

tenite and abrasive wear resistance of carburized structural steels]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Ser.: Tekhnichni nauki: Zb. nauk. prats' – Reporter of the Priazovskiyi state technical university. Section: Technical science: Collection of scientific works*, 2012, no. 25, pp. 95-101. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Ефременко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 21.03.2017

УДК 621.78:669.14.018.295

© Ткаченко І.Ф.¹, Уніят М.А.²

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

В роботі вирішена актуальна науково-технічна задача підвищення експлуатаційних характеристик сталей, усунення анізотропії механічних та фізико-хімічних властивостей за рахунок оптимізації хімічного складу. 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 проведена оптимізація хімічного складу сталі Е36.

Ключові слова: нормалізована сталь, міцність, пластичність, оптимізація хімічного складу.

Ткаченко И.Ф., Уният М.А., Многоцелевая оптимизация химического состава стали Е36 с применением компьютерных методов глубокого разведывательного анализа данных. В работе решена актуальная научно-техническая задача повышение эксплуатационных характеристик сталей, устранение анизотропии механических и физико-химических свойств за счет оптимизации химического состава. 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. С помощью методов математического анализа, проведена оптимизация химического состава стали Е36.

Ключевые слова: нормализуемая сталь, прочность, пластичность, оптимизация химического состава.

I.F. Tkachenko, M.A. Uniyat. Multipurpose optimization of the chemical composition of the steel E36 with the use of computer methods of the deep data analysis. An actual scientific and technical task solution, that is operational performance improvement, elimination of the mechanical and physico-chemical properties anisotropy by optimizing the chemical composition has been given in the paper. Using the methods of the deep data analysis, the effect of production parameters (chemical composition and thickness of rolled metal) on the key indicators of the mechanical properties – ultimate strength, yield strength, percent elongation and impact resistance-has been investigated. It is shown that the most responsive characteristic of mechanical properties – impact resistance, is influ-

¹ д-р техн. наук, профессор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь
² здобувач, Донецький регіональний центр з гідрометеорології, м. Маріуполь, muniyat@ukr.net

enced by the elements: C, Mn, Si, P, H₂. According to the results of the research it is shown that under operating conditions by optimizing the chemical composition of the investigated steels by means of the CHAID method and with the use of quality criteria the optimal concentration ranges of chemical elements, which ensure high and stable levels of plasticity and the work of the blow of rolled low alloy steels may be determined. The influence of thermal treatment on the chemical distribution of elements, microstructure, hardness and mechanical properties of the welding manganese steels has been researched. Using the methods of mathematical analysis, the chemical composition of the steel E36 has been investigated.

Keywords: normalized rolled low alloy steel, plasticity, hardness, strength, subcritical temperatures. optimization of the chemical composition.

Постановка проблеми. Нормалізація є дуже поширеним різновидом термічного зміцнення прокату конструкційних сталей різноманітного призначення: у будівництві; при виробництві судин, що працюють під тиском; у суднобудівництві. 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 у комплексно легованих сталях.

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

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В результаті досліджень [1-4] встановлено, що нез'ясованими є чинники, що призводять до нестабільних значень показників якості прокату цих сталей. Однією з найважливіших груп чинників, що можуть призвести до зміни показників, є вміст хімічних елементів таких сталей, що змінюються залежно від марки сталей, а також у межах різних плавко однієї марки сталі.

Добре відомо, що такі хімічні елементи, як сірка, фосфор, а також домішки кольорових металів сприяють погіршенню всіх показників механічних властивостей. Додаткові складнощі виникають внаслідок їх взаємодії між собою, що в наш час не може бути встановлено з вичерпною повнотою.

