

УДК: 669.14.018.294:669.017

А.И. Бабаченко, А.А. Кононенко, М.А. Дедик

**РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
КОЛЕСА НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЗАКАЛОЧНОЙ МАШИНЕ
С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
РАСЧЕТА СКОРОСТЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ**

Анотація. Для підвищення стійкості до утворення експлуатаційних дефектів термічного походження на поверхні кочення залізничних коліс був розроблений новий хімічний склад сталі. Для розробки режимів термічної обробки необхідно було створити математичну модель розрахунку швидкостей охолодження по перетину обода колеса при прискореному охолодженні. Моделі розподілу температури і швидкостей охолодження по перетину обода після охолодження за допомогою вертикальної гартувальної машини, отримані шляхом рішення диференціального рівняння теплопровідності (рівняння Фур'є), дозволили розробити режими термічної обробки, що забезпечують отримання заданого комплексу механічних властивостей залізничних коліс з дослідної сталі.

Ключові слова. Залізничні колеса, хімічний склад, термічна обробка, модель розподілу температури по перерізу виробу, швидкість охолодження

Аннотация. Для повышения стойкости к образованию эксплуатационных дефектов термического происхождения на поверхности катания железнодорожных колес был разработан новый химический состав стали. Для разработки режимов термической обработки необходимо было создать математическую модель расчета скоростей охлаждения по сечению обода колеса при ускоренном охлаждении. Модели распределения температуры и скоростей охлаждения по сечению обода после охлаждения с помощью вертикальной закалочной машины, полученные путём решения дифференциального уравнения теплопроводности (уравнения Фурье), позволили разработать режимы термической обработки, обеспечивающие получение заданного комплекса механических свойств железнодорожных колес из опытной стали.

Ключевые слова. Железнодорожные колеса, химический состав, термическая обработка, модель распределения температуры по сечению изделия, скорость охлаждения

Abstract. To increase the resistance to the formation of thermal origin operational defects on rail wheel rolling surface has been developed a new chemical composition of the steel. For the development of heat treatment it was necessary to create a mathematical model for calculating the cooling rates over the section rim with accelerated cooling. The models of the temperature distribution and cooling rates on the cross section of the rim after cooling with the help of vertical quenching machine, obtained through the solution of the differential equation of heat conduction (Fourier equation), enabled the development of heat treatment regimes that ensure reception of a given set of mechanical properties of railway wheels of the experimental steel.

Keywords. Railway wheel chemical composition, heat treatment, the temperature distribution across the section model of the product, cooling rate

Актуальность исследований

В настоящее время во всем мире ужесточаются условия эксплуатации железнодорожных колес (это связано с повышением нагрузки на ось, увеличением скорости движения поездов и др.). Это требует совершенствования химического состава сталей, которые бы обеспечивали

необходимый уровень всех служебных свойств в этих условиях эксплуатации и высокую стойкость колес к образованию на поверхности катания дефектов эксплуатационного происхождения. Напряжения, возникающие при эксплуатации колес в контакте «колесо-рельс», приводят к повреждениям, основные из которых можно классифицировать как износ поверхности катания, дефекты теплового характера, возникающие в ободе в процессе торможения и скольжения колеса, дефекты усталостного происхождения и хрупкое разрушение металла [1, 2, 3].

Склонность железнодорожных колес к возникновению указанных явлений во многом зависит от химического состава стали, используемой для их производства, и технологии ее деформационной и термической обработки [1, 4-7]. Уменьшение износа может быть достигнуто путем повышения характеристик прочности всех элементов колеса при минимальном снижении или при сохранении других характеристик надежности.

Существует несколько направлений по изменению химического состава стали для железнодорожных колес. Одно из них - это повышение содержания углерода в стали (до 0,70% и более). Такое содержание углерода при существующей термической обработке может обеспечить в ободе колеса уровень твердости 300-320 НВ. Однако, повышение углерода в стали приводит к снижению ее сопротивления хрупкому разрушению, повышает скорость роста усталостной трещины при циклическом нагружении, а также может оказывать отрицательное влияние на ее чувствительность к образованию дефектов теплового воздействия [8]. Другое направление – использование легированных сталей, которые могут обеспечивать твердость обода до 400 НВ. Однако такие стали являются дорогостоящими. И третьим направлением (которое в настоящее время наиболее активно развивается) является использование сталей с пониженным содержанием углерода (до 0,55-0,60%) и легированием недорогими элементами матричной системы.

Для повышения стойкости к образованию эксплуатационных дефектов термического происхождения на поверхности катания железнодорожных колес был разработан химический состав стали [9], содержащий марганец (до 1-1,2%), кремний (до 0,90%), ванадий (до 0,15%) – марка «К».

Постановка проблемы

Структуру и свойства стали наряду с химическим составом определяют и условия охлаждения при ее термической обработке. Термокинетические диаграммы характеризуют кинетику распада аустенита при непрерывном охлаждении. Эти диаграммы имеют большое практическое значение, так как при термической обработке распад аустенита происходит при непрерывном изменении температуры. Если известны скорости охлаждения по сечению реальных изделий, то, нанося соответствующие кривые скоростей охлаждения на термокинетическую диаграмму стали

определенного химического состава, можно определить температуру превращения аустенита и оценить получаемую при этом структуру. Для стали опытного состава была построена термокинетическая диаграмма [11].

Изложение основного материала

Для разработки режимов термической обработки необходимо было создать математическую модель расчета скоростей охлаждения по сечению обода колеса при ускоренном охлаждении. Для получения реальных скоростей охлаждения по сечению обода был проведен эксперимент в лабораторных условиях с зачеканенными термопарами на различной глубине от поверхности катания (5, 15, 30, 45, 60 мм) в фрагмент обода, который охлаждали от температуры аустенитизации (850 °С) с помощью спрейера конструкции, идентичной применяемой при производстве железнодорожных колес на ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» (рис. 1).

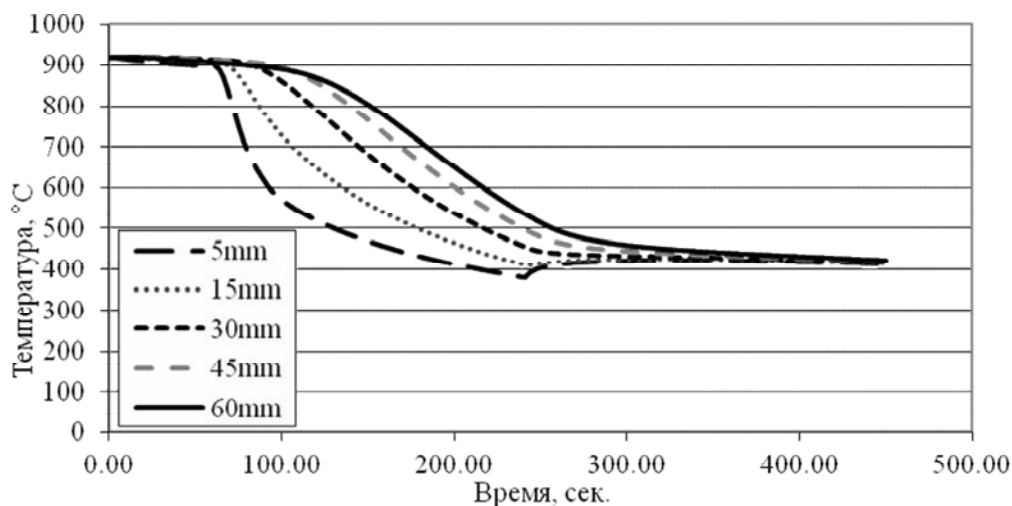


Рисунок 1 - Изменение температуры по сечению обода в процессе охлаждения спрейером в лабораторных условиях

Моделирование закалки колеса проводилось с помощью метода конечных элементов в среде программного комплекса ANSYS. Построение геометрии железнодорожного колеса проводилось в программе AutoCad. Чертеж экспортировался в формате *.sat в ANSYS. Затем геометрическая модель разбивалась на плоские четырехузловые конечные элементы с одной степенью свободы (температура) размером 2,5 мм. В качестве начальных условий задавалась температура перед закалкой 850 °С. В физическом смысле граничные условия принимались как охладители вода и воздух, задавались в виде конвективных нагрузок на поверхность колеса, которые характеризуются коэффициентом теплоотдачи и температурой охладителя. Коэффициент теплоотдачи задавался как функция от температуры поверхности металла. Для решения тепловой задачи задавались следующие температурозависимые свойства сталей: плотность, удельная теплоемкость и температуропроводность. Результаты расчётов плотности, удельной теплоемкости и температуропроводности сталей марки «Т»

(ГОСТ 10791-2011), «2» (ГОСТ 10791-2011) и «К» (опытная) представлены на рис. 2.

При решении тепловой задачи принимались метод решения – квазистатический; тип решателя – итерационный; интегрирование по времени – неявное.

Значения температуры обода железнодорожного колеса в различных его зонах после закалки в течение 60, 120, 180 секунд были получены путём решения методом конечных элементов дифференциального уравнения теплопроводности (уравнения Фурье):

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

где t – температура; τ – время; a – коэффициент температуропроводности; $\nabla^2 t$ – оператор Лапласа (сумма вторых частных производных); q_v – количество теплоты, которое выделяется в единице объема в единицу времени; c – теплоемкость; ρ – плотность.

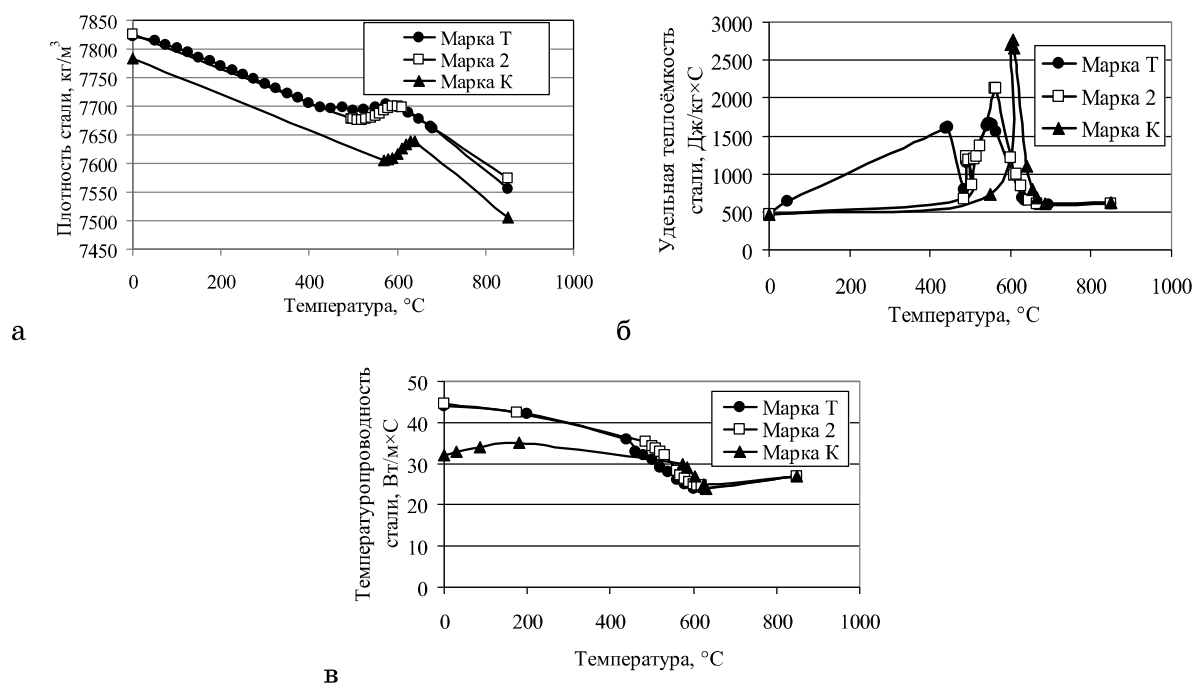


Рисунок 2 - Зависимость плотности (а), удельной теплоёмкости (б) и температуропроводности (в) сталей марки «Т», «2» и «К» от температуры

Процесс охлаждения железнодорожных колес при их упрочняющей термической обработке в промышленных условиях на вертикальной закалочной машине представляет собой прерывистое охлаждение. Колесо устанавливается в вертикальном положении, к ободу подводится спрейер, колесо вращается и на обод со стороны поверхности катания и на 2/3 высоты боковой поверхности подается вода. Некоторый объем металла обода, подвергнутый охлаждению спрейером в результате вращения колеса выходит из зоны его действия и отогревается за счет тепла внутренних объемов металла и затем через некоторое время в результате вращения

колеса, он снова попадает в зону действия спрейера и охлаждается водой. Таким образом, охлаждение обода колеса является циклическим, что так же учитывалось при разработке модели в работе.

На рис. 3 представлены графики изменения температуры во времени по сечению обода колеса. На глубине 0-15 мм более четко выражены периоды охлаждения и отогрева металла обода, на глубине более 15 мм этот эффект уже слабо выражен и охлаждение происходит практически равномерно с постоянной скоростью.

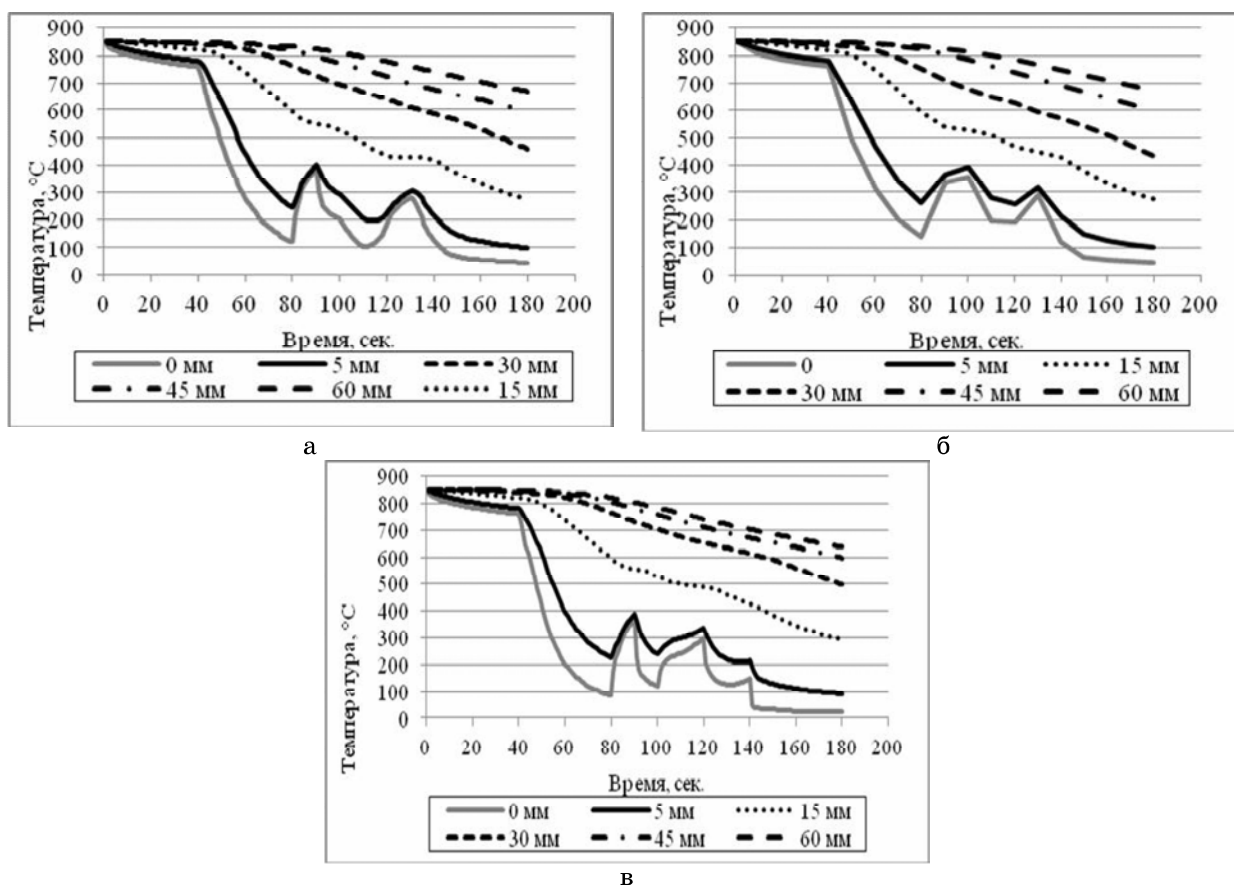


Рисунок 3 - Изменение температуры по сечению обода колеса из стали марки «2» (а), «Т» (б), «К» (в) при охлаждении на вертикальной закалочной машине

На рис. 4 приведены модели распределения температуры и скоростей охлаждения по сечению обода, из анализа которых видно, что после охлаждения с помощью спрейеров в течение 60 сек на одной и той же глубине от поверхности ободьев из разных марок сталей достигаются различные температуры при отличающихся скоростях охлаждения.

На рис. 5 приведены модели распределения температуры и скоростей охлаждения по сечению обода, из анализа которых видно, что после охлаждения с помощью спрейеров в течение 120 сек. уже есть отличия не только по температуре и скоростям охлаждения, но и распределение температурных полей имеет качественно другую картину.

Модели распределения температуры и скоростей охлаждения по сечению ободьев после охлаждения с помощью спрейеров в течение 180 сек. из сталей марок «2», «Т» и «К» приведены на рис. 6. В результате их

анализа можно сделать вывод о том, что в результате такого длительного охлаждения после завершения фазовых превращений, металл ободьев всех рассматриваемых марок сталей достигает близкой температуры и его охлаждение происходит с близкими скоростями, температурные поля ободьев так же очень подобны.

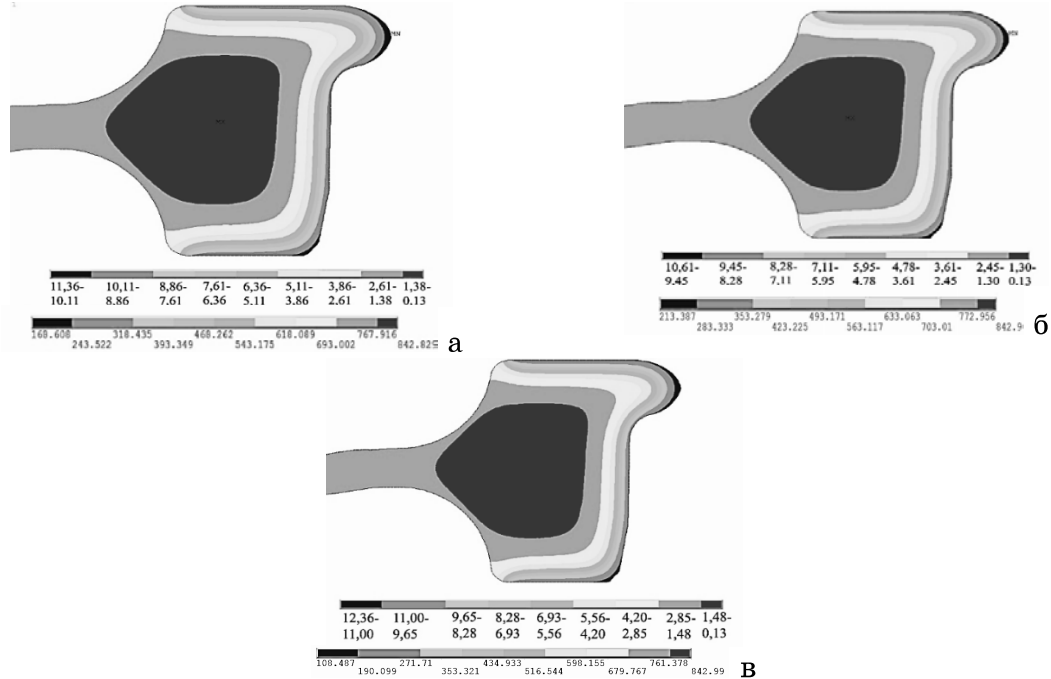


Рисунок 4 - Модель распределения скоростей охлаждения (верхняя шкала, °C/сек.) и температуры (нижняя шкала, °C) по сечению обода колеса из стали марки «2» (а), «Т» (б), «К» (в) после охлаждения на вертикальной закалочной машине в течение 60 сек

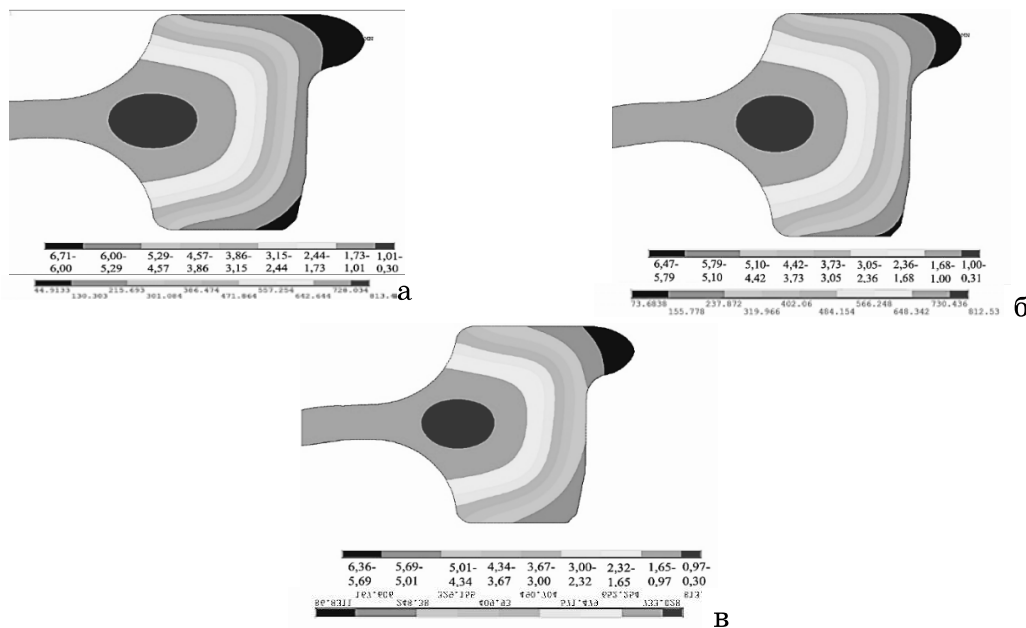


Рисунок 5 - Модель распределения скоростей охлаждения (верхняя шкала, °C/сек.) и температуры (нижняя шкала, °C) по сечению обода колеса из стали марки «2» (а), «Т» (б), «К» (в) после охлаждения на вертикальной закалочной машине в течение 120 сек

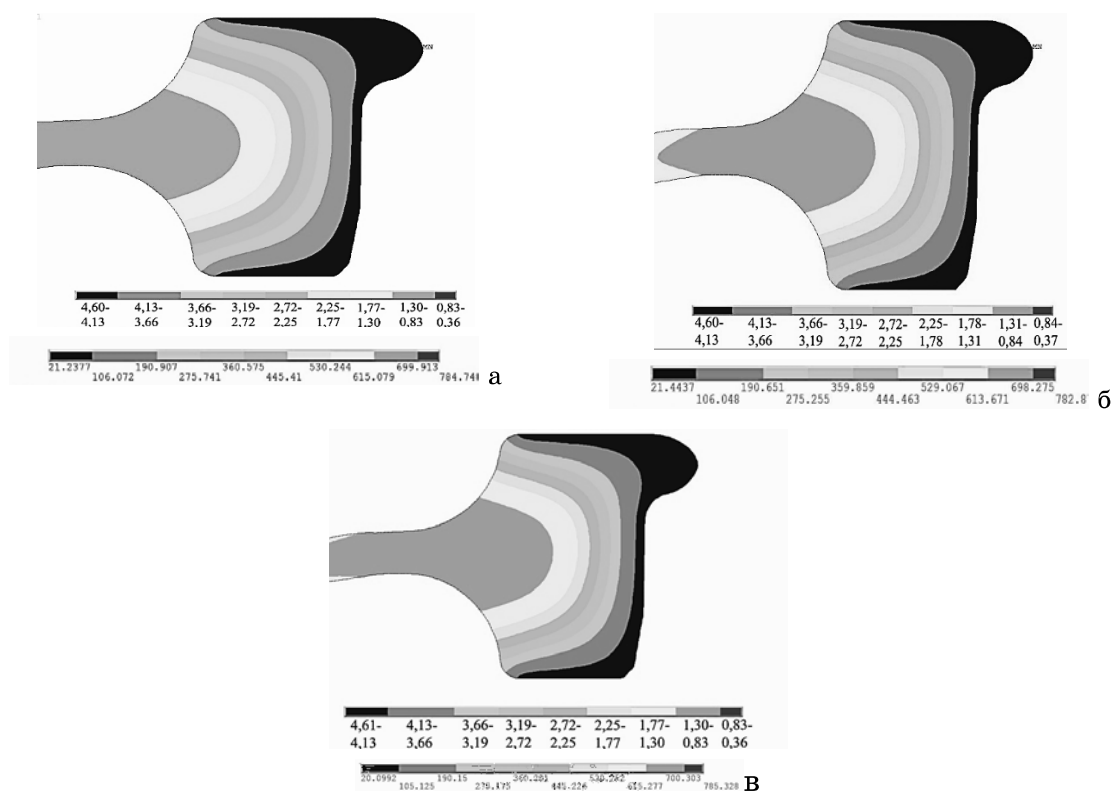


Рисунок 6 - Модель распределения скоростей охлаждения (верхняя шкала, °С/сек.) и температуры (нижняя шкала, °С) по сечению обода колеса из стали марки «2» (а), «Т» (б), «К» (в) после охлаждения на вертикальной закалочной машине в течение 180 сек

Также в работе была выполнена оценка адекватности модели путем сравнения данных, полученных экспериментально и в результате моделирования. Результаты оценки подтвердили высокую адекватность модели.

Полученные модели позволяют обоснованно рекомендовать изменение режимов ускоренного охлаждения при упрочняющей термической обработке (таблица 1).

Таблица 1

Режим термической обработки опытных колес

Температура нагрева, °С	Расход воды, м ³ /час	Время охлаждения, с	Температура отпуска, °С	Продолжительность отпуска, час
860	80	200	500	2,5

Выводы

Формирование структурного состояния и механических свойств при термической обработке зависит от структурно-напряженного состояния в момент фазового превращения при переохлаждении из аустенитного состояния ниже критических температур. Модели распределения температуры и скоростей охлаждения по сечению ободьев после охлаждения с помощью спрейеров, полученные путём решения дифференциального уравнения теплопроводности, позволили разработать режимы термической обработки, обеспечивающие получение заданного комплекса механических свойств железнодорожных колес из опытной

стали: прочности на уровне 1020 МПа, твердости более 320 НВ при высокой стойкости колес к образованию эксплуатационных дефектов термического происхождения на поверхности катания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесная сталь / Узлов И.Г., Гасик М.И., Есаулов А.Т. и др. – К.: Техник, 1985. – 168 с
2. Державна Інструкція з огляду, обстеження та формування вагонних колісних пар. а адміністрація залізничного транспорту України «Укрзалізниця» Київ. 2006р.
3. Ларин Т.В. Исследование механизма износа, усталостного выкрашивания, образования выщербин и наволакивания на поверхности катания цельнокатаных колес. – В кн.: Повышение надежности и долговечности деталей подвижного состава и пути: Тр. ВНИИЖТ. М., 1977. – С. 51-68.
4. Узлов И.Г. Создание новой металлопродукции для обновления железнодорожного подвижного состава Украины / И.Г. Узлов // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2006.- № 1.- С. 62-66.
5. Промышленное производство высокопрочных железнодорожных колес / И.Г. Узлов, К.И. Узлов, А.В. Кныш, Г.Н. Польский // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2008. - №1. - С. 98 – 101.
6. Пат. 74116 Україна, МПК С2 В21J5/10, В21K1/28 Спосіб виробництва суцільнокатаних залізничних коліс / Козловський А.І., Шрамко О.В., Данченко В.М., Узлов І.Г., Польський Г.М., Горб Є.В., Соловійов С.Е., Чуприна Л.В., Грінкевич В.О., Бабаченко О.І., Голубева Л.В.; замовник і патентовласник ВАТ «Нижньодніпровський трубопрокатний завод».- а200503714; заявл. 19.04.2005; опубл. 17.10.2005, Бюл. № 10.
7. Вязкость разрушения железнодорожных колес и влияние на нее размера колесной заготовки и режимов ее горячей пластической деформации / И.Г. Узлов, А.И. Бабаченко, А.А. Кононенко, Ж.А. Дементьева, А.Л. Сафронов // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. тр. - Днепропетровск: ПГАСА, 2006. - Выпуск 36. – ч. 2.- С. 160-165.
8. А.И. Бабаченко, А.А. Кононенко, А.В. Кныш, А.Н., Хулин, Ж.А. Дементьева, Е. А Шпак. Влияние твердости и химического состава железнодорожных колес на стойкость к образованию дефектов на поверхности катания. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2013. №1. С.53-56.
9. А. И. Бабаченко, П. Л. Литвиненко, А. В. Кныш, Ж. А. Дементьева, А. Н. Хулин, Е. А. Шпак. Совершенствование химического состава стали для железнодорожных колес, обеспечивающего повышение их стойкости к образованию дефектов на поверхности катания // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровск: Візіон, 2011. – Вып. 23. – С. 226–233.
10. Штейнберг, С. С. Металловедение / С.С. Штейнберг ; ред. И.Н. Богачев, В.Д. Садовский . – изд. перераб. и доп. – Свердловск : Металлургиздат, 1961 . – 598с.
11. А. И. Бабаченко, А.В. Кныш, А.А. Кононенко, Ж.А. Дементьева, Е.А. Шпак, Ж.З. Чехута, О.Ф. Клиновая. Кинетика распада переохлажденного аустенита стали для железнодорожных колес при непрерывном охлаждении. // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2014. – Выпуск 73. – С. 65–69.