

І. Р. Поворотня¹, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-5872-7403

О. А. Сафронова¹, м.н.с., аспірантка, ORCID 0000-0002-4032-4275

Р. В. Подольський¹, Ph. D., н.с., ORCID 0000-0002-0288-0641

Е. В. Олійник¹, аспірант, ORCID 0000-0002-3366-3746

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА ФАЗОВУ СТРУКТУРУ І ТВЕРДІСТЬ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ОСЕЙ ПІСЛЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Анотація. Зважаючи на чималу кількість комплексних підходів із застосуванням інформаційних технологій до обґрунтування вибору вмісту хімічних елементів в сталі та закладених у них обмеженнях, запропоновано використання концепції спрямованого хімічного зв'язку, що забезпечує високу прогнозу точність та одержання необхідних її властивостей на затребуваному споживачем рівні. В роботі виконаний аналіз вимог нормативної документації щодо хімічного складу, а саме вмісту основних компонентів таких як вуглець, марганець і кремній, в сталі для залізничних осей марок EA1N, F і OC. Були застосовані інформаційні технології з використанням концепції спрямованої міжатомної взаємодії, коли критерії є комплексними та характеризують весь склад одночасно, а також отримані лінійні закономірності впливу інтегрального показника хімічного складу на твердість. Метою дослідження є встановлення закономірностей впливу хімічного складу на формування і трансформацію фазової структури та твердості після деформації і термічної обробки вуглецевої сталі для залізничних осей. Об'єктом досліджень були лабораторні злитки вуглецевих сталей, які співставні за хімічним складом зі сталями для залізничних осей відповідно до державного, європейського та американського стандартів. Виготовлені з них зразки піддавалися гарячій пластичній деформації (ГПД) з наступною термічною обробкою (ГПД+ТО). Проведений мікроструктурний аналіз досліджуваних сталей. Виявлено закономірності впливу хімічного складу на співвідношення фаз та твердість досліджених сталей у різних станах: литому, після ГПД та ГПД+ТО з використанням концепції спрямованого хімічного зв'язку. Встановлено, що за інтегрального параметру зарядового стану (Z^Y) менше 1,20 є, тобто за певного хімічного складу в досліджуваному інтервалі значень, твердість сталі у стані після ГПД перевищує твердість такої сталі у стані після ГПД+ТО.

Ключові слова: залізничні осі, національний стандарт, хімічний склад, механічні властивості, мікроструктура.

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Посилання для цитування: Поворотня І. Р., Сафронова О. А., Подольський Р. В., Олійник Е. В. Вплив хімічного складу на фазову структуру і твердість вуглецевої сталі для залізничних осей після деформації та термічної обробки. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 656-671. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-656-671>.

Стан питання. Необхідною умовою експлуатації залізничного транспорту є його безпека, яка визначається рівнем показників якості металу окремих вузлів, деталей і елементів [1]. Ці показники відображені у вітчизняних, зарубіжних і міжнародних стандартах на залізничні осі. Проведений аналіз вимог вітчизняних, міжнародних і зарубіжних стандартів [2-15] на катані і ковани осі показав, що осі для залізничного транспорту виготовляють в основному з вуглецевої спокійної сталі звичайної якості.

Порівнянням цих вимог встановлено, що найнижчий вміст вуглецю має марка EA1N (0,35-0,40%С по мас.), а найвищий вміст вуглецю вимагає стандарт для осьової сталі марки F (0,45-0,59%С по мас.). В свою чергу марка сталі ОС має вищий вміст вуглецю, ніж в сталі EA1N, але в порівнянні з маркою F його вміст має нижчі показники (0,42-0,50%С по мас.).

У результаті порівняння вмісту марганцю встановлено, що його найбільшу кількість містить сталь марки EA1N – в діапазоні 0,9-1,2% мас., трохи менший вміст регламентують вимоги для сталі F – 0,45-0,59% мас., а найменший вміст цього елемента в сталі ОС.

По вмісту кремнію для сталі F у вимогах встановлений діапазон у кількості 0,3-0,5% ваг. Для сталі EA1N кількість кремнію стандарт обмежує лише по мінімальній кількості – 0,15% мас. Для осьової сталі ОС кількість кремнію має бути в рамках 0,15-0,35% мас. Припустимий вміст основних хімічних елементів в сталях марок ОС, EA1N і F показаний на рисунку 1.

Щодо вмісту ванадію для марки F встановлений вміст в діапазоні 0,02-0,8%V мас., а для марки EA1N передбачено обмеження максимального його вмісту на рівні 0,06%, мас. В сталі марки ОС ванадій у вмісті не передбачено.

Щодо вмісту шкідливих домішок європейський стандарт EN 13261:2003 (марка сталі EA1N) має більш жорсткі вимоги до вмісту сірки (<0,015%мас.) та фосфору (<0,02% мас.). В українському стандарті ДСТУ 31334:2009 вміст сірки і фосфору обмежують до 0,4% мас., а за американськими вимогами AAR M-101-2017 фосфору в сталі має бути не більше 0,0045% мас. та сірки не більше ніж 0,05% мас.

Вимоги щодо вмісту нікелю та міді за українським та європейським стандартами мають відповідний близький рівень вимог: для марки ОС

Ni – не більше 0,3% мас., а Cu <0,25% мас.; для марки EA1N вміст нікелю і міді обмежується вмістом <0,3% мас. В американському стандарті вимоги до цих елементів відсутні. До вмісту хрому і молібдену норми присутні лише для однієї із трьох аналізованих сталей – у європейській марці EA1N (Cr <0,3% мас., Mo <0,08% мас.).