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

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

Виклад основного матеріалу. Досліджували листовий прокат зі сталі E36 за ГОСТ 5521-93, хімічний склад якої наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад дослідженої сталі E36, %

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

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

Вплив параметрів виробництва на межу міцності показаний на рис. 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 збільшення межі міцності здійснюється разом зі збільшенням концентрації кремнію (вузли 1,2). Такий позитивний вплив є закономірним, тому що кремній зміцнює твердий розчин. При зниженому вмісті $Si < 0,325\%$ (вузол 1) очікувано негативний внесок надає товщина прокату (вузол 3,4,11,12) за рахунок низьких швидкостей охолодження та, як наслідок, зниження дисперсності структурних складових, що викликає знеміцнення сталі.

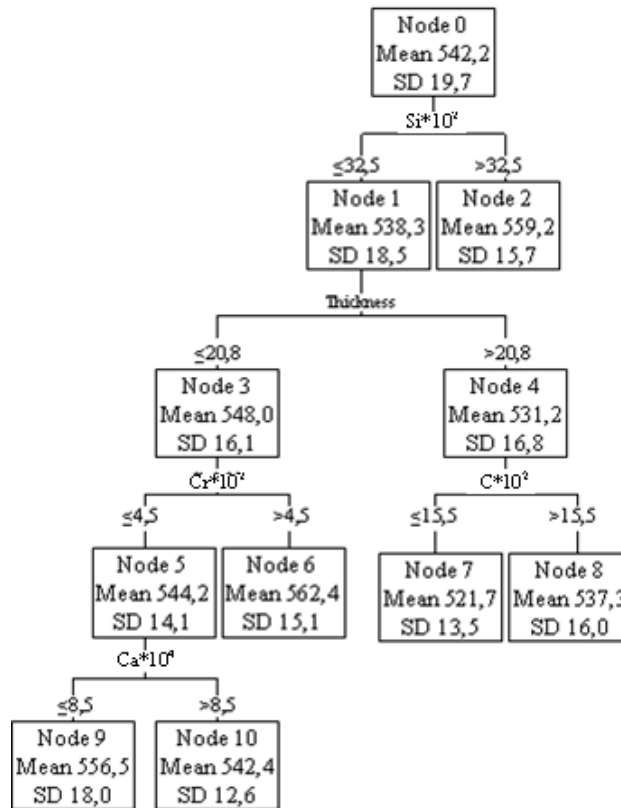


Рис. 1 – Дендрограма впливу факторів виробництва на межу міцності сталі E36

При товщині прокату менш як 20,75 мм, позитивну роль у збільшенні межі міцності відіграють концентрація хрому та кальцію (вузол 5, 6, 9, 10). Хром є елементом заміщення та зміцнює твердий розчин, а також може утворювати зміцнюючі включення типу легованого цементиту. Кальцій вводять у сталь для розкислення та модифікації неметалевих включень, що опосередковано впливає на межу міцності.

При товщині прокату більш як 20,75 мм на межу міцності позитивно впливає збільшення концентрації вуглецю (вузол 7, 8). Вуглець утворює з залізом твердий розчин проникнення, тому його вводять у сталь для збільшення характеристик міцності.

Аналогічно із застосуванням методів ГРАД було 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.

Сталі E36 є типовими представником поширеної групи будівельних сталей. В той же час, в ній спостерігається найбільш значні неоднорідності просторового розподілу структурних складових та хімічних елементів. Саме ця сталь характеризується недостатньо стабільними значеннями роботи ударного руйнування (KV^{40}) після розробленої термічної обробки в умовах незмінного хімічного складу. В 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 результатів ГРАД, здійснюють статистично значущий вплив на кожен стандартний показник механічних властивостей листового прокату.

