

О.І. Бабаченко, д.т.н., с.н.с., директор, ORCID 0000-0003-4710-0343

Г.А. Кононенко, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7446-4105

Є.С. Клемшов, к.т.н., н.с.

Р.В. Подольський, інженер, ORCID 0000-0002-0288-0641

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

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНО ДОПУСТИМИХ ШВИДКОСТЕЙ ОХОЛОДЖЕННЯ ОБОДУ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ОДНОРІДНОЇ СТРУКТУРИ

Анотація. Відповідність новим більш жорстким вимогам до залізничних коліс можлива тільки при комплексному підході до вдосконалення технології їх виробництва при обґрунтованому виборі режимів термічної обробки з урахуванням хімічного складу сталі. Мета дослідження - експериментальне та аналітичне визначення гранично допустимих швидкостей охолодження поверхні кочення і мінімально необхідних швидкостей охолодження центральних ділянок ободу залізничного колеса для досягнення високого рівня твердості феритно-перлітної структури. Дослідження проводили на сталях марки ER8 та ER7 за EN 13262, марки 2 за ДСТУ ГОСТ 10791:2016, сталі класу С за AAR M-107/M-208. На основі випробування на прогартовуваність (ГОСТ 5657) методом торцевого гартування (за методом Джомені) визначалась відстань від поверхні, з якої виконували однобічне охолодження, де твердість відповідала вимогам нормативної документації для коліс з досліджуваної сталі, та відстань, де вже не відбувалось утворення голчастих структур, в тому числі бейніту та відманштетту за результатами металографічних досліджень та визначення твердості. За результатами зміни температури в процесі охолодження визначені швидкості охолодження у місцях, які відповідали заданим умовам. В роботі було застосовано моделювання в програмному комплексі QForm VX 8.2, в результаті була розроблена модель, для адаптації якої використовували результати експерименту. Підтвердили високу збіжність результатів розрахунку та експерименту. При цьому модель дозволила отримати миттєву швидкість охолодження в вигляді, який більше відповідає фізичному сенсу процесу і уникнути розкиду фактичних значень, пов'язаного з дискретністю фіксації даних. Встановлено, що миттєва швидкість охолодження змінюється в процесі безперервної рівномірної подачі охолоджувача. В деяких випадках фіксували значне уповільнення охолодження, або навіть негативні значення миттєвої швидкості охолодження. Це пов'язано з виділенням теплоти фазових перетворень, яке виникає під час розпаду аустеніту за дифузійним механізмом. Розроблена модель може бути використана для побудови термокінетичних діаграм при безперервному охолодженні та для розробки рекомендацій щодо режимів термічної обробки для досягнення заданих механічних властивостей за певного структурного стану.

Ключові слова: залізничні колеса, твердість, швидкість охолодження, прогартовуваність, моделювання

Посилання для цитування: *Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Клемешов Є.С., Подольський Р.В.* Визначення гранично допустимих швидкостей охолодження ободу залізничних коліс для формування однорідної структури. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Вип.34. – С. 219-228. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-219-228

Вступ. Так як обід колеса працює в парі тертя з рейкою, він, в першу чергу, повинен мати високу зносостійкість, що визначається його твердістю. З іншого боку, для забезпечення експлуатаційної надійності колеса необхідно щоб його обід мав достатній запас в'язкості, що в деяких випадках, може бути пов'язано з необхідністю зниження міцності (твердості). Ці, в якійсь мірі суперечливі вимоги за механічними властивостями і визначають складність проблеми забезпечення надійності ободу колеса. Для досягнення нормованих вимог механічних властивостей та мікроструктури залізничні колеса підлягають термічній обробці. Для забезпечення відповідності нормативним вимогам необхідно забезпечити відповідні швидкості охолодження для сталей різного хімічного складу: середнього для плавки та з урахуванням хімічної мікронеоднорідності, яка формується при кристалізації сталі.

Мета дослідження - експериментальне та аналітичне визначення гранично допустимих швидкостей охолодження поверхні кочення і мінімально необхідних швидкостей охолодження центральних ділянок ободу залізничного колеса для досягнення високого рівня твердості феритно-перлітної структури.

