

УДК:669.14.018.294:669.017

DOI:10.30838/J.PMNTM.2413.240418.10.99

МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ПЕРЕТИНОМ ОБОДУ В ПРОЦЕСІ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС ЗІ СТАЛЕЙ РІЗНОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ

БАБАЧЕНКО О. І.¹, *д. т. н.*,
 КОНОНЕНКО Г. А.², *к. т. н.*,
 ХУЛІН А. М.^{3*}, *к. т. н.*

¹ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49000, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID: 0000-0002-2869-3478

² Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49000, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: 0000-0001-7446-4105

^{3*} Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49000, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: ahulin81@ukr.net; ORCID: 0000-0002-6707-0877

Анотація. Постановка проблеми. Досягнення високих механічних властивостей обода залізничного колеса з вуглецевої сталі забезпечується за рахунок формування в ній структури високодисперсного перліту і невеликої кількості доєвтектоїдного фериту, що виділяється у вигляді сітки по границях колишніх аустенітних зерен. Мікроструктурні дослідження ободів залізничних коліс показують, що існуючі режими термообробки викликають у деяких випадках формування, поряд із феритом і перлітом, структури бейніту в місцях, де може мати місце хімічна мікронеоднорідність та реалізовуватись достатньо висока швидкість охолодження. Вирішенням цієї проблеми може бути застосування систем гнучкого управління режимами термічної обробки, заснованих на моделюванні процесів фазових і структурних перетворень. **Методика.** Моделювали охолодження обода залізничного колеса за прискореного охолодження за допомогою методу кінцевих елементів із використанням рівняння теплопровідності (рівняння Фур'є) під час термічної обробки залізничних коліс зі сталі з граничними відхиленнями за хімічним складом у межах вимог нормативної документації, які можуть формуватися в металі обода колеса в результаті ліквідації хімічних елементів за дендритної кристалізації заготовки. Для залізничних коліс застосовують вуглецеві сталі, які в основному відрізняються тільки вмістом вуглецю, марганцю і кремнію. На практиці діапазон змін цих елементів у колісній сталі різних марок у збіднених і збагачених хімічними елементами ліквідаційних ділянках, що формуються у процесі кристалізації, може становити: 0,45...0,70 % вуглецю; 0,25...0,50 % кремнію; 0,40...1,0 % марганцю. **Результати.** Показано, що під час охолодження обода залізничного колеса в його внутрішніх шарах реалізується менша швидкість охолодження, тобто фазові перетворення зі зміною відстані від поверхні відведення тепла за термічної обробки відбуваються в інших умовах. Доведено, що на перших етапах прискореного охолодження необхідно зменшувати інтенсивність витрати води, щоб швидкість охолодження не перевищувала критичну. **Наукова новизна.** Встановлено закономірності зміни температури за перетином обода залізничних коліс зі сталей різного хімічного складу в процесі прискореного охолодження зміцнювальної термічної обробки. **Практична значимість.** Наведені моделі дозволять розробити науково обґрунтовані режими термічної обробки залізничних коліс для забезпечення формування рівномірної високодисперсної мікроструктури за перетином обода колеса.

Ключові слова: залізничне колесо; термічна обробка; фазові перетворення; термодинамічна діаграма; моделювання методом кінцевих елементів; хімічна неоднорідність сталі; вуглецеві сталі для залізничних коліс

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СЕЧЕНИИ ОБОДА В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС ИЗ СТАЛИ РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

БАБАЧЕНКО А. И.¹, *д. т. н.*,
 КОНОНЕНКО А. А.², *к. т. н.*,
 ХУЛИН А. Н.^{3*}, *к. т. н.*

¹ Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, 49000, Украина, тел. + 38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID: 0000-0002-2869-3478

² Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, 49000, Украина, тел. + 38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: 0000-0001-7446-4105

^{3*} Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, 49000, Украина, тел. + 38 (056) 790-05-14, e-mail: ahulin81@ukr.net; ORCID: 0000-0002-6707-0877

Аннотация. Постановка проблемы. Достижение высоких механических свойств обода железнодорожного колеса из углеродистой стали обеспечивается за счет формирования в ней структуры высокодисперсного перлита и в небольшом количестве доэвтектоидного феррита, который выделяется в виде сетки по границам бывших аустенитных зерен. Микроструктурные исследования ободов железнодорожных колес показывают, что существующие режимы термообработки приводят в некоторых случаях к формированию, наряду с ферритом и перлитом, структуры бейнита в местах, где может иметь место химическая микронеоднородность и реализовываться достаточно высокая скорость охлаждения. Решением данной задачи может быть применение систем гибкого управления режимами термической обработки, основанных на моделировании процессов фазовых и структурных превращений. **Методика.** Моделировали охлаждение обода железнодорожного колеса при ускоренном охлаждении с помощью метода конечных элементов с использованием уравнения теплопроводности (уравнение Фурье) при термической обработке железнодорожных колес из стали с предельными отклонениями по химическому составу в пределах требований нормативной документации, которые могут формироваться в металле обода колеса в результате ликвации химических элементов при дендритной кристаллизации заготовки. Для железнодорожных колес применяют углеродистые стали, которые в основном отличаются только содержанием углерода, марганца и кремния. На практике диапазон изменений этих элементов в колесной стали различных марок в обедненных и обогащенных химическими элементами ликвационных участках, формирующихся при кристаллизации, может составлять: 0,45...0,70 % углерода; 0,25...0,50 % кремния; 0,40...1,0 % марганца. **Результаты.** Показано, что при охлаждении обода железнодорожного колеса в его внутренних слоях реализуется меньшая скорость охлаждения, то есть фазовые превращения с изменением расстояния от поверхности отвода тепла при термической обработке проходят в других условиях. Доказано, что на первых этапах ускоренного охлаждения необходимо уменьшать интенсивность расхода воды, чтобы скорость охлаждения не превышала критическую. **Научная новизна.** Установлены закономерности изменения температуры по сечению обода железнодорожных колес из сталей различного химического состава в процессе ускоренного охлаждения упрочняющей термической обработки. **Практическая значимость.** Разработанные модели позволят разработать научно обоснованные режимы термической обработки железнодорожных колес для обеспечения формирования равномерной высокодисперсной микроструктуры по сечению обода колеса.

Ключевые слова: железнодорожное колесо; термическая обработка; фазовые превращения; термокинетическая диаграмма; моделирование методом конечных элементов; химическая неоднородность стали; углеродистые стали для железнодорожных колес

THE MODELING BY FINAL ELEMENTS METHOD OF TEMPERATURE CHANGE IN THE RIM CROSS-SECTION DURING HEAT TREATMENT OF RAILWAY WHEELS MADE FROM DIFFERENT CHEMICAL COMPOSITION STEELS

BABACHENKO O.I.¹, *Dr. Tech. Sc.*,
KONONENKO G.A.², *Ph. D. in Engineering sciences*,
KHULIN A.M.^{3*}, *Ph. D. in Engineering sciences*

¹ The 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, Ak. Starodubov's Sq., 1, Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID: 0000-0002-2869-3478

² The 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, Ak. Starodubov's Sq., 1, Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: 0000-0001-7446-4105

^{3*} The 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, Ak. Starodubov's Sq., 1, Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: ahulin81@ukr.net; ORCID: 0000-0002-6707-0877

Abstract. Formulation of the problem. The achievement of high mechanical properties of the railway wheel rim made from carbon steel is ensured by the highly dispersed perlite structure formation in it and a small amount of pre-eutectoid ferrite, which is allocated in the form of a grid along the borders of the former austenitic grains. Microstructural studies of the wheel rims show that the existing modes of heat treatment in some cases lead, along with ferrite and perlite, to the formation of the structure of bainite in places where chemical microinhomogeneity may occur and a fairly high cooling rate can be realized. As a decision of this problem

can be used application of the flexible control systems of thermal processing, based on the simulation of processes of phase and structural transformations. **Method.** The accelerated cooling of the railway wheel rim during its heat treatment was simulated by means of the finite element method using the thermal conductivity equation (Fourier equation). When simulation the steel was used with marginal deviations of a chemical composition within the normative documentation requirements that can take place in the wheel rim metal as a result of the chemical elements segregation during the dendritic crystallization of the workpiece. The carbon steel which is used for producing the railway wheels, mainly differ only in the content of carbon, manganese and silicon. In practice, the range of these elements changes in the wheel steel of various grades in the impoverished and enriched with chemical elements segregation sites formed during crystallization can be: 0.45...0.70 % carbon; 0.25...0.50 % silicon; 0.40...1.0 % manganese. **Results.** It is shown that when cooling the rim of a railway wheel in its inner layers, a lower cooling rate is realized, that is, phase transformations with a change of the distance from the heat removal surface during heat treatment pass in other conditions. It has been proved that at the early stages of accelerated cooling it is necessary to reduce the intensity of water flow so that the cooling rate does not exceed the critical one. **Scientific novelty.** The regularities of a temperature change in the cross-section of the railway wheel rim from the different chemical composition steels during the process of accelerated cooling with the hardening heat treatment were established. **Practical significance.** The developed models will allow to develop scientifically substantiated heat treatment modes of railroad wheels in order to ensure the formation of a uniform fine dispersed microstructure in the cross-section of the rail wheel rim.

Keywords: railroad wheel; heat treatment; phase transformation; thermokinetic diagram; modeling with finite element method; chemical microinhomogeneity of steel; carbon steels for railway wheels

Вступ

Досягнення високого комплексу механічних і експлуатаційних властивостей виробів у сучасних виробничих умовах неможливе без застосування науково обґрунтованих режимів термічної обробки. У свою чергу, це вимагає чіткого розуміння фазових і структурних перетворень, що відбуваються в сталі під час обробки, а також факторів, що впливають на стійкість переохолодженого аустеніту.

Вважається, що досягнення високих механічних властивостей обода залізничного колеса з вуглецевої сталі забезпечується за рахунок формування в ній структури лише тонкодисперсного перліту – сорбіту і доевтектоїдного фериту в невеликій кількості у вигляді сітки по границях колишніх аустенітних зерен без утворення голчастих мікроструктур. Але мікроструктурні дослідження ободів залізничних коліс показують, що існуючі режими термообробки викликають у деяких випадках формування, поряд із феритом і перлітом, структури бейніту в місцях, де може мати місце хімічна мікронеоднорідність та достатньо висока швидкість охолодження. Вирішенням цієї проблеми може бути застосування систем гнучкого управління режимами термічної обробки, заснованих на моделюванні процесів фазових і структурних перетворень.

Найповнішу характеристику перетворення аустеніту під час охолодження дають ізотермічні і термодіаграми розпаду переохолодженого аустеніту.

Термодіаграми характеризують кінетику розпаду аустеніту у разі безперервного охолодження. Ці діаграми менш наочні, ніж ізотермічні, але мають велике практичне значення, оскільки під час термічної обробки розпад аустеніту відбувається за безперервної зміни температури. Якщо відомі швидкості охолодження в різних перетинах реальних виробів, то, наносячи відповідні криві швидкостей охолодження на термодіаграму сталі певного хімічного складу, можна визначити температуру перетворення аустеніту і оцінити одержувану при цьому структуру [6].

Мета роботи

Моделювання методом кінцевих елементів зміни температури за перетином обода колеса в процесі термічної обробки, яке буде основою для розроблення рекомендацій щодо раціональних режимів термозміцнення в умовах модернізації устаткування термічної ділянки колесопрокатного цеху ПАТ «Інтерпайп НТЗ».

Методика

Наразі існує велика кількість сучасних програмних продуктів, створених на основі кінцево-елементного аналізу, що дозволяють, за допомогою проведення комп'ютерного моделювання, удосконалювати технологію виготовлення того чи іншого виробу [1–3]. Системи автоматизованого проектування, стосовно металів і їх сплавів, дозволяють моделювати процеси лиття, гарячої і холодної пластичної деформації, механічної обробки, зварювання і багато інших. У роботі моделювали охолодження обода залізничного колеса за прискореного охолодження за допомогою методу кінцевих елементів із використанням рівняння теплопровідності (рівняння Фур'є)* під час термічної обробки залізничних коліс зі сталі з граничними відхиленнями за хімічним складом у межах вимог нормативної документації, які можуть формуватися в металі обода колеса в результаті ліквідації хімічних елементів у процесі дендритної кристалізації заготовки.

Результати досліджень

Оскільки формування структурного стану у процесі термічної обробки залежить від структурно-напруженого стану в момент фазового перетворення у разі переохолодження з аустенітного стану нижче критичних температур, у роботі були досліджені температурно-часові параметри охолодження коліс у

*Дослідження проведено за участю м. н. с. ІЧМ НАН України М. А. Дедика.

промислових умовах. Для отримання реальних швидкостей охолодження по перетину обода в лабораторних умовах було проведено такий експеримент: у фрагмент обода зачеканені термопари на різній глибині від поверхні катання (5, 15, 30, 45, 60 мм), який потім охолоджували від температури аустенізації (900 °С) за допомогою спреера. Конструкція цього спреера була ідентична тій, що застосовується під час термічної обробки залізничних коліс на ПАТ «Інтерпайп НТЗ». Зміна температури по перетину обода в процесі охолодження наведена на рисунку 1.

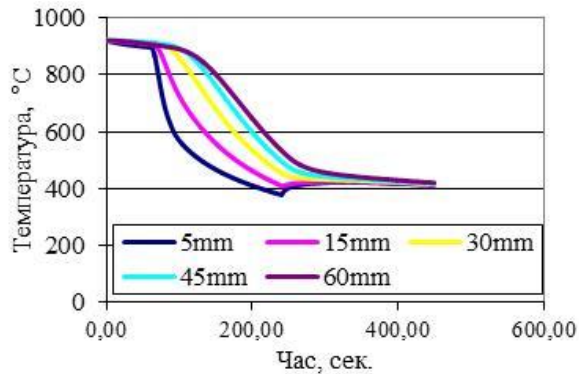


Рис. 1. Зміна температури по перетину обода у процесі охолодження спреером у лабораторних умовах / Fig. 1. Changing the temperature at the intersection of the rim during the cooling by a sprayer in the laboratory conditions

Загартування (зміцнення) обода здійснюють за режимами, що забезпечують максимальне подрібнення продуктів розпаду аустеніту (дисперсності перліту), і, в результаті, отримання заданого рівня міцності, твердості, відносного видовження і відносного звуження [4]. Разом із цим, підвищення дисперсності перліту позитивно впливає на в'язкість руйнування і ударну в'язкість обода колеса. Режими зміцнення розробляються відповідно до конкретних коліс: їх конструктивних особливостей, хімічного складу сталі і вимог до їх властивостей.

Структуру і властивості сталі поряд із хімічним складом визначають і умови розпаду аустеніту під час її термічної обробки. Якщо відомі швидкості охолодження по перетину реальних виробів, то можна визначити температуру перетворення аустеніту й оцінити одержувану при цьому структуру.

Для розроблення режимів термічної обробки необхідно створити математичну модель розрахунку швидкостей охолодження по перетину обода колеса за прискореного охолодження.

Моделювання гарту колеса проводилося за допомогою методу кінцевих елементів у середовищі програмного комплексу ANSYS. Геометрична модель розбивалася на плоскі чотирихвузлові кінцеві елементи з одним ступенем свободи (температура) розміром 2,5 мм. Як вихідні умови задавалася температура перед загартуванням 850 °С.

У фізичному сенсі граничні умови приймалися як охолоджувачі вода і повітря та задавалися у вигляді конвективних навантажень на поверхню колеса, які характеризуються коефіцієнтом тепловіддачі і температурою охолоджувача. Коефіцієнт тепловіддачі задавався як функція від температури поверхні металу. Для розв'язання теплової задачі задавалися такі температурозалежні властивості сталей: щільність, питома теплоємність і температуропровідність. Результати розрахунків щільності, питомої теплоємності і температуропровідності вуглецевих сталей, що застосовуються для виробництва залізничних коліс, наведені на рисунку 2.

Значення температури обода залізничного колеса в різних його зонах після гарту протягом охолодження були отримані шляхом розв'язання методом кінцевих елементів диференціального рівняння теплопровідності (рівняння Фур'є):

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (1)$$

де t – температура; τ – час; a – коефіцієнт температуропровідності; $\nabla^2 t$ – оператор Лапласа (сума других частинних похідних); q_v – кількість теплоти, що виділяється в одиниці об'єму в одиницю часу; c – теплоємність; ρ – щільність.

Для залізничних коліс застосовують вуглецеві сталі. В основному вони відрізняються тільки вмістом вуглецю, марганцю і кремнію. На практиці діапазон змін цих елементів у колісній сталі різних марок у збіднених і збагачених домішками ліквідаційних ділянках може становити: 0,45...0,70 % вуглецю; 0,25...0,50 % кремнію; 0,40...1,0 % марганцю. Ми умовно виділили три хімічні склади: з мінімальним (C = 0,45 %; Si = 0,25 %, Mn = 0,40 %), середнім (C = 0,58 %; Si = 0,38 %, Mn = 0,70 %) та максимальним (C = 0,70 %; Si = 0,50 %, Mn = 1,0 %) вмістом легуючих елементів (ЛЕ). Для кожного умовного складу враховувався комплексний вплив змінюваних ЛЕ.

Для адекватного оцінювання впливу хімічного складу на кінетику фазових перетворень та охолодження за перетином обода були прийняті однакова геометрія колеса та однакові умови охолодження (охолодження з постійною витратою води). В результаті моделювання отримали криві зміни температури за прискореного охолодження залежно від глибини від поверхні катання та від хімічного складу.

Коли збільшується відстань від поверхні катання, фактично реалізується менша швидкість (рис. 2), тобто фазові перетворення зі зміною відстані від поверхні катання відбуваються в інших умовах. Принципово такий характер мають графіки для всіх аналізованих умовних хімічних складів, що добре корелюють із даними, отриманими експериментально в лабораторних умовах (рис. 1).

Також з рисунка 2 видно, що на глибині 0...3 мм у перші 5 секунд охолодження швидкість складає

близько 70 °C/сек за витрати води 80 м³/год. Критична швидкість охолодження для високовуглецевих доєвтектоїдних сталей, у разі перевищення якої утворюється мартенсит, складає близько 50 °C/сек [5]. За подальшого охолодження без зміни витрати води швидкість складає близько 30 °C/сек, що зумовлює утворення проміжних мікроструктур у поверхневому шарі обода колеса. На глибині 20 мм у перші 5 секунд швидкість охолодження складає близько 20 °C/сек, тому формується структура високодисперсного перліту, оптимальна для обода залізничного колеса.

Вочевидь, збільшення витрати води в перші секунди охолодження викликає збільшення швидкостей охолодження, і швидкість охолодження може перевищити критичну на більшій глибині від поверхні катання. Це спричинить формування нерівномірної макро- і мікроструктури і сприятиме нерівномірності механічних властивостей. Для усунення такої неоднорідності необхідно механічною обробкою видаляти більший шар металу, що збільшує вартість продукції.

Подальші дослідження в промислових умовах були спрямовані на зменшення витрати води на початку охолодження з метою формування рівномірної мікроструктури по перетину обода колеса.

Із рисунка 3 видно, що на глибині 3 мм від поверхні катання вплив хімічного складу в досліджуваних інтервалах на швидкість охолодження мінімальний. На глибині 20 мм за рахунок відмінностей теплофізичних властивостей для сталі з мінімальним вмістом ЛЕ реалізується менша швидкість охолодження, а для сталей з максимальним і середнім вмістом ЛЕ – більша. Тому за наявності ліквацийних ділянок у сусідніх мікрооб'ємах сталі можуть утворюватися різні мікроструктури. Це може викликати зміну кількості доєвтектоїдного фериту, рівномірності його розподілу, зміну міжпластинчастої відстані в перліті, та навіть утворення проміжних структур за дифузійно-зсувним механізмом та виникнення голчастих мікроструктур.

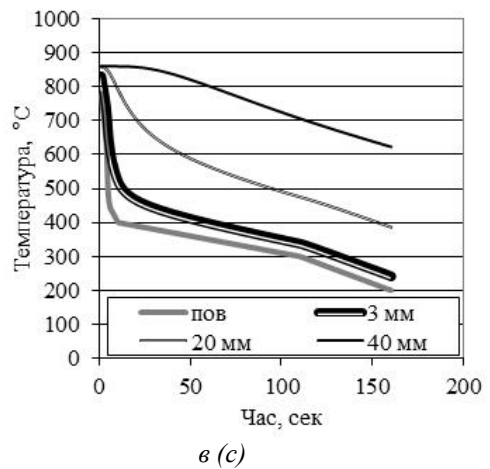
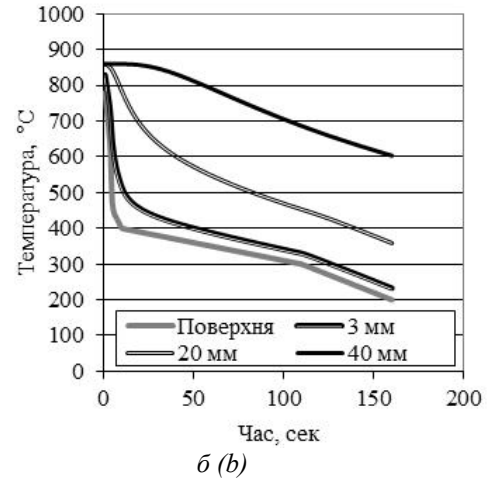
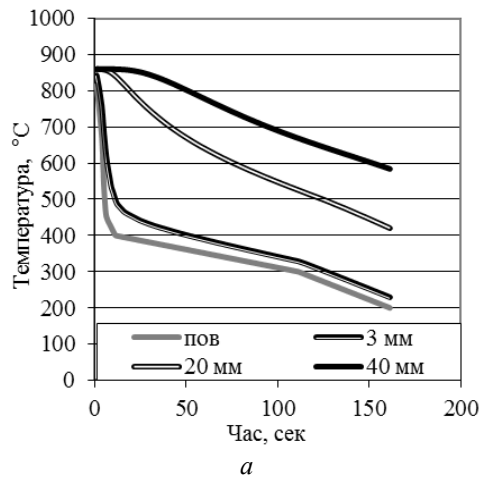
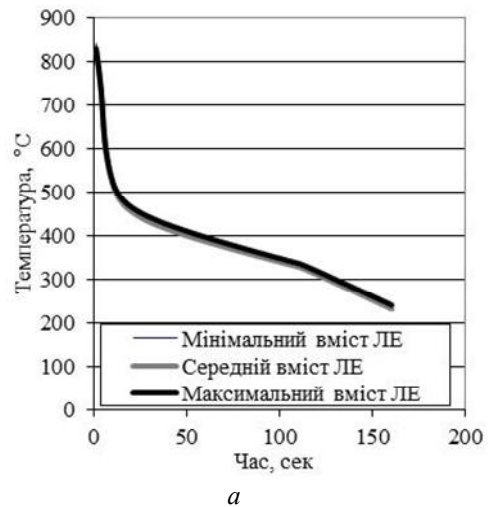


Рис. 2. Зміна температури по перетину обода у процесі прискореного охолодження коліс із різним умовним хімічним складом: мінімальним (а), середнім (б) і максимальним (в) вмістом легуючих елементів (ЛЕ) / Fig. 2. Changing the temperature at the intersection of the rim in the process of accelerated cooling of the wheels with different conditional chemical composition: minimum (a), average (b) and maximum (c) content of alloying elements (AE)



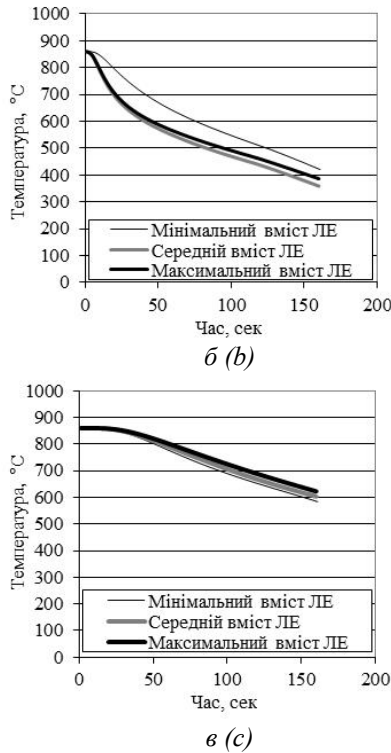


Рис. 3. Зміна температури обода на глибині 3 мм (а), 20 мм (б), 40 мм (в) від поверхні катання у процесі охолодження спреєром залежно від хімічного складу сталі / Fig. 3. Changing the temperature of rim at a depth of 3 mm (a), 20 mm (b), 40 mm (c) from the surface of the ride in the process of cooling of spinner, depending on the chemical composition of the steel

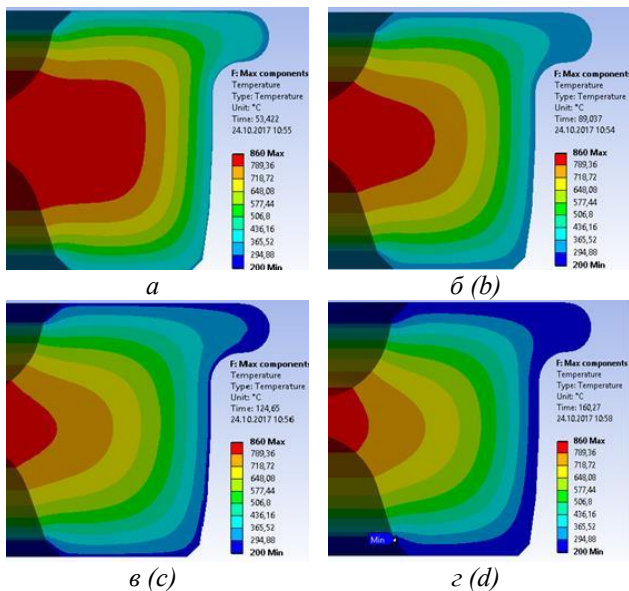


Рис. 4. Розподіл температур по перетину обода зі сталі з максимальним умістом легуючих елементів (ЛЕ) у процесі охолодження: а – 60 сек; б – 90 сек; в – 120 сек; г – 160 сек / Fig. 4. The distribution of the temperature at the intersection of the rim from steel with a maximum content of the alloying elements (LE) in the cooling process: a – 60 sec; b – 90 sec; c – 120 sec; d – 160 sec

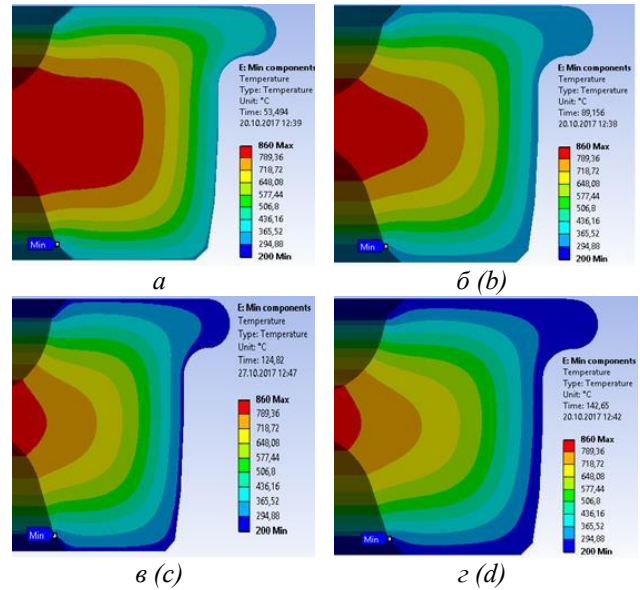


Рис. 5. Розподіл температури по перетину обода зі сталі з мінімальним умістом легуючих елементів (ЛЕ) у процесі охолодження: а – 60 сек; б – 90 сек; в – 120 сек; г – 160 сек / Fig. 5. The distribution of the temperature at the intersection of the rim of steel with a minimum content of the alloying elements (LE) in the cooling process: a – 60 sec; b – 90 sec; c – 120 sec; d – 160 sec

На останньому етапі моделювання проводилася адаптація моделі до реального процесу (зіставлення експериментальних даних у контрольних точках із числовими результатами, подальше корегування моделі) й аналіз оптимальних результатів моделювання. Результати моделювання (температура у вузлах моделі колеса на різній глибині) зіставляли з експериментальними даними і в разі значного розходження вносили поправки в числову модель шляхом зміни коефіцієнта тепловіддачі охолоджувача.

Формування структурного стану під час термічної обробки залежить від вихідного стану в момент фазового перетворення у разі переохолодження аустеніту нижче критичних температур.

На рисунках 4 і 5 наведено моделі розподілу температур і швидкостей охолодження по перетину обода, з аналізу яких видно, що після охолодження за допомогою спреєра протягом першої хвилини на одній і тій самій глибині від поверхні ободів зі сталей різного хімічного складу досягаються різні температури; є деякі відмінності не тільки в температурі, а і розподіл температурних полів має дещо іншу картину.

Результати моделювання за допомогою встановлених закономірностей кінетики фазових перетворень під час термічної обробки будуть використані для розроблення технологічних параметрів термічної обробки на модернізованому обладнанні вертикальних гартівних машин в умовах ПАТ «Інтерпайп НТЗ».

Висновки

У результаті моделювання отримано криві зміни температури за прискороного охолодження залежно від глибини від поверхні катання та хімічного складу.

Показано, що у випадку збільшення відстані від поверхні катання залізничного колеса у процесі термічної обробки фактично реалізується менша швидкість, тобто фазові перетворення зі зміною відстані від поверхні катання відбуваються в інших умовах. Принципово такий характер мають закономірності для всіх аналізованих умовних хімічних складів, що добре корелюють із даними, отриманими експериментально в лабораторних умовах.

Установлено, що на глибині 0...3 мм у перші 5 секунд охолодження швидкість складає близько 70 °C/сек за витрати води 80 м³/год, що може перевищувати критичну швидкість охолодження для вуглецевих доевтектоїдних сталей, у разі перевищення якої утворюється мартенсит. Під час подальшого охолодження без зміни витрати води швидкість складає близько 30 °C/сек, що може викликати утворення проміжних мікроструктур у підповерхневому шарі обода колеса. На глибині 20 мм у перші 5 секунд швидкість охолодження складає близько 20 °C/сек, тому формується структура високодисперсного перліту, оптимальна для обода залізничного колеса.

Імпульсне збільшення витрати води в перші секунди охолодження спричинить збільшення

швидкостей охолодження, і вона може перевищити критичну на більшій глибині від поверхні катання. Це зумовить формування нерівномірної макро- і мікроструктури і сприятиме нерівномірності механічних властивостей. Для усунення такої неоднорідності необхідно буде механічною обробкою видаляти більший шар металу, що позначиться на вартості продукції.

Показано, що на глибині 3 мм від поверхні катання вплив хімічного складу в досліджуваних інтервалах на швидкість охолодження мінімальний. На глибині 20 мм за рахунок відмінностей теплофізичних властивостей для сталі з мінімальним вмістом легуючих елементів реалізується менша швидкість охолодження, а для сталей з максимальним і середнім вмістом ЛЕ – більша. Тому за наявності ліквідаційних ділянок у сусідніх мікрооб'ємах сталі можуть утворюватися різні мікроструктури. Це може викликати зміни кількості доевтектоїдного фериту, рівномірності його розподілу, зміни міжпластинчастої відстані в перліті, та навіть утворення проміжних структур за дифузійно-зсувним механізмом та виникнення голчастих мікроструктур.

У подальшому результати моделювання будуть використані для розроблення раціональних режимів термічної обробки залізничних коліс в умовах ПАТ «Інтерпайп НТЗ».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабаченко А. И. Разработка режимов охлаждения железнодорожного колеса на вертикальной закалочной машине с помощью математической модели расчета скоростей охлаждения / А. И. Бабаченко, А. А. Кононенко, М. А. Дедик // Сучасні проблеми металургії. – 2017. – № 20. – С. 14–21. – Режим доступу : <http://spm.nmetau.edu.ua/uk/journal>
2. Бабаченко О. І. Визначення оптимальної швидкості охолодження при термічній обробці залізничних рейок / О. І. Бабаченко, О. В. Узлов, О. В. Пучіков, А. М. Хулін, Г. А. Кононенко // Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту: наук. пр. 77-ї Міжнар. наук.-практ. конф. – 2017. – С. 302–304. – Режим доступу: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:qwr7zqQ8E4J:ndch.diit.edu.ua/upload/%25D0%25BF%25D1%2580%25D0%25BE%25D0%25B3%25D1%2580%25D0%25B0%25D0%25BC%25D0%25BC%25D0%25B0%252077%2520%25D0%25BA%25D0%25BE%25D0%25BD%25D1%2584.%2B.pdf+&cd=3&hl=ru&ct=clnk&gl=ua&client=firefox-b-ab>
3. Бабаченко О. І. Розробка математичної моделі розрахунку температурного поля по перетину залізничної рейки при термічній обробці / О. І. Бабаченко, Г. А. Кононенко, Н. Ю. Філоненко, А. М. Хулін // Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. – Вип. 104. – Дніпро: ДВНЗ ПДАБА, 2018. – С. 31–35.
4. Лахтин Ю. М. Материаловедение и термическая обработка металлов : монография / Ю. М. Лахтин. – Москва : Металлургия, 1983. – 359 с.
5. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора титана : справочник термиста / [Л. Е. Попова, А. А. Попов]. – Москва : Металлургия, 1991. – 503 с.
6. Энтин Р. И. Превращения аустенита в стали : монография / Р. И. Энтин – Москва : Гос. науч.-техн. изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1960. – 252 с.

REFERENCES

1. Babachenko O.I., Kononenko G.A. and Dedik M.A. *Razrabotka rezhimov ohlazhdeniya zheleznodorozhnogo kola na vertikal'noj zakalochnoj mashine s pomosh'yu matematicheskoy modeli rascheta skorostej ohlazhdeniya* [Development of cooling modes of a railway wheel on a vertical quenching machine with the help of a mathematical model for calculating cooling rates]. *Suchasni problem metalyrgii* [Modern problems of metallurgy], 2017, no. 20, pp. 14–21. (in Russian).
2. Babachenko O.I., Uzlov O.V., Puchikov O.V., Khulin A.M. and Kononenko G.A. [Determination of the optimum cooling rate for the thermal treatment of railways]. *Problemi i perspektivi rozviku zaliznichnogo transportu: nauk. pr. 77-i mizhnar. nauk.-prakt. konf.* [Scientific papers of the 77th International Scientific and Practical Conference "Problems and Prospects for the Development of Railway Transport"]. 2017, pp. 302–304. (in Ukrainian).
3. Babachenko O.I., Kononenko G.A., Philonenko N.Yu. and Khulin A.M. *Rozrobka matematichnoi modeli rozrahunku temperaturnogo polya za peretynu zaliznichnoi rejki pri termichnij obrobci* [Development of a mathematical model for calculating

the temperature field at the intersection of a rail rail during heat treatment]. *Budivnictvo. Materialoznavstvo. Mashinobuduvannya* [Building. Material Science. Mechanical Engineering]. Iss. 104, Dnipro, SHEE PSACEA Publ., 2018, pp. 31–35. (in Ukrainian).

4. Lakhtin Yu.M. *Materialovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Material Science and Heat Treatment of Metals]. Moscow : Metallurgy Publ., 1983, 359 p. (in Russian).

5. Popova L.Ye. and Popov A.A. *Diagrammy prevrascheniya austenita v stalyah i beta-rastvora titana* [Diagrams of transformation of austenite in steels and beta-titanium solution]. Moscow : Metallurgy Publ., 1991, 503 p. (in Russian).

6. Entin R.I. *Prevrashcheniya austenita v stali* [The transformation of austenite into steel]. Moscow : Gos. nauch.-tehn. izd-vo lit-ry po chernoj i cvetnoj metallurgii, 1960, 252 p. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. Д. М. Тогобицькою (Україна), д-ром техн. наук С. В. Бобирем (Україна).

Надійшла до редколегії 01.02.2018

Прийнята до друку 09.02.2018