

УДК 691.735:621.893

І. Р. Поворотня¹, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-5872-7403**Р. В. Подольський**¹, Ph.D., н.с., ORCID 0000-0002-0288-0641**О. А. Сафронова**¹, м.н.с., аспірант, ORCID 0000-0002-4032-4275**Е. В. Олійник**¹, аспірант, ORCID 0000-0002-3366-3746¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некасова НАН України*

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВМІСТУ ТА СПІВВІДНОШЕННЯ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ФАЗОВИЙ СКЛАД ТА ТВЕРДІСТЬ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ РІЗНОГО СКЛАДУ

Анотація. Ресурс осі залежить від багатьох показників, які визначають її службові характеристики. Це – хімічний склад сталі, структурний стан, рівень показників міцності, пластичності, в'язкості та ін. Однак найважливішим технічним показником працездатності осі є її втомна міцність. Для забезпечення високої надійності осей необхідно формувати однорідну структуру та досягати оптимальної чистоти металу, уникаючи формування грубих неметалевих включень та їх скупчень. Відомо, що ліквіація в більшості випадків утворюється під час кристалізації (твердіння злитка або безперервнолітої заготовки БЛЗ). Спадковий вплив особливостей первинного структуроутворення БЛЗ і факторів, що їх визначають, на кінцеву мікроструктуру і комплекс властивостей готової металопродукції недостатньо вивчені. Мета: дослідження впливу хімічного складу вуглецевих сталей з різним вмістом та співвідношенням базових хімічних елементів на особливості формування мікроструктури вуглецевої сталі та її твердості. В рамках даної роботи виплавлено дослідні злитки вуглецевих сталей різного хімічного складу. Зразки піддавали гарячій пластичній деформації і термічній обробці. Гаряча пластична деформація проведена методом осаджування при температурі 1260°C на 50%. Наступна термічна обробка складалась з нормалізації від 850°C. За результатами металографічного дослідження було розраховано кількісне співвідношення перліту та фериту у дослідних зразках у литому стані, після гарячої пластичної деформації та після наступної термічної обробки. Методом Бринеля визначали твердість дослідних сталей в різному стані. Фазовий склад оцінювали за допомогою програмного забезпечення ImageJ. Підтверджено основоположну роль вуглецю у формуванні кількості перлітної складової і твердості. Встановлений фрагментарний вплив вмісту марганцю на кількість перліту у дослідних зразках після термічної обробки, який збільшується зі зростанням вмісту цього елемента. Виявлено тісний зв'язок ванадію з кількістю перлітної складової у стані після гарячої пластичної деформації та частково після гарячої пластичної деформації з наступною термічною обробкою. Алюміній також має фрагментарний вплив – з ростом вмісту цього елемента частково зменшується кількість перліту, а для іншої частини плавок дослідних сталей

навпаки – зростає частка перліту з ростом вмісту алюмінію.

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

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

Стан питання. Як відомо, неоднорідність розподілу хімічних елементів у структурі вуглецевих сталей утворюється переважно під час кристалізації – твердіння злитка або безперервнолітої заготовки.

Автори роботи [1], дослідивши формування структури залізничних осей, виготовлених з безперервнолітих заготовок різного перерізу, відзначають, що до сих пір особливості виробництва безперервнолітих заготовок, їх вплив на морфологію і кінетику утворення первинної структури практично не враховувалися при розробці технологічних режимів гарячої деформації і термічної обробки осьових заготовок. Недостатньо вивчено і майже не використовується спадковий вплив особливостей механізму первинного структуроутворення БЛЗ і факторів, що їх визначають, на кінцеву мікроструктуру і комплекс властивостей готової металопродукції [2]. Адже нерівномірність розподілу феритних і перлітних ділянок, обумовлена хімічною неоднорідністю, навіть в разі задовільних показників металографічного аналізу (вміст неметалевих включень, величина зерна сталі), як показано раніше [3, 4], погіршує механічні властивості термічно обробленого прокату, зокрема, знижує пластичні характеристики та ударну в'язкість.

Спроби пояснити вплив хімічної неоднорідності на формування мікроструктури конструкційних сталей в процесі гарячої деформації і термічної обробки були зроблені в роботах [3, 5-9]. Завдяки результатам, отриманим у роботах [6, 10-12], було встановлено, що хімічна мікронеоднорідність, яка утворилась під час кристалізації злитка, при гарячій деформації трансформується у волокнисту хімічну мікронеоднорідність, яка впливає на формування зеренної структури заготовок та прокату з вуглецевих та низьколегованих сталей конструкційного призначення. Так, деякі дослідники пояснюють утворення цього впливу спадкоємної хімічної мікронеоднорідності на формування нерівномірної зеренної структури у прокаті, початковою заготовкою для виготовлення якого була БЛЗ.

За винятком вуглецю, різні елементи, що присутні в хімічному складі сталі, мають низький ступінь дифузії у твердому стані, тому неоднорідність, яка існує наприкінці твердіння, суттєво не змінюється в процесі кристалізації злитка [13]. Нагрів до температур порядку 1200 °С, який використовують перед прокаткою, може тільки трошки зменшити первісний ступінь ліквації хімічних елементів, не змінюючи значно весь комплекс [6]. Тому можна стверджувати, що на формування зернистої структури при початковій деформаційно-термічній обробці БЛЗ безпосередньо впливає дендритна ліквація.

Утворення нерівномірної смугастої ферито-перлітної структури обумовлює в основному марганець, тому що будучи аустенітостабілізуючим елементом, він гальмує утворення зародків фериту і процес їх наступного зростання. Доевтектоїдний ферит утворюється у волокнах, що відповідають колишнім дендритним осям з низьким вмістом марганцю, а перліт, навпаки, утворюється в основному у волокнах, що відповідають колишнім міждендритним просторам [9].

Закладання певних ознак технологічної спадковості відбувається на всіх етапах плавлення, кристалізації, структуроутворення, твердофазних перетвореннях; різних видах термічної, деформаційно-термічної, деформаційної обробки і тощо У більшості випадків саме технологічні чинники відповідають за формування особливостей будови і проявів структурної спадковості сталей та сплавів.

Зазвичай, сталі із вмістом вуглецю від 0,40 до 0,60% застосовують для виготовлення рейок, залізничних коліс та залізничних осей. У ці сталі додають заміщаючі легуючі елементи, такі як хром (Cr), марганець (Mn), молібден (Mo) і нікель (Ni), щоб забезпечити більш високу прогартуваність і поліпшити здатність сталей піддаватися термічній обробці, у тому числі на певну глибину зміцнення та опір розміцненню під час відпуску [14].

Введення в сталь марганцю, нікелю, хрому і молібдену сприятливо позначається на зносостійкості сталі. Однак зміст цих елементів має бути суворо обмежений виходячи з економічних та технологічних аспектів вирішення питання щодо розробки матеріалу.

Марганець збільшує характеристики міцності і підвищує прогартуваність сталі. При збільшенні вмісту його в сталі до 2% (ваг.), монотонно підвищується тимчасовий опір руйнування при розтягуванні, але підвищення межі плинності зберігається при додаванні Mn тільки до 1,5% (мас). Ударна в'язкість знижується зі збільшенням концентрації Mn і особливо інтенсивно при вмісті його вище 1,5% (ваг.). Нікель збільшує в'язкість і міцність сталі, покращує зварюваність, підвищує прогартуваність [15]. Хром підвищує

міцність, пластичність конструкційних сталей, особливо у поєднанні з нікелем, зменшує схильність сталі до перегріву, покращує прогартуваність. Молибден зменшує крихкість сталі при відпуску, полегшує механічну обробку [16]. Сприяє подрібненню зерна, підвищує корозійну стійкість.

Мета дослідження – дослідження впливу зміни хімічного складу вуглецевих сталей з різним вмістом та співвідношенням базових хімічних елементів на особливості формування мікроструктури вуглецевої сталі та її твердості.

Матеріал та методика дослідження. Матеріалом дослідження були лабораторні сталі, що є співставними за хімічним складом зі сталями для залізничних осей марки EA1N (EN13261:2009), марки OC (ДСТУ ГОСТ 4728:2014), марки F (AAR M-101-2017) (табл. 1).

Для вирішення поставленого завдання використовувалася лабораторна індукційна плавильна піч, до складу якої входить: плавильний модуль - ІТПЕ-0.01 і генератор ВТГ-20-22. Для забезпечення необхідних показників в досліджуваних варіантах дослідного складу сталі і відсутності небажаних домішок присутніх в рядовому брухті в якості вихідної сировини вибрали метал катаного дроту, хімічний склад якого наведено в табл. 2.

Проби зі сталі дослідного хімічного складу підлягали гарячій пластичній деформації (ГПД) при температурі $1260 \pm 10^\circ\text{C}$ осаджуванням на 50%. Потім проводили термічну обробку (ТО), яка відповідає прийнятій при виробництві залізничних осей: нормалізація (охолодження на повітрі) після нагріву та витримки 30 хв. при 850°C .

Мікроструктуру досліджували у литому стані, після ГПД та ГПД+ТО. Металографічний аналіз виконано на світловому (оптичному) мікроскопі «Axiovert 200 M MAT» виробництва фірми «Carl Zeiss». Мікроструктуру зразків вуглецевої сталі виявляли травленням в 4-% спиртовому розчині азотної кислоти HNO_3 (ніталь).

Фазовий склад на мікроструктурах досліджуваних зразків вимірювався за допомогою програмного забезпечення ImageJ. Це програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, що написана на мові Java для аналізу та обробки зображень, в тому числі і мікроструктур.

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). Контроль твердості виконували на бічній поверхні темплету (середнє значення по 3 вимірюванням).

Таблиця 1 – Хімічний склад дослідних плавок, % ваг.

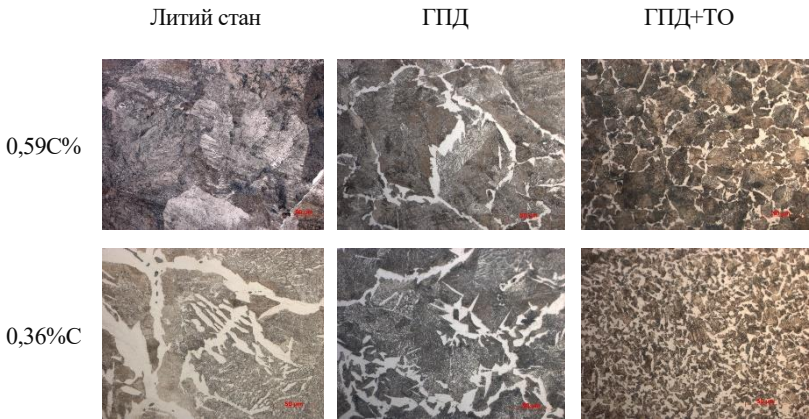
Умовне маркування сталі	Основні елементи				Mn /Si%	Елементи									
	C	Si	Mn	P		S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V	Ti		
C2	0,52	0,42	0,69	1,64	0,012	0,0055	0,057	0,087	0,0094	0,032	0,136	0,0026	0,0015		
C3	0,51	0,37	0,63	1,7	0,013	0,0054	0,056	0,089	0,0094	0,027	0,135	0,003	0,0013		
C4	0,51	0,31	0,56	1,78	0,013	0,0055	0,056	0,086	0,0095	0,039	0,135	0,003	0,001		
1	0,39	0,12	0,6	5	0,021	0,024	0,027	0,021	0,0029	0,0005	0,027	0,0011	0,0005		
2	0,55	0,16	0,63	3,94	0,021	0,029	0,027	0,026	0,003	0,0016	0,026	0,0011	0,0005		
3.1	0,55	0,44	0,85	1,93	0,023	0,034	0,027	0,025	0,0022	0,016	0,026	0,0022	0,0014		
3.2	0,59	0,31	1,08	3,48	0,026	0,03	0,028	0,027	0,0022	0,043	0,029	0,0023	0,0013		
4	0,45	0,35	0,95	2,71	0,019	0,037	0,028	0,028	0,0013	0,022	0,026	0,0019	0,0013		
5	0,49	0,22	0,95	4,32	0,021	0,032	0,028	0,028	0,0034	0,022	0,027	0,0015	0,0014		
6	0,54	0,21	0,77	3,67	0,016	0,023	0,024	0,028	0,019	0,026	0,026	0,0021	0,0008		
7	0,57	0,18	0,78	4,33	0,016	0,03	0,023	0,026	0,001	0,01	0,027	0,0023	0,0008		
8	0,36	0,34	0,63	1,85	0,019	0,025	0,027	0,024	0,0026	0,031	0,026	0,002	0,0011		
9	0,39	0,3	0,86	2,87	0,018	0,026	0,025	0,022	0,0027	0,017	0,025	0,001	0,0012		
10	0,41	0,27	0,89	3,3	0,02	0,029	0,027	0,03	0,0028	0,033	0,029	0,001	0,0032		

Таблиця 2 – Хімічний склад шихти, % мас.

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	V	Cu	Ti	Mo	Al
0,081	0,006	0,347	0,015	0,018	0,028	0,032	0,008	0,026	-	0,0046	0,031

Результати дослідження

В результаті металографічного дослідження дослідних сталей у литому стані, після ГПД і після ГПД+ТО визначено їх фазовий склад. Мікроструктура зразків з найбільшим і найменшим вмістом вуглецю №3.2 і №8, де вміст вуглецю складає 0,59С% мас. і 0,36%С мас. відповідно наведено на рисунку 1.



Рисунки 1 – Мікроструктура дослідних зразків № 3.2 і № 8 з вмістом вуглецю складає 0,36%С мас. і 0,59С% мас. $\times 500$.

Встановлено, що мікроструктура досліджуваного металу являє собою ферит та перліт як в литому стані, так і після наступних обробок. Можна відзначити, що після ГПД та ГПД+ТО відбувається зменшення середнього розміру зерна та збільшення кількості фериту. За допомогою програми ImageJ проводився розрахунок співвідношення феритної і перлітної фаз. Результати розрахунку приведені в таблиці 3. Також в табл. з наведеними середніми значеннями твердості дослідних сталей у відповідному стані.

Були виконані дослідження для встановлення впливу структурного стану на твердість (рис. 2), хімічного складу на структуру та твердість вуглецевої сталі з різним вмістом та співвідношенням базових хімічних елементів в литому стані, після ГПД і ГПД+ТО (рис. 3).

Таблиця 3 – Кількість перліту (П), фериту (Ф) та середня твердість (НВ) дослідних сталей в литому стані та після обробки.

Умовне маркування сталі	Литий стан			Гаряча пластична деформація			Гаряча пластична деформація та наступна термічна обробка (нормалізація)		
	НВ	Структурна складова, %		НВ	Структурна складова, %		НВ	Структурна складова, %	
		П	Ф		П	Ф		П	Ф
C2	187	75,34	24,66	211	93,57	6,44	217,00	76,15	18,9
C3	197	67,54	32,46	213,5	93,15	6,85	212,00	79,66	20,34
C4	187	78,71	21,29	200	94,15	5,85	201,00	75,68	24,32
1	152,5	76,3	23,7	177,75	81,39	18,62	170,00	62,34	37,66
2	156	23,8	76,2	205,5	93,47	6,54	207,00	89,4	10,6
3.1	179	70,61	29,39	246,25	98,24	1,77	248,00	89,56	10,44
3.2	187	70,9	29,1	227,5	92,78	7,23	217,00	84,55	15,45
4	166,5	87,22	12,78	185,5	91,46	8,55	195,00	71,45	28,55
5	170	72,74	27,26	208	89,30	10,70	212,00	86,51	13,49
6	183	72,62	27,38	194,5	93,30	6,70	207,00	87,02	12,98
7	170	74,85	25,15	209,25	96,95	3,06	217,00	92,29	7,71
8	156	72,95	27,05	193,75	84,83	15,17	179,00	77,73	22,27
9	174,5	72,04	28,51	177,75	73,58	26,43	170,00	64,37	35,63
10	156	82,41	17,59	190,75	84,18	15,83	197,00	76,15	23,85

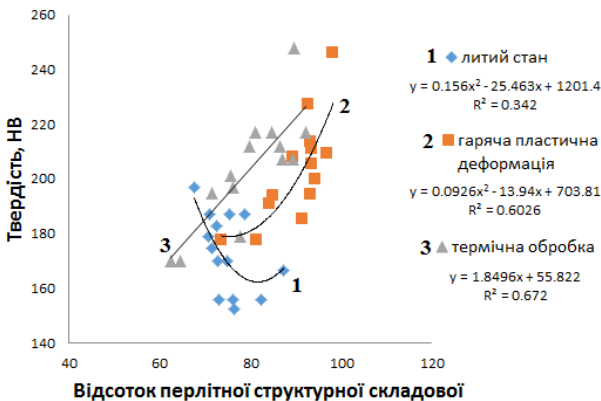


Рисунок 2 – Вплив кількості перлітної структурної складової на твердість досліджуваних зразків з дослідних сталей лабораторного виготовлення.

Як видно з рис. 2, після ГПД та ГПД+ГО зі збільшенням частки перлітної складової твердість підвищується. При цьому після термічної обробки характер цього впливу більш рівномірний, в той час як після гарячої пластичної деформації характер цього впливу стає більш інтенсивним при більшому відсотку перліту. Необхідно відзначити, що в литому стані напрямок цього впливу протилежний: при збільшенні кількості перліту твердість зменшується. Для пояснення цього ефекту додатково було проведено вимірювання мікротвердості. Встановлено, що мікротвердість грубого перліту в литому стані складає 2480 МПа/мм², а мікротвердість дисперсного перліту в стані після термічної обробки – 2650 МПа/мм². Через більш низьку твердість грубого перліту, твердість сталі в литому стані має зворотній характер залежності. Зміна кількості феритної складової на твердість впливає у протилежному напрямку ніж перлітна.

Базовими (матричними) елементами, що формують основу сплаву, окрім вуглецю, вважають кремній і марганець. Встановлено, що вуглець відіграє основоположну роль у формуванні кількості перлітної складової і твердості (рис. 3, а). Чітких залежностей, щодо впливу кремнію не спостерігається (рис. 3, б). Марганець має наступний вплив на вміст перліту у литому стані: кількість перліту зменшується зі зростанням відсотку марганця, проте дві плавки випадають з загального тренду. Тільки після термічної обробки кількість перліту збільшується з підвищенням вмісту марганцю (рис. 3, в). Співвідношення марганця до кремнію не має чіткого впливу, його значимість можна бачити на окремих ділянках для литого стану та після термічної обробки (рис. 3, г).

Хром, нікель, молібден розбивають на області з відкорегованими значеннями по їх вмісту, однак трендових залежностей не виявлено. Впливу сірки, фосфору та міді на кількість перлітної складової не встановлено.

Алюміній має деякий вплив на фрагменти даних у литому стані та частково у стані після термічної обробці (рис. 4, а), ймовірно їх потрібно окремо виділити та розглянути при подальших дослідженнях. На етапі гарячої пластичної деформації не виявлено значущого впливу.

Ванадій має тісний зв'язок з перлітною складовою у стані після гарячої пластичної деформації ($R^2 = 0,52$) та частково після наступної термічної обробки (виділена область, рис. 4).

Вплив елементів на кількість фериту має аналогічні залежності, але протилежний напрямок.

Оскільки при виготовленні лабораторних плавок технічно дуже складно зафіксувати хімічний склад плавки за всіма іншими елементами

окрім аналізованого, то неможливо уникнути їх впливу та стає неможливим встановлення закономірностей впливу одного з елементів на параметри структури або механічні властивості дослідних сталей.

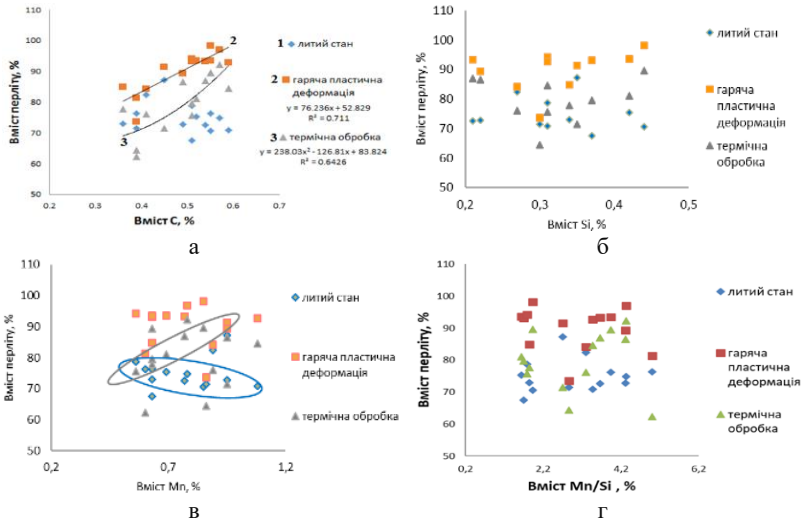


Рисунок 3 – Вплив вмісту вуглецю, кремнію, марганцю та їх співвідношення на кількість перліту в дослідних сталях лабораторного виготовлення.

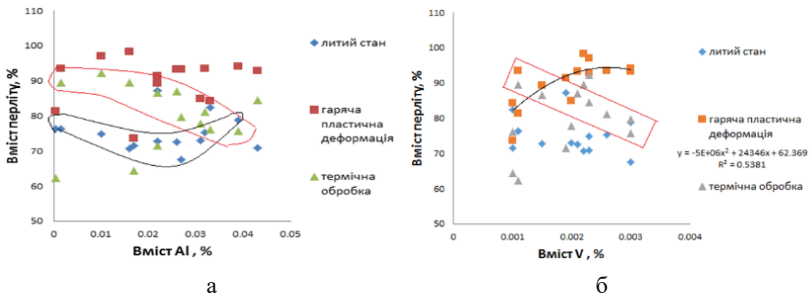


Рисунок 4 – Вплив вмісту алюмінію та ванадію на кількість перліту в дослідних сталях лабораторного виготовлення.

Для встановлення більш точних закономірностей, при подальших дослідженнях планується застосовувати інтегральні параметри міжатомної взаємодії, що відображають фізико-хімічні аспекти поведінки багатоконпонентного розплаву. Теоретичні аспекти міжатомної взаємодії базуються на концепції спрямованого хімічного

зв'язку, що розглядає металевий розплав, як хімічно єдину систему. Застосування цього підходу дозволить реалізувати «згортку» повного хімічного складу багатокомпонентного сплаву, що дозволить збільшити інформаційну потужність моделей та знизити їх параметричність.

Висновки

1. Виконаний огляд тенденцій щодо застосування кремнію і марганцю в вуглецевих сталях, аналіз впливу їх вмісту та співвідношення на механічні властивості, фазовий склад, рівномірність зеренної структури.

2. Виготовлено дослідні злитки вуглецевих сталей різного хімічного складу. За результатами металографічного дослідження розраховано кількісне співвідношення перліту та фериту у дослідних зразках у литому стані, після гарячої пластичної деформації та після наступної термічної обробки.

3. Досліджений вплив хімічного складу дослідних сталей, що призначенні для виготовлення залізничних осей, на формування структури та твердість

4. Підтверджено, що вуглець відіграє основоположну роль у формуванні кількості перлітної складової і твердості. Встановлений фрагментарний вплив вмісту марганцю на кількість перліту у стані після термічної обробки, який збільшується зі зростанням вмісту цього елемента. Виявлено, що ванадій має тісний зв'язок з кількістю перлітної складової у стані після гарячої пластичної деформації та частково після гарячої пластичної деформації та після наступної термічної обробки. Також фрагментарно має вплив алюміній – частково зменшується кількість перліту з ростом вмісту цього елемента, а для іншої частини навпаки – зростає частка перліту з ростом вмісту алюмінію.

Перелік посилань

1. Левченко Г. В., Грицай Т. В. Формирование структуры железнодорожных осей, изготовленных из непрерывнолитых заготовок различного сечения. *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии*. 2012. № 26. С. 218-227.

2. Парусов В. В., Сычков А. Б., Парусов Э. В. *Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки* : монография. Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2012. 376 с.

3. Влияние деформированного состояния заготовок на однородность микроструктуры железнодорожных осей / Г. В. Левченко, Е. Г. Дёмина, С. А. Воробей, Е. Е. Нефедьева, И. Д. Буга, Ю. Г. Антонов, Г. А. Мединский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. № 3. С. 70-75.

4. Качество арматурного проката для анкерного крепления горных выработок / Г. В. Левченко, С. А. Воробей, Е. Г. Дёмина, А. В. Кекух, И. А.

Гунькин, В. В. Винаградов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. № 5. С. 29-33.

5. Влияние режимов деформации слитка осевой стали на повышение ударной вязкости железнодорожных осей / Е. Г. Дёмина, С. А. Здоровец, В. И. Сухомлин, Ж. З. Чехута // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии*. 2010. № 21. С. 227-237.

6. Трансформация дендритной структуры при производстве железнодорожных осей / Г. В. Левченко, С. В. Ершов, Е. Г. Дёмина, Г. А. Мединский, Г. Б. Иванов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 2. С. 74-76.

7. Левченко Г. В. (рук.); Воробей С. А. (исполн.) и др. Изучение закономерностей формирования диспергированной структуры стали в процессе деформационно-термической обработки проката больших сечений [Текст]: отчёт о НИР / Институт чёрной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины; Днепропетровск, 2011. 191 с. № ГР 0109U002448

8. Нефедьєва О. Є. Закономірності впливу температурно-деформаційних параметрів обробки сталі на формування рівномірної дрібнозернистої структури залізничних осей: дис. кандидата техн. наук: 05.16.01. Дніпропетровськ, 2013. 123с.

9. Паршин В. М., Козачок Е. А., Корниенко А. И. Особенности литой структуры непрерывнолитых слитков прямоугольного сечения. *Известия вузов. Чёрная металлургия*. 1987. № 11. С. 43-47.

10. Левченко Г. В., Грицай Т. В., Нефедьєва О. Є. Особливості формування структури трубних заготовок, виготовлених зі злитка та безперервнолитого металу. *Металознавство та обробка металів*. 2011. № 2. С. 12-18.

11. Левченко Г. В., Дёмина Е. Г., Кныш А. В. Влияние содержания кремния на формирование структуры волокнистого композита в арматурном прокате. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 1. С. 83-87.

12. Обеспечение качества железнодорожных осей, изготовленных из непрерывнолитых заготовок различного сечения / Г. В. Левченко, Т. В. Балаханова, Е. Е. Нефедьєва, В. В. Мосьпан, Ю. Г. Антонов, Г. А. Мединский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 9. С. 29-33.

13. Колосов М. И., Строганов А. И., Смирнов Ю. Д. *Качество слитка спокойной стали*. Москва : Металлургия, 1973. 408 с.

14. Atomic and nanoscale chemical and structural changes in quenched and tempered 4340 steel / A. J. Clarke, M. Miller, R. Field, D. Coughlin, P. Gibbs, K. D. Clarke, D. Alexander, K. Powers, A. P. Papin, G. Krauss // *Acta Materialia*. 2014. № 77. P. 17–27.

15. Высоковский С. И., Гуглин Н.Н., Левин Л. С., Маресев М. И., Филорикьян Б. К. О путях повышения противоснарядной стойкости катаной стальной брони для танков. *Вопросы оборонной техники*. Серия XX. Выпуск 63. 1976 г. URL: http://btvt.info/5library/vop_1976_btk1.htm (Дата звернення 01.10.2023)

16. Макаров Г. Г., Рахимжанов Н. Е., Колмогоров М. А., Королёв П. А. *Броневые стали для советских танков. 100 лет отечественному танкостроению. состояние и развитие бронетанкового вооружения и*

техники. 2020. С. 106-110.

References

1. Levchenko, H. V., & Hrytsai, T. V. (2012). Formyrovanye struktury zheleznodorozhnykh osei, yzgotovlennyykh yz nepreryvno lyutyykh zahotovok razlychnoho secheniya [Formation of the structure of railway axles made of continuously cast blanks of various cross-sections]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 26, 218-227
2. Parusov, V. V., Sychkov, A. B., & Parusov, E. V. (2012). Teoretycheskiye y tekhnolohycheskiye osnovy proyzvodstva vysokoeffektivnykh vydvov katanky: monohrfyia [Theoretical and technological foundations of the production of highly effective types of wire rod: monograph]. ART-PRESS
3. Levchenko, H. V., Demyna, E. H., Vorobei, S. A., Nefedeva, E. E., Buha, Y. D., Antonov, Yu. H., & Medynskiy, H. A. (2010). Vliyanie deformirovannogo sostoyaniya zagotovok na odnorodnost mikrostrukturyi zheleznodorozhnyih osey [Influence of the deformed state of the workpieces on the homogeneity of the microstructure of railway axles]. *Metallurgical and mining industry*, 3, 70-75
4. Levchenko, H. V., Vorobei, S. A., Demyna, E. H., Kekukh, A. V., Hunkyn, Y. A., & Vynahradov, V. V. (2005). Kachestvo armaturnogo prokata dlya ankernogo krepleniya gornyyh vyirabotok [Quality of reinforcement bars for anchoring of mine workings]. *Metallurgical and mining industry*, 5, 29-33
5. Dyomina, E. G., Zdorovets, S. A., Suhomlin, V. I., & Chehuta, Zh. Z. (2010). Vliyanie rezhimov deformatsii slitka osevoy stali na povyishenie udarnoy vyzkostyi zheleznodorozhnyih osey [Influence of deformation modes of axial steel ingot on increasing the impact strength of railway axles]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 21, 227-237
6. Levchenko, G. V., Ershov, S. V., Deomina, E. G., Medinskiy, G. A., & Ivanov, G. B. (2008). Transformatsiya dendritnoy strukturyi pri proizvodstve zheleznodorozhnyih osey [Transformation of dendritic structure in the production of railway axles]. *Metallurgical and mining industry*, 2, 74-76
7. Levchenko H. V., Vorobei S. A. et al. (2011). Yzuchenye zakonomernosti formyrovaniya dysperhyrovannoi struktury staly v protsesse deformatsyonno-termicheskoi obrabotky prokata bolshykh secheniy [Study of the patterns of formation of a dispersed structure of steel in the process of deformation-heat treatment of rolled products of large sections]: research report / Institute of Ferrous Metallurgy named after. Z. I. Nekrasova NAS of Ukraine; Dnepropetrovsk, 191 p. No. 0109U002448
8. Nefedieva, O. Ye. (2013). Zakonomirnosti vplyvu temperaturno-deformatsiinykh parametrov obrobky stali na formuvannia rivnomirnoi dribnozernystoi struktury zaliznychnyykh osei [Patterns of influence of temperature and deformation parameters of steel processing on the formation of a uniform fine-grained structure of railway axles]: thesis technical candidate Sciences: 05.16.01. Dnipropetrovsk, 123 p
9. Parshyn, V. M., Kozachok, E. A., & Korniyenko, A. Y. (1987) Osobennosti litoi strukturyi nepreryvno lyutyykh slitkov pryamougolnogo secheniya [Features of the cast structure of continuously cast rectangular ingots]. *University News. Ferrous*

metallurgy, 11, 43-47

10. Levchenko, G. V., Gritsay, T. V., & Nefedieva, O. E. (2011). Osoblyvosti formuvannia struktury trubnykh zahotovok, vyhotovlenykh zi zlytka ta bezperervnolytogo metalu [Peculiarities of forming the structure of pipe blanks made of ingot and continuously cast metal]. *Metallurgy and metal processing*, 2, 12-18

11. Levchenko, G. V., Demina, E. G., & Knyish, A. V. (2009). Vliyanie soderzhaniya kremniya na formirovanie struktury voloknistogo kompozita v armaturnom prokate [The influence of silicon content on the formation of the structure of a fibrous composite in rolled reinforcing bars]. *Metallurgical and mining industry*, 1, 83-87

12. Levchenko, G. V., Balahanova, T. V., Nefedeva, E. E., Mospan, V. V., Antonov, Yu. G., & Medinskiy, G. A. (2016). Obespechenie kachestva zheleznodorozhnyih osey, izgotovlennyih iz nepreryvnolytyih zagotovok razlichnogo secheniya [Ensuring the quality of railway axles made from continuously cast billets of various sections]. *Metallurgical and mining industry*, 9, 29-33

13. Kolosov, M. I., Stroganov, A. I., Smirnov, & Yu. D. (1973). Kachestvo slitka spokoynoy stali [Quality of mild steel ingot]. Moscow : Metallurgy, 408 p

14. Clarke, A. J., Miller, M., Field, R., Coughlin, D., Gibbs, P., Clarke, K. D., Alexander, D., Powers, K., Papin, A. P., & Krauss, G. (2014). Atomic and nanoscale chemical and structural changes in quenched and tempered 4340 steel. *Acta Materialia*, 77, 17-27

15. Vysokovskij, S. I., Guglin, H. N., Levin, L. S., Maresev, M. I., & Filorikyan, B. K. (1976). O putyah povysheniya protivosnaryadnoj stojkosti katanoj stalnoj broni dlya tankov [On ways to increase the projectile resistance of rolled steel armor for tanks]. *Voprosy oboronoj tehniki* [Defense technology issues]. Series XX, 63. http://btvt.info/5library/vop_1976_btk1.htm

16. Makarov, G. G., Rakimzhanov, N. E., Kolmogorov, M. A., & Korolyov, P. A. (2020). Bronevye stali dlya sovetских tankov [Armor steel for Soviet tanks]. *100 years of domestic tank construction. state and development of armored weapons and equipment*, 106-110

I. R. Povorotnia¹, Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0001-5872-7403

R. V. Podolskyi¹, Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0002-0288-0641

O. A. Safronova¹, Junior Research, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-4032-4275

E. V. Oliinyk¹, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-3366-3746

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE CONTENT AND RATIO OF CHEMICAL ELEMENTS ON THE PHASE COMPOSITION AND HARDNESS OF CARBON STEELS OF DIFFERENT COMPOSITION

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

Abstract. The axle resource depends on many indicators that determine its service characteristics. These are the chemical composition of steel, structural condition, level of indicators of strength, plasticity, viscosity, etc. However, the most important technical indicator of axle performance is its fatigue strength. To ensure high

reliability of axles, it is necessary to form a homogeneous structure and achieve optimal metal purity, avoiding the formation of coarse non-metallic inclusions and their accumulations. It is known that liquation in most cases is formed during crystallization (solidification of an ingot or continuously cast billet). The hereditary influence of the features of the primary structure formation of BLZ and the factors that determine them on the final microstructure and the set of properties of the finished metal products have not been sufficiently studied. Purpose: study of the influence of the chemical composition of carbon steels with different contents and ratios of basic chemical elements on the features of the formation of the microstructure of carbon steel and its hardness. As part of this work, experimental ingots of carbon steels of different chemical composition were melted. The samples were subjected to hot plastic deformation and heat treatment. Hot plastic deformation was carried out by the method of deposition at a temperature of 1260°C by 50%. The next heat treatment consisted of normalization from 850°C. According to the results of the metallographic study, the quantitative ratio of pearlite and ferrite in the test samples in the cast state, after hot plastic deformation and after subsequent heat treatment was calculated. The hardness of the experimental steels in different states was determined by the Brinell method. Phase composition was evaluated using ImageJ software. The fundamental role of carbon in the formation of the amount of the pearlite component and hardness has been confirmed. A fragmentary influence of the manganese content on the amount of pearlite in the experimental samples after heat treatment was established, which increases with the increase in the content of this element. A close relationship between vanadium and the amount of pearlite component in the state after hot plastic deformation and partially after hot plastic deformation with subsequent heat treatment was revealed. Aluminum also has a fragmentary effect - with an increase in the content of this element, the amount of pearlite partially decreases, and for the other part of the melts of experimental steels, on the contrary, the share of pearlite increases with an increase in the content of aluminum.

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

For citation: 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 composition. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 476-489. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-476-489>

*Стаття надійшла до редакції збірника 09.10.2023 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*