

УДК 669.14.014.294:3:621.785.669.017

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240422.9.837

РОЗРОБЛЕННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СТАЛІ ТА РЕЖИМУ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В ЛЕГКИХ УМОВАХ ГАЛЬМУВАННЯ ЗА ВИСОКИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ВІСЬ

БАБАЧЕНКО О. І.^{1*}, *докт. тех. наук.*,КОНОНЕНКО Г. А.², *докт. тех. наук.*,ПОДОЛЬСЬКИЙ Р. В.³,САФРОНОВА О. А.⁴

^{1*} Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790-05-14, e-mail: A.Babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2869-3478

² Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

³ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0288-0641

⁴ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: safronovaaa77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4032-4275

Анотація. Створення нових, більш зносостійких матеріалів, має велике значення в проблемі підвищення довговічності залізничних коліс. Вибір хімічного складу сталей та розроблення режимів термічної обробки коліс для створення певного структурного стану дозволить підвищити зносостійкість, контактну втому й опір крихкому руйнуванню. **Мета дослідження** – розроблення хімічного складу сталі і раціональних параметрів термічної обробки залізничних коліс класу D (легкі умови гальмування і високі навантаження на вісь із підвищеною стійкістю до зношування), які забезпечать виконання вимог стандарту AAR M-107/M-208. **Методика.** В лабораторних умовах виплавлено дослідні плавки із різним умістом легувальних елементів за допомогою комплексної установки, що складається з плавильного агрегата ІТРЕ-0,01 закритого типу і високочастотного джерела струму ВТГ-20-22. Лабораторні сталі підлягали гарячій пластичній деформації та термічній обробці за режимами, наближеними до промислових для виготовлення залізничного колеса. Кінетику розпаду аустеніту за безперервного охолодження за різними швидкостями досліджували дилатометричним методом. Механічні властивості визначали за стандартними методиками. **Результати.** Виготовлено та вивчено сталь дослідного складу. Виготовлено залізничні колеса з дослідної сталі рекомендованого хімічного складу. **Наукова новизна.** Встановлено закономірності кінетики розпаду аустеніту за безперервного охолодження сталі дослідного складу: 0,68 % С, 0,49 % Si; 0,7 % Mn; 0,77 % Cr; 0,22 % Ni; 0,069 % Mo; 0,087 % V для залізничних коліс класу D, призначених для експлуатації в легких умовах гальмування за високих навантажень на вісь відповідно до вимог стандарту AAR M-107/M-208. Визначено закономірності зміни механізму розпаду аустеніту в широкому інтервалі швидкостей охолодження: до 1 °C/c розпад аустеніту відбувається з утворенням повністю перлітної структури, за швидкості охолодження 2 °C/c структура являє собою 15 % перліту, 25 % бейніту, решта – мартенсит і залишковий аустеніт; за швидкостей охолодження ≥ 5 °C/c формується структура мартенситу й залишкового аустеніту. **Практична значимість.** Розроблено рекомендації щодо хімічного складу сталі та технології термічного зміцнення коліс, для отримання високого комплексу механічних властивостей залізничних коліс класу D відповідно до вимог стандарту AAR M-107/M-208.

Ключові слова: залізничні колеса; хімічний склад; кінетика розпаду; термічна обробка, твердість

DEVELOPMENT OF STEEL CHEMICAL COMPOSITION AND HEAT TREATMENT REGIME OF RAILWAY WHEELS FOR OPERATION IN LIGHT BRAKING CONDITIONS UNDER HIGH AXLE LOADS

BABACHENKO O.I.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.)*,
 KONONENKO G.A.², *Dr. Sc. (Tech.)*,
 PODOLSKYI R.V.³,
 SAFRONOVA O.A.⁴

^{1*} Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named of Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2869-3478

² Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named of Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

³ Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0288-0641

⁴ Department of Heat Treatment of Metals, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49000, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 713-59-51; Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: safronovaaa77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4032-4275

Abstract. The development of new wear-resistant materials has a pivotal role in solving the durability problem of railway wheels. The adoption of appropriate chemical compositions of steel and proper heat treatment regimes aimed at developing specific structural conditions for manufacturing railway wheels will increase wear-resistance, contact fatigue and brittle fracture resistance. **Purpose of research.** The research suggests methods for the development of steel chemical composition and rational parameters for the class D railway wheels heat treatment (light braking conditions and high loads on axle with increased wear resistance), which will ensure realization of the AAR M-107/M-208 standard requirements. **Methodology.** In the laboratory, experimental meltings with different content of alloying elements are done. A complex setting consisting of closed type melting unit ICEF-0.01 and high-frequency current source HFTG-20-22 is used. Laboratory steels are subjected to hot plastic deformation and heat treatment in regimes closing to the industrial ones in the manufacture of a railway wheel. The kinetics of austenite decay during continuous cooling at different rates with dilatometric method is investigated. Mechanical properties are determined with standard methods. **Results.** Experimental steel is made and investigated. Railway wheels from experimental steel of the recommended chemical composition are manufactured. **Scientific novelty.** The regularities of the austenite decay kinetics at continuous cooling of experimental composition steel: 0.68 % C, 0.49 % Si; 0.7 % Mn; 0.77 % Cr; 0.22 % Ni; 0.069 % Mo; 0.087 % V for class D railway wheels, designed for operation in light braking conditions under high axle loads according to requirements of AAR M-107/M-208 standard are determined. The regularities of change in the austenite decay mechanism in a wide range of cooling rates are determined. Up to 1 °C/s, the austenite decay proceeds with the formation of a completely pearlitic structure. At a cooling rate of 2 °C/s, the structure is 15 % perlite, 25 % bainite, the rest is martensite and residual austenite. At cooling rates ≥ 5 °C/s the structure of martensite and residual austenite is formed. **Practical significance.** The recommendations for steel chemical composition and thermal strengthening technology of wheels to obtaining a high complex of class D railway wheels mechanical properties according to requirements of AAR M-107/M-208 standard are developed.

Keywords: railway wheels; chemical composition; decay kinetics; heat treatment; stiffness

Сучасний стан проблеми

Аналіз працездатності виробів із конструкційних сталей показує, що їх експлуатаційна надійність і довговічність залежать від рівня механічних характеристик (твердості, тимчасового опору, границі плинності, пластичних і в'язких характеристик, 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 велике значення для підвищення довговічності залізничних коліс.

Вибір хімічного складу сталей та розроблення режимів термічної обробки коліс для створення певного структурного стану дозволить підвищити зносостійкість, контактну втому і опір крихкому руйнуванню.

Аналіз існуючих публікацій за темою

Зносостійкість вуглецевих і низьколегованих сталей, як і інші їх

механічні властивості, визначається їх структурним станом – об'ємною часткою, формою і характером розподілу структурних складових. У праці [1] показано, що характер розподілу часток другої фази значною мірою впливає на зносостійкість сталі. Дослідження, виконані в роботі [2], показали, що структура пластинчастого перліту має максимальну зносостійкість порівняно зі структурою глобулярного перліту. Зі збільшенням дисперсності пластинчастого перліту зносостійкість сталі підвищується [3]. Такий же вплив на зносостійкість чинить і зменшення феритної складової.

Відомі численні експериментальні дані, що підтверджують пряму залежність зношування сталі від її твердості [4]. Однак спроби дослідників використовувати твердість (або тимчасовий опір) як характеристику, що однозначно визначає зносостійкість матеріалів, не дали успіху. У праці [5] показано, що за одного і того ж рівня твердості конструкційні сталі в різному структурному стані можуть мати і різну зносостійкість.

Сьогодні суцільнокатані залізничні колеса у всіх країнах виготовляють із вуглецевої сталі високої якості. Зазвичай у світі для виготовлення коліс залежно від умов експлуатації рухомого складу використовують сталь різного хімічного складу. Згідно з вимогами стандарту AAR M-107/M-208 термічно зміцнені колеса, призначені для роботи в різних умовах, виготовляють зі сталі з різним вмістом вуглецю: клас А – важкі умови

гальмування, високі швидкості, незначні навантаження, (0,47...0,57 %); клас В – важкі умови гальмування, високі швидкості та великі навантаження (0,57...0,67 %); клас С – високі навантаження і легкі умови гальмування (0,67...0,77 %); клас L – високошвидкісний рух із більш важкими умовами гальмування, ніж для інших класів, і невеликим осьовим навантаженням (до 0,47 %); клас D – високі навантаження з підвищеною стійкістю до зношування та легкі умови гальмування (0,67...0,77 %).

Мета роботи – розроблення хімічного складу сталі і раціональних параметрів термічної обробки залізничних коліс класу D (легкі умови гальмування і високі навантаження на вісь із підвищеною стійкістю до зношування), які забезпечать виконання вимог стандарту AAR M-107/M-208.

Матеріали і методи досліджень

В умовах Інституту чорної металургії виплавлено дослідні плавки із різним вмістом легуючих елементів (табл. 1) та отримано злитки масою 8...10 кг для досліджень. Виплавку виконували за допомогою комплексної установки, що складається з плавильного агрегата ІТПЕ-0,01 закритого типу і високочастотного джерела струму ВТГ-20-22, що має вбудовану станцію автономного охолодження. Сталь варіанта 1 порівняльна (базова), варіанти 2-4 – дослідні.

Таблиця 1

Фактичний хімічний склад дослідних плавок, мас. частка (%)

№ зливки	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	P	S	Al	Ti	(N)
1	0,69	0,36	0,82	0,28	0,14	0,21	0,055	0,016	0,008	0,21	≤0,005	–
2	0,70	0,57	0,80	0,90	0,15	0,41	0,110	0,01	0,007	0,25	≤0,005	–
3	0,68	0,52	0,72	0,21	0,10	0,70	0,110	0,007	0,010	0,23	≤0,005	–
4	0,71	0,55	0,83	0,89	0,09	0,11	0,100	0,012	0,06	0,20	≤0,005	–

Від донної частини дослідних злитків відібрано проби висотою 110 мм. У лабораторних умовах проведено гарячу пластичну деформацію дослідних злитків шляхом осаджування на величину 50 % із використанням гідравлічної випробувальної машини ЦД-40. Температура нагрівання

проб під гарячу деформацію дорівнювала 1 240 °С, що відповідає температурі нагріву колісної заготовки в кільцевій печі в умовах ПАТ «Інтерпайп НТЗ». Контроль температури здійснювали пірометром візуальним загальнопромисловим «Промінь».

Оскільки залізничні колеса в процесі виробництва піддаються термічному зміцненню, а їх кінцева структура і механічні властивості визначаються саме цією технологічною операцією, в досліді виконано термічну обробку зразків. Із деформованих злитків вирізано заготовки під зразки для механічних випробувань, які піддавали термічній обробці за дослідними режимами.

Для вивчення кінетики розпаду аустеніту нагрівали зразки в дилатометрі DIL 805 A у вакуумі ($5,0 \cdot 10^{-4}$ mbar) струмами високої частоти (2 МГц) за допомогою індуктора, що складається із двох мідних котушок у вигляді порожнистих мідних трубок. Охолоджували індуктор водою, яка циркулює усередині зовнішньої котушки. Охолодження зразків із заданою швидкістю відбувається шляхом подачі охолоджувального газу (гелію або газоподібного азоту) через внутрішні отвори другої котушки. Зразок розташовується горизонтально, і зміна геометричних розмірів зразка визначається за допомогою високоточного датчика LVDT (лінійний диференціальний трансформатор зі змінним коефіцієнтом передачі) вимірювання лінійного збільшення.

Режим зміни температури задається програмно, температура зразка в часі контролюється через приварену до нього термопару (сплав Pt – Pt/Rh 10 %) діаметром 0,09 мм. Програма представлена у вигляді таблиці, в якій вказано температури і час. Обладнання підтримує задану температуру в заданий момент часу. Швидкість охолодження визначається швидкістю подачі охолоджувального газу.

Термокінетичну діаграму (ТКД) будували після різних швидкостей охолодження дилатометричних зразків, нагрітих за режимом, близьким до умов нагрівання під термозміцнення залізничних коліс у газополум'яній кільцевій печі на ділянці термообробки в колесо-прокатному цеху: швидкість нагрівання зразків в індукторі становила $30 \text{ }^\circ\text{C/хв}$.

Після нагрівання в аустенітну область зразки витримували протягом 5 хвилин і

охолоджували гелієм із різними швидкостями: 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; $30 \text{ }^\circ\text{C/с}$.

Металографічні шліфи виготовляли посередині дилатометричних зразків у перерізі, перпендикулярному їх осі. Твердість методом Віккерса за навантаження 10 кг заміряли з використанням автоматичного мікротвердоміра KB 30. Кількість структурних складових оцінювали за мікрофотографіями за допомогою аналізатора зображення із застосуванням методик кількісного визначення другої фази, реалізованих в аналізаторі зображень Thixomet.

Результати досліджень

Відповідно до стандарту AAR M-107/M-208 «Колеса з вуглецевої сталі» хімічний склад коліс класу D повинен відповідати всім вимогам до коліс класу C. Припустиме відхилення за вмістом Ni, Cr, Mo, V у разі виконання такої умови:

$$930 - [570 \times \% \text{C}] - [80 \times \% \text{Mn}] - [20 \times \% \text{Si}] - [50 \times \% \text{Cr}] - [30 \times \% \text{Ni}] - [20 \times \% \text{Mo} + \% \text{V}] > 390.$$

Крім вимог до хімічного складу сталі класу D стандарт AAR M-107/M-208 включає вимоги до властивостей коліс, які наведені в таблиці 2.

Необхідне поєднання властивостей досягається головним чином за рахунок вибору оптимального структурного стану металу, який визначається хімічним складом колісної сталі і режимами термічної обробки коліс. У виборі матеріалу виходять із конкретних умов експлуатації коліс, їх призначення. Дослідні сталі підлягали термічній обробці, потім були виготовлені зразки для визначення механічних властивостей. Отримані результати наведені в таблиці 3.

Для аналізу мікроструктури сталі злитків дослідного складу з головок зразків після випробувань на розтяг були виготовили мікрошліфи. Характерний структурний стан (рис. 1) являє собою пластинчастий перліт із невеликою кількістю доєвтектоїдного фериту. Структура мартенситу не виявлена.

Таблиця 2

Вимоги стандарту AAR M-107/M-208 до властивостей залізничних коліс класу D*

Механічні властивості	За 65–80 °F (18,3...26,6 °C)	За 1 000 °F (538 °C)
Твердість за Брінеллем на поверхні	341–415 HB	–
Твердість за Брінеллем, градієнт по перерізу	321–415 HB (32–44 HRC)	–
В'язкість руйнування K_{Ic}	$\sqrt{35}$ ksi, дюйм (38,5 МПа· $\sqrt{м}$)	
Границя міцності	>157 psi (1 082 МПа)	> 70 psi (482 МПа)
Границя плинності	> 110 psi (758 МПа)	> 50 psi (345 МПа)
Відносне видовження	>14 %	> 20 %
Відносне звуження	> 15 %	> 40 %

Таблиця 3

Механічні властивості сталі злитків дослідного складу після гарячої пластичної деформації та наступної термічної обробки

Злиток №	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %
1	1 094,4	636,6	14,2	40,51
2	1 114,4	671,8	14,6	40,36
3	1 145,5	657,9	14,6	37,62
4	1 086,6	564,6	14,8	44,19
Вимоги M107–M 208	>157 psi (1 082 МПа)	> 110 psi (758 МПа)	>14 %	> 15 %

Як видно з таблиці 3, механічні властивості термічно оброблених зразків, відібраних від гарячедеформованих злитків із дослідних сталей, перевищують вимоги стандарту AAR M-107/M-208 до коліс класу D (відносне подовження > 14 %; границя міцності >1 082 МПа).

Дослідження структурного стану дослідних сталей 1–4 показало, що вони мають в основному перлітну структуру та незначну кількість (2–4 %) доєвтектоїдного фериту, що цілком задовольняє вимоги стандарту AAR M-107/M-208 до коліс класу D.

Таким чином, виходячи з аналізу результатів досліджень структури та властивостей дослідних легованих сталей, розробили рекомендований хімічний склад сталі (табл. 4) для виробництва коліс в умовах ПАТ «Інтерпайп НТЗ» класу D за стандартом AAR M-107/M-208.

На МЗ «Дніпросталь» виплавлено дослідну плавку (пл. № 12 865), з мас. часткою (%): з 0,68 C; 0,49 Si; 0,70 Mn; 0,77 Cr; 0,07 Mo; 0,22 Ni; 0,09 V.

Досліджено кінетику розпаду аустеніту за безперервного охолодження.

Термокінетична діаграма наведена на рисунку 1, а; мікроструктура після досліджуваних швидкостей охолодження – на рисунку 2. Встановлено закономірності кінетики розпаду аустеніту за безперервного охолодження сталі дослідного складу: 0,68 % C, 0,49 % Si; 0,7 % Mn; 0,77 % Cr; 0,22 % Ni; 0,069 % Mo; 0,087 % V для залізничних коліс класу D, призначених для експлуатації в легких умовах гальмування за високих навантажень на вісь відповідно до вимог стандарту AAR M-107/M-208.

Визначено закономірності зміни механізму розпаду аустеніту в широкому інтервалі швидкостей охолодження: до 1 °C/c розпад аустеніту відбувається з утворенням повністю перлітної структури, за швидкості охолодження 2 °C/c структура являє собою 15 % перліту, 25 % бейніту, решта – мартенсит і залишковий аустеніт; за швидкостей охолодження ≥ 5 °C/c формується структура мартенситу й залишкового аустеніту.

Структурна діаграма розпаду аустеніту дослідної сталі показана на рисунку 1, б.

Рекомендований хімічний склад сталі для виробництва коліс класу D за стандартом AAR M-107/M-208

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V
0,67–0,70	0,45–0,55	0,65–0,75	0,75–0,80	0,06–0,10	0,20–0,25	0,08–0,12

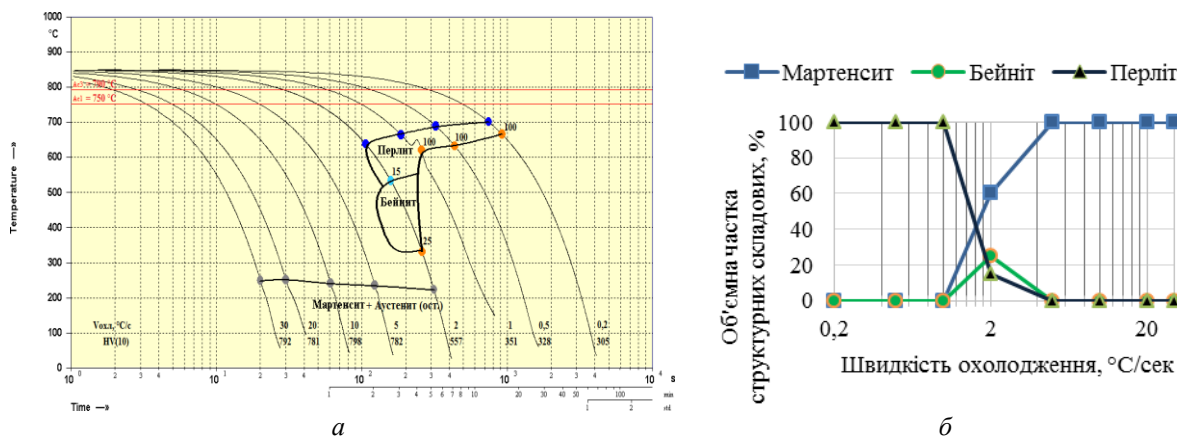


Рис. 1. Термокінетична (а) та структурна (б) діаграми розпаду аустеніту за безперервного охолодження сталі для залізничних коліс класу D за стандартом AAR M-107/M-208 з 0,68 % C; 0,49 % Si; 0,70 % Mn; 0,77 % Cr; 0,07 % Mo; 0,22 % Ni; 0,09 % V

У промислових умовах ПАТ «Інтерпайп НТЗ» – єдиного вітчизняного виробника залізничних коліс – виготовлено дослідно-промислову партію залізничних коліс класу D (AAR M-107/M-208). Досліджено вплив параметрів ТО на структуру і властивості дослідних коліс в умовах колесопрокатного цеху. Встановлено раціональні режими, за яких у колесах із дослідної сталі формується сприятлива структура дисперсного перліту з невеликою кількістю інших фаз та високий комплекс механічних властивостей, який відповідає наперед заданому.

Розроблено рекомендації щодо режиму зміцнювальної термічної обробки коліс: нагрів до (840 ± 10) °C; охолодження спреером протягом (170 ± 5) с; витрата води від: 0 до (65 ± 2) м³/год; тривалість підстуджування: (35 ± 5) хв; температура відпуску: (600 ± 10) °C; відпуск протягом 3 год. + 15 хв.

Результати випробувань на розтяг за температури навколишнього середовища (табл. 5) повністю відповідають вимогам AAR M-107/M-208 за показниками міцності і пластичності.

Результати випробування за температури навколишнього середовища

№ колеса	Границя плинності σ_T , МПа	Тимчасовий опір σ_B , МПа	Відносне подовження δ , %	Відносне звуження ψ , %
038	874,78	1 099	14,37	43,33
Вимоги AAR M-107/M-208 Клас D	min 758,4	min 1 082,5	min 14,0	min 15,0

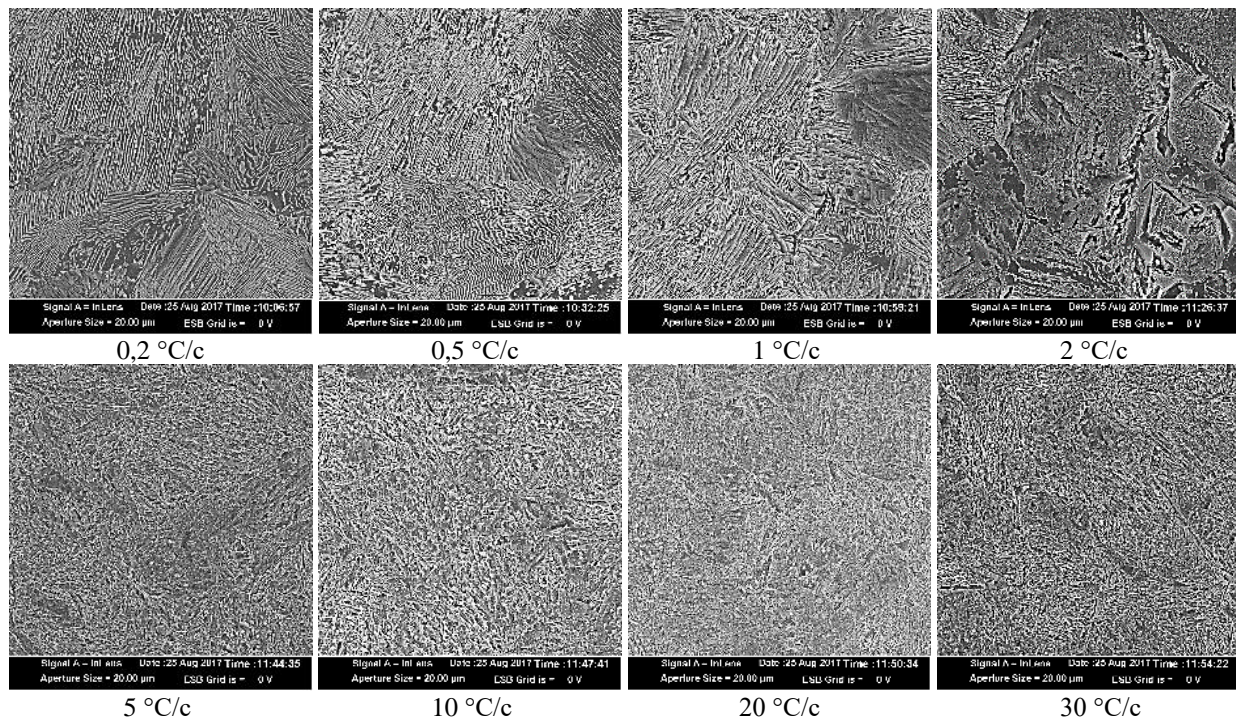


Рис. 2. Мікроструктура ($\times 2000$) сталі (хімічний склад мас. частка, %: 0,68 C; 0,49 Si; 0,70 Mn; 0,77 Cr; 0,07 Mo; 0,22 Ni; 0,09 V) для залізничних коліс класу D за стандартом AAR M-107/M-208 після безперервного охолодження за різних швидкостей

Висновки

1. Виконано виплавку чотирьох дослідних плавок для коліс класу D з різним вмістом легувальних елементів та отримано злитки масою 8...10 кг для досліджень. Встановлено, що структура дослідних злитків має в основному перлітну структуру з незначною кількістю (2...4 %) доєвтектоїдного фериту, що цілком задовольняє вимоги стандарту AAR M-107/M-208 до коліс класу D. Механічні властивості термічно оброблених зразків, відібраних від гарячедеформованих злитків із легованих сталей, значно перевищують вимоги стандарту AAR M-107/M-208 до коліс класу D (відносне подовження $> 14\%$; границя міцності > 1082 МПа).

2. За результатами лабораторних досліджень встановлено оптимальний хімічний склад сталі для залізничних коліс та температурно-часові параметри її термічної обробки, які в сукупності можуть забезпечити виконання вимог стандарту AAR M-107/M-208 до коліс класу D. Встановлено принципову можливість отримання високого комплексу механічних

властивостей залізничних коліс за умови формування структурного стану без утворення мартенситу після деформаційної та термічної обробки за режимами, наближеними до умов виробництва залізничних коліс на ПАТ «Інтерпайп НТЗ».

3. Розроблено хімічний склад сталі, що дозволяє виготовляти залізничні колеса класу D, які відповідають вимогам AAR M-107/M-208, мас. частка (%): C = 0,67...0,70; Si = 0,45...0,55; Mn = 0,65...0,75; Cr = 0,75...0,80; Mo = 0,06...0,10; Ni = 0,20...0,25; V = 0,08...0,12.

4. Розроблений режим термічного зміцнення, а саме температура нагрівання під прискорене охолодження $840 + 10$ °C, тривалість прискореного охолодження – 170 ± 5 с, витрата охолоджувальної рідини $60...65$ м³/год., тривалість підстуджування коліс – 35 ± 5 хв; відпуск за температури $600 + 10$ °C протягом 3 год. 00 хв – 10 хв, дозволяє отримати в залізничних колесах класу D з розробленої сталі рівень механічних властивостей, що відповідає вимогам AAR M-107/M-208.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hornbogn Erxard. Metallkundliche Gesichterunkte des Verachleibes. Vol.118, № 6. VDI-Z, 1976. Pp. 274–280.
2. Стародубов К. Ф., Узлов И. Г., Савенков В. Я. и др. Термическое упрочнение проката. Москва : Металлургия, 1970. 368 с.
3. Лемницкий В. В., Казарновский Д. С., Равицкая Т. М. и др. Влияние состава и исходной структуры на изменение свойств стали при контактно-усталостном разрушении. *Металловедение и термическая обработка металлов*. Вып. 7. Харьков : УкрНИИМет, 1971. С. 37-43.
4. Крагельский И. В. Трение и износ. Москва : Машиностроение. 1968. 480 с.
5. Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин. Москва : Машиностроение, 1966. 331 с.
6. Краузе Г., Шольтен О. Факторы, влияющие на трение и износ в системе «колесо – рельс». *Железные дороги мира*. 1978. № 1. С. 62–64.

REFERENCES

1. Hornbogn Erxard. Metallkundliche Gesichterunkte des Verachleibes. VDI-Z, 1976, vol.118, no. 6, pp. 274–280.
2. Starodubov K.F., Uzlov I.G., Savenkov V.Ya. and oth. *Termicheskoe uprochnenie prokata* [Thermal hardening of rolled products]. Moscow : Metallurgiya, 1970, 368 p. (in Russian).
3. Lemnitskiy V.V., Kazarnovskiy D.S., Ravitskaya T.M. and oth. *Vliyanie sostava i ishodnoy strukturyi na izmenenie svoystv stali pri kontaktno-ustalostnom razrushenii* [Influence of the composition and initial structure on the change in the properties of steel during contact-fatigue fracture]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. Harkov : UkrNIIMet, 1971, no. 7, pp. 37–43. (in Russian).
4. Kragelskiy I.V. *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Moscow : Mashinostroenie, 1968, 480 p. (in Russian).
5. Tenenbaum M.M. *Iznosostoykost konstruksionnyih materialov i detaley mashin* [Wear resistance of structural materials and machine parts]. Moscow : Mashinostroenie, 1966, 331 p. (in Russian)
6. Krauze G. and Sholten O. *Faktoryi,vliyayuschie na trenie i iznos v sisteme "koleso – rels"* [Factors affecting friction and wear in the "wheel – rail" system]. *Zheleznyie dorogi mira* [Railways of the World]. 1978, no. 1, pp. 62–64. (in Russian).

Надійшла до редакції: 12.02.2022