

О.І. Бабаченко, Г.А. Кононенко, Є.С. Клемешов, Р.В. Подольський
**РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ШВИДКОСТЕЙ ОХОЛОДЖЕННЯ
ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС З ЗАСТОСУВАННЯМ МОДЕЛЮВАННЯ
В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ QFORM VX 8.2
ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ОДНОРІДНОЇ ФЕРИТО-ПЕРЛІТНОЇ СТРУКТУРИ**

Анотація. Дослідження проводили на сталі марки ER7 за EN 13262. На основі випробування на прогартуваність (ГОСТ 5657) методом торцевого гартування (по Джомені) визначалась відстань від поверхні, з якої виконували однібічне 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. 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. 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, прогартуваність, моделювання.

Результати отримані в роботі, яка виконується відповідно до державної цільової програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень», код програмної класифікації видатків 6541230.

Вступ. При кристалізації сталевого злитка формується хімічна мікронеоднорідність, пов'язана з дендритною ліквіацією.

В процесі прискореного охолодження ділянки аустеніту з підвищеним вмістом кремнію і марганцю можуть зазнавати $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення по бездифузійному і проміжному механізму і являють собою структури з голчатою морфологією (мартенсит і бейніт).

Зміна фазового складу і неоднорідність структурного стану є недопустимими згідно окремих нормативних вимог та можуть призводити до зниження механічних властивостей ободів залізничних коліс і зменшення загальної експлуатаційної надійності цих виробів.

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. Визначення раціонального інтервалу швидкостей охолодження ободу залізничного колеса для досягнення високого рівня твердості феритно-перлітної структури з застосуванням моделювання.

Матеріал та методики досліджень. Дослідження проводили на сталі марки ER7 за EN 13262. Зразок досліджуваної сталі підлягав випробуванню на прогартовуваність методом торцевого гартування (за ГОСТ 5657 методом Джомені). Вимірювання твердості проводились на твердомірі ТК-2М. Моделювання проводилось в програмному комплексі QForm VX 8.2.

Результати досліджень. Після випробувань на прогартовуваність за ГОСТ 5657, визначалась відстань від поверхні, з якої виконували однобічне охолодження, де твердість відповідала вимогам нормативної документації для коліс з досліджуваної сталі (рис. 1), та відстань, де вже не відбувалось гартування, тобто утворення голчастих структур, в тому числі бейніту та відманштетту (рис. 2). На наступному етапі досліджень були розміщені термопари в другий зразок з тієї 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 (рис. 3, а). 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. Але аналіз результатів показав, що необхідне регулювання інтенсивності охолодження при термічній обробці. Для розробки режимів диференціації витрати охолоджувача необхідне була розробка та застосування моделі розрахунку зміни температури металу в процесі охолодження.



Рисунок 1 - Зміна твердості в залежності від відстані до торцю зразка після випробувань на прогартуваність за ГОСТ 5657 (метод Джомені)

