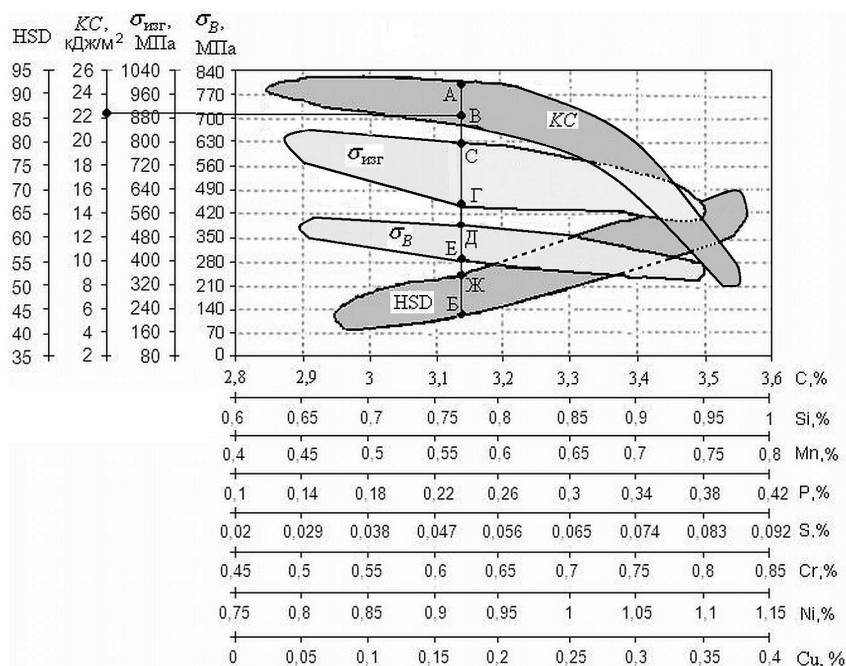


Рис. 2. Рабочая область механических свойств валков исполнения СПХН: $\sigma_B \approx 220...380$ МПа, $\sigma_{изг} \approx 390...840$ МПа, КС $\approx 8...25$ кДж/м², HSD $\approx 40...70$ / Fig. 2. Effective range of the mechanical properties of the rolls SPHN: $\sigma_B \approx 220...380$ МПа, $\sigma_{изг} \approx 390...840$ МПа, КС $\approx 8...25$ кДж/м², HSD $\approx 40...70$ [16]

В ходе анализа рабочего слоя бочек (до ~50 мм) в рассматриваемом интервале элементов химического состава и параметров структуры установлено следующее. Увеличение содержания углерода от 2,9 до 3,5 % в рабочем слое валков (рис. 2) приводит к увеличению и укрупнению числа графитных включений, которые ослабляют металлическую перлитную матрицу. Этот факт обуславливает снижение прочности и ударной вязкости: показатели σ_B уменьшаются с 380 до 220 МПа; показатели $\sigma_{изг}$ – с 840 до 390 МПа, а показатели КС – с 25 до 8 кДж/м².

Относительно высокие показатели прочности и ударной вязкости наблюдаются у валкового чугуна с содержанием до 3 % углерода и до 0,5 % кремния, который вызывает интенсивную графитизацию чугуновых расплавов в отличие от углерода. При этом содержание легирующих элементов остается относительно невысоким: 0,45...0,55 % Cr и 0,75...0,85 % Ni. Как показано в работе [2], такое соотношение хрома и никеля обеспечивает повышение твердости по сечению валка с одновременным понижением хрупкости. Повышение твердости от 38 до 68 единиц Шора сопровождается, во всех случаях, снижением прочностных свойств на изгиб и разрыв, что также обусловлено изменением содержания связанного углерода с 0,8 до 1,2 %.

На ударную вязкость благоприятно влияет возрастание никеля от 0,75 до 1,15 % и уменьшение содержания фосфора до 0,31 %. При больших диаметрах бочек валков твердость снижалась на 2...3 единицы, а при малых – повышалась на 1,0...1,5. При прочих равных условиях это объясняется снижением или повышением скорости охлаждения соответственно при увеличении или уменьшении массы валка [2].