Матеріал та методики досліджень. Для досягнення поставленої мети, в роботі було розроблено методику для визначення необхідних швидкостей охолодження, що полягає в наступному. Зразок досліджуваної сталі підлягав випробуванню на прогартовуваність (ГОСТ 5657) методом торцевого гартування (за методом Джомені). Визначалась відстань від поверхні, з якої виконували однобічне охолодження, де твердість відповідала вимогам нормативної документації для коліс з досліджуваної сталі, та відстань, де вже не відбувалось гартування, тобто утворення голчастих структур, в тому числі бейніту та відманштетту. На наступному етапі були зачеканені термопари в другий зразок з тої ж сталі на попередньо визначені відстані, та проводилось охолодження в тих самих умовах, як і для першого зразка, з записом зміни температури під час охолодження. За результатом аналізу отриманих залежностей визначався оптимальний діапазон швидкостей охолодження, що забезпечуватиме задовільні значення твердості в центральних об'ємах ободу та гарантує відсутність голчастих структур біля поверхні кочення ободу колеса. Хімічний склад досліджуваних сталей наведено в таблиці 1.

Заготовки для зразків для випробування були виготовлені з проб, відібраних від ободів коліс. Перед вирізкою зразків заготовки були піддані нормалізації відповідно до вимог ГОСТ 5657. Відповідно до рекомендацій стандарту і з урахуванням хімічного складу сталей було обрано такі параметри нормалізації заготовок: температура нагріву - 880 °С, час витримки: 30 хвилин.

Таблиця 1 - Вміст хімічних елементів в досліджуваних сталях, %мас.

Хімічний елемент	Марка сталі, плавка			
	Марка 2, ДСТУ ГОСТ 10791:2016	Клас С,пл. ААР М-107/М-208	Марка ER7, EN 13262	Марка ER8, EN 13262
C	0,61	0,71	0,48	0,53
Mn	0,69	0,76	0,70	0,72
Si	0,27	0,30	0,30	0,27
P	0,013	0,010	0,009	0,009
S	0,002	0,008	0,002	0,003
Al	0,005	0,016	0,011	0,004
Cr	0,08	0,13	0,21	0,21
Ni	0,10	0,09	0,06	0,09
Cu	0,14	0,15	0,23	0,14
Ti	0,001	0,004	-	-
Mo	0,009	0,012	0,006	0,01
V	0,002	0,023	0,002	0,015
Nb	0,002	0,002	-	-
[H], ppm	1,44	0,80	1,50	1,73

Після нормалізації з заготовок були виготовлені по 2 зразка з розмірами відповідно до п.2.1 стандарту ГОСТ 5657 (рис. 1, а). Загальний вигляд виготовлених зразків представлений на рис. 1, б.

В лабораторних умовах було створено устаткування для проведення випробування. Установка для визначення прогартовуваності методом торцевого гарту відповідає вимогам стандарту ГОСТ 5657. Висота фонтану води - 58-60 мм. Співвісність водяного сопла і зразка була забезпечена. Водяна парасолька рівномірна (рис. 1, в).

Відповідно до вимог стандарту нагрів під загартування при температурі 850 °С (час нагріву 30 хвилин) з наступною витримкою 30 хвилин. При проведенні випробувань температура води була 15,5 °С. Час повного охолодження зразка становив понад 20 хвилин, що відповідає вимогам стандарту ГОСТ 5657. Процес однобічного охолодження показано на рис. 2, а.

Після гарту з зразків знімалися лиски після зняття яких вимірювали твердість (рис. 2, б).

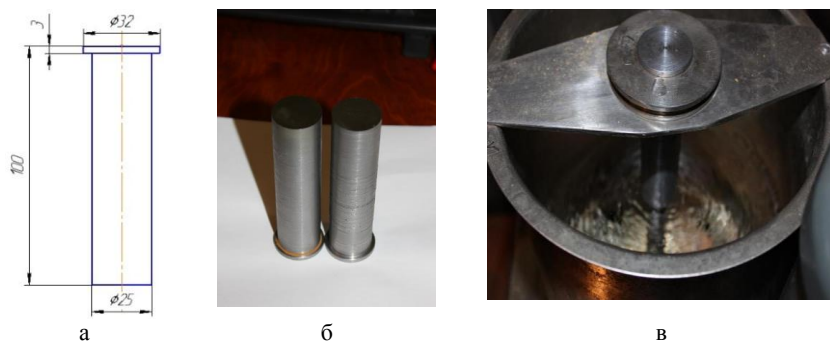


Рисунок 1 –Схема (а) та загальний вигляд зразку (б) для випробування сталі на прогартовуваність за ГОСТ 5657; процес однобічного охолодження водою (в)

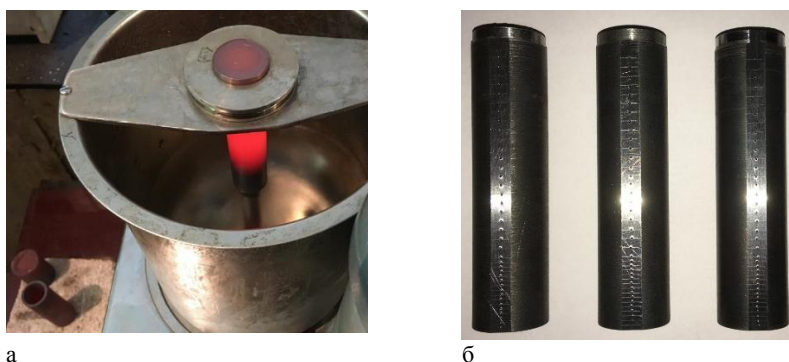


Рисунок 2 – Процес торцевого гартування дослідного зразка (а), дослідні зразки після вимірювання твердості (б)

Вимірювання твердості проводились на твердомірі ТК-2М.

В роботі було застосовано моделювання в програмному комплексі QForm VX 8.2, в результаті була розроблена модель, для адаптації якої використовували результати експерименту.

Результати досліджень. Було встановлено закономірність зміни твердості від відстані до торцю, з якого проводилося охолодження, та визначено відстань, на якій твердість відповідала вимогам нормативної документації (рис. 3). Горизонтальна лінія на графіку - рівень вимог НТД до коліс з даної марки сталі.

Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2020. – Випуск 34 «Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Выпуск 34 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

В роботі було виконано дослідження мікроструктури зразків після торцевого гартування від поверхні, з якої охолоджували в напрямку збільшення відстані. Показано, що зі збільшенням відстані від торцю структура змінюється від структур гарту до перлітної, різний рівень твердості в контрольованих точках досягається за рахунок зміни дисперсності перліту. За результатами експерименту встановлені відстані для досліджуваних сталей, на яких не утворюється голчаста мікроструктура (табл. 2).

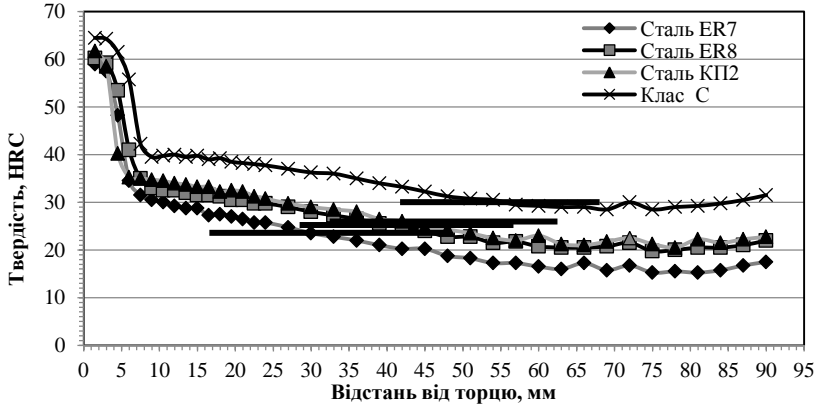


Рисунок 3 – Зміна твердості в залежності від відстані до торцю зразка після випробувань на прогартовуваність за ГОСТ 5657 (метод Джомені)

Таблиця 2 – Результати експерименту з однобічним тепловідводом

Досліджувані параметри сталей	Марка сталі			
	Марка 2	Клас С	Марка ER7	Марка ER8
Мінімальна відстань, на якій не спостерігали голчасті структури бейніту, мартенситу та відманштетту, мм	9	13,5	13,5	16,5
Відстань, що відповідає середині інтервалу, мм	25,5	33,75	21,75	27,75
Відстань, на якій твердість відповідала мінімально припустимій за вимогами відповідної НТД, мм	42	54	30	39

На наступному етапі досліджень було зачеканено термопари у визначених точках та записано криві охолодження (рис. 4), які дозволяють

визначити реальні швидкості охолодження: максимально припустиму для поверхні кочення ободу колеса, при якій не відбувається утворення мартенситу; мінімально необхідну для центральних областей ободу для досягнення твердості на рівні вимог нормативної документації для всіх досліджуваних сталей.

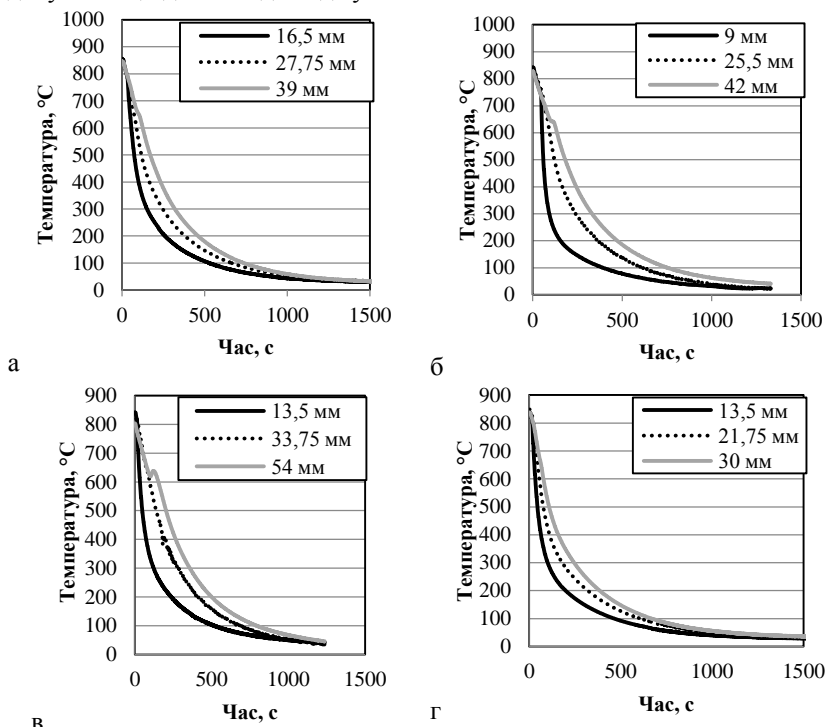


Рисунок 4 – Зміна температури в процесі охолодження досліджуваних сталей: а – марки ER8 за EN 13262, б – марки 2 за ДСТУ ГОСТ 10791:2016, в – сталі класу C AAR M-107/M-208, г – марки ER7 за EN 13262

В програмному комплексі QForm VX 8.2 була розроблена модель, для адаптації якої використовували результати експерименту. Підтвердили високу збіжність результатів розрахунку та експерименту. При цьому модель дозволила отримати миттєву швидкість охолодження в вигляді, який більше відповідає фізичному сенсу процесу (рис. 5), і уникнути розкиду фактичних значень, пов'язаного з дискретністю фіксації даних.

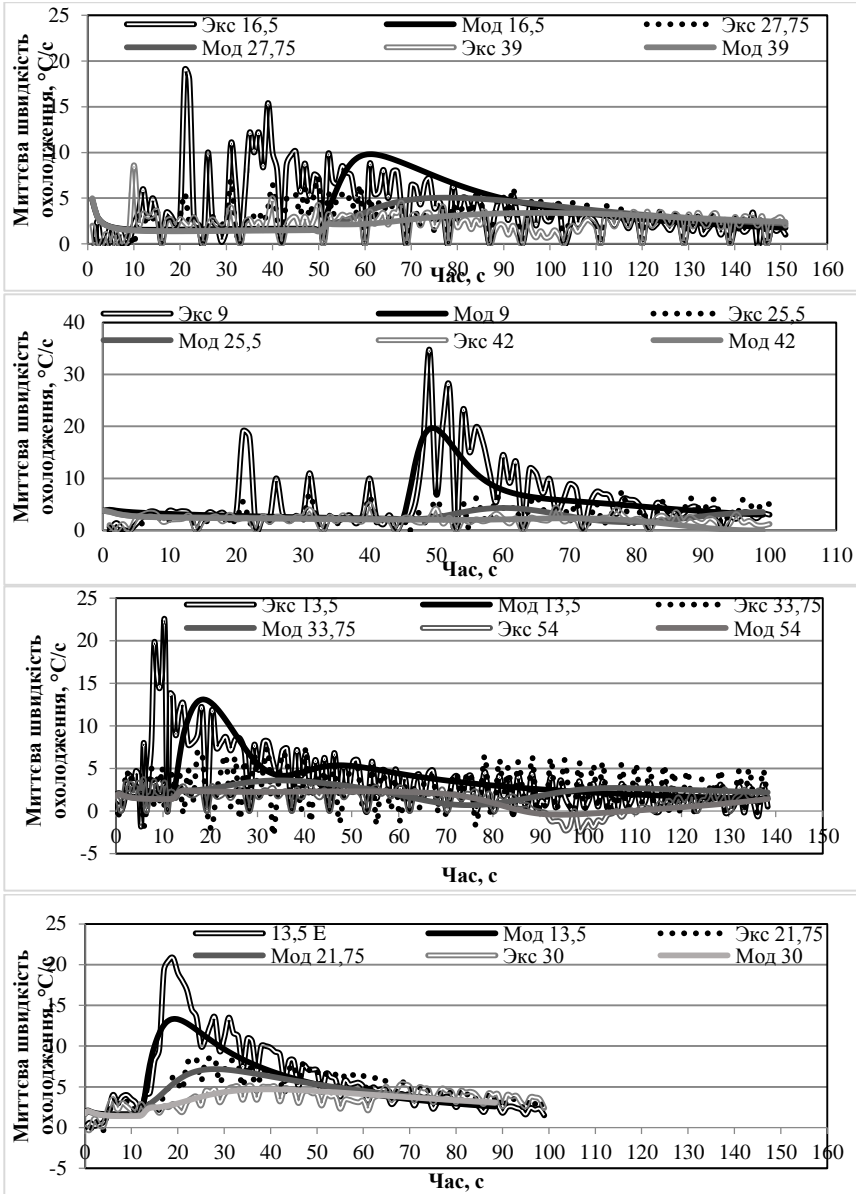


Рисунок 5 – Миттєва швидкість охолодження: порівняння експериментальних та розрахункових значень: а – марки ER8 за EN 13262, б – марки 2 за ГОСТ 10791-2011, в – сталі класу C AAR M-107/M-208, г – марки ER7 за EN 13262

Як можна бачити з рисунку 4, миттєва швидкість охолодження змінюється в процесі безперервної рівномірної подачі охолоджувача. В деяких випадках фіксували значне уповільнення охолодження, або навіть негативні значення миттєвої швидкості охолодження. Це пов'язано з виділенням теплоти фазових перетворень, яке виникає під час розпаду аустеніту за дифузійним механізмом. Також можна відзначити, що для різної відстані від торцю максимума миттєвої швидкості охолодження припадають на різний час – це час, коли на метал на певній відстані починає впливати дія охолоджувача. До того метал охолоджувався тільки за рахунок відводу тепла бічною поверхнею. В точках, які розташовані ближче до поверхні інтенсивного тепловідводу максимальна миттєва швидкість більша.

Таким чином, визначені допустимі інтервали швидкостей охолодження поверхневих і центральних ділянок ободу коліс при прискореному охолодженні з сталей марок ER7, ER8, марки 2, сталі для коліс класу С. Дані можуть бути використані для вдосконалення режимів термічної обробки залізничних коліс поточного виробництва з метою досягнення високого комплексу механічних властивостей як при існуючій технології охолодження, так і при диференційованому охолодженні на модернізованому обладнанні термічної ділянки колесопрокатного цеху.

Висновки

1. Розроблено спосіб визначення швидкості охолодження сталі. Спосіб включає метод торцевого гартування зразків, нагрів до температури гартування, охолодження водою в спеціальному пристрої за певних умов, проведення замірів твердості на бічній стороні зразка. Додатково досліджують на структурний стан, виявляють місця в яких мікроструктура та рівень твердості відповідають заданим, у такий самий другий зразок в визначені місця розміщують термометри та записують криві зміни температури під час охолодження з торцю, при цьому на кривих визначають швидкість охолодження, при якій забезпечується заданий рівень твердості та структурний стан. Спосіб дозволяє підвищити інформативність та точність способу та спростити оптимізацію режимів термообробки готового виробу. На розроблений спосіб подана заявка на патент.

2. Експериментально визначені гранично припустимі швидкості охолодження поверхні кочення і мінімально необхідні швидкості охолодження центральних ділянок ободу залізничного колеса для досягнення високого рівня твердості та утворення однорідної мікроструктури. Встановлено, що для кожної марки сталі для залізничних коліс існує визначений вузький інтервал швидкостей охолодження при термічній обробці, в якому забезпечується виконання вимог нормативної

документації для залізничних коліс за мікроструктурою (відсутність голчастих структур мартенситу, бейніту, відманштетту) та за рівнем твердості.

3. Розроблена модель зміни температури по перерізу зразка для торцевого гартування для сталей різного хімічного складу, яка дозволить прогнозувати миттєві та загальні швидкості охолодження, фазовий склад та механічні властивості на будь-якій відстані від поверхні тепловідводу. Така модель може бути використана для побудови термокінетичних діаграм при безперервному охолодженні та для розробки рекомендацій щодо режимів термічної обробки для досягнення заданих механічних властивостей за певного структурного стану.

A.I. Babachenko, Dr.Sci., Senior Researcher, Director, ORCID 0000-0003-4710-0343

G.A. Kononenko, PhD., Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7446-4105

E.S. Klemeshov, PhD., Researcher

R.V. Podolskiy, *engineer*, ORCID 0000-0002-0288-0641

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Determination of the maximum permissible cooling rate of railway wheel rims to form a homogeneous structure

Summary. Compliance with the new more stringent requirements for railway wheels is possible only with an integrated approach to improving their production technology with a reasonable choice of heat treatment modes, taking into account the chemical composition of steel. The purpose of the study is the experimental and analytical determination of the maximum permissible cooling rate of the rolling surface and the minimum required cooling rate of the central sections of the rim of a railway wheel to achieve a high level of hardness of the ferrite-pearlite structure. The studies were carried out on steels of grades ER8 and ER7 according to EN 13262, grade 2 according to GOST 10791: 2016, steel of class C according to AAR M-107 / M-208. Based on the hardenability test (GOST 5657) by the end hardening method (according to the Jomeni method), the distance from the surface from which one-sided cooling was performed, where the hardness met the requirements of the normative documentation for wheels made of the steel under study, the distance where the formation of needle-like structures did not occur, was determined, including bainite and widmanstatt according to the results of metallographic studies and determination of hardness. Based on the results of temperature changes during the cooling process, the cooling rates were determined in places that met the specified conditions. In the work, modeling was applied in the QForm VX 8.2 software package, as a result, a model was developed for the adaptation of which the results of the experiment were used. The high convergence of the results of calculation and experiment was confirmed. At the same time, the model made it possible to obtain the instantaneous cooling rate in a form that is more consistent with the physical meaning of the process and to avoid the scatter of actual values associated with the discreteness of data recording. It was found that the instantaneous cooling rate changes during the continuous uniform supply of the coolant. In some cases, a significant slowdown in cooling was recorded, or even negative values of the instantaneous cooling rate. This is due to the release of the heat of phase transformation,

Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2020. – Випуск 34
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

which occurs during the decomposition of austenite by the diffusion mechanism. The developed model can be used to construct thermokinetic diagrams during continuous cooling and to develop recommendations for heat treatment modes to achieve the specified mechanical properties at a certain structural state.

Keywords: railway wheels, hardness, cooling rate, hardenability, modeling

For citation: Babachenko O.I., Kononenko H.A., Klemesho YE.S., Podol's'kyu R.V. Vyznachennya hranychno dopustymykh shvydkostey okholodzhennya obodu zaliznychnykh kolis dlya formuvannya odnoridnoyi struktury. [Determination of the maximum allowable cooling rates of the rim of railway wheels to form a homogeneous structure.]. «*Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii*». [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 219-228. [in Ukrainian]. DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-219-228

*Стаття надійшла до редакції збірника 11.11.20 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування (Протокол засідання
редакційної колегії збірника №3 від 22 грудня 2020 року)*