

О.І. Бабаченко, д-р техн. наук, ст. наук співр., директор, e-mail: A_Babachenko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>

Г.А. Кононенко, д-р. техн. наук, ст. дослідник, учений секретар, e-mail: perlit@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>

Р.В. Подольський, доктор філософії, наук. співр., e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>

О.А. Сафронова, аспірантка, мол. наук. співр., e-mail: safronovaaa77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4032-4275>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Розробка хімічного складу і режимів термічної обробки сталі для залізничних коліс з підвищеною стійкістю до зношування при високих навантаженнях на вісь

Одним із напрямів розвитку залізничного транспорту є збільшення навантаження на вісь, таким чином необхідне створення нових, більш зносостійких матеріалів для підвищення довговічності залізничних коліс. При цьому в багатьох випадках високий рівень твердості та міцності повинен поєднуватися з не менш високими значеннями показників пластичності й в'язкості. **Мета роботи:** дослідити вплив розробленого хімічного складу та режимів обробки на механічні властивості сталей лабораторного виробництва для залізничних коліс з підвищеною стійкістю до зношування, які працюють в легких умовах гальмування при високих навантаженнях на вісь. **Матеріал і методика досліджень.** Дослідження проводились на сталях лабораторного способу виготовлення. Металографічні дослідження виконані на світловому мікроскопі «Neophot 32» і «Axiovert 200 M MAT» фірми «Carl Zeiss». Шліфи виготовляли механічним способом. Мікроструктуру виявляли травленням у 2–3 % спиртовому розчині азотної кислоти (HNO_3). Механічні випробування на розтяг при кімнатній температурі проводили за стандартною методикою. **Результати досліджень.** За результатами аналітичних досліджень та розрахункових моделей, що дозволяють прогнозувати механічні властивості залежно від вмісту хімічних елементів в сталі, було розроблено хімічний склад дослідних злитків для виплавки в лабораторних умовах. Виконана виплавка дослідних плавок. Встановлено можливість отримання комплексу механічних властивостей та мікроструктури, що нормуються вимогами ААР М-107/М-208 для залізничних коліс класу D з розробленої сталі.

Ключові слова: вуглецеві та низьколеговані сталі, хімічний склад, залізничні колеса, мікроструктура, механічні властивості.

Вступ. Аналіз працездатності залізничних коліс свідчить, що їх експлуатаційна надійність і довговічність залежить не тільки від рівня механічних характеристик (в першу чергу твердості, тимчасового опору, границі плинності, пластичних і в'язких характеристик), але і від зносостійкості і контактно-втомної міцності. Значна частина відмов залізничних коліс відбувається не в результаті їх руйнування, а внаслідок зношування та втомного руйнування поверхонь тертя, що вимагає істотних матеріальних витрат для їх ремонту та заміни. Створення нових, більш зносостійких матеріалів має важливе значення в проблемі підвищення довговічності залізничних коліс.

Залізничний транспорт є однією з найважливіших

ланок у дорожньо-транспортному комплексі багатьох країн. Стратегічно важливим завданням є розробка конкурентоспроможних залізничних коліс, що мають службові та експлуатаційні характеристики на достатньому рівні відповідно до різних умов експлуатації. Одним із напрямів розвитку залізничного транспорту є збільшення навантаження на вісь.

Існує ряд механізмів зміцнення сталі. Найдоступнішим у реалізації є твердорозчинне зміцнення базовими хімічними елементами, яке реалізується у вуглецевих сталях. Вміст вуглецю суттєво впливає на міцність та твердість, тому традиційно для високоміцних залізничних коліс застосовують вуглецеві сталі, що відрізняються підвищеним вмістом цього елемента.

При цьому в багатьох випадках високий рівень твердості та міцності повинен поєднуватися з не менш високими значеннями показників пластичності й в'язкості.

Мета роботи: дослідити вплив розробленого хімічного складу та режимів обробки на механічні властивості сталей лабораторного виробництва для залізничних коліс з підвищеною стійкістю до зношування, які працюють в легких умовах гальмування при високих навантаженнях на вісь.

Матеріал і методика досліджень. Розробка нових марок сталей для залізничних коліс у промислових умовах, особливо на ранніх стадіях виробництва, є дорогою. Тому виплавку дослідних сталей експериментальних хімічних складів, деформаційну і термічну обробку дослідних злитків по режимам, що моделюють промислову технологію, виготовлення зразків, дослідження структури і механічних властивостей нової сталі здійснювали в лабораторних умовах.