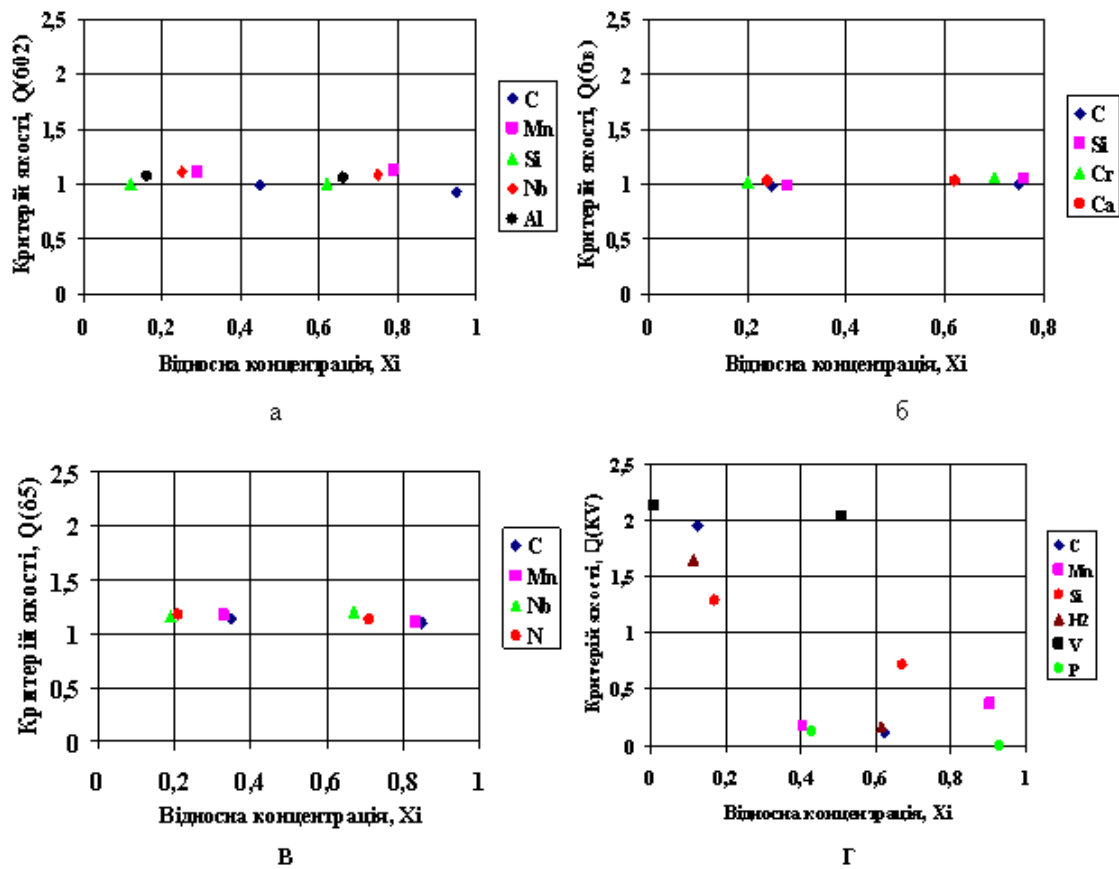


Рис. 2 – Вплив вмісту елементів на окремі критерії якості прокату сталі E36

Такий підхід дозволяє кількісно оцінити вплив кожного легуючого елементу, в діапазоні марочної концентрації, на основні механічні властивості з метою забезпечення гарантованої якості прокату. У випадку, коли для певного хімічного елементу в усьому діапазоні його концентрацій усі критерії якості мають значення $Q_i \geq 1$, це вочевидь свідчить про позитивний вплив такого елементу на якість металопродукції. В той же час, якщо для якогось елементу спостерігаються такі Q_i , що $Q_i < 1$, це є ознакою неоднозначної ролі цього елементу в забезпеченні якості листового прокату та вимагатиме, вочевидь, корегування його концентрації в сталі.

Рисунок 2, а свідчить про позитивний вплив всіх статистично визначених хімічних елементів на $Q(\sigma_{02})$ за виключенням C, для якого: $Q(\sigma_{02}) = 0,93 < 1$ в умовах підвищеної концентрації: $X_C = 0,95$. На рисунку 2 (б, в) показано, що усі 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 рисунку 2 (г), найбільш чутливим показником механічних властивостей до змін концентрацій хімічних елементів є опір ударному руйнуванню. При цьому, практично усі статистично визначені для цієї характеристики хімічні елементи: *C, Mn, Si, H₂, P*, за виключенням *V*, здійснюють позитивний вплив на середнє значення та статистичну стабільність KV^{40} виключно в діапазоні своїх відносних концентрацій $X_i < \sim 0.4$. Проте, в усіх 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, що показаний на рисунку 3.

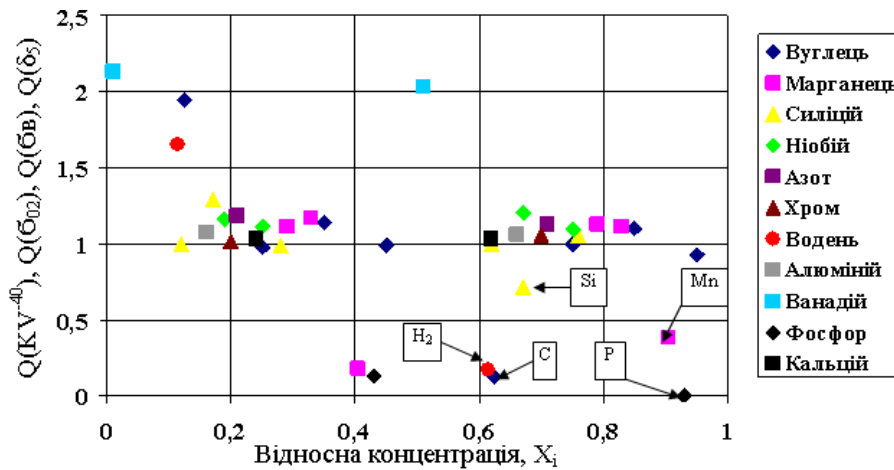


Рис. 3 – Вплив вмісту елементів на всі критерії якості сталі E36

На цьому графіку (рис. 3) показано залежності кожного критерія 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 призводить до зниження критерію якості сталі. До цих елементів належать *C, Mn, Si, H₂, P*. Проте отримані результати дають можливість встановити оптимальні діапазони концентрацій цих елементів, які б гарантували отримання стабільно високих значень всіх без виключення показників якості прокату. На рис. 3 можна бачити, що сприятливий діапазон відносних концентрацій становить $X_i = 0 \dots 0.4$. Саме в цьому оптимальному діапазоні усі без виключення критерії якості мають значення $Q_i \geq 1$. Таким чином, на підставі результатів проведеної багатоцільової оптимізації можна визначити оптимальний хімічний склад сталі E36, що гарантує з імовірністю не менше 95% перевищення вимог діючих стандартів до всіх без виключення показників механічних властивостей листового прокату сталі E36. Для цього необхідно підтримувати вміст вказаних хімічних елементів (*C, Mn, Si, H₂, P*) в наступних діапазонах: $C = 0,13 \dots 0,15 \%$; $Mn = 0,9 \dots 1,36 \%$; $Si = 0,15 \dots 0,28 \%$; $P \leq 0,014 \%$; $H_2 \leq 0,00052 \%$ 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 було досліджено властивості прокату від конверторних плавок, які за своїм хімічним складом відповідають сформульованим вище вимогам. Рекомендований та фактичний хімічний склад сталі E36 наведено у таблиці 2.

Відповідні механічні властивості, їх стандартні середні квадратичні відхилення та розраховані критерії якості надані 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 $Q(KV^{40}) = 0$.

Таблиця 2

Фактичний та оптимізований хімічні склади сталі E36

Різновид хімічного складу	Масова доля 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 5521-93	≤ 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

Різновид хімічного складу	Механічні властивості та значення критерію якості							
	σ_{02} , МПа	Q(σ_{02})	σ_B , МПа	Q(σ_B)	δ_5 , %	Q(δ_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 5521-93	≥355	-	≥490	-	≥21	-	≥34	-

В дужках – стандартне відхилення.

Рівень розрахованого критерію якості є незадовільним (для KV⁻⁴⁰) та нестабільним (для σ_{02} та σ_B) у зв'язку з занадто широким діапазоном статистичного розкиду, незважаючи на відповідність вимогам діючого стандарту стосовно середніх значень вказаних трьох показників. Прийнятні значення критерію якості досягаються тільки для відносного подовження (Q(δ_5) = 1,1 > 1), що свідчить про гарантовано високі та стабільні значення цього показника. В цілому, можна сказати, що при промисловому виробництві не досягається висока та стабільна якість листового прокату сталі E36. Наведені дані з 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(δ_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.

Висновки

За результатами виконаних досліджень показано, що за умов 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.

Вперше показано, що шляхом оптимізації хімічного складу нормалізованих високоміцних зварювальних сталей, при існуючих технологіях термічної обробки, можуть бути досягнуті стабільно високі показники пластичності та роботи руйнування при негативних кліматичних температурах.

Встановлено, 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.

Перелік використаних джерел:

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. ... д-ра техн. наук : 05.16.01 / І.Ф. Ткаченко; Приазов. держ. техн. ун-т. – Маріуполь, 2007. – 42 с.
3. Миленин А.А. Математическое моделирование распределения температуры по длине и ширине горячекатаных полос / А.А. Миленин, В.Н. Данченко, А.Ю. Путники // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 1. – С. 40-44.
4. Ткаченко И.Ф. Оптимизация режимов противфлокеной обработки металлопроката / И.Ф. Ткаченко // *Сборник тезисов докладов международной науч.-техн. конференции «Азовсталь-2003»*. – Мариуполь, 2003. – С. 68-69.
5. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие для ВУЗов / В.Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 2003. – 479 с.
6. Ткаченко И.Ф. Многоцелевая оптимизация технологии термического упрочнения проката высокопрочных свариваемых сталей с использованием компьютерной технологии «DataMining» / И.Ф. Ткаченко // *Вісник Приазовського державного технічного університету* : Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2004. – № 14. – С. 111-117.
7. Дюк В. Data-Mining : учебный курс / В. Дюк, А. Самойленко. – СПб. : Питер, 2001. – 368 с.
8. Боровиков В. Statistica : искусство анализа данных на компьютере / В. Боровиков. – СПб. : Питер, 2001. – 656 с.
9. Приклонский В.И. Численные методы / В.И. Приклонский. – М. : МГУ Физфак, 1999. – 146 с.
10. Пат. 71819 А. Україна, МПК G 01 N 3/00. Спосіб визначення схильності металевих матеріалів до окрихчування / І.Ф. Ткаченко, К.І. Ткаченко. – № 20031212811; заявл. 29.12.03; опубл. 15.12.04, Бюл. № 12.

References:

1. Korchin A.S., Shybko A.V., Krupski I.A. Analiz rezul'tatov ispytaniy i statisticheskij priemochnyj kontrol' sluzhebnyh svojstv metalloprodukcii s primeneniem komp'yutero [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. (Rus.)
2. Tkachenko I.F. *Rozvitok naukovih i metodologichnih osnov prognozuvannja i optimizacii skladiv i tehnologij termichnogo zmicnennja kompleksno-legovanih stalej*. Avtoref. diss. dokt. techn. nauk [Development of scientific and methodological bases of forecasting and optimizing the composition and technology of thermal hardening of complex-alloyed steels. Thesis of doc. tech. sci. diss.]. Mariupol, 2007, 42 p. (Ukr.)
3. Milenin A.A., Danchenko V.N., Putnoki A.Yu. Matematicheskoe modelirovanie raspredelenija temperatury po dlina i shirine gorjachekatanyh polos [Mathematical modeling of the temperature distribution along the length and width of hot rolled strips]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost – Metallurgical and mining industry*, 2006, no. 1, pp. 40-44. (Rus.)
4. Tkachenko I.F. Optimizatsiia rezhimov protivflokennoi obrabotki metalloprokata. Anotatsii dopovidei Mezhn. nauk.-tehn. konferencii «Azovstal'-2003» [Optimization anti-flake treatment of metal. Abstracts of International Sci.-tech. Conf. «Azovstal'-2003»]. Mariupol, 2003, pp. 68-69. (Rus.)
5. Gmurman V.E. *Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika: ucheb. posobie dlja vuzov* [Probability Theory and mathematical statistics: textbook for Universities]. Moscow, Higher school Publ., 2003, 479 p. (Rus.)
6. Tkachenko I.F. Mnogocelelevaja optimizacija tehnologii termicheskogo uprochnenija prokata vysokoprochnyh svarivaemyh stalej s ispol'zovaniem komp'yuternoj tehnologii «Data Mining» [Multipurpose optimization of the technology of thermal hardening of rolled welded high strength steels using computer technology «Data Mining»]. *Visnik Priazov'skogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu. Serija: Tehniceskie nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Science*, Mariupol, 2004, no. 14, pp. 111-117. (Rus.)
7. Duke V., Samoilenko A. *Data-Mining: Uchebnyj kurs* [Data Mining: Training course]. Saint Petersburg, Peter Publ., 2001, 368 p. (Rus.)

8. Borovikov V. *Statistica: isskustvo analiza dannyh na komp'yutere* [Statistica: the art of data analysis on the computer]. Saint Petersburg, Peter Publ., 2001, 656 p. (Rus.)
9. Priklonskiy V.I. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, MSU Faculty of Physics Publ., 1999, 146 p. (Rus.)
10. Tkachenko I.F., Tkachenko K.I. *Sposib vyznachennja shylnosti metalevyh materialiv do okryhchuvannja* [A method for determining the propensity of metallic materials to embrittlement]. Patent UA, no. 71819 A, 2004. (Ukr.)

Рецензент: Л.С. Малінов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 18.04.2017

УДК 621.658.012.531

© Чабак Ю.Г.¹, Федун В.И.², Ефременко Б.В.³,
Зусин А.М.⁴, Джеренова А.В.⁵

ВЛИЯНИЕ ПОСТ-ТЕРМООБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ПЛАЗМЕННОГО Fe-C-Mn-Cr-W-V ПОКРЫТИЯ

В статье описано влияние пост-термической обработки (выдержка при 950 °C в течение 80 мин с закалкой в масле) на микроструктурное состояние и микротвердость импульсно-плазменного покрытия, нанесенного с использованием разнородных катодов (стали P18 и высокохромистого чугуна). Показано, что в процессе выдержки происходит распад пересыщенного твердого раствора с выделением дисперсных вольфрам (хром)-содержащих карбидов. Формирование карбидов в основном завершается в течение 40 мин выдержки; это сопровождается 2-3-кратным ростом микротвердости покрытия.

Ключевые слова: плазменно-импульсная обработка, катод, покрытие, карбиды, микроструктура, микротвердость.

Чабак Ю.Г., Федун В.И., Ефременко Б.В., Зусин А.М., Джеренова А.В. Влияние пост-термообработки на микроструктуру и микротвердость плазменного Fe-C-Mn-Cr-W-V покрытия. У статті описано вплив пост-термічної обробки (витримка при 950 °C протягом 80 хв із загартуванням в маслі) на микроструктурний стан і микротвердість імпульсного-плазмового покриття, нанесеного з використанням різнорідних катодів (стали P18 і високохромистого чавуну). Показано, що в процесі витримки відбувається розпад пересиченого твердого розчину з виділенням дисперсних вольфрам (хром)-вміщуючих карбідів. Формування карбідів в основному завершується протягом 40 хв витримки; це супроводжується 2-3-кратним зростанням микротвердості покриття.

Ключові слова: плазмово-імпульсна обробка, катод, покриття, карбід, мікроструктура, микротвердість.

Yu.G. Chabak, V.I. Fedun, B.V. Efremenko, A.M. Zusin, A.V. Dzherenova. Effect of post-heat treatment on the microstructure and microhardness of a plasma sprayed Fe-

¹ канд. техн. наук, ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁴ канд. техн. наук, ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁵ ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь