

УДК 621.78:669.14.018.295

БАГАТОЦІЛЬОВА ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СТАЛІ Е36 ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕТОДІВ ГЛИБОКОГО РОЗВІДУВАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ

ТКАЧЕНКО І. Ф.¹, д. т. н., проф.,

УНІЯТ М. А.², провідний інж. з метрології.

¹Кафедра матеріалознавства, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», пров. Нахімова, 3, 87500, Маріуполь, Україна, тел. +38 (067) 608-82-69, e-mail: ift955@gmail.com

²Донецький регіональний центр з гідрометеорології, вул. Олімпійська, 185, 87557, Маріуполь, Україна, тел. +38 (097) 879-65-76 e-mail: MUniyat@ukr.net

Анотація. Постановка проблеми. Підвищення експлуатаційних характеристик, усунення анізотропії механічних та фізико-хімічних властивостей за рахунок оптимізації хімічного складу сталі Е36 у нормалізованому стані. **Методика.** Дослідження впливу багатоцільової оптимізації хімічного складу сталі Е36 на механічні характеристики виконувались із застосуванням комп'ютерних методів глибокого розвідувального аналізу даних (ГРАД). **Результати.** Вирішено актуальну науково-технічну проблему підвищення експлуатаційних характеристик, усунення анізотропії механічних та фізико-хімічних властивостей за рахунок оптимізації хімічного складу. **Наукова цінність.** Із застосуванням методів глибокого розвідувального аналізу даних досліджено вплив параметрів виробництва на механічні властивості. Вивчено вплив термічної обробки на розподіл хімічних елементів, мікроструктуру, твердість та механічні властивості низьколегованих сталей. **Практична цінність.** За допомогою методів математичного аналізу проведено оптимізацію хімічного складу сталі Е36.

Ключові слова: нормалізована сталь; міцність; пластичність; оптимізація хімічного складу

МНОГОЦЕЛЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛИ Е36 С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

ТКАЧЕНКО И. Ф.¹, д. т. н., проф.,

УНИЯТ М. А.², вед. инж. по метрологии

¹Кафедра материаловедения, Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», пер. Нахимова, 3, Мариуполь, 87500, Украина, тел. +38 (067) 608-82-69, e-mail: ift955@gmail.com

²Донецкий региональный центр по гидрометеорологии, ул. Олимпийская, 185, Мариуполь, 87557, Украина, тел. +38 (097) 879-65-76, e-mail: MUniyat@ukr.net

Аннотация. Постановка проблемы. Повышение эксплуатационных характеристик, устранение анизотропии механических и физико-химических свойств за счет оптимизации химического состава стали Е36 в нормализованном состоянии. **Методика.** Исследование влияния многоцелевой оптимизации химического состава стали Е36 на механические характеристики выполнялись с применением компьютерных методов глубокого разведывательного анализа данных (ГРАД). **Результаты.** В работе решена актуальная научно-техническая задача повышения эксплуатационных характеристик, устранения анизотропии механических и физико-химических свойств за счет оптимизации химического состава. **Научная ценность.** С применением методов глубокого разведывательного анализа данных исследовано влияние параметров производства на механические свойства. Изучено влияние термической обработки на распределение химических элементов, микроструктуру, твердость и механические свойства низколегированных сталей. **Практическая ценность.** С помощью методов математического анализа, проведена оптимизация химического состава стали Е36.

Ключевые слова: нормализуемая сталь; прочность; пластичность; оптимизация химического состава

MULTIPURPOSE OPTIMIZATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE STEEL E36 WITH THE USE OF COMPUTER METHODS RESEARCHING DEEP ANALYSIS OF DATA

TKACHENKO I. F.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,

UNIYAT M. A.², lead engineer on Metrology

¹Department of Materials Science, the State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Nakhimov la., 3, Mariupol, 87500, Ukraine, tel. +38 (067) 608-82-69, e-mail: ift955@gmail.com

²Donetsk Regional Centre of Hydrometeorology, Olympic str., 185, Mariupol, 87557, Ukraine, tel. +38 (097) 879-65-76, e-mail: MUniyat@ukr.net