Валки исполнения СПХН-49 с диаметром бочки 940 мм и СПХН-45 с \varnothing 920 мм, изготавливаемые для чистовых и предчистовых клетей крупносортовых, рельсобалочных и непрерывнозаготовочных станов, благодаря невысокой скорости охлаждения имеют низкое содержание карбидной составляющей – 8 и 11 % соответственно. При этом твердость валка СПХН-49 составила 51–53 HSD, а валка СПХН-45 – 47 HSD, так как углерод наряду с карбидом железа образует графит (до 3 %). Валок исполнения СПХН-45 с диаметром бочки 1 000 мм имеет твердость рабочей зоны металлической бочки 54 HSD. Как отмечалось в работе [2], дальнейшее повышение показателей твердости за счет увеличения содержания углерода и скорости охлаждения в производственных условиях ограничено и дальнейший рост твердости валков возможен только за счет легирования.

Приведенный на рисунке 2 график оценки качества рабочих областей чугуна делает возможным выбор значений конкретного механического свойства. При предпочтении к одному из рассматриваемых свойств валков,

например к ударной вязкости (точка *B* на рисунке 2) и проведении вертикали *AB* прогнозируется химический состав изделия и интервал существования его механических свойств. Как следует из этого рисунка, критерий $\sigma_{изг}$ изменяется в пределах от 580 до 800 МПа (отрезок *CT*); σ_B – в пределах 290...380 МПа (отрезок *DE*); HSD – в пределах 43...52 единиц (отрезок *ЖБ*). Химсостав валка принимает следующие значения: 3,14 % C, 0,77 % Si, 0,57 % Mn, 0,236 % P, 0,051 % S, 0,62 % Cr, 0,92 % Ni, 0,17 % Cu.

Область самоподобия нормированных оценок механических свойств валков исполнения СПХН для $\sigma_B = (380...220)/380 = 0,42$, т. е. коэффициент самоподобия K_{σ_B} равен, соответственно, 0,42. Для остальных рассматриваемых показателей качества этот показатель составил: $K_{\sigma_{изг}} = 0,54$; $K_{КС} = 0,68$ и $K_{HSD} = 0,43$.

Твердость, она имеет более низкий показатель области самоподобия – 0,43. В этой связи показатель самоподобия для твердости, как и показатель области самоподобия для прочности на разрыв, – 0,42, менее чувствительны к изменениям химического состава, по сравнению с показателем самоподобия для вязкости – 0,68. Данные показатели качества легче удержать в областях их самоподобия, чем остальные показатели, при возможных изменениях параметров технологии.

При этом ударная вязкость имеет более высокий диапазон изменения области самоподобия среди рассматриваемых областей. Это указывает на то, что ударная вязкость наиболее чувствительна к изменениям штатной технологии в пределах рабочей области по сравнению с остальными характеристиками.

Поскольку вязкость валков играет важную роль в служебных характеристиках валкового чугуна, постольку можно предполагать, что для получения валка с заданным показателем вязкости необходимо задавать более узкий диапазон изменения химического состава.

Выводы

Показано, что каждый из показателей ранжирования механических свойств прокатных чугуновых валков исполнения СПХН, рассчитанный на основании анализа рабочей области их существования в рамках штатной технологии производства, представляет собой интегральную оценку влияния параметров.

Предложенный на основании теории фракталов подход позволяет гарантировать стабильные показатели качества с минимальными отклонениями в рамках принятой технологии и свидетельствует о перспективах его использования при идентификации многопараметрических технологий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография / [Ю. Дубров, В. Большаков, В. Волчук]. – Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 236 с. – Режим доступа : <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
2. Прокатные валки из высокоуглеродистых сталей : монография / [Т. С. Скобло, Н. М. Воронцов, Н. А. Будагянц и др.]. – Москва : Металлургия, 1994. – 336 с.
3. 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.
4. 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 доступа : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>
5. Журавель І. М. Вибір налаштувань під час обчислення поля фрактальних розмірностей зображення / І. М. Журавель // *Науковий вісник НЛТУ України* – 2018. – Т. 28. – № 2. – С. 159–163. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15421/40280230>
6. Zhuravel' I. M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions / I. M. Zhuravel', L. M. Svirs'ka // *Materials Science*. – 2010. – Vol. 46. – № 3. – Pp. 418–420.
7. Volchuk V. I. 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 доступа : <https://hrcak.srce.hr/202359>
8. Mandelbrot B. V. *The Fractal Geometry of Nature* : monograph / [B. V. Mandelbrot]. – New-York, San Francisco : Freeman, 1982. – 480 p. – Режим доступа : <http://www.amazon.com/Fractal-Geometry-Nature-Benoit-Mandelbrot/dp/0716711869>
9. Основы организации фрактального моделирования : монография / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров]. – Киев : Академперіодика НАН України, 2017. – 170 с.
10. Большаков В. И. Организация фрактального моделирования / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Доповіді НАН України*. – 2018. – № 6. – С. 67–72. – Режим доступа : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.06.067>
11. Большаков В. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Доповіді НАН України*. – 2008. – № 11. – С. 99–107. – Режим доступа : <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2008-11/08-11-17.pdf>
12. Большаков В. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Доповіді НАН України*. – 2017. – № 4. – С. 42–48. – Режим доступа : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.04.00>
13. Большаков В. И. Фрактальный подход при идентификации сложных систем / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Доповіді НАН України*. – 2017. – № 6. – С. 46–50. – Режим доступа : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.06.00>
14. *Fractals and properties of materials* : monograph / [V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov]. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p. – Режим доступа : <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
15. Пути применения теории фракталов : монография / [В. Большаков, В. Волчук, Ю. Дубров]. – Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2016. – 146 с. – Режим доступа : <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
16. Большаков В. И. Фракталы в материаловедении : учебное пособие / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров]. – Днепропетровск : ПГАСА, 2006. – 253 с.
17. Литые валки : монография / [А. Е. Кривошеев]. – Москва : Металлургиздат, 1957. – 360 с.
18. 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 доступа : <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>
19. Большаков В. И. Этапы ідентифікації багатопараметричних технологій та шляхи їх реалізації / В. И. Большаков, В. М. Волчук, Ю. И. Дубров // *Вісник НАН України*. – 2013. – № 8. – С. 66–72. – Режим доступа : <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/67873>
20. 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 доступа : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
21. Большаков Вад. І. Системний аналіз технології виробництва масивного металевого лиття / Вад. І. Большаков, В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // *Вісник НАН України*. – 2015. – № 9. – С. 69–73. – Режим доступа : <http://dx.doi.org/10.15407/visn2015.09.069>

REFERENCES

1. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. (in Russian).
2. Skoblo T.S., Vorontsov N.M., Budagyants N.A. and others. *Prokatnyye valki iz vysokouglerodistykh staley* [Rolling rolls made of high-carbon steels]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1994, 336 p. (in Russian).
3. 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]. *Metaloznaustvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013. no. 4. pp. 5–11. (in Russian).

4. 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 Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).
5. Zhuravel' I.M. *Vybir nalashтуvan pid chas obchyslennya polya fraktal'nykh rozmirnostey zobrazhennya* [The choice of parameters when calculating the fractal dimension of the image] *Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny* [Scientific Bulletin of UNFU]. 2018, vol. 28, no 2, pp. 159-163. (in Ukrainian).
6. Zhuravel' I.M. and Svir'ska L.M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions. *Materials Science*, 2015, vol. 46, no 3, pp. 418–420.
7. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S. and 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. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. New-York, San Francisco : Freeman, 1982, 480 p.
9. Bol'shakov 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).
10. Bol'shakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Organizatsiya fraktal'nogo modelirovaniya* [Organization of fractal modeling]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2018, no. 6, pp. 67–72. (in Russian).
11. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Osobennosti primeneniya mul'tifraktal'nogo formalizma v materialovedenii* [Features of the multifractal formalism in materials]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2008, no. 11, pp. 99–107. (in Russian).
12. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Topologicheskiye i fraktal'nyye invarianty struktury dlya otsenki kachestva metalla* [Topological and fractal invariants of a structure to assess the quality of a metal]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 4, pp. 42–48. (in Russian).
13. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Fraktal'nyy podkhod pri identifikatsii slozhnykh sistem* [Fractal approach to the identification of complex systems]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 6, pp. 46–50. (in Russian).
14. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
15. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Puti primeneniya teorii fraktalov* [Ways of applying the theory of fractals]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2016, 146 p. (in Russian).
16. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Fraktaly v materialovedenii* [Fractals in materials]. Dnepropetrovsk : PSACEA, 2005, 253 p. (in Russian).
17. Krivocheev A.E. *Cast rolls*. Moscow: Metallurgy, 1957, 360 p. (in Russian).
18. 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).
19. 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).
20. 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).
21. Bol'shakov Vad.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnytstva 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).

Поступила в редакцію 13.03.2018

Принята к печати 17.03.2018