

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.010920.60.655

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СТАЛІ S420M НА ПОКАЗНИКИ МІЦНОСТІ

ІВАНЦОВ С. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
НЕСВЕТОВА А. С.², бак.,
КУШНІР Н. О.³, бак.

^{1*} 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: serhii.v.ivantsov@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

² 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: nesvetovaanastasia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6871-7452

³ 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: nadiakushniir@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5616-669X

Анотація. *Вступ.* Дослідження впливу хімічного складу матеріалів на їх механічні властивості частіше за все реалізується шляхом моделювання. Такий підхід дозволяє встановити взаємно однозначну відповідність між складом і властивостями у вигляді отриманих рівнянь регресії. Оцінка величини коефіцієнтів рівнянь дає можливість визначити ступінь впливу елементів хімічного складу матеріалів на механічні властивості. Тому запропоновано використати такий підхід до оцінки впливу хімічного складу сталі S420M на її міцність. *Матеріали та методика.* Хімічний склад та межа міцності σ_B в конструкційній сталі S420M змінювались у межах, що відповідають вимогам стандарту ДСТУ EN 10025-4 на металопродукцію. Із застосуванням методики планування експериментів реалізовано дробну репліку 2⁴ матриці експерименту. *Результати експерименту.* Отримано багатопараметричне рівняння регресії оцінки межі міцності залежно від процентного вмісту вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору, сірки, хрому, нікелю, молібдену, ніобію та ванадію. На межу міцності найбільше впливає залежно від процентного вмісту 125,25 вуглець, 29,50 – марганець, 29,50 – хром, 24,50 – ванадій та 16,50 – молібден. Розрахунок впливу елементів хімічного складу на міцність здійснювався на основі аналізу коефіцієнтів отриманої математичної моделі. Таким чином, реалізовано підхід до прогнозу межі міцності сталі S420M, що дозволяє в процесі виробництва контролювати її показники шляхом зміни хімічного складу. Працездатність моделі підтверджена статистичними показниками Фішера і Кохрена. *Висновки.* На основі аналізу впливу хімічного складу сталі S420M на межу її міцності отримано математичну модель прогнозу в межах стандарту ДСТУ EN 10025-4. Аналіз коефіцієнтів моделі дозволив провести ранжування елементів хімічного складу сталі залежно від «ваги» їх процентного вмісту. Реалізація такого підходу дозволяє прогнозувати показники межі міцності сталі в процесі її виробництва шляхом підбору хімічного складу.

Ключові слова: *сталь S420M; хімічний склад; рівняння регресії; міцність; прогноз*

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛИ S420M НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЧНОСТИ

ІВАНЦОВ С. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
НЕСВЕТОВА А. С.², бак.,
КУШНІР Н. О.³, бак.

^{1*} Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: serhii.v.ivantsov@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

² Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: nesvetovaanastasia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6871-7452

³ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: nadiakushniir@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5616-669X

Аннотация. Введение. Исследование влияния химического состава материалов на их механические свойства чаще всего реализуется путем моделирования. Такой подход позволяет установить взаимно однозначное соответствие между составом и свойствами в виде полученных уравнений регрессии. Оценка величины коэффициентов уравнений позволяет определить степень влияния элементов химического состава материалов на механические свойства. Поэтому предложено использовать такой подход к оценке влияния химического состава стали S420M на ее прочность. **Материалы и методика.** Химический состав и предел прочности σ_B конструкционной стали S420M изменялись в пределах, соответствующих требованиям стандарта ДСТУ EN 10025-4 на металлопродукцию. С использованием методики планирования экспериментов реализована дробная реплика 2^4 матрицы эксперимента. **Результаты эксперимента.** Получено многопараметрическое уравнение регрессии оценки предела прочности в зависимости от процентного содержания углерода, кремния, марганца, фосфора, серы, хрома, никеля, молибдена, ниобия и ванадия. На предел прочности наибольшее влияние в зависимости от процентного содержания 125,25 оказывает углерод, 29,50 – марганец, 29,50 – хром, 24,50 – ванадий и 16,50 – молибден. Расчет влияния элементов химического состава на прочность осуществлялся на основе анализа коэффициентов полученной математической модели. Таким образом, реализован подход к прогнозу предела прочности стали S420M, что позволяет в процессе производства контролировать ее показатели путем изменения химического состава. Работоспособность модели подтверждена статистическими показателями Фишера и Кохрена. **Выводы.** На основании анализа влияния химического состава стали S420M на предел ее прочности получена математическая модель прогноза в пределах стандарта ДСТУ EN 10025-4. Анализ коэффициентов модели позволил провести ранжирование элементов химического состава стали в зависимости от «веса» их процентного содержания. Реализация данного подхода позволяет прогнозировать показатели предела прочности стали в процессе ее производства путем подбора химического состава.

