Расчет теплообмена при изготовлении железнодорожных колес повышенной твердости

А. М. ЛЫКОВ¹, В. П. ИВАНОВ¹, Д. Д. ЛЫКОВ²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет по землеустройству» (ФГБОУ ВО ГУЗ), Москва, 105064, Россия

² Общество с ограниченной ответственностью «Компания МАТТЕХ» (ООО «Компания МАТТЕХ»), Москва, 129085, Россия

Аннотация. Теоретически исследованы температуры и скорости охлаждения в ободе железнодорожного колеса при различных условиях охлаждения поверхности катания водяными струями в процессе изготовления колес повышенной твердости. С помощью диаграммы неизоэнтальпического превращения аустенита для колесной стали 2 проведен анализ структур металла (мартенсит, бейнит и др.), которые образуются при различных режимах охлаждения. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса упрочнения обода колеса (твердость, структура металла) при охлаждении его водяными струями, полученные при различных режимах нагрева колеса и с разным химическим составом стали.

Ключевые слова: обод железнодорожного колеса; структура; поверхность катания; мартенсит; бейнит; перлит

Введение. Развитие производства железнодорожных колес с повышенной твердостью обода — путь к решению проблемы снижения интенсивности износа поверхности катания и гребня, улучшения эксплуатационных характеристик железнодорожных колес в целом. Технология изготовления железнодорожных колес повышенной твердости включает в себя важнейший процесс нагрева обода колеса до температуры 850 °С и выше, охлаждение водяными струями и отпуск при температуре 500 °С в течение нескольких часов (2–4 ч). В результате закалки в ободе колеса на различной глубине от поверхности катания образуются структуры металла с соответствующей твердостью, обеспечивающие снижение интенсивности его износа по сравнению с незакаленными колесами.

На практике существуют различные способы отвода тепла от обода колеса водяными струями:

- системой спрейеров от поверхности катания и боковых его поверхностей (рис. 1, а), колесо при этом вращается вокруг горизонтальной оси [1].
- спрейерами, равномерно расположенными по всей поверхности катания (рис. 1, б), при этом колесо вращается вокруг вертикальной оси [2]. Это позволяет более равномерно, по сравнению с первым способом, осуществлять теплоотвод от поверхности катания.

Одним из показателей качества закалки колеса является твердость металла на различной глубине от поверхности катания. Так, например, по техническим

условиям (ТУ-0943-оп-01124323–2006 «Колеса цельнокатанные из микрелегированной стали с повышенными механическими свойствами») необходимо обеспечить твердость 360–390 НВ на глубине 30 мм от поверхности катания. Кроме того, на поверхности катания обода требуется исключить такую фазу, как мартенсит, наличие которого создает в поверхностном слое значительные растягивающие напряжения, в частности окружные. Подбор режимов охлаждения экспериментальными методами является достаточно сложной задачей. Исследования температурных полей в полноразмерном ободе колеса как контактными, так и бесконтактными методами затруднены вследствие быстрого вращения колеса, возможного наличия пленки жидкости на охлаждаемой поверхности и др. Кроме того, теплоотвод от фиксированной точки поверхности катания или боковой поверхности обода колеса носит циклический характер с высокой скоростью изменения температуры во времени.

Целью настоящих исследований является теоретический анализ влияния технологических параметров на возможность получения наилучших структур металла в ободе колеса (т. е. без мартенсита на поверхности катания, с твердостью металла 360–390 НВ на глубине 30 мм от поверхности катания) исключительно в ходе процесса охлаждения, а также сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Теоретические исследования. Необходимо рассчитать нестационарные температурные поля в массе обода путем решения трехмерной задачи теплопроводности, когда задан удельный тепловой поток на поверхности катания, моделирующий отвод тепла струями жидкости (граничные условия 2-го рода), или коэффициент теплоотдачи от поверхности обода, нагретой до температуры ~850 °С, к набегающему потоку охлаждающей воды (граничные условия 3-го рода). При высоких температурах поверхности удельный тепловой поток и коэффициент теплоотдачи от поверхности катания сильно зависят от ее температуры. Соответственно, точность расчетов будет зависеть от корректности задания граничных условий.

■ E-mail: alykov49@mail.ru (А. М. Лыков)

Существует достаточное количество работ, посвященных теплообмену струй жидкости с нагретой поверхностью (до 1000 °С), в которых рассматриваются различные режимы кипения воды на поверхности [3, 4, 5, 6, 7]. При этом наблюдаются значительные расхождения в приведенных данных, например в источниках [4] и [6]. На рис. 2 представлены зависимости удельного теплового потока от температуры поверхности, которые использовались в работах [7] — кривая 3 и [5] — кривая 2. Из графиков видно, что максимумы удельных тепловых потоков из [7] и [5] различаются в 2 раза и они смещены относительно друг друга приблизительно на 200 °С.

На основе метода элементарных балансов в работе [7] проведен подробный расчет температурных полей в массе обода, структур металла, образующихся в результате охлаждения его жидкостью, а также напряженно-деформированного состояния обода из колесной стали 2, химический состав которой представлен в табл. 1. В этих расчетах не учитывался циклический характер теплового воздействия от подачи воды спреями, который реализуется за счет вращения колеса и их неравномерного расположения на поверхности катания, что существенно влияет на температурные поля и скорости охлаждения, особенно в поверхностных слоях, и снижает достоверность расчетов.

На основании зависимостей из работы [8] для температуры на поверхности катания и в массе обода установлено, что кривизной поверхности колеса в расчетах можно пренебречь.

В наших расчетах была использована программа [9], которая позволяет рассчитывать температуру и скорость охлаждения в ободу колеса при задании удельного теплового потока, зависящего от температуры поверхности и времени (граничное условие 2-го рода), в том числе в виде разрывных функций, т. е. с учетом циклического теплоотвода от поверхности катания с различной скважностью теплового импульса. Это позволяет