При виконанні досліджень по роботі виплавку виконували за допомогою комплексної установки, що складається з плавильного агрегату ІТПЕ-0,01 закритого типу і височастотного джерела струму ВТГ-20-22, що має вбудовану станцію автономного охолодження. Установка дозволяє виплавляти в лабораторних умовах дослідні марки сталі, в тому числі леговані марганцем, кремнієм, хромом, молібденом та ін. Виплавку дослідних плавок проводили шляхом переплавлення 8,5—9,0 кг металеві шихти сталі для залізничних коліс.

Металографічні дослідження дослідних і промислових сталей виконані на світловому мікроскопі «Neophot 32» і «Axiovert 200 M MAT» фірми «Carl Zeiss». Шліфи виготовляли механічним способом. Мікроструктуру виявляли травленням у 2—3 % спиртовому розчині азотної кислоти (HNO_3). Механічні випробування на розтяг при кімнатній температурі проводили за стандартною методикою.

Стан питання. Посилення умов експлуатації коліс, підвищення навантаження на вісь вимагає вдосконалення хімічного складу колісних сталей, які б забезпечували необхідний рівень всіх службових властивостей коліс, що експлуатуються в складних умовах. Більшість робіт, що проводяться в цьому напрямі, спрямовані на вирішення одного завдання — підвищення експлуатаційної довговічності коліс, насамперед шляхом зниження їхнього зношування.

Рівень механічних властивостей та експлуатаційних характеристик залізничних коліс докорінно залежить від хімічного складу сталі [1]. Основним зміцнювачем сталі для залізничних коліс є вуглець. Змінюючи його вміст сталі, можна домогтися різних властивостей у готових виробах. При підвищенні вмісту вуглецю збільшується міцність, твердість та зносостійкість залізничних коліс. У той же час при цьому відбувається зниження їх пластичності, в'язкості, опору крихкому руйнуванню і стійкості до термічного впливу.

Відомо, що ефективність легування сталі в багатьох випадках залежить від розподілу легуючих

елементів між твердим розчином і карбідною фазою.

Легуючі елементи, розчиняючись у ферит, змінюють його властивості, зокрема, підвищують міцність. Причому ті з них, які мають відмінні від α -заліза ґратки або більший атомний радіус (кремній, марганець), зміцнюють ферит сильніше. Підвищення міцності фериту при легуванні кремнієм до 2 % і марганцем до 3 % не супроводжується падінням відносного видовження та звуження. За спадною здатністю зміцнювати ферит елементи розташовуються в наступному порядку: кремній, марганець, ванадій, хром.

Марганець сприяє зміцненню $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення до нижчих температур, що призводить до зменшення дифузійних констант, що визначають кінетику перетворення. Збільшення вмісту марганцю впливає на перетворення так само, як і підвищення швидкості охолодження: збільшується дисперсність перліту, зменшується кількість доєвтектоїдного фериту. Критична швидкість охолодження, необхідна для пригнічення перлітного перетворення, у присутності марганцю значно знижується. Зниження під дією марганцю критичної швидкості загартування призводить до збільшення прожарюваності сталі. При вмісті марганцю до 1,2 % пластичні властивості колісної сталі знаходяться на досить високому рівні [2].

Кремній не є карбідоутворюючим елементом, і його кількість у сталі обмежують до 2 %. Він значно підвищує границю плинності і границю міцності сталі, але при вмісті в сталі більше 1,2 % знижує в'язкість, пластичність і підвищує поріг холодноламкості. Кремній структурно не виявляється, оскільки повністю розчинний у фериті, крім тієї частини кремнію, яка у вигляді окису кремнію не встигла спливати в шлак і залишилася в металі у вигляді силікатних включень.

Хром, як і марганець, в сталі знаходиться переважно в твердому розчині, тому його вплив на перетворення аустеніту в перлітному інтервалі аналогічно впливу марганцю. Здатність хрому утворювати більш стійкі карбіди, ніж карбіди марганцю, призводить до того, що область проміжного перетворення зі збільшенням вмісту хрому відокремлюється і зсувається вправо меншою мірою, ніж перлітна. Пластичність колісної сталі під впливом хрому не змінюється до його вмісту 0,9 %, після чого відбувається зниження пластичних властивостей та ударної в'язкості [2].

Нікель незначно впливає на швидкість зростання зародків перліту при різних температурах. Невеликі добавки нікелю підвищують дисперсність перліту, що сприятливо впливає на пластичні властивості та ударну в'язкість колісної сталі [3].

Молібден належить до тієї ж групи періодичної системи, як і хром. Сталі, що мають у складі молібден, відрізняються високою швидкістю перетворення в проміжній області, причому температура максимуму швидкості перетворення в перлітній області підвищується, а в проміжній області знижується. Внаслідок цього обидві області перетворень виявляються розділеними. При цьому дифузійне утворення фериту значно сповільнюється. Повільне перетворення в перлітній області порівняно з проміжною сприяє тому, що в сталях при нормальних швид-

костях охолодження виявляються структури, що виділяються за проміжним механізмом. Молібден відноситься до карбідоутворюючих елементів, але карбідоутворюючий вплив його чітко проявляється тільки при вмісті більше 0,6 %. Нижче цієї межі молібден, майже не змінюючи співвідношення структурних складових і повністю розчиняючись у фериті евтектоїду, сприяє отриманню щільної крейданої структури по всьому перерізу виливка [4].

Ванадій, як сильний карбідоутворюючий елемент, у разі недостатньо високої температури нагріву під загартовування не тільки не збільшує прожарюваність сталі, а навпаки, знижує її. При цьому карбіди, що не розчинилися, відіграють роль зародків, що сприяє прискореному перетворенню аустеніту в перлітній області. Зниження прожарювання при цьому сприяє подрібненню зерна. Міцнісні, пластичні властивості і ударна в'язкість сталі при цьому зростає [2; 5].

Основними структурними параметрами, що впливають на пластичні властивості колісних сталей, є величина дійсного зерна, різнозернистість, дисперсність перліту та чистота сталі по неметалевим включенням [6—7]. Виходячи з викладеного, існує кілька шляхів підвищення пластичності і в'язкості обода залізничного колеса. Основним з них є легування колісних сталей елементами, які в комплексі з ефективною термічною обробкою забезпечать формування в ободі колеса дрібнозернистої структури з максимальною дисперсністю перліту.

Другий шлях — це підвищення величини накопиченої деформації в ободі колеса за рахунок збільшення пророблюваності колісної заготовки на пресопрокатній лінії. Аналіз раніше проведених досліджень показав, що це призведе до зменшення різнозернистості в ободі колеса і до зниження в ньому величини дійсного зерна, що позитивно впливає на пластичні властивості [8—11].

Третій напрям підвищення пластичних властивостей металу ободів коліс — це зниження його забрудненості неметалевими включеннями.

Відповідно до вимог стандарту Асоціації американських залізниць AAR M107/M208 колеса класів C і D за хімічним складом повинні задовольняти вимогам, наведеним в таблиці 1.

При цьому за механічними властивостями вимоги стандарту суттєво відрізняються (табл. 2).

Як впливає з таблиці 1, основними легуючими елементами для коліс класу D (як і для більшості сталей для залізничних коліс) є марганець і кремній. Однак, стандарт M107/M208 допускає відхилення цих елементів від вимог, наведених у таблиці 1, за умови, що виконуватиметься така нерівність:

$$930 - [570 \times \%C] - [80 \times \%Mn] - [20 \times \%Si] - [50 \times \%Cr] - [30 \times \%Ni] - [20 \times \%Mo + \%V] > 390. \quad (1)$$

Структури мартенситу та бейніту є неприпустимими.

Виконані аналітичні дослідження показали, що досягнення рівня відносного подовження не менше 14 % у сталях близького хімічного складу є можливим. Для цього необхідно забезпечити формування в ободі колеса структури тонкодисперсного пластинчастого перліту із міжпластинчастою відстанню менше 0,20 мкм [12—13].

Результати досліджень. З використанням математичної моделі, розробленої авторами роботи [14], були розраховані очікувані механічні властивості модельних зразків з хімічним складом, близьким до сталі для коліс класу D, легуваних окремими елементами. Розрахунок тимчасового опору, відносного звуження та відносного видовження проводився за формулами, які наведені нижче:

$$\sigma_B = 309 + 835C - 34Si + 51Mn + 349Cr + 47Ni + 143Cu - 1198Al + 293Ti - 148Mo + 4757N + 753S + 5119P, r = 0,65; \quad (2)$$

$$\psi = 55 - 44C + 66Si + 37Mn - 15Cr + 4Ni - 22Cu + 303Al + 73Ti + 6Mo + 892N - 89S - 30P, r = 0,7; \quad (3)$$

$$\delta = 43 - 36C + 6Si - 8Mn + 35Cr - 0,5Ni - 13Cu + 148Al + 270Ti - 12Mo - 657N - 236S + 195P, r = 0,8. \quad (4)$$

Результати розрахунку механічних властивостей за вказаними моделями (2—4) наведено у таблиці 3.

Склад А відповідає вимогам стандарту M-107/M-208 для коліс класу D з мінімальним вмістом базових і легуючих елементів, а склад Б — з підвищеним вмістом Cr, Ni, Mo, але задовольняє умовам вищенаведеної нерівності (1). Результати розрахунків з використанням математичних моде-

Таблиця 1

Хімічний склад сталі залізничних коліс класу C і D відповідно до AAR M107/M208, %мас.

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Ti	Nb
0,67-0,77	0,60-0,90	0,15-1,00	0,005-0,040	не більше								
				0,030	0,25	0,25	0,10	0,040	0,35	0,060	0,03	0,05

Таблиця 2

Механічні властивості коліс класу C і D відповідно до AAR M107/M208

Клас коліс	Твердість, HB	Границя міцності, МПа	Границя плинності, МПа	Відносне видовження, %	Відносне звуження, %
C	321-363	—	—	—	—
D	341-415	≥1082,4	≥758,4	≥14	≥15

лей підтверджують раніше зроблений висновок про можливість досягнення у вуглецевих сталях із вмістом вуглецю не менше 0,67 % та структурою пластинчастого перліту відносного видовження не менше 14 %.

З урахуванням результатів аналітичних досліджень було виплавлено дві лабораторні дослідні плавки (табл. 4).

Лабораторні виливки сталей 1 і 2 нагрівалися до температури 1210 °С, витримувалися протягом 2 годин, деформувалися зі ступенем деформації 40—50 %, після чого охолоджувалися на спокійному повітрі до кімнатної температури. Це дозволило врахувати вплив гарячої пластичної деформації колісної заготовки на пресопрокатній лінії на механічні властивості готових коліс. З деформованих виливків вирізалися дослідні заготовки та проводилася термічна обробка за різними дослідними режимами, з яких виготовлялися шліфи для мікроструктурних досліджень.

Режими термічної обробки зразків відрізнялися швидкістю охолодження зразків від температури аустенітизації (860 °С) і були наступними:

Режим 1 — $V_{\text{охол}} \sim 2 \text{ }^{\circ}\text{C/c}$ (в азбесті);

Режим 2 — $V_{\text{охол}} \sim 5 \text{ }^{\circ}\text{C/c}$ (нормалізація).

Механічні властивості металу дослідних плавки представлено в таблиці 5.

Аналіз механічних властивостей показав, що термічна обробка дослідної плавки № 1 за режимом № 2 та плавки № 2 за режимом № 1 забезпечила механічні властивості, що відповідають вимогам до

колів класу D.

Мікроструктура дослідних лабораторних сталей № 1 і № 2 при різних варіантах термічної обробки показана на рисунку. З результатів аналізу мікроструктури встановлено, що в обох лабораторних сталях у всіх випадках структура дрібнозерниста, має перліт і незначну кількість фериту, досить рівномірно розподілених дрібних зерен. Незначна різнозернистість продуктів бездифузійного перетворення аустеніту та структур, що розпадаються за проміжним механізмом у матриці сталей, не спостерігаються.

У сталі № 2 дійсне зерно дрібніше (рис. 1 в, г), а доєвтектоїдного фериту в порівнянні зі сталлю № 1 (рис. 1 а, б) менше. Відмінність у величині зерна можна пояснити тим, що при приблизно однаковому вмісті ванадію в досліджуваних сталях, роль інших елементів, зокрема, марганцю і молібдену, що стабілізують аустеніт, підвищуючи його стійкість, і ефективно подрібнюють зерно, сильніше проявляється при їх більшому вмісті у сталі № 2 (див. табл. 4). З цієї ж причини в сталі № 2, навіть при меншому вмісті вуглецю, доєвтектоїдного фериту утворюється не більше ніж у сталі № 1.

Термічна обробка обох сталей за режимом № 2 (нормалізація) забезпечує отримання більш дисперсної дрібнозернистої структури, ніж обробка за режимом № 1, що пояснюється більшою швидкістю охолодження зразків при нормалізації від температури 860 °С, ніж за їхнього охолодження в азбесті. Перліт обох сталей має тонкопластинчасту будову

Таблиця 3

Результати розрахунку механічних властивостей сталей, що за хімічним складом відповідають вимогам ААR М107/М208 до колів класу D

Умовне позначення хімічного складу	Хімічний склад сталі, %мас.								Розрахункові механічні властивості		
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	σ_B , МПа	ψ , %	δ , %
A	0,67	0,60	0,15	0,02	0,02	0,25	0,25	0,1	1108,7	56,7	29,4
Б	0,72	0,70	0,25	0,02	0,02	0,30	0,40	0,4	1127,5	66,0	25,5

Таблиця 4

Хімічний склад дослідних лабораторних плавки сталей

Номер плавки	Вміст елементів, %мас.											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	V
1	0,75	0,28	0,74	0,028	0,038	0,23	0,19	0,21	0,015	0,03	—	0,084
2	0,71	0,29	0,82	0,031	0,031	0,22	0,49	0,20	—	0,04	0,005	0,085

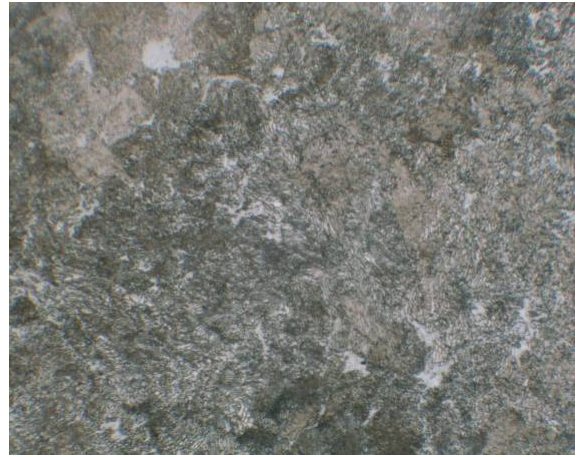
Таблиця 5

Механічні властивості сталей лабораторних плавки

Номер плавки	Режим термічного оброблення	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	НВ
1	№ 1	1201,0	759,7	15,4	25	355
	№ 2	1268,8	964,3	15,3	29	370
2	№ 1	1201,3	906,2	15,2	25	360
	№ 2	1091,0	623,2	12,9	29	300
Вимоги до колів класу D		>1082,4	>758,4	>(14)	>(15)	341-415



а



б



в



г

Рис. Мікроструктура дослідних лабораторних сталей № 1 (а, б) і № 2 (в, г) після термічного оброблення за режимами: режим 1 (а, в) — $V_{\text{охл}} \sim 2 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$; режим 2 (б, г) — $V_{\text{охл}} \sim 5 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ($\times 400$)

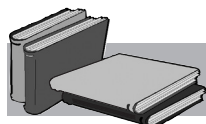
(0,16 мкм та 0,12 мкм відповідно).

Таким чином, результати металографічного аналізу дослідних зразків дозволи встановити, що для розроблених хімічних складів сталей після термічного оброблення можливо досягти найбільш ефективного поєднання структурного стану та комплексу механічних властивостей металу, які відповідають вимогам стандарту AAR M-107/M-208 для виготовлення залізничних коліс класу D.

Висновки

За результатами аналітичних досліджень та розрахункових моделей, що дозволяють прогнозувати механічні властивості сталей залежно від вмісту хімічних елементів в сталі, було розроблено хімічний склад дослідних злитків малого об'єму для виплавки в лабораторних умовах. Виконана виплавка дослідних плавок.

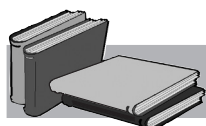
Встановлено можливість отримання повного комплексу механічних властивостей та мікроструктури, що нормуються вимогами AAR M-107/M-208 для залізничних коліс класу D з розробленої сталі.



ЛІТЕРАТУРА

1. Козловский А.И., Узлов И.Г. Производство и качество железнодорожных колес. *Металлургическая и горная промышленность*. 2001. № 7. С. 66—69.
2. Узлов И.Г., Гасик М.И., Есаулов А.Т. и др. Колесная сталь. Киев: Техника, 1985. 168 с.
3. Гуляев А.П. Металловедение. 5-е переработанное издание. Москва: Металлургия, 1978. 648 с.
4. Будагьянц Н.А., Карсский В.Е. Литые прокатные валки. Москва: Металлургия, 1983. 175 с.
5. Голиков И.Н., Гольдштейн М.И., Мурзин И.И. Ванадий в стали. Москва: Металлургия, 1968. 291 с.
6. Parusov E.V., Gubenko S.I., Sychkov A.B., Chuiko I.N., Sagura L.V., Denisenko A.I. Influence of the structural parameters of high-carbon steel on the impact strength. *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48. No. 12. P. 812—817. <https://doi.org/10.3103/S0967091218120100>
7. Губенко С.И., Парусов Э.В. Пластичность сплавов с различной структурой. Germany-Mauritius: Palamarium Academic Publishing, 2017. 183 с.
8. Бабаченко А.И., Кононенко А.А., Подольский Р.В., Дементьева Ж.А., Шпак Е.А., Клиновья О.Ф. Надежность железнодорожных колес, изготовленных разными способами производства. *Металл и литье Украины*. 2019. № 3—4 (310—311). С. 48—57. <https://doi.org/10.15407/pmach2019.03.048>
9. Бабаченко А.И., Кононенко А.А., Борисенко А.Ю., Литвиненко П.Л., Шпак Е.А., Тараненко А.А., Степанюк С.Н., Федорова И.П., Яценко А.И. Влияние горячей пластической деформации и термической обработки на структуру и механические свойства сталей для железнодорожных колес. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2012. Вып. 25. С. 177—186.
10. Кононенко А.А., Бабаченко А.И., Борисенко А.Ю., Яценко А.И., Литвиненко П.Л., Даличук А.А., Федорова И.П. Исследования влияния горячей пластической деформации и термической обработки на структуру и свойства литой колесной стали. *Строительство, материаловедение, машиностроение*: Сб. науч. трудов. 2012. Вып. 64. С. 107—117.
11. Узлов И.Г., Бабаченко А.И., Шрамко А.В., Яровой В.А., Миленин А.А., Гринкевич В.А., Дементьева Ж.А., Кононенко А.А. Исследование влияния деформационной обработки колесной заготовки на механические свойства железнодорожных колес. *Металл та литье України*. 2005. № 9—10. С. 54—57.
12. Луценко О.В., Нестеренко А.М., Черниченко В.Г., Казачек А.С. Влияние термомеханической обработки на структуру и свойства высокоуглеродистой катанки с регламентированным химическим составом. *Обработка металлов давлением. Сб. науч. трудов*. 2010. № 4. С. 182—186.
13. Parusov E.V., Lutsenko V.A., Chuiko I.N., Parusov O.V. Influence of chemical composition and cooling parameters on kinetics of austenite decomposition in high-carbon steels. *Chernye Metally*. 2020. № 9. P. 39—44.
14. Приходько Э.В. Эффективность комплексного легирования стали и сплавов. Киев: Наукова думка, 1995. 292 с.

Надійшла 10.08.2023



REFERENCES

1. Kozlovsky, A.I., Uzlov, I.G. (2001). Production and quality of railway wheels. *Metallurgical and mining industry*, 7, 66—69 [in Russian].
2. Uzlov, I.G., Gasyk, M.I., Esaulov, A.T. et al. (1985). Wheel steel. Kyiv: Tekhnika [in Russian].
3. Gulyaev, A.P. (1978). Metallurgy. 5th revised edition. Moscow: Metallurgiya [in Russian].
4. Budaghyants, N.A., Karsskyi, V.E. (1983). Cast rolling rolls. Moscow: Metallurgiya [in Russian].
5. Golykov, I.N., Goldshtein, M.I., Murzyn, I.I. (1968). Vanadium in steel. Moscow: Metallurgiya [in Russian].
6. Parusov, E.V., Gubenko, S.I., Sychkov, A.B. et al. (2018). Influence of the Structural Parameters of High-Carbon Steel on the Impact Strength. *Steel Transl.*, 48, 812—817. <https://doi.org/10.3103/S0967091218120100>
7. Gubenko, S.I., Parusov, E.V. (2017). Plasticity of alloys with different structure. Germany-Mauritius: Palamarium Academic Publishing [in Russian].
8. Babachenko, A.I., Kononenko, A.A., Podolskyi, R.V., Dementieva, Zh.A., Shpak, E.A., Klinovaya, O.F. (2019). Reliability of railway wheels manufactured by different production methods. *Metal and Casting of Ukraine*, 3—4(310—311), 48—57. <https://doi.org/10.15407/pmach2019.03.048> [in Russian].
9. Babachenko, A.I., Kononenko, A.A., Borysenko, A.Yu., Litvinenko, P.L., Shpak, E.A., Taranenko, A.A., Stepaniuk, S.N., Fedorova, I.P., Yatsenko, A.I. (2012). Influence of hot plastic deformation and heat treatment on the structure and mechanical properties of steels for railway wheels. *Fundamental and applied problems of black metallurgy*, 25, 177—186 [in Russian].
10. Kononenko, A.A., Babachenko, A.I., Borysenko, A.Yu., Yatsenko, A.I., Litvinenko, P.L., Dalichuk, A.A., Fedorova, I.P. (2012). Studies of the influence of hot plastic deformation and thermal processing on the structure and properties of cast wheel steel. *Construction, material science, machine construction*, 64, 107—117 [in Russian].

11. Uzlov, I.G., Babachenko, A.I., Shramko, A.V., Yarovoy, V.A., Milenin, A.A., Grinkevich, V.A., Dementieva, Zh.A., Kononenko, A.A. (2005). Investigation of the effects of deformation treatment of wheel blank on mechanical properties of railway wheels. *Metal and Casting of Ukraine*, (9—10), 54—57 [in Russian].
12. Lutsenko, O.V., Nesterenko, A.M., Chernychenko, V.G., Kazachek, A.S. (2010). The influence of thermomechanical treatment on the structure and properties of high-carbon wire rod with a regulated chemical composition. *Processing of metals by pressure*, 4, 182—186 [in Russian].
13. Parusov, E.V., Lutsenko, V.A., Chuiko, I.N., Parusov, O.V. (2020). Influence of chemical composition and cooling parameters on kinetics of austenite decomposition in high-carbon steels. *Chernye Metally*, 9, 39—44.
14. Prihodko, E.V. (1995). Effectiveness of complex alloying of steel and alloys. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].

Received 10.08.2023

Summary

O.I. Babachenko, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Director,
e-mail: A_Babachenko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>

G.A. Kononenko, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Scientific
Secretary, e-mail: perlit@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>

R.V. Podolskyi, PhD, Researcher, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>

O.A. Safronova, PhD-student, Junior Researcher,
e-mail: safronovaaa77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4032-4275>

*Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro,
Ukraine)*

Development of the chemical composition and modes of heat treatment of steel for railway wheels with increased wear resistance at high axle loads

One of the directions of the development of railway transport is increasing the load on the axle, while it is necessary to create new, more wear-resistant materials to increase the durability of railway wheels. At the same time, in many cases, a high level of hardness and strength must be combined with no less high values of plasticity and viscosity indicators. **Purpose:** to investigate the effect of the developed chemical composition and processing modes on the mechanical properties of laboratory-produced steels for railway wheels with increased wear resistance, which work in light braking conditions with high axle loads. **Material and methodology.** Research was carried out on steels of the experimental composition of the laboratory manufacturing method. Metallographic studies of experimental and industrial steels were performed on a light microscope "Neophot 32" and "Axiovert 200 M MAT" of the company "Carl Zeiss". Grinds were made mechanically. The microstructure was revealed by etching in a 2—3 % alcoholic solution of nitric acid (HNO_3). Mechanical tensile tests at room temperature were carried out according to standard methods. **Results.** Based on the results of analytical studies and calculation models that allow predicting the mechanical properties of steels depending on the content of chemical elements in the steel, the chemical composition of small-volume experimental ingots for smelting in laboratory conditions was developed. Smelting of experimental melts has been completed. The possibility of obtaining a full set of mechanical properties and microstructure, standardized by the requirements of AAR M-107/M-208 for railway wheels of class D from developed steel, has been established.

Keywords

Carbon and low-alloy steels, chemical composition, railway wheels, microstructure, mechanical properties.