Ключевые слова: сталь S420M; химический состав; уравнение регрессии; прочность; прогноз

EFFECT OF CHEMICAL COMPOSITION OF S420M STEEL ON STRENGTH INDICATORS

IVANTSOV S.V.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
NESVIETOVA A.S.², *Bachelor*,
KUSHNIR N.O.³, *Bachelor*

^{1*} Department of Materials Science, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: serhii.v.ivantsov@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

² Department of Materials Science, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: nesvetovaanastasia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6871-7452

³ Department of Materials Science, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: nadiakushniir@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5616-669X

Abstract. Introduction. The study of the influence of chemical composition of materials on their mechanical properties is most often realized through modeling. This approach makes it possible to establish a one-to-one correspondence between composition and properties in the form of the obtained regression equations. The estimation of the magnitude of the coefficients of the equations allows us to determine the degree of influence of chemical composition elements of the materials on mechanical properties. It is therefore proposed to use this approach to evaluate the effect of chemical composition of S420M on its strength. **Materials and methodology.** The chemical composition and the tensile strength σ_B of the S420M structural steel were varied within the limits of the ДСТУ EN 10025-4 standard for metal products. Using a technique of experiment planning, a fractional replica of the 2^4 experiment matrix was implemented. **The results of the experiment.** Multiparametric regression equations for the estimation of the tensile strength depending on the percentage of carbon, silicon, manganese, phosphorus, sulfur, chromium, nickel, molybdenum, niobium and vanadium were obtained. The greatest impact on the tensile strength, depending on the percentage, is 125,25 carbon, 29,50 – manganese, 29,50 – chromium, 24,50 – vanadium and 16,50 – molybdenum. The calculation of the effect of the elements of the chemical composition on the strength was carried out on the basis of the analysis of the coefficients of the obtained mathematical model. Thus, the approach to the prediction of the strength limit of S420M steel is implemented, which allows to control its performance during production by changing the chemical composition. The performance of the model is confirmed by the statistics of Fisher and Cochran. **Conclusions.** On the basis of the analysis of the influence of the chemical composition of S420M steel on its ultimate

strength, a mathematical model of forecasting within the ДСТУ EN 10025-4 standard was obtained. The analysis of the coefficients of the model made it possible to rank the elements of the chemical composition of steel, depending on the "weight" of their percentage. The implementation of this approach allows us to predict the performance of steel strength in the process of its production by selecting the chemical composition.

Keywords: steel S420M; chemical composition; regression equation; strength; forecast

Вступ. У будівництві більшість опорних конструкцій виготовляється зі сталей різних марок залежно від їх призначення [1; 2]. Вимоги до якості металопродукції постійно зростають, що зумовлює пошук підходів до оптимізації технології їх виробництва [3–6]. Перспективними до оцінювання механічних характеристик матеріалів бачаться теоретико-інформаційний підхід [7], фрактальне моделювання [8–11], аналіз області компромісу властивостей [12; 13].

Значна кількість моделей прогнозу якості матеріалів базується на застосуванні системного підходу [14–16] та врахуванні експертних оцінок [17]. Застосування подібних підходів значно підвищує точність результатів прогнозу досліджуваних характеристик. У праці [14] застосування системного підходу до дослідження технології виробництва сортопрокатних чавунних валків виконання СПХН дозволило визначити діапазони значень елементів їх хімічного складу, в межах яких можна отримати підвищені значення механічних характеристик валків.

При цьому хімічний склад металів відіграє значну роль у формуванні їх механічних характеристик [17; 18].

Наприклад, моделі зв'язку властивостей матеріалів з їх хімічним складом застосовуються для експертної ідентифікації тренду структурної стабільності [19].

Для встановлення впливу елементів хімічного складу конструкційної сталі на показники її міцності запропоновано використати методику планування експериментів. Такий підхід дозволяє не тільки одержати та дослідити нову модель, а й кількісно охарактеризувати «вагу» впливу кожного параметра моделі на функцію мети.

Матеріали та методика. Сталі, що експлуатуються в умовах агресивних середовищ, повинні мати високі показники механічних характеристик. У роботі як матеріал для дослідження обрано дрібнозернисту конструкційну сталь S420M після термомеханічної прокатки згідно зі штатною технологією виробництва. Проведення термомеханічної прокатки зменшує перлітну смугастість сталі шляхом подрібнення аустенітного зерна і цим самим підвищує комплекс її механічних характеристик. Ця марка сталі активно використовується в будівництві мостів, автомагістралей, вітрогенераторів та в різних видах металокопункцій. Хімічний склад сталі перебував у межах, обумовлених ДСТУ EN 10025-4 (табл. 1).

Таблиця 1

Склад сталі S420M

В % від маси	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	Mo	Nb
S420M	0,12... 0,16	0,30... 0,50	1,30... 1,70	0,020... 0,030	0,015... 0,025	<0,025	0,10... 0,30	<0,55	0,10... 0,20	0,03... 0,05
	Ni		Ti		V		Al		-	
	0,40...0,80		< 0,05		0,08...0,12		< 0,02		-	

Межа міцності сталі змінювалась від 540 до 720 МПа залежно від хімічного

складу за номінальної товщини прокату понад 16 мм.

Результати експерименту.

Застосування методики планування експериментів дозволяє досліджувати різні багатопараметричні технології та встановлювати зв'язки між необхідними параметрами [20; 21]. Але, оскільки досліджуваних параметрів (елементів хімічного складу), що значним чином впливають на міцність металу, обрано 10, проведення експериментів 2^{10} пов'язано зі значними матеріальними затратами, тому запропоновано реалізувати дробну репліку матриці планування 2^4 , що значно знижує матеріально-часові витрати на експерименти. Значення σ_B заносилися в матрицю відповідно до експертної оцінки впливу на них елементів хімічного складу [1; 2].

Дробна репліка мала 16 рядків з експериментальними показниками значень Y_e та результатами прогнозу по отриманому рівнянню регресії Y_p (табл. 2). В таблиці 2: ЗР – загальний рівень

аргументів від X_1 до X_{10} ; НР та ВР – нижній та верхній рівні; ІВ – інтервал варіювання. Аргументами функції (межі текучості) виступали вуглець (X_1), кремній (X_2), марганець (X_3), нікель (X_4), сірка (X_5), фосфор (X_6), хром (X_7), молібден (X_8), ніобій (X_9) і ванадій (X_{10}).

Застосування матриці планування дозволило отримати модель прогнозу межі міцності сталі S420M залежно від впливу елементів хімічного складу:

$$Y_p = -146,125 + 3756,250 \cdot X_1 + 258,750 \cdot X_2 + 73,750 \cdot X_3 + 16,250 \cdot X_4 - 625,000 \cdot X_5 - 68,750 \cdot X_6 + 147,500 \cdot X_7 + 165,000 \cdot X_8 + 462,500 \cdot X_9 + 2450,000 \cdot X_{10} - 1562,500 \cdot X_1 \cdot X_2.$$

Таблиця 2

Дробна репліка матриці планування експериментів сталі S420M

ЗР		0,14	0,40	1,50	0,60	0,020	0,025	0,20	0,15	0,04	0,10	σ_B , МПа	
ІВ		0,02	0,10	0,20	0,20	0,005	0,005	0,10	0,05	0,01	0,02		
НР		0,12	0,30	1,30	0,40	0,015	0,020	0,10	0,10	0,03	0,08		
ВР		0,16	0,50	1,70	0,80	0,025	0,030	0,30	0,20	0,05	0,12		
№	X_0	X_1 (C)	X_2 (Si)	X_3 (Mn)	X_4 (Ni)	X_5 (S)	X_6 (P)	X_7 (Cr)	X_8 (Mo)	X_9 (Nb)	X_{10} (V)	Y_e	Y_p
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	720	748
2	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	692	715
3	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	700	667
4	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	665	659
5	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	705	736
6	+	+	-	+	-	-	-	-	+	-	+	710	712
7	+	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	680	655
8	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	675	680
9	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	600	628
10	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	-	580	590
11	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	565	542
12	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	556	528
13	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	562	567
14	+	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	595	586
15	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	540	530
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	547	549

Отримане рівняння перевіряли за допомогою статистичних критеріїв Фішера і Кохрена. Результати перевірки підтвердили адекватність математичної моделі.

Критерій Фішера: $F = 1,262$ за критичного значення 2,400.

Критерій Кохрена: $F = 0,361$ за критичного значення 0,547.

На основі аналізу коефіцієнтів рівнянь у нормованих одиницях проведено оцінювання впливу обраних параметрів $X_1 \dots X_{10}$ на функцію мети. Гістограма на рисунку 1 відображає числові значення «ваги» кожного параметра.

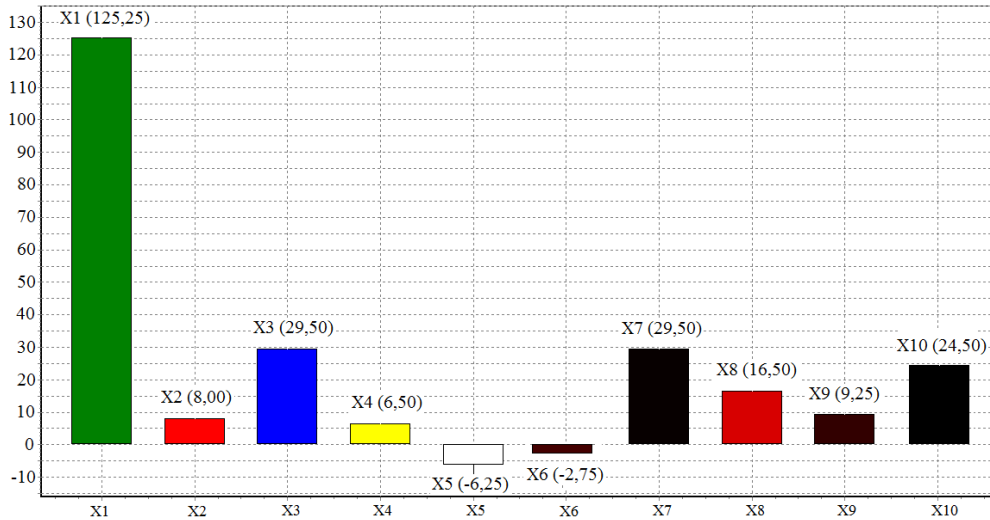


Рис. 1. Оцінка впливу хімічного складу на межу міцності сталі S420M

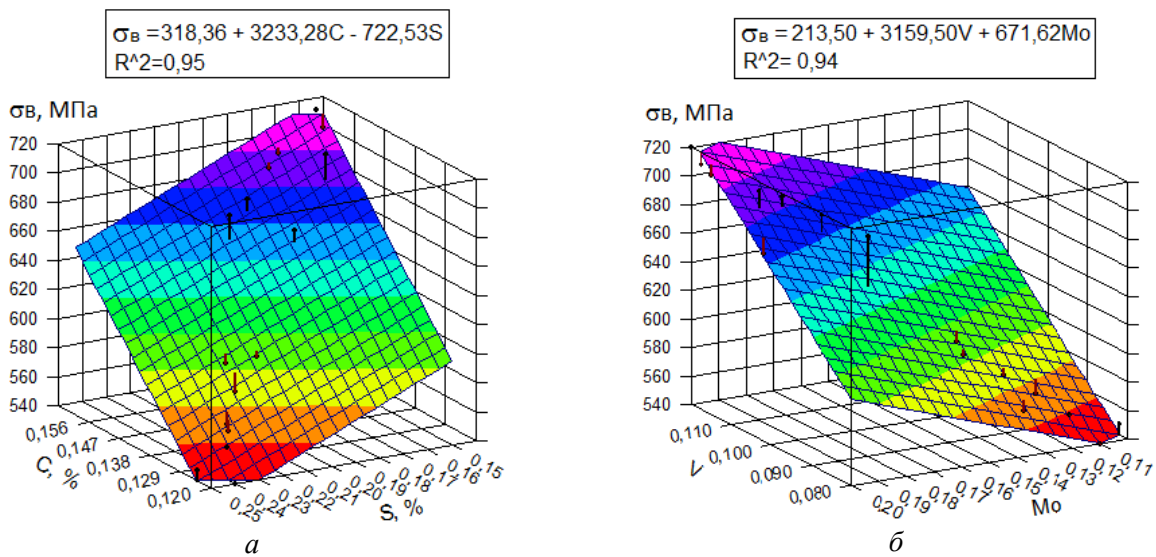


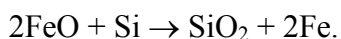
Рис. 2. Оцінка впливу вуглецю і сірки (а) та ванадію і молібдену (б) на межу міцності сталі S420M

Результати дослідження гістограми свідчать, що найбільший вплив на міцність сталі за заданого відсоткового вмісту чинять вуглець (коефіцієнт впливу найбільший 125,25), марганець (29,50), хром (29,50) та ванадій (24,50).

Згідно з даними літературних джерел [1; 2] проведено аналіз впливу елементів хімічного складу на межу міцності сталі S420M. Результати цього аналізу збігаються з отриманими в роботі даними, що наведені на гістограмі (рис. 1) та підтверджують

вплив елементів хімічного складу в заданому діапазоні значень.

Вуглець у нелегованих та низьколегованих сталях має значний вплив на показники їх міцності. Він займає октаедричні порожнини ($0,154$ від розміру атома ґратки R) у ґратці заліза, та, утворюючи хімічну сполуку цементит Fe_3C , підвищує показники твердості і міцності сталей завдяки додатковим ковалентним зв'язкам між атомами заліза та вуглецю. Марганець допомагає видаленню зі сталі O_2 і S та утворює твердий розчин із Fe і підвищує твердість, міцність феритної фази. Кремній вводять для розкиснення сталі, що відбувається за такою реакцією:



Si підвищує межі міцності та пружності. Додатки Cr , Ni , Si , Mn підвищують показники міцності та жаростійкості сталі. Сірка, для якої зафіксовано негативний коефіцієнт впливу $-6,25$, знижує механічні властивості завдяки утворенню сульфідів FeS , що викликає красноламкість сталі за підвищених температур. Фосфор менше, ніж сірка (коефіцієнт впливу $-2,75$), але також знижує показники механічних властивостей завдяки утворенню сполуки Fe_3P , що має крихку ґратку та здебільшого розміщується по межах зерен сталей, чим послаблює зв'язки між ними. Це явище відоме як холодноламкість.

Комплексний вплив легувальних елементів молібдену, ніобію та ванадію позитивно відображається на показниках

міцності і пластичності сталі. Атоми цих металів упродовжуються в ґратку заліза за типом заміщення та утворюють стійкі карбіди типу VC , NbC , MoC , Mo_2C , що не розчиняються в аустенітній матриці. Енергія зв'язку між атомами цих карбідів перевищує енергію зв'язку між атомами F та C , що і визначає їх більш високу міцність.

Вплив елементів хімічного складу на міцність сталі $S420M$ в межах стандарту ДСТУ EN 10025-4 відображається наведеними на рисунку 2 співвідношеннями.

Слід зазначити, що отримані результати впливу хімічних елементів на міцність сталі $S420M$ підтверджуються механізмом їх фізико-хімічної взаємодії.

Висновки. Шляхом реалізації дробної репліки отримано модель впливу елементів хімічного складу конструкційної сталі $S420M$ на межу її міцності в межах існуючого стандарту ДСТУ EN 10025-4, що надає можливість:

- відносно вимог замовника на показники межі міцності металопрокату сталі підбирати квазіоптимальні числові значення її хімічного складу;

- проводити ранжування елементів хімічного складу відносно ступеня їх впливу на міцність, що дозволяє в процесі виробництва сталі коригувати вміст тільки елементів із високими коефіцієнтами впливу: $125,25$ – вуглець, $29,50$ – марганець, $29,50$ – хром, $24,50$ – ванадій;

- здійснювати оперативний прогноз міцності сталі в процесі її виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Berns H., Theisen W. Ferrous materials: Steel and Cast Iron : monograph. Berlin Heidelberg : Springer, 2008. 418 p.
2. 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. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.23.209>
3. Иванцов С. В., Большаков В. И., Лаухин Д. В., Бекетов А. В., Мурашкин А. В. Влияние размера аустенитного зерна на кинетику разрушения высокопрочных строительных сталей. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 1. С. 70–72.
4. Иванцов С. В. Вплив параметрів структури на кінетику руйнування мікролегованих будівельних сталей : дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук : 05.02.01. Дніпропетровськ, 2014. 192 с.
5. Ivantsov S. V., Bolshakov V. I., Volkova O. V., Scheller P. R. CCT-diagram of high strength steel X70. *New developments in Geoscience, Geoinforming, Metallurgy and Mining Economics*. 2007. Vol. 58. Pp. 113–121.
6. Laukhin D. V., Beketov O. V., Rott N. O., Tyuterev I. A., Ivantsov S. V., Laukhin V. D. The Analysis of Interrelation between Kinetics of Propagation of Plastic Deformation and Initiation of Ductile Fracture. *Metallofizika i*

Noveishie Tekhnologii. 2017. Vol. 39, № 10. Pp. 1335–1343. URL: <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/130441>

7. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Применение теоретико-информационного подхода для идентификации структуры металла. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 8. С. 4–9. URL : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/4134>

8. 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. № 2. Pp. 93–97. URL : <https://hrcak.srce.hr/202359>

9. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov Yu. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, № 9. Pp. 1165–1171. URL: [doi: 10.15407/mfint.40.09.1165](https://doi.org/10.15407/mfint.40.09.1165)

10. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий. *Металлофизика. Новейшие технологии*. 2017. Т. 39. № 3. С. 949–957. URL: <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/130334>

11. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M., Kryzhanovskiy V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd. 2019. Vol. 968. Pp. 20–25. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.20>

12. Волчук В. Н. К определению области компромисса характеристик качества материалов. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2015. № 3. С. 21–25. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>

13. Волчук В., Токозов С. Спосіб прогнозу механічних властивостей чавунних валків. *ScienceRise*. 2018. Т. 11. С. 57–61. URL: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.150342>

14. Большаков Вад. И., Большаков В. И., Волчук В. М., Дубров Ю. И. Системный анализ технологии производства массивного металлического лиття. *Вісник НАН України*. 2015. № 9. С. 69–73. URL: <http://dx.doi.org/10.15407/visn2015.09.069>

15. Волчук В. М. Модель оцінювання твердості чавунних валків СПХН-43 та СШХНФ-47. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 4. С. 22–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241219.22.597>

16. Волчук В. Н. Мультифрактальный подход при оценке перлитной структуры. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 6. С. 31–36. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/1469>

17. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дейнеко Л. Н., Дубров Ю. И. Формирование модели прогноза качества материала, основанной на экспертной оценке и активном эксперименте. *Компьютерное материаловедение и обеспечение качества* : матер. к 45-му Междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов. Одесса : АстроПринт, 2006. С. 146–150.

18. Волчук В. Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 5. С. 12–18. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>

19. Dubrov Yu., Volchuk V. Expert trend identification of structural stability. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 4. С. 42–46. URL: [doi: 10.30838/J.PMHTM.2413.261218.42.564](https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.261218.42.564)

20. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. Москва : Финансы и статистика, 1981. 263 с.

21. Mishutin A., Kroviakov S., Pischev O., Soldo B. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. *Technical Journal*. 2017. Vol. 11, № 3. Pp. 121–124. URL: <https://hrcak.srce.hr/186657>

REFERENCES

1. Berns H. and Theisen W. *Ferrous materials: Steel and Cast Iron*. Berlin Heidelberg : Springer, 2008, 418 p.
2. 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.
3. Ivantsov S.V., Bolshakov V.I., Laukhin D.V., Beketov A.V. and Murashkin A.V. *Vliyaniye razmera austenitnogo zerna na kinetiku razrusheniya vysokoprochnykh stroitel'nykh staley* [Influence of the size of austenitic grain on the kinetics of fracture of high-strength structural steels]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining]. 2014, no. 1, pp. 70–72. (in Russian).
4. Ivantsov S.V. *Vplyv parametriv struktury na kinetyku ruynuvannya mikrolehovanykh budivel'nykh staley* [Influence of structure parameters on the kinetics of fracture of microalloyed structural steels]. Diss. na soisk. uchen. step. kand. tehn. nauk : 05.02.01 [Candidate Dissertation for Technical Sciences (05.02.01 – Materials Science)]. Dnipropetrovsk, 2014, 192 p. (in Ukrainian).

5. Ivantsov S.V., Bolshakov V.I., Volkova O.V. and Scheller P.R. CCT-diagram of high strength steel X70. New developments in Geoscience, Geoinforming, Metallurgy and Mining Economics. 2007, vol. 58, pp. 113–121.
6. Laukhin D.V., Beketov O.V., Rott N.O., Tyuterev I.A., Ivantsov S.V. and Laukhin V.D. The Analysis of Interrelation between Kinetics of Propagation of Plastic Deformation and Initiation of Ductile Fracture. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2017, vol. 39, no 10, pp. 1335–1343.
7. 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 Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 8, pp. 4–9. (in Russian).
8. 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.
9. 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.
10. Volchuk V.M. *K primeniyu fraktalnogo 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).
11. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M. and Kryzhanovskiy V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2019, vol. 968, pp. 20–25.
12. Volchuk V.N. *K opredeleniyu oblasti kompromissa kharakteristik kachestva materialov* [By identifying areas compromise performance materials quality]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 3, pp. 21–25. (in Russian).
13. Volchuk V. and Tokosov S. *Sposib prohnozu mekhanichnykh vlastyvostey chavunnykh valkiv* [Method of forecasting mechanical properties of cast-iron rolls]. *ScienceRise*. 2018, vol. 11, pp. 57–61. (in Ukrainian).
14. Bol'shakov Vad.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnytstva masynnoho 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).
15. Volchuk V.M. *Model' otsinyuvannya tverdosti chavunnykh valkiv CПXH-43 ta CИИXHΦ-47* [Model of assessment of the hardness of the iron rollers CПXH-43 and CИИXHΦ-47]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Ukrainian).
16. Volchuk V.M. *Mul'tifraktal'nyy podkhod pri otsenke perlitnoy struktury* [Multifractal approach when estimating a pearlite structure]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 6, pp. 31–36. (in Russian).
17. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N., Deyneko L.N. and Dubrov Yu.I. *Formirovaniye modeli prognoza kachestva materiala, osnovannoy na `ekspertnoy otsenke i aktivnom `eksperimente* [Formation of a material quality forecast model based on expert judgment and active experiment]. *Komp'yuternoe materialovedenie i obespechenie kachestva : mater. k 45-mu Mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizacii kompozitov* [Computer materials science and quality assurance: mater. to the 45th Int. this on modeling and optimization of composites]. Odessa : AstroPrint, 2006, pp. 146–150. (in Russian).
18. 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 State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).
19. Dubrov Yu. and Volchuk V. Expert trend identification of structural stability. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2018, no. 4, pp. 42–46.
20. Voznesenskiy V.A. *Statisticheskiye metody planirovaniya eksperimeta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyakh* [Statistical methods of experiment planning in technical and economic research]. Moscow : Finansy i statistika Publ., 1981, 263 p. (in Russian).
21. Mishutn A., Kroviakov S., Pishev O. and Soldo B. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. *Technical Journal*. 2017, vol. 11, no. 3, pp. 121–124.

Надійшла до редакції : 15.06.2020.