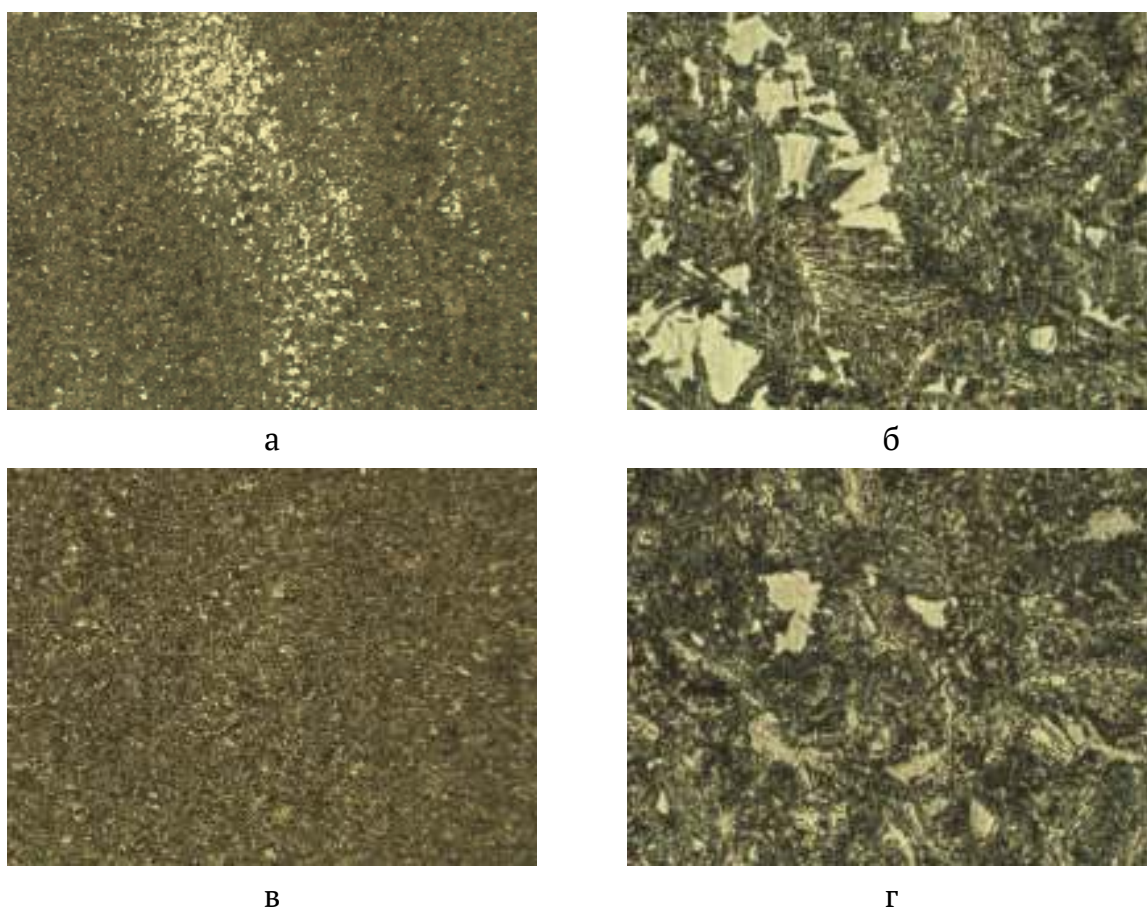


Рисунок 2 - Мікроструктура зразка зі сталі марки ER7 за EN 13262 після торцевого гартування на відстані від торцю 7,5 мм (а, б) та 13,5 мм (в, г)
а, в - $\times 100$; б, г - $\times 1000$

В програмному комплексі QForm VX 8.2 була розроблена модель, для адаптації якої використовували результати експерименту.

В основу роботи програми покладені основні підходи з теорії теплопередачі.

Якщо в просторі існує різниця температур між двома точками, то відбувається перенесення енергії (теплообмін) від області з більшою температурою до області з меншою температурою.

Виділяють наступні три види теплообміну:

- теплопровідність;
- конвекція;
- випромінювання.

Модель розрахунку зміни температури в процесі термічної обробки ободу залізничного колеса виконувалась за допомогою програми QForm VX 8.2, яка може розраховувати нерівномірне температурне поле в заготовці, яке змінюється в часі в процесі деформації, нагрівання або її охолодження.

Виділяють наступні три види теплообміну: теплопровідність; конвекція; випромінювання. Передача тепла теплопровідністю здійснюється при безпосередньому контакті частин тіла з різною температурою. Диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності, що використовується для моделювання цього явища в програмі QForm VX 8.2 має вигляд:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_G = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

де: D - оператор Лапласа,

T - температурне поле [K],

t - час [с],

k - коефіцієнт теплопровідності [Вт / (м К)],

ρ - щільність [кг / м³],

c - питома теплоємність [Дж / (кг К)],

q_G - потужність внутрішнього джерела тепла [Вт / м³].

У програмі QForm VX 8.2 для опису конвективного теплообміну використовується закон Ньютона-Рихмана:

$$q_n = h(T_1 - T_c) \quad (2)$$

де h - коефіцієнт тепловіддачі [Вт / (м² К)],

T_1 - температура тіла (заготовки або інструменту),

T_c - температура навколишнього середовища.