Summary. Problev. Performance, eliminating the anisotropy of the mechanical and physico-chemical properties by optimizing the chemical composition of the steel E36 in the normalized condition. **Methodology.** Study of the multi-objective optimization influence of steel E36 chemical composition on the mechanical characteristics were carried out

with the use of computer methods Roshal deep data analysis abbreviated GRAD. **Findings.** There was solved the actual scientific and technical problem of improved performance, elimination of anisotropy of the mechanical and physico-chemical properties by the chemical composition optimizing in the work. **Originality.** Using the methods of deep exploratory data analysis, it was investigated the effect of production parameters on the mechanical properties. It was observed the influence of heat treatment on the distribution of chemical elements, the microstructure, hardness and mechanical properties of low alloy steels. **Practical value.** Using the methods of mathematical analysis, it was made optimization of the chemical composition of the steel E36.

Keywords: *normalized rolled low alloy steel; hardness; plasticity; optimization of the chemical composition*

Вступ. Нормалізація - дуже поширений різновид термічного зміцнення прокату конструкційних сталей різноманітного призначення: у будівництві; для виробництва судин, що працюють під тиском; у суднобудуванні. Таким шляхом досягається формування підвищеного комплексу механічних властивостей як низьколегованих сталей, так і комплексно легованих високоміцних конструкційних сталей. Проте, особливо для металопродукції збільшеного перерізу, не досягаються високі рівні міцності та спротиву ударному руйнуванню, спостерігаються великий розкид значень показників якості, а також скрихчення, особливо в комплексно легованих сталях.

Існування вказаних проблем зумовлене недостатньо сприятливою мікроструктурою у стані постачання сталей, що нормалізуються: наявність феритно-перлітної смугастості, підвищені розміри та несферична морфологія колоній перлітоподібних структур. Враховуючи високу технологічність нормалізації як способу термічного зміцнення, а також усе ширше використання низьковуглецевих комплексно легованих високоміцних конструкційних сталей з підвищеними вимогами щодо їх спротиву ударному руйнуванню, актуальною бачиться проблема подальшого підвищення та стабілізації всіх показників експлуатаційних властивостей сталей, що нормалізуються за рахунок багатоцільової оптимізації хімічного складу.

У результаті досліджень [1 - 4] встановлено, що нез'ясованими залишаються чинники, які дають нестабільні значення показників якості прокату цих сталей. Одна з найважливіших груп чинників, що можуть викликати зміни показників, - це вміст хімічних елементів таких сталей, що змінюються залежно від марки, а також у межах різних плавів однієї марки сталі.

Добре відомо, що такі хімічні елементи як сірка, фосфор, а також домішки

кольорових металів спричиняють погіршення всіх показників механічних властивостей. Додаткові складнощі виникають внаслідок їх взаємодії між собою, що в наразі не можна встановити з вичерпною повнотою.

Виходячи з викладеного, важливим завданням бачиться дослідження впливу параметрів виробництва (хімічний склад та швидкість охолодження), а також їх дії на показники механічних властивостей.

Мета дослідження - підвищення експлуатаційних характеристик, усунення анізотропії механічних та фізико-хімічних властивостей за рахунок оптимізації хімічного складу сталі E36 у нормалізованому стані.

Методика та результати дослідження. Вивчали листовий прокат зі сталі E36 за ГОСТ 5521 - 93, хімічний склад якої наведено в таблиці 1.

Дослідження впливу багатоцільової оптимізації хімічного складу сталі E36 на механічні характеристики виконувались із застосуванням комп'ютерних методів глибокого розвідувального аналізу скорочено ГРАД [5 - 9].

Вплив параметрів виробництва на межу міцності показаний на рисунку 1. Статистично значимий вплив здійснюють: кремній, хром, вуглець, кальцій та товщина прокату. Як видно з дендрограми, найсуттєвіший вплив на характеристику міцності чинить концентрація кремнію, при цьому межа міцності збільшується разом зі збільшенням концентрації кремнію (вузли 1, 2). Такий позитивний вплив закономірний, тому що кремній зміцнює твердий розчин. За зниженого вмісту $Si < 0,325\%$ (вузол 1) очікувано негативний внесок дає товщина прокату (вузли 3, 4, 11, 12), за рахунок низьких швидкостей охолодження, та, як наслідок, зниження дисперсності структурних складових, що викликає знеміцнення сталі.

Хімічний склад дослідженої сталі E36, % / The chemical composition of the investigated steel E36, %

C 0,01	Mn 0,01	Si 0,01	S 0,001	P 0,001	Ni 0,01	AL R 0,001	Ti 0,001	Nb 0,001	V 0,001	N 0,001
17	144	25	35	35	5-40	15-60	5-20	20-50	50-100	3-7

За товщини прокату менше 20,75 мм позитивну роль у збільшенні межі міцності відіграє концентрація хрому та кальцію (вузол 5, 6, 9, 10). Хром - елемент заміщення, зміцнює твердий розчин, а також може утворювати зміцнювальні включення типу легованого цементиту. Кальцій вводять у сталь для розкиснення та модифікації неметалевих включень, що опосередковано впливає на межу міцності.

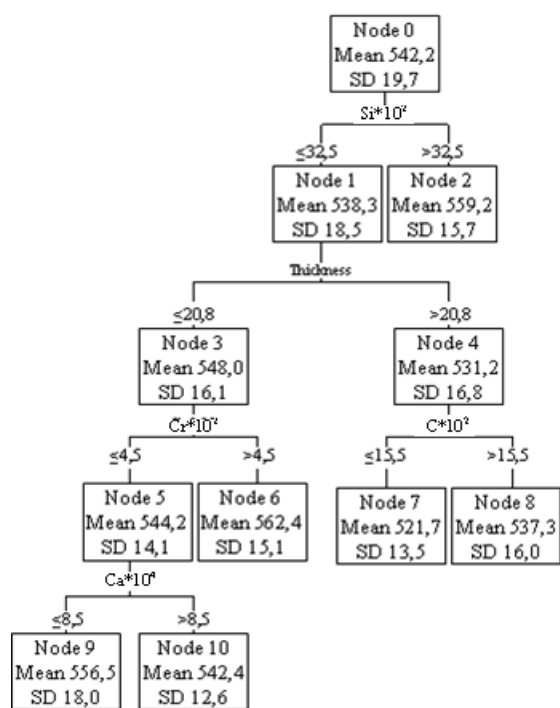


Рис. 1. Дендрограма впливу факторів виробництва на межу міцності сталі E36

За товщини прокату більше 20,75 мм на межу міцності позитивно впливає збільшення концентрації вуглецю (вузол 7, 8). Вуглець утворює із залізом твердий розчин проникнення, тому його вводять у сталь для збільшення характеристик міцності.

Аналогічно із застосуванням методів ГРАД досліджено вплив параметрів

виробництва на межу течії, відносно подовження та опір ударному руйнуванню.

Беспосередньо багатоцільова оптимізація виконувалась шляхом дослідження залежностей всіх критеріїв якості [10] від відносних концентрацій досліджених хімічних елементів, які визначають за формулою:

$$X_i = (C_i - C_{min}) / (C_{max} - C_{min}),$$

де X_i – відносна концентрація; C_i – фактичне значення концентрації i -го хімічного елемента; C_{min} – мінімальне значення концентрації i -го хімічного елемента; C_{max} – максимальне значення концентрації i -го хімічного елемента.

Як було встановлено, сталь E36 - типовий представник поширеної групи будівельних сталей. В той же час, у ній спостерігаються найбільш значні неоднорідності просторового розподілу структурних складових та хімічних елементів. Саме ця сталь характеризується недостатньо стабільними значеннями роботи ударного руйнування (KV^{40}) після термічної обробки в умовах незмінного хімічного складу. У зв'язку з цим, виконувалася багатоцільова оптимізація хімічного складу.

Критерії якості розраховували для головних характеристик механічних властивостей дослідної сталі: межа течії $Q(\sigma_{02})$, межа міцності $Q(\sigma_B)$, відносне подовження $Q(\delta_5)$ та робота удару $Q(KV^{40})$.

На рисунку 2 показано вплив на всі вказані вище критерії якості окремих об'єктивно визначених хімічних елементів, які, згідно з результатами ГРАД, здійснюють статистично значущий вплив на кожен стандартний показник механічних властивостей листового прокату.

Такий підхід дозволяє кількісно оцінити вплив кожного легуючого елемента, в діапазоні марочної концентрації, на основні механічні властивості з метою забезпечення гарантованої якості прокату. У випадку,

коли для певного хімічного елемента в усьому діапазоні його концентрацій всі критерії якості мають значення $Q_i \geq 1$, це, вочевидь, свідчить про позитивний вплив такого елемента на якість металопродукції. В той же час, якщо для якогось елемента спостерігаються такі Q_i , що $Q_i < 1$, це є ознакою неоднозначної ролі цього елемента в забезпеченні якості листового прокату, та вимагатиме, вочевидь, корегування його концентрації в сталі.

Рисунок 2, а свідчить про позитивний вплив усіх статистично визначених хімічних елементів на $Q(\sigma_{02})$, за винятком С, для якого: $Q(\sigma_{02}) = 0,93 < 1$ в умовах підвищеної концентрації: $X_C = 0,95$. На рисунку 2 б, в

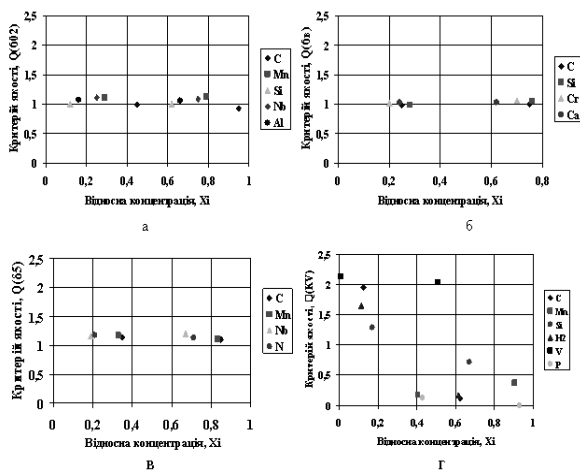


Рис. 2. Вплив вмісту елементів на окремі критерії якості прокату сталі Е36

показано, що всі досліджені елементи у припустимих діапазонах їх концентрацій позитивно впливають на критерії якості: $Q(\sigma_b)$, $Q(\delta_5)$, тобто в усіх випадках $Q_i \geq 1$.

Як можна бачити з рисунка 2 з, найбільш чутливий показник механічних властивостей до змін концентрацій хімічних елементів - це опір ударному руйнуванню. При цьому, практично всі статистично визначені для цієї характеристики хімічні елементи: С, Мn, Si, H₂, Р, за винятком V, здійснюють позитивний вплив на середнє значення та статистичну стабільність KV^{40} тільки в діапазоні своїх відносних концентрацій $X_i < \sim 0,4$. Проте у всіх випадках, коли $X_i > \sim 0,4$, маємо $Q(KV^{40}) < 1$, тобто - нестабільний рівень KV^{40} прокату. Враховуючи практично однакову важливість, з точки зору діючих сучасних стандартів, відповідності технічним вимогам кожного показника механічних

властивостей прокату, для виконання оптимізації був побудований узагальнений графік, показаний на рисунку 3.

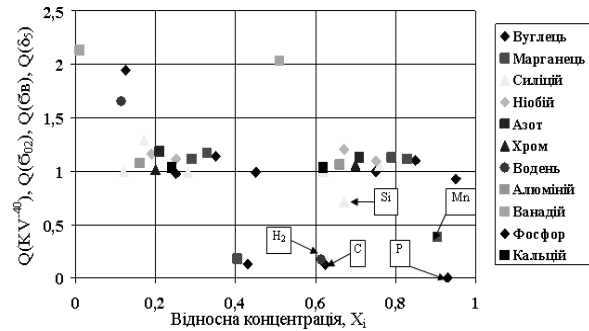


Рис. 3. Вплив вмісту елементів на всі критерії якості сталі Е36

На цьому графіку (рис. 3) показано залежності кожного критерію якості дослідженої сталі від відносної концентрації статистично визначених елементів. З наведених даних випливає, що такі легуючі елементи як V, Al, N₂, Ca, Ni, Cr, Nb у всьому дослідженому діапазоні своїх концентрацій здатні забезпечувати значення всіх критеріїв якості на рівні $Q_i \geq 1$. В той же час, як було показано вище, є низка елементів, використання яких у марочному діапазоні концентрацій викликає зниження критерію якості сталі. До цих елементів належать С, Мn, Si, H₂, Р. Проте отримані результати дають можливість установити оптимальні діапазони концентрацій цих елементів, які б гарантували отримання стабільно високих значень усіх без винятку показників якості прокату.

З рисунка 3 можна бачити, що сприятливий діапазон відносних концентрацій становить $X_i = 0 \dots 0,4$. Саме в цьому оптимальному діапазоні всі без виключення критерії якості мають значення $Q_i \geq 1$.

Таким чином, на підставі результатів проведеної багатоцільової оптимізації можна визначити оптимальний хімічний склад сталі Е36, що гарантує з імовірністю не менше 95 % перевищення вимог діючих стандартів до всіх без винятку показників механічних властивостей листового прокату сталі Е36. Для цього необхідно підтримувати вміст вказаних хімічних елементів (С, Мn, Si, H₂, Р) в таких діапазонах: С = 0,13...0,15 %; Мn =

0,9...1,36 %; $Si = 0,15...0,28$ %; $P \leq 0,014$ %; $H_2 \leq 0,00052$ % із збереженням концентрації решти хімічних елементів у межах вимог діючого стандарту. Як можна бачити, концентрації вказаних вище хімічних елементів на практиці відповідають нижнім межах вимог діючого стандарту і, таким чином, можуть бути досягнуті в умовах діючого виробництва. З

метою експериментальної перевірки розроблених рекомендацій щодо оптимального хімічного складу дослідженої сталі вивчено властивості прокату від конверторних плавок, які за своїм хімічним складом відповідають сформульованим вище вимогам. Рекомендований та фактичний хімічні склади сталі E36 наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Фактичний та оптимізований хімічні склади сталі E36 / The actual and optimized chemical compositions of steel E36

Різновид хімічного складу	Масова частка елементів, % мас.														
	C	Mn	Si	P	H ₂	S	Ni	Cu	Al	Ti	Nb	Cr	V	N ₂	As
Промисловий	0,13-0,18	1,2-1,59	0,16-0,46	0,005-0,028	0,00022-0,00096	0,001-0,022	0,01-0,32	0,01-0,27	0,017-0,053	≤ 0,02	≤ 0,044	0,01-0,14	≤ 0,061	0,003-0,008	≤ 0,008
Оптимальний	≤ 0,15	0,9-1,36	0,15-0,28	≤ 0,014	≤ 0,00052	≤ 0,035	≤ 0,40	≤ 0,35	0,015-0,06	≤ 0,02	0,02-0,05	≤ 0,20	0,05-0,1	≤ 0,008	≤ 0,008
ГОСТ 5521	≤ 0,18	0,9-1,6	0,15-0,5	≤ 0,035	-	≤ 0,035	≤ 0,40	≤ 0,35	0,015-0,06	≤ 0,02	0,02-0,05	≤ 0,20	0,05-0,1	≤ 0,008	≤ 0,008

Таблиця 3

Механічні властивості сталі E36 різного хімічного складу після нормалізації в промислових умовах / Mechanical properties of steel E36 with different chemical composition after normalization in an industrial environment

Різновид хімічного складу	Механічні властивості та значення критерію якості							
	σ_{02} , МПа	$Q(\sigma_{02})$	σ_B , МПа	$Q(\sigma_B)$	δ_5 , %	$Q(\delta_5)$	KV ⁻⁴⁰ , Дж	$Q(KV^{40})$
Промисловий	398 (20)	0,95	542 (20)	0,98	30 (2)	1,1	51 (19)	0 (-0,16)
Оптимальний	388 (17)	0,95	511 (10)	0,98	31 (2)	1,2	92 (13)	1,6
ГОСТ 5521	≥355	-	≥490	-	≥21	-	≥34	-

в дужках () – стандартне відхилення.

Відповідні механічні властивості, їх стандартні середні квадратичні відхилення та розраховані критерії якості показано в таблиці 3. Як можна бачити з таблиці 3, в умовах промислового виробництва, що не передбачає додаткових обмежень на хімічний склад сталі, не досягаються прийнятні значення критеріїв якості для межі течії $Q(\sigma_{02}) = 0,95 < 1$, межі міцності $Q(\sigma_B) = 0,98 < 1$ та роботи удару $Q(KV^{40}) = 0$.

Рівень розрахованого критерію якості незадовільний (для KV⁻⁴⁰) та нестабільний (для σ_{02} та σ_B) у зв'язку з занадто широким діапазоном статистичного розкиду, незважаючи на відповідність вимог діючого стандарту стосовно середніх значень вказаних трьох показників. Прийнятні значення критерію якості досягаються

тільки для відносного подовження ($Q(\delta_5) = 1,1 > 1$), що свідчить про гарантовано високі та стабільні значення цього показника. В цілому можна сказати, що в умовах промислового виробництва не досягається висока та стабільна якість листового прокату сталі E36.

Наведені дані в таблиці 3 також свідчать, що в результаті оптимізації хімічного складу сталі за умов використання діючої технології термічної обробки прокату відбувається помітне підвищення середніх значень роботи ударного руйнування, зменшення діапазону її статистичного розкиду ($Q(KV^{40}) = 1,6 > 1$), а також збільшення середніх значень відносного подовження ($Q(\delta_5) = 1,2 > 1$).

Таким чином, аналіз наведених даних щодо проведеної багатоцільової оптимізації хімічного складу сталі E36 свідчить про позитивний вплив такої оптимізації на механічні властивості, зокрема, пластичність та роботу удару.

Результати. У роботі виконано актуальне науково-технічне завдання підвищення експлуатаційних характеристик, усунення анізотропії механічних та фізико-хімічних властивостей за рахунок оптимізації хімічного складу.

Наукова і практична цінність. Із застосуванням методів глибокого розвідувального аналізу даних досліджено вплив параметрів виробництва на механічні властивості. Вивчено вплив термічної обробки на розподіл хімічних елементів, мікроструктуру, твердість та механічні властивості низьколегованих сталей. За допомогою методів математичного аналізу проведено оптимізацію хімічного складу сталі E36.

Висновки. 1. За результатами виконаних досліджень показано, що в

умовах діючого виробництва шляхом оптимізації хімічного складу досліджених сталей методом ГРАД та із застосуванням критеріїв якості можуть бути визначені оптимальні діапазони концентрацій хімічних елементів, які забезпечують високий та стабільний рівень пластичності та роботи удару прокату низьколегованих сталей.

2. Уперше показано, що шляхом оптимізації хімічного складу нормалізованих високоміцних зварювальних сталей за існуючих технологій термічної обробки можуть бути досягнуті стабільно високі показники пластичності та роботи руйнування за негативних кліматичних температур.

3. Установлено, що стабільно високі, гарантовані, з імовірністю не менше 95 %, значення показників пластичності прокату досягаються в результаті багатоцільової оптимізації хімічного складу без зміни марочного хімічного складу та технології термічної обробки.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Корхин А. С. Анализ результатов испытаний и статистический приемочный контроль служебных свойств металлопродукции с применением компьютеров / А. С. Корхин, А. В. Шибко, И. А. Крупский // *Металл и литье Украины*. – 2005. – № 5. – С. 39–41.
2. Ткаченко І. Ф. Розвиток наукових і методологічних основ прогнозування і оптимізації складів і технологій термічного зміцнення комплексно-легованих сталей : автореф. дис. на здобуття наук ступеня д-ра техн. наук : 05.16.01 «Металознавство та термічна обробка металів» / І. Ф. Ткаченко ; Приазов. держ. техн. ун-т. – Маріуполь, 2007. – 42 с.
3. Математическое моделирование распределения температуры по длине и ширине горячекатаных полос / А. А. Миленин, В. Н. Данченко, А. Ю. Путники, В. Т. Тилик // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 1. – С. 40–44.
4. Оптимизация режимов противоблоксной обработки металлопроката // *Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции «Азовсталь-2003»*. – Мариуполь, 2003. – С. 68–69.
5. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : [учеб. пособие для Вузов] / Гмурман В. Е. – 9-е изд., стер. – Москва : Высш. шк., 2003. – 479 с.
6. Ткаченко І. Ф. Многоцелевая оптимизация технологии термического упрочнения проката высокопрочных свариваемых сталей с использованием компьютерной технологии «DataMining» / І. Ф. Ткаченко // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – Маріуполь, 2004. – № 14. – С. 111–117.
7. Дюк В. Data-Mining : учеб. курс / В. Дюк, А. Самойленко. – Санкт-Петербург : Питер, 2001. – 368 с.
8. Боровиков В. Statistica: искусство анализа данных на компьютере / Боровиков В. – Санкт-Петербург : Питер, 2001. – 656 с.
9. Приклопский В. И. Численные методы / Приклопский В. И. – Москва : МГУ Физфак, 1999. – 146 с.
10. Спосіб визначення схильності металевих матеріалів до окрихчування : пат. 71819 А Україна : МПК7 G01N3/00 / Ткаченко І. Ф., Ткаченко К. І. – № 2003121811 ; заявл. 29.12.2003 ; опубл. 15.12.2004, Бюл. № 12.

REFERENCES

1. Korxin A.S., Shibko A.V. and Krupskij I.A. *Analiz rezul'tatov ispytaniy i statisticheskij priemochnyj kontrol' sluzhebnykh svojstv metalloprodukcii s primeneniem komp'yuterov* [Analysis of test results and statistical inspection of the service properties of steel products with the use of computers]. *Metall i lit'e Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine]. 2005, no. 5, pp. 39–41. (in Russian).

2. Tkachenko I.F. *Rozvytok naukovykh i metodologichnykh osnov prognozuvannia i optimizatsii skladiv i tekhnologii termichnoho zmitsnennia kompleksno-lehovanykh stalei: avtoref. dis. na zdobuttia nauk stupenia d-ra tekhn. nauk: 05.16.01 «Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv»* [Development of scientific and methodological bases of forecasting and optimizing the composition and technology of thermal hardening of complex-alloyed steels. Author. dis. on competition of science degree Dr. Techn. Sciences: 05.16.01 "Materials Science and Heat Treatment of Metals"]. Pryazovskiy derzh. tekhn. un-t. [Azov State Technical University]. Mariupol, 2007, 42 p. (in Ukrainian).
3. Milenin A.A., Danchenko V.N., Putnoki A.Yu. and Tiliuk V.T. *Matematicheskoe modelirovanie raspredeleniya temperatury po dline i shirine goryachekatanykh polos* [Mathematical modeling of the temperature distribution along the length and width of hot rolled strips]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry]. 2006, no. 1, pp. 40–44. (in Russian).
4. *Optimizatsiya rezhimov protivoflokentnoy obrabotki metalloprokata* [Optimization anti-flake treatment of metal]. *Sbornik tezisov dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferencii «Azovstal'-2003»* [The book of abstracts of international scientific-technical conference "Azovstal-2003"]. Mariupol, 2003, pp. 68-69. (in Russian).
5. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika* [Probability Theory and mathematical statistics]. Moskva: Vyssh. shk., 2003, iss. 9, 479 p. (in Russian).
6. Tkachenko I.F. *Mnogocelovaya optimizatsiya tekhnologii termicheskogo uprochneniya prokata vysokoprochnykh svarivaemykh stalej s ispol'zovaniem komp'yuternoj tekhnologii «DataMining»* [Multipurpose optimization of the technology of thermal hardening of rolled welded high strength steels using computer technology "DataMining"]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu* [Bulletin of Azov State Technical University]. Mariupol, 2004, no. 14, pp. 111–117. (in Russian).
7. Dyuke V. and Samojlenko A. *Data Mining*. Sankt-Peterburg: Piter, 2001, 368 p. (in Russian).
8. Borovikov V. *Statistica: isskustvo analiza dannykh na komp'yutere* [Statistica: the art of data analysis on the computer]. Sankt-Peterburg: Piter, 2001, 656 p. (in Russian).
9. Priklopskiy V.I. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moskva: MGU Fizfak, 1999, 146 p. (in Russian).
10. Tkachenko I.F. and Tkachenko K.I. *Sposib vyznachennia shchlnosti metalevykh materialiv do okrykhchuvannia: pat. 71819 A Ukraina: MPK7 G01N3/00* [A method for determining the propensity of metallic materials to embrittlement. Pat. 71819 A. Ukraine. G01N3/00]. 2004. (in Ukrainian).

Рецензент: Данишевський В. В., д-р т. н., проф.

Надійшла до редколегії: 29.01.2017 р. Прийнята до друку: 3.02.2017 р.