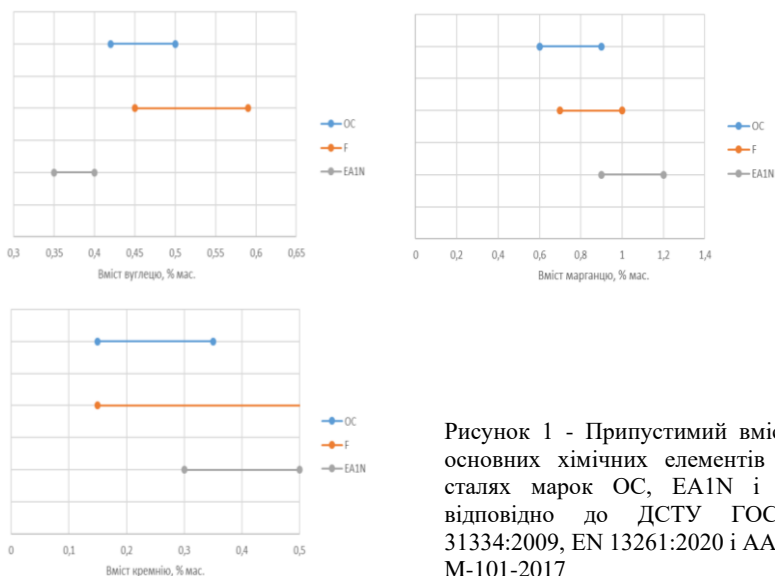


Рисунок 1 - Припустимий вміст основних хімічних елементів в сталях марок OC, EA1N і F відповідно до ДСТУ ГОСТ 31334:2009, EN 13261:2020 і AAR M-101-2017

Як показав аналіз вимог світових та вітчизняного стандартів, існуючі марки сталей для залізничних осей мають досить широкий інтервал припустимого вмісту основних елементів, що може значно впливати на формування структури та властивостей залізничних осей. У зв'язку з цим, особливого значення набуває встановлення найбільш раціонального складу сталей, що є запорукою підвищення надійності та безпеки залізничного транспорту.

Методика дослідження. Існуючі підходи до оптимізації хімічного складу сталі, що забезпечує необхідні механічні властивості та структурний стан сталей, як правило, базуються на статистичних моделях «склад-властивість», що не відображають фізико-хімічні аспекти поведінки багатокомпонентного розплаву на заключних стадіях технології отримання готової продукції (фазові перетворення тощо). Аналіз впливу хімічного складу в межах відомих марок сталей, що був виконаний в роботі, базується на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку [16], який розглядає металевий розплав як хімічно єдину систему.

Оскільки фазові перетворення є наслідком міжатомної взаємодії в багатокомпонентному розплаві, на першому етапі здійснюється «згортка» хімічного складу за допомогою використання інтегральних параметрів зарядового (Z^Y) та структурного (d) станів, які розраховуються як результат попарної взаємодії всіх його m компонентів.

Параметр Z^Y визначається шляхом усереднення ефективних зарядів усіх типів зв'язків $i - j$ з довжиною зв'язку d :

$$Z^Y = \sum_{k=1}^m \frac{\lg Ru_k^o - \lg(d/2)}{tg\alpha_k} \cdot n_k^2 + 2 \cdot \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l=k+1}^m n_k \cdot n_l \cdot \Delta e_{kl}''$$

де n_k - мольна доля, Ru_k^o - радіус неполярзованого атома, $tg\alpha_k$ - параметр, який характеризує зміну електронної щільності при іонізації атома k -того компонента.

Реалізація процедур «згортки» хімічного складу багатокомпонентних залізобуглецевих розплавів за запропонованою методикою здійснюється у програмному модулі «Метал» [16]. Хімічна індивідуальність, реакційна здатність, хімічний та структурний стан досліджуваних розплавів виражається через поєднання зазначених вище інтегральних параметрів (Z^Y , e ; d , 10^{-1} нм; $tg\alpha$). Введення перелічених параметрів знижує параметричність моделей та підвищує їх фізичність.

Матеріалом дослідження були сталі лабораторного виготовлення, що є співставними за хімічним складом зі сталями для залізничних осей відповідно до державного стандарту ДСТУ ГОСТ 4728:2014 (марка ОС), європейського стандарту EN 13261:2009 (марка EA1N) та американського стандарту AAR M-101-2017 (марка F) (табл. 1) [17].

Була проведена гаряча пластична деформація (далі ГПД) з використанням гідравлічної випробувальної машини ЦД-40 шляхом осаджування на величину 50% за температури нагрівання проб під ГПД 1260°C.

Зразки, що пройшли ГПД, охолоджували на спокійному повітрі. З отриманих проб виготовляли заготовки під зразки для їх подальшої термічної обробки (далі - ТО) за режимом нормалізації від 850 °C з охолодженням на спокійному повітрі. Така обробка відповідає режимам, що застосовуються при виробництві залізничних осей.

Твердість дослідних сталей контролювали згідно ДСТУ ISO 6506-1:2007 «Матеріали металеві. Визначення твердості за Брінеллем. Частина 1. Метод випробування» сталюю кулькою $\varnothing 10$ мм при зусиллі 29430 Н (3000 кгс).

Результати досліджень. Результати металографічного аналізу зразків з №1 і №9, де вміст вуглецю однаковий, але відчутно відрізняється вміст інших основних елементів в литому стані, після ГПД і після ГПД+ ТО наведено на рисунку 2.

Як показав аналіз отриманих результатів вимірювання твердості розкид значень відносно середнього $(HB_{\max} - HB_{\min})/HB_{\text{aver}}$ для сталей, співставних за хімічним складом зі сталями для залізничних осей марки EA1N та OC, в досліджуваних межах зміни хімічного складу для різних станів оброблення складає в середньому близько 9% (від 5% до 13%). Для сталей, співставних за хімічним складом зі сталлю для залізничних осей марки F аналогічний показник складає більше 20% для кожного зі станів, що є достатньо відчутним та може впливати на тривалість експлуатації осей.

Структура досліджуваного металу ферито-перлітна, в якій після проведення ГПД і ГПД+ТО відбулася зміна кількості структурних складових та підвищилася твердість. При цьому важливо враховувати морфологію структурних складових, особливості їх будови, які здобуваються внаслідок оброблення сталі.

На попередніх етапах дослідження було виконано аналіз впливу вмісту та співвідношення окремих елементів на кількість структурних складових та твердість [18], однак не вдалося отримати надійні та стійкі закономірності впливу з високим значенням коефіцієнту апроксимації. Аналіз результатів показував лише фрагментарний вплив окремих елементів, оскільки в лабораторних плавках складно зафіксувати та зробити постійним вміст всіх інших елементів, окрім досліджуваного через малий обсяг печі і неможливість виконання поточного хімічного аналізу в процесі плавки. Подальшим розвитком попередніх досліджень стало застосування інформаційних технологій з використанням концепції спрямованої міжатомної взаємодії, коли критерії є комплексними та характеризують весь склад одночасно.

Була виконана процедура «згортки» хімічного складу багатокomпонентних залізовуглецевих розплавів у програмному модулі «Метал». Проведено аналіз впливу хімічного складу на значення параметрів міжатомної взаємодії компонентів сталі.

Вуглець є одним із основних матричних елементів, при збільшенні вмісту якого значно зменшується між'ядерна відстань, а також зі збільшенням вуглецю виявлено зростання значень параметрів tga та ρ_l . Найбільш тісний зв'язок встановлено для вмісту вуглецю та Z^Y – параметру зарядового стану системи (рис. 5).

Таблиця 1 – Вміст основних хімічних елементів та параметри їх міжатомної взаємодії, кількість фаз та середня твердість дослідних плавок

Марка	№	Основні елементи, % мас.				Параметри міжатомної взаємодії хімічних елементів					Литий стан		Гаряча пластична деформація		Термічна обробка		
		C	Si	Mn	Zr, e	Zr^i, e	$d, 10^{-1} \text{нм}$	$tg \alpha$	$\rho l, e / \text{нм}$	Структурна складова, %	НВ	Структурна складова, %	НВ	Структурна складова, %	НВ	Структурна складова, %	НВ
F	C2	0,52	0,42	0,69	1,21528	2,732	0,08877	3,5873	75,34	24,66	187,0	93,56	6,44	211,0	81,1	18,9	217,0
F	C3	0,51	0,37	0,63	1,21087	2,734	0,08875	3,58463	67,54	32,46	197,0	93,15	6,85	213,5	79,66	20,34	212,0
F	C4	0,51	0,31	0,56	1,20703	2,736	0,08877	3,58251	78,71	21,29	187,0	94,15	5,85	200,0	75,68	24,32	201,0
EAIN	1	0,39	0,12	0,60	1,18823	2,759	0,08851	3,55989	76,30	23,70	152,5	81,39	18,62	177,8	62,34	37,66	170,0
F	2	0,55	0,16	0,63	1,20203	2,733	0,08873	3,58654	76,20	23,80	156,0	93,47	6,54	205,5	89,4	10,6	207,0
F	3.1	0,55	0,44	0,85	1,21891	2,727	0,08876	3,59405	70,61	29,39	179,0	98,24	1,77	246,3	89,56	10,44	248,0
F	3.2	0,59	0,31	1,08	1,22255	2,725	0,08883	3,59455	70,90	29,10	187,0	92,78	7,23	227,5	84,55	15,45	217,0
OC	4	0,45	0,35	0,95	1,21115	2,745	0,08862	3,57521	87,22	12,78	166,5	91,46	8,55	185,5	71,45	28,55	195,0
OC	5	0,49	0,22	0,95	1,20834	2,742	0,08867	3,57753	72,74	27,26	170,0	89,30	10,70	208,0	86,51	13,49	212,0
F	6	0,54	0,21	0,77	1,20726	2,734	0,08874	3,58522	72,62	27,38	183,0	93,30	6,70	194,5	87,02	12,98	207,0
F	7	0,57	0,18	0,78	1,20767	2,730	0,08876	3,58942	74,85	25,15	170,0	96,94	3,06	209,3	92,29	7,71	217,0
EAIN	8	0,36	0,34	0,63	1,19675	2,758	0,08853	3,56092	72,95	27,05	156,0	84,83	15,17	193,8	77,73	22,27	179,0
EAIN	9	0,39	0,3	0,86	1,20209	2,755	0,08853	3,56455	71,49	28,51	174,5	73,58	26,43	177,8	64,37	35,63	170,0
OC	10	0,41	0,27	0,89	1,20390	2,7531	0,088584	3,566014	82,41	17,59	156,0	84,17	15,83	190,8	76,15	23,85	197,0

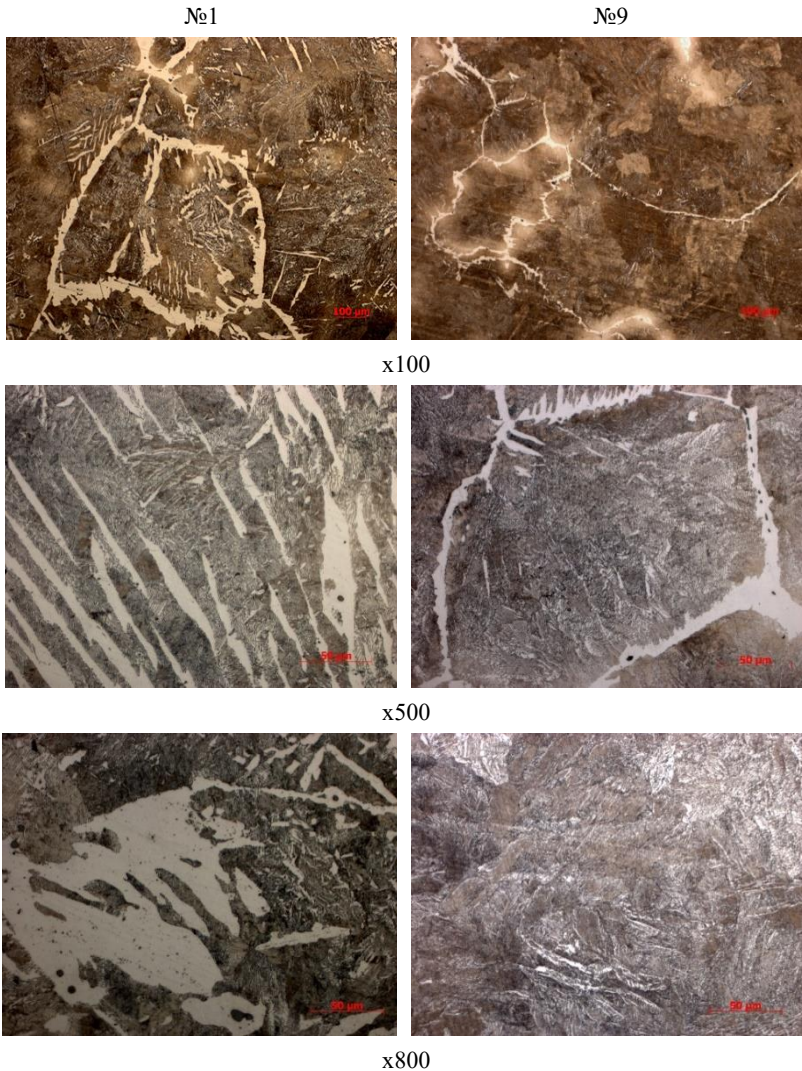


Рисунок 2 – Мікроструктура дослідних зразків № 1 і № 9 з однаковим вмістом вуглецю і з різним вмістом кремнію і марганцю в литому стані

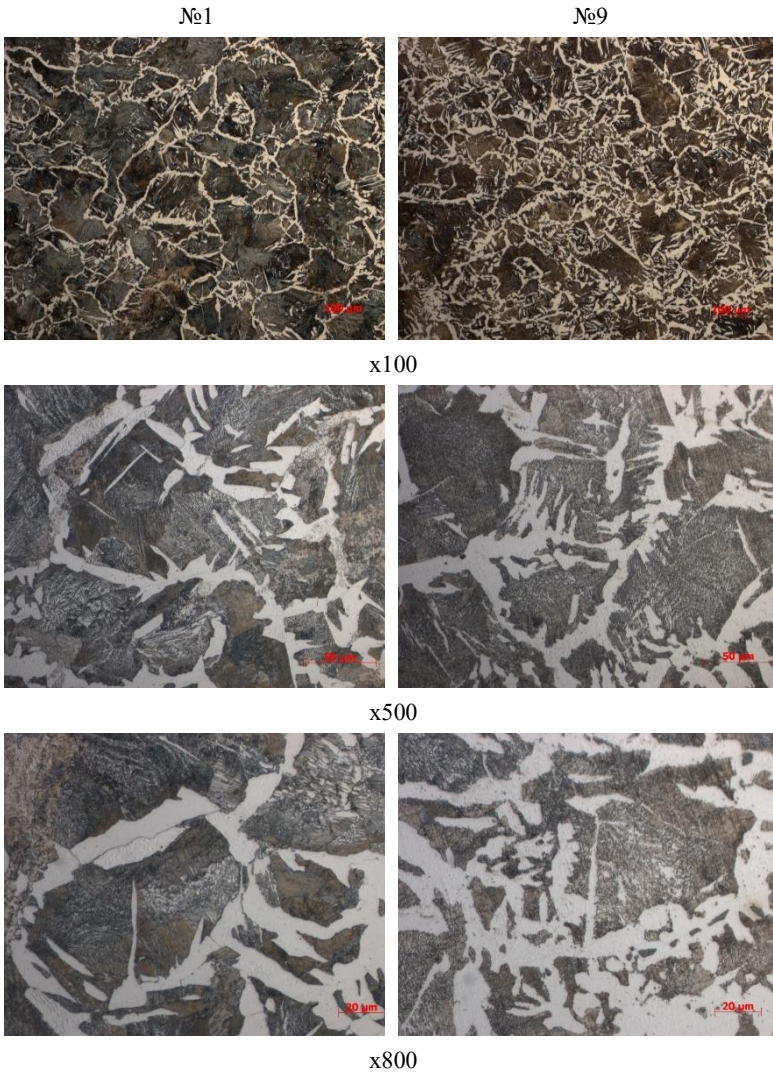


Рисунок 3 – Мікροструктура дослідних зразків № 1 і № 9 з однаковим вмістом вуглецю і з різним вмістом кремнію і марганцю після ГПД

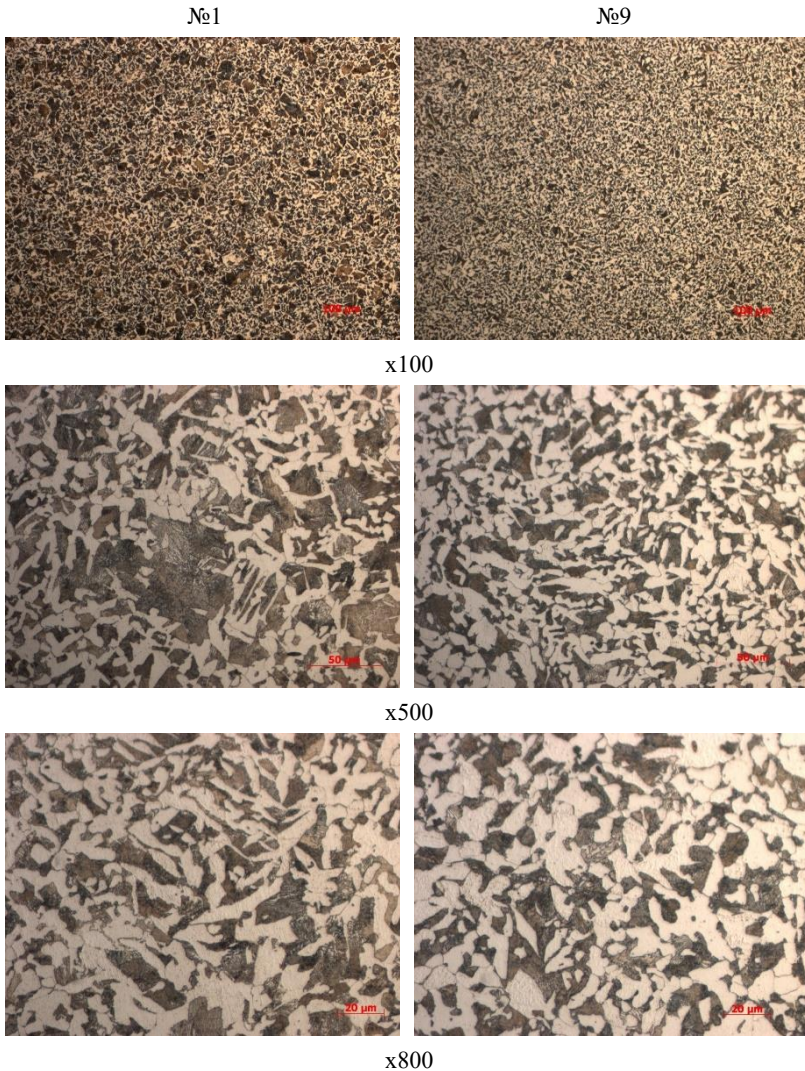


Рисунок 4 – Мікроструктура дослідних зразків № 1 і № 9 з однаковим вмістом вуглецю і з різним вмістом кремнію і марганцю після ГПД + ТО

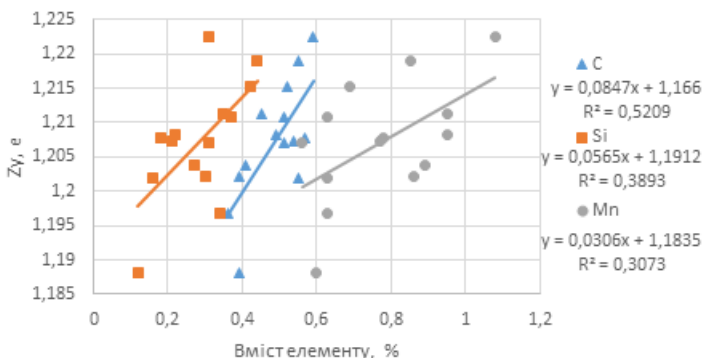


Рисунок 5 – Залежність Z^Y – параметру зарядового стану системи від вмісту основних компонентів дослідної сталі лабораторного виготовлення

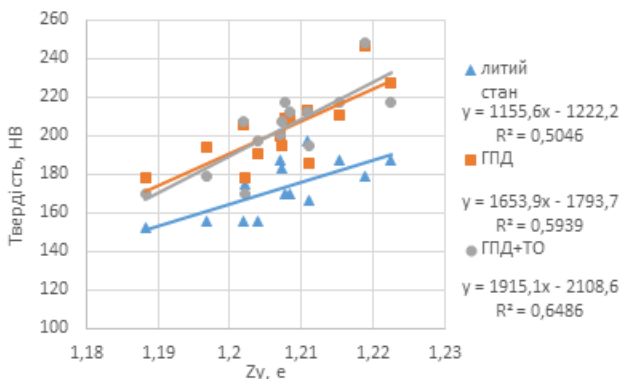


Рисунок 6 – Залежність твердості зразків дослідної сталі лабораторного виготовлення від Z^Y – параметру зарядового стану системи

Встановлено, що при перетині ліній тренду гарячої деформації та термічної обробки, за виконання умови $1,2 \leq Z^Y \leq 1,21$ вони «змінюють» своє положення: до цього інтервалу значень нижче розташовується лінія тренду для стану після термічної обробки, а вище – після гарячої пластичної деформації; після цього інтервалу значень Z^Y – навпаки (рис. 7).

Крім того, були отримані лінійні закономірності впливу інтегрального показника хімічного складу на твердість з більш високим рівнем коефіцієнту апроксимації, ніж для окремих елементів [17]. До того ж вони мають однаковий напрямок як для литого стану, так і для

стану з додатковим наступним обробленням (ГПД та ГПД+ТО): зі збільшенням інтегральних показників хімічного складу (Z^Y , $tg\alpha$, ρl) твердість сталі завжди збільшується, а зі збільшенням середньозваженої між'ядерної відстані d твердість завжди зменшується. Тобто застосування цих параметрів дозволило отримати більш стабільні та надійні закономірності (рис. 6):

$$HB_{\text{лит.}} = 1155,6 Z^Y - 1222,2 \quad (1);$$

$$HB_{\text{ГПД}} = 1653,9 Z^Y - 1793,7 \quad (2);$$

$$HB_{\text{ГПД+ТО}} = 1915,1 Z^Y - 2108,6 \quad (3).$$

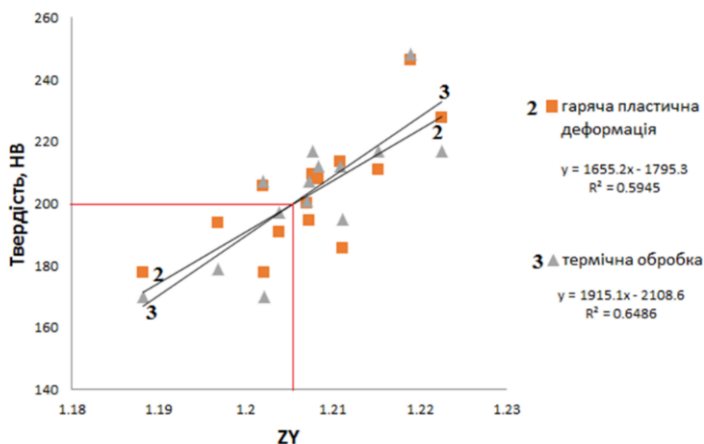


Рисунок 7 – Визначення значення параметру Z^Y , за якого змінюється вплив обробки на рівень твердості зразків дослідної сталі лабораторного виготовлення

Таким чином в результаті досліджень впливу хімічного складу на кількість структурних складових та твердість дослідних сталей у литому стані, після ГПД, та ГПД+ТО встановлено, що за певного хімічного складу при якому Z^Y менше 1,20 твердість сталі у стані після ГПД вище, ніж після наступної термічної обробки. Співставлення одержаних даних таблиці 2 та аналіз представлених закономірностей свідчить, що в основному цій умові відповідають сталі з меншим вмістом вуглецю (марка EA1N) та дві плавки, що співставні за хімічним складом зі сталлю марки F, але мають відносно невелику кількість вуглецю в межах нормативних вимог та кількість марганцю, яка є дещо меншою за мінімальні вимоги стандарту (рис. 1). Такі результати відповідають загальним уявленням про вплив вуглецю та марганцю на

кінетику фазових перетворень. Отже, за результатами досліджень було визначено граничне значення параметру зарядового стану системи Z^Y , до досягнення значень якого на рівні 1,20 є, проводити додаткову нормалізацію сталей задля підвищення твердості немає необхідності, оскільки стан після ГПД забезпечує більш високі значення цієї характеристики. Для сталей з вмістом хімічних елементів, який відповідає більш високим значенням Z^Y ніж 1,20 є, проведення наступної ТО після ГПД є ефективним з точки зору підвищення твердості.

Висновки

1. Виконаний аналіз нормативних вимог щодо вмісту основних хімічних компонентів сталей для залізничних осей марки EA1N (EN13261:2009), марки OC (ДСТУ ГОСТ 4728:2014), марки F (AAR M-101-2017). Встановлено, що нормовані інтервали достатньо широкі та значною мірою перетинаються між собою, що може спричинити широкий розкид значень механічних властивостей за умови відповідності сталі за хімічним складом вимогам стандарту та стабільній технології виготовлення.

2. Досліджено вплив вмісту основних хімічних елементів дослідних сталей для залізничних осей на значення параметрів міжатомної взаємодії, які комплексно характеризують загальний хімічний склад сталі як багатокомпонентної системи. Встановлено, що вуглець має найбільш тісний зв'язок зі значеннями цих параметрів та узгоджується з загальновідомими даними про вплив вуглецю на формування властивостей сталей. Визначено, що у сталях, співставних за хімічним складом зі сталями для залізничних осей марки EA1N та OC, в досліджуваних межах зміни хімічного складу для різних станів оброблення розкид значень твердості складає в середньому близько 9% (від 5% до 13%). Для сталей, співставних за хімічним складом зі сталлю для залізничних осей марки F аналогічний показник складає більше 20%.

3. Встановлено, що після значення зарядового стану при виконанні умови $1,2 \leq Z^Y \leq 1,21$ лінії тренду значень твердості «змінюють» своє положення: до цього інтервалу значень нижче розташовується лінія тренду для стану після термічної обробки, а нижче – після комплексної обробки, яка включає гарячу пластичну деформацію та термічну обробку; після цього інтервалу значень Z^Y – навпаки. Таким чином, встановлено, що для вуглецевих сталей, хімічний склад яких має значення Z^Y 1,20 і менше, проведення додаткової нормалізації після гарячої пластичної деформації не ефективно з точки зору підвищення твердості.

Перелік посилань

1. Novosad M., Fajkoš R., Řeha B., Řezníček R. Fatigue tests of railway axles. *Procedia Engineering*. 2010. Vol. 2(1). P. 2259-2268. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.242>
2. AAR M-101-2017 (Асоціація американських залізниць). Осі з термообробленої та нетермообробленої вуглецевої сталі. Axles, carbon steel, heat-treated. Введ. 2017-02-01. 20 с.
3. IRS: R 16-95, IRS-R-16-95 (Індійський залізничний стандарт). Сталеві осі для пасажирських та вантажних вагонів. Steel axles for carriages and wagons. Введ. 2012-04-03. 23 с.
4. ДСТУ ГОСТ 31334-2007 (Міждержавний стандарт). Осі для рухомого складу залізниць колії 1520 мм. Технічні умови. Axles for rolling stock of 1520 mm gauge railways. Specification. Введ. 2008-07-01. 23 с.
5. ДСТУ ГОСТ 4728:2014 (ГОСТ 4728-2010, IDT) (Національний стандарт України). Заготовки осьові для залізничного рухомого складу. Технічні умови. Axle billets for railway rolling stock. Specifications. Введ. 2015-02-01. 18 с.
6. Керівний документ (КД) 32.144-2000. Контроль неруйнівний приймальний. Колеса цілокатані, бандажі та осі колісних пар рухомого складу. Технічні вимоги. Введ. 2008-01-10. 15 с.
7. ISO 1005/3-1982 (E) (Міжнародний стандарт). (ISO 1005-3:1982). Матеріали для рухомого залізничного складу. Частина 3. Осі для тягового та причіпного рухомого складу. Вимоги до якості. Railway rolling stock material. Part 3: Axles for tractive and trailing stock. Quality requirements. Введ. 1982-04-01. 10 с.
8. СТ РК ИСО 1005/9-2007 (Государственный стандарт Республики Казахстан). Подвижной состав железных дорог часть 9: Осі для тягових и прицепных вагонов. Требования к размерам / Railway rolling stock material. Part 9: Axles for tractive and trailing stock. Dimensional requirements. Введ. 2007-09-14. 33 с.
9. ISO 5948:2018(E) (Міжнародний стандарт). Рухомий склад залізниць. Ультразвукові приймальні випробування / ISO: 5948:2018 (E) (International Standard). Railway rolling stock material. Ultrasonic acceptance testing. Введ. 2018-12-01. 11 с.
10. UIC 811-1(E) (Міжнародний залізничний європейський союз). Технічні умови постачання осей для залізничного рухомого складу. Technical specification for the supply of axles for tractive and trailing stock. Введ. 1987-01-01. 50 с.
11. BS 5892-1:1992+A3:2009, BS 5892 (Британський стандарт). Частина 1. 1983. Матеріал для рухомого залізничного складу. Осі для тягового та рухомого складу. Railway rolling stock materials. Specification for axles for traction and trailing stock. Введ. 2009-11-30. 26 с.
12. TTS 093 (Турецький стандарт). Технічні умови на осі. 2012, 12 с.
13. PN71/K-91046 (Польська версія PN-K-91046:1971, замінений PN-K-91046:1993). Залізничний рухомий склад. Standard gauge rolling stock. Введ. 1993. 49 с.

14. UNI 6551-69 (Італійська версія UNI 6551:1969). Forged, special alloyed steel normalized axles for wheel sets of railway vehicles. Quality, requirements and tests. Ковані нормалізовані осі з легованої сталі для колісних пар залізничного транспорту. Якість, вимоги та випробування. Введ. 1969-10-31.

15. EN 13261:2020 + A1:2010 (E) (Європейський стандарт. Англійська версія). Рейковий транспорт. Колісні пари та візки. Осі. Вимоги до виробу. Railway applications. Wheelsets and bogies. Axles. Product requirements. Введ. 2010-10-01. 55 с.

16. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters. *Lithuanian Journal of Physics*. Vol. 64, No. 1. P. 58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>

17. Поворотня І. Р., Подольський Р. В., Сафронова О. А., Олійник Е.В. Аналіз впливу вмісту та співвідношення хімічних елементів на фазовий склад та твердість вуглецевих сталей різного складу. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 476-489. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-476-489>

References

1. Novosad, M., Fajkoš, R., Řeha, B. & Řezníček, R. (2010) Fatigue tests of railway axles. *Procedia Engineering*, 2(1), 2259-2268. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.242>

2. AAR M-101-2017 (Asotsiatsiia amerykanskykh zaliznyts). Osi z termoobroblenoi ta netermoobroblenoi vuhletsevoi stali. (Association of American Railroads). Heat-treated and non-heat-treated carbon steel axles. Axles, carbon steel, heat-treated. 2017-02-01, 20.

3. IRS: R 16-95, IRS-R-16-95 (Indiyskyi zaliznychnyi standart). Stalevi osi dlia pasazhyrskykh ta vantazhnykh vahoniv [Indian Railway Standard]. Steel axles for passenger and freight wagons. 2012-04-03, 23.

4. DSTU HOST 31334-2007 (Mizhderzhavnyi standart). Osi dlia rukhomoho skladu zaliznyts kolii 1520 mm. Tekhnichni umovy [DSTU GOST 31334-2007 (Interstate standard). Axles for railway rolling stock with a gauge of 1520 mm. Technical conditions] Axles for rolling stock of 1520 mm gauge railways. Specification. 2008-07-01, 23.

5. DSTU HOST 4728:2014 (HOST 4728-2010, IDT) (Natsionalnyi standart Ukrainy). Zahativky osovi dlia zaliznychnoho rukhomoho skladu. Tekhnichni umovy [DSTU GOST 4728:2014 (GOST 4728-2010, IDT) (National Standard of Ukraine). Axle blanks for railway rolling stock. Technical conditions] Axle billets for railway rolling stock. Specifications. 2015-02-01, 18.

6. Kerivnyi dokument (KD) 32.144-2000. Kontrol neruivnyy pryimalnyi. Kolesa tsilokatani, bandazhi ta osi kolisnykh par rukhomoho skladu. Tekhnichni vymohy. [Guidance document (CD) 32.144-2000. Non-destructive acceptance testing. Solid wheels, tires and axles of rolling stock wheelsets. Technical requirements.] 2008-01-10, 15.

7. ISO 1005/3-1982 (E) (Mizhnarodnyi standart). (ISO 1005-3:1982). Materialy dlia rukhomoho zaliznychnoho skladu. Chastyna 3. Osi dlia tiahovoho ta prychipnoho rukhomoho skladu. Vymohy do yakosti [Railway rolling stock

material. Part 3: Axles for tractive and trailing stock. Quality requirements.] 1982-04-01, 10.

8. ST RK YSO 1005/9-2007 (Hosudarstvennii standart Reuspublyky Kazakhstan). Podvyzhnoi sostav zheleznykh doroh chast 9: Osy dlia tiahovykh y prytepynykh vahonov. Trebovaniya k razmeram / Railway rolling stock material. Part 9: Axles for tractive and trailing stock. Dimensional requirements. 2007-09-14, 33.

9. ISO 5948:2018(E) (Mizhnarodnyi standart). Rukhomyi sklad zaliznyts. Ultrazvukovi pryimalni vyprobuvannia [ISO: 5948:2018 (E) (International Standard). Railway rolling stock material. Ultrasonic acceptance testing.] 2018-12-01, 11.

10. UIC 811-1(E) (Mizhnarodnyi zaliznychnyi yevropeyskyi soiuз). Tekhnichni umovy postachannia osei dlia zaliznychnoho rukhomoho skladu. [(International Standard) Technical specification for the supply of axles for tractive and trailing stock.] 1987-01-01, 50.

11. BS 5892-1:1992+A3:2009, BS 5892 (Brytanskyi standart). Chastyna 1. 1983. Material dlia rukhomoho zaliznychnoho skladu. Osi dlia tiahovoho ta rukhomoho skladu [(British Standard) Railway rolling stock materials. Specification for axles for traction and trailing stock]. 2009-11-30, 26.

12. TTS 093 (Turetskyi standart). Tekhnichni umovy na osi. [(Turkish Standard). Technical conditions on the axle.] 2012, 12.

13. PN71/K-91046 (Polska versii PN-K-91046:1971, zaminenyi PN-K-91046:1993). Zaliznychnyi rukhomyi sklad [(Polish version PN-K-91046:1971, replaced by PN-K-91046:1993). Railway rolling stock] Standard gauge rolling stock. 1993, 49.

14. UNI 6551-69 (Italiiska versii UNI 6551:1969). Kovani normalizovani osi z lehovanoi stali dlia kolisnykh par zaliznychnoho transportu. Yakist, vymohy ta vyprobuvannia [(Italian version UNI 6551:1969) Forged, special alloyed steel normalized axles for wheel sets of railway vehicles. Quality, requirements and tests] 1969-10-31, 30.

15. EN 13261:2020 + A1:2010 (E) (levropeyskyi standart. Anhliiska versii). Reikovyi transport. Kolisni pary ta vizky. Osi. Vymohy do vyrobu [(European standard. English version). Railway applications. Wheelsets and bogies. Axles. Product requirements.] 2010-10-01, 55 .

16. Togobitska, D. & Belkova, A. (2024) New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters. *Lithuanian Journal of Physics*. 64(1), 58-71. <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>

17. Povorotnia, I. R., Podolskyi, R. V., Safronova, O. A. & Oliinyk, E.V. (2023) Analysis of the influence of the content and ratio of chemical elements on the phase composition and hardness of carbon steels of different compositions. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 37, 476-489. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-476-489>

I. R. Povorotnia¹, Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0001-5872-7403
O. A. Safronova¹, Junior Researcher, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-4032-4275
R. V. Podolsky¹, Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0002-0288-0641
E. V. Oliinyk¹, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-3366-3746

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE PHASE STRUCTURE AND HARDNESS OF CARBON STEEL FOR RAILWAY AXLES AFTER DEFORMATION AND HEAT TREATMENT

Abstract. Given the considerable number of complex approaches using information technologies to justify the choice of the content of chemical elements in steel and the limitations inherent in them, the use of the concept of directional chemical bonding is proposed, which ensures high predictive accuracy and obtaining the necessary properties at the level demanded by the consumer. The paper analyzes the requirements of regulatory documentation regarding the chemical composition, namely the content of the main components such as carbon, manganese and silicon, in steel for railway axles of grades EA1N, F and OC. Information technologies were applied using the concept of directed interatomic interaction, when the criteria are complex and characterize the entire composition simultaneously, and linear patterns of the influence of the integral indicator of the chemical composition on hardness were obtained. The purpose of the study is to establish the patterns of the influence of chemical composition on the formation and transformation of the phase structure and hardness after deformation and thermal annealing of carbon steel for railway axles. The object of research was laboratory ingots of carbon steels, which are comparable in chemical composition to steels for railway axles in accordance with state, European and American standards. The samples made from them were subjected to hot plastic deformation (HPD) followed by heat treatment (HPD+HT). A microstructural analysis of the studied steels was carried out. The regularities of the influence of chemical composition on the phase ratio and hardness of the studied steels in different states were revealed: as-cast, after HPD and HPD+HT using the concept of directional chemical bonding. It was established that for an integral parameter of the charge state (Z^Y) less than 1.20 e, that is, for a certain chemical composition in the studied interval of values, the hardness of steel in the state after GPA exceeds the hardness of such steel in the state after HPD+HT.

Key words: railway axles, national standard, chemical composition, mechanical properties, microstructure.

For citation: Povorotnia, I. R., Safronova, O. A., Podolsky, R. V., & Oliinyk, E. V. (2024). Influence of chemical composition on the phase structure and hardness of carbon steel for railway axles after deformation and heat treatment. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 656-671. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-656-671>

*Стаття надійшла до редакції збірника 02.11.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)*