Щільність теплового потоку випромінювання на поверхні визначається за формулою:

$$q_n = \varepsilon \sigma_0 (T_1^4 - T_c^4) \quad (3)$$

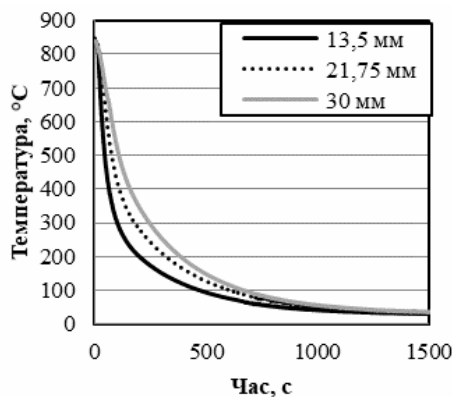
де ε - ступінь чорноти реального тіла, яка визначається як відношення випромінювальної здатності даного тіла до випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла при тій же температурі,

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт / (м}^2\text{К}^4)$ - постійна Стефана-Больцмана.

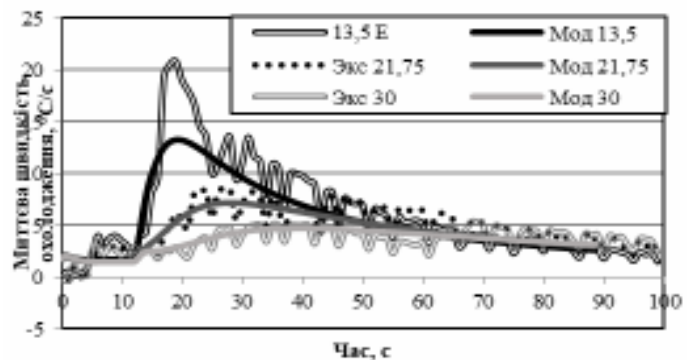
Процес теплообміну в QForm VX 8.2 моделюється за допомогою методу кінцевих об'ємів. Відповідно до цього методу просторова дискретизація завдання здійснюється шляхом розбиття розрахункової області на невеликі дотичні обсяги. У середині кожного контрольного обсягу знаходиться одна точка «прив'язки» шуканого сіткового рішення. В якості кінцевих об'ємів в QForm VX 8.2 використані осередки Вороного.

Сітка осередків Вороного будується на базі кінцево-елементної сітки, використовуваної для дискретизації деформаційної завдання. У кожному з кінцевих елементів виділяється точка, рівновіддалена від кутових вузлів трикутного (2D завдання) або тетрадрального (3D) елемента. Таким чином, кінцеві обсяги у вигляді осередків Вороного є геометричними фігурами, ребра яких з'єднують центри описаних кіл для трикутних (2D) і описаних сфер для тетрадральних (3D) кінцевих елементів.

Порівняння експериментальних та розрахованих за допомогою моделі результатів підтвердило їх високу збіжність. При цьому модель дозволила отримати миттєву швидкість охолодження в вигляді, який більше відповідає фізичному сенсу процесу (рис. 2, б), і уникнути розкиду фактичних значень, пов'язаного з дискретністю фіксації даних.



а



б

Рисунок 3 – Зміна температури в процесі охолодження (а) та миттєва швидкість охолодження (порівняння експериментальних та розрахункових значень) (б) марки ER7 за EN 13262

Як можна бачити з рисунку 2, б, 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 максимуми 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.

Результати моделювання зміни температури по перерізу зразка для випробувань на торцеве гартування представлені на рисунку 4.

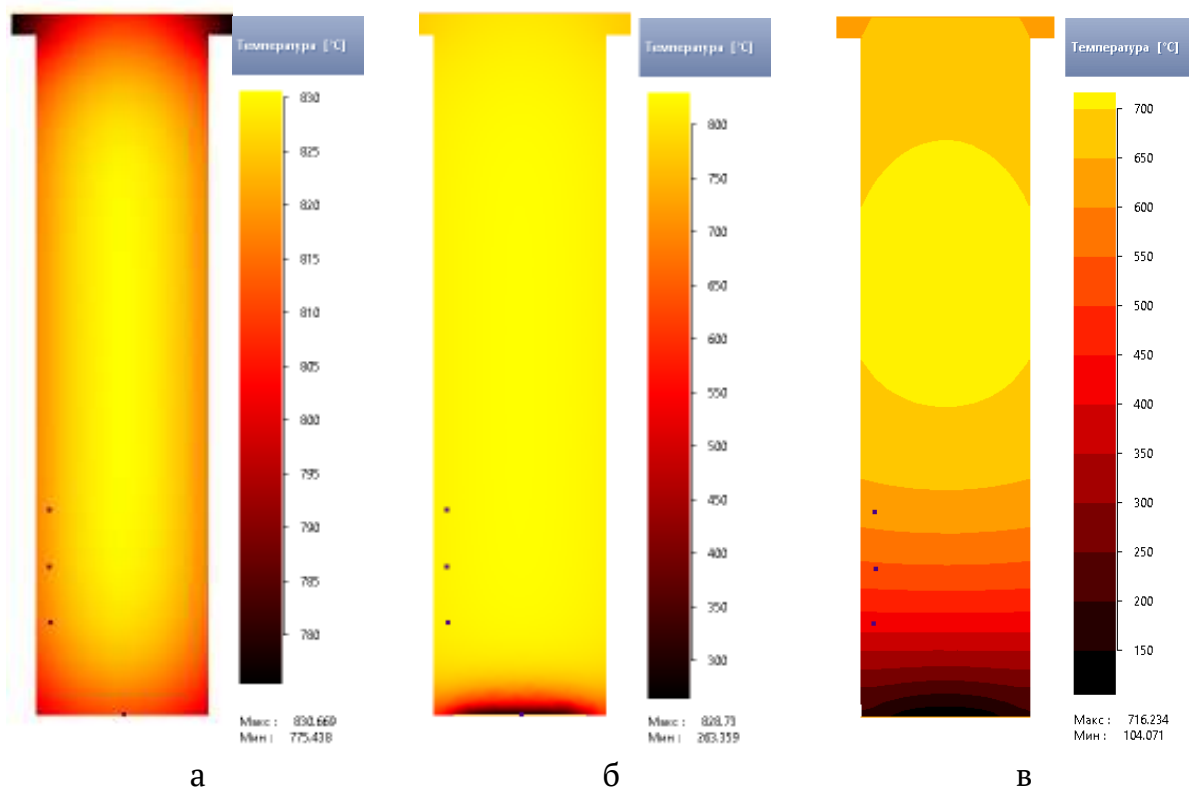


Рисунок 4 – Температурні поля по перерізу зразка для випробувань на прогартуваність зі сталі марки ER7 за EN 13262: а – перед початком охолодження; б – через 1 с одностороннього охолодження; в - через 60 с одностороннього охолодження

З аналізу рисунку видно, розподіл температури в тілі зразка в процесі охолодження зразка досліджуваної сталі. На рисунку 4 вказані точки, у яких ре-

алізовувались швидкості охолодження, при яких твердість та структура відповідають заданим.

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 термокінетичної діаграми при безперервному охолодженні (рис. 5) та для розробки рекомендацій щодо режимів термічної обробки для досягнення заданих механічних властивостей за певного структурного стану.

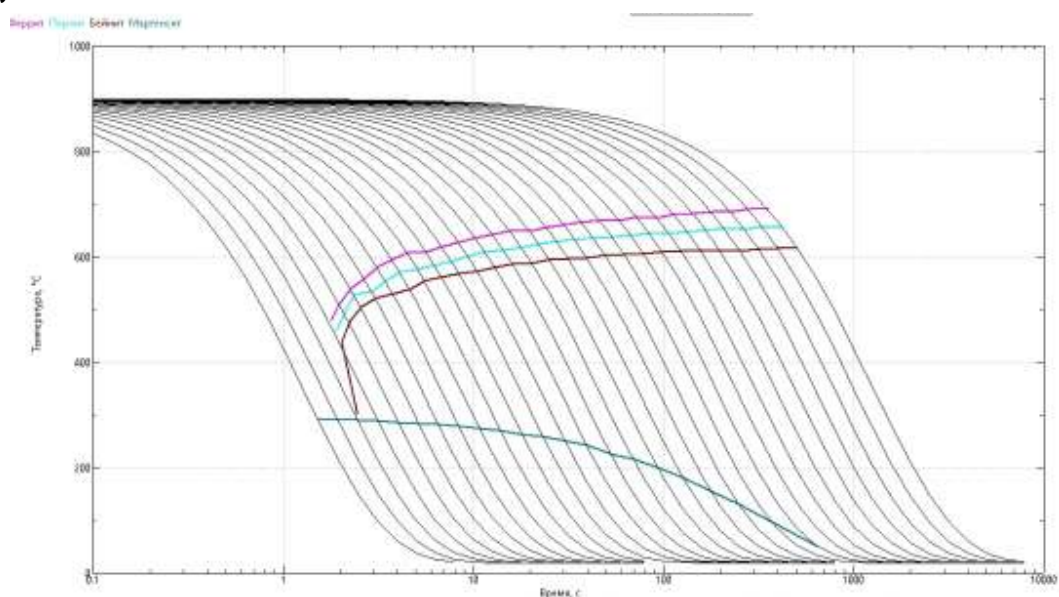


Рисунок 5 – Термокінетична діаграма досліджуваної сталі марки ER7 за EN 13262, побудована з застосуванням моделі розрахунку температури при безперервному охолодженні з застосуванням програми QForm VX 8.2

Висновки. Визначений допустимий інтервал швидкостей охолодження поверхневих і центральних ділянок ободу коліс при прискореному охолодженні з сталі марки ER7. 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. 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 термодинамічних діаграм при безперервному охолодженні та для розробки рекомендацій щодо режимів термічної обробки для досягнення заданих механічних властивостей за певного структурного стану.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Бабаченко А.И., Кононенко А.А., Подольский Р.В., Клемешов Є.С. Модель розрахунку зміни температури для розробки параметрів термічної обробки, яка забезпечить однорідну дисперсну структуру по перерізу ободу залізничних коліс. Матеріали всеукраїнської науково-методичної конференції "Проблеми математичного моделювання". 2020. №1. С.46–48.
2. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Імітаційне моделювання зміни теплового поля залізничної рейки під час диференційної термічної обробки. VI Міжнародна науково технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем». 2020. №6. С. 17–18.
3. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронова О.А. Дослідження впливу хімічного складу сталі для залізничних коліс в межах марочного на мікроструктуру та механічні властивості при різних швидкостях охолодження . Матеріали міжнародної наукової конференції міждисциплінарні наукові дослідження: особливості та тенденції. Чернігів. 2020. №2. С. 44–49. <https://doi.org/10.36074/04.12.2020.v2.07>
4. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Дослідження мікроструктури та розподілу твердості рейок по перерізу при термічній обробці головки рейки, які створюються при виробництві за поточною технологією. Матеріали міжнародної наукової конференції міждисциплінарні наукові дослідження: особливості та тенденції. Чернігів. 2020. №2. С. 50–56. <https://doi.org/10.36074/04.12.2020.v2.08>

REFERENCE

1. Babachenko A. I., Kononenko A. A., Podol'skij R. V., Klemeshov Є. S. Model' rozrahunku zmini temperaturi dlja rozrobki parametriv termichnoї obrobki, jaka zabezpechit' odnoridnu dispersnu strukturu po pererizu obodu zaliznichnih kolis. Materiali vseukraїns'koї naukovo-metodichnoї konferencії "Problemi matematichnogo modeljuvannja". 2020. №1. S. 46–48.

2. Babachenko O. I., Kononenko G. A., Podol's'kij R. V. Imitacijne modeljuvannja zmini teplovogo polja zaliznichnoï rejki pid chas diferencijnoï termichnoï obrobki. VI Mizhnarodna naukovu tehnicna konferencija «Komp'juterne modeljuvannja ta optimizacija skladnih sistem». 2020. №6. S. 17–18.
3. Babachenko O. I., Kononenko G. A., Podol's'kij R. V., Safronova O.A. Doslidzhennja vplivu himichnogo skladu stali dlja zaliznichnih kolis v mezhah marochnogo na mikrostrukturu ta mehanichni vlastivosti pri riznih shvidkostjah oholodzhennja . Materiali mizhnarodnoï naukovoi konferencii mizhdisciplinarni naukovi doslidzhennja: osoblivosti ta tendencii. Chernigiv. 2020. №2. S. 44–49. <https://doi.org/10.36074/04.12.2020.v2.07>
4. Babachenko O. I., Kononenko G. A., Podol's'kij R. V. Doslidzhennja mikrostrukturi ta rozpodilu tverdosti rejok po pererizu pri termichnij obrobci golovki rejki, jaki stvorjуют'sja pri virobnictvi za potочноju tehnologiju. Materiali mizhnarodnoï naukovoi konferencii mizhdisciplinarni naukovi doslidzhennja: osoblivosti ta tendencii. Chernigiv. 2020. №2. S. 50–56. <https://doi.org/10.36074/04.12.2020.v2.08>

Received 01.03.2021.

Accepted 05.03.2021.

Разработка рекомендаций по скоростей охлаждения железнодорожных колес с применением моделирования в программном комплексе qform vx 8.2 для формирования однородной феррито-перлитной структуры

Было применено моделирование в программном комплексе QForm VX 8.2, в результате была разработана модель, для адаптации которой использовали результаты эксперимента. Подтвердили высокую сходимость результатов расчета и эксперимента. Разработанная модель может быть использована для построения термокинетических диаграмм при непрерывном охлаждении и для разработки рекомендаций по режимов термической обработки.

Development of recommendations on cooling rates of railway wheels with the use of modeling in the software package qform vx 8.2 for the formation of a homogeneous ferritic-perlite structure

Summary. The tests were performed on ER7 steel according to EN 13262. Based on the hardenability test (GOST 5657) by the method of end hardening (Jomen) the distance from the surface from which unilateral cooling was performed, where the hardness met the requirements of regulatory documentation for wheels of test steel, and the distance where the formation of needle structures, including bainite and otmanshtette, no longer took place. Simulation was applied in the software package QForm VX 8.2, as a result, a model was developed, for the

adaptation of which the results of the experiment were used. Confirmed the high convergence of the results of the calculation and the experiment. At the same time, the model allowed to obtain an instantaneous cooling rate in a form that is more in line with the physical meaning of the process and to avoid the scatter of actual values associated with the discreteness of data capture. It is established that the instantaneous cooling rate changes in the process of continuous uniform supply of the cooler. The permissible range of cooling rates of the surface and central sections of the wheel rim during accelerated cooling of ER7 steel is determined. The data can be used to improve the heat treatment modes of railway wheels of current production in order to achieve a high set of mechanical properties both with the existing cooling technology and with differentiated cooling on the modernized equipment of the thermal section of the wheel shop. The developed model can be used to build thermokinetic diagrams under continuous cooling and to develop recommendations for heat treatment modes to achieve the specified mechanical properties under a certain structural state.

Бабаченко Олександр Іванович - докт. техн.наук, директор Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Кононенко Ганна Андріївна - канд. техн. наук, вчений секретар Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Клемешов Євгеній Сергійович - канд. техн. наук, науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Подольський Ростислав Вячеславович - інженер першої категорії Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Бабаченко Александр Иванович - докт. техн.наук, директор Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Кононенко Анна Андреевна - канд. техн.наук, ученый секретарь Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Клемешов Евгений Сергеевич - канд. техн.наук, научный сотрудник Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Подольский Ростислав Вячеславович - инженер первой категории Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Babachenko Alexander - Dr. Technical Sciences, Director of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine.

Kononenko Ganna - Cand. technical science, scientific secretary of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine.

Klemeshov Evgen - Cand. technical science, researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine.

Podolskyi Rostislav - engineer of the first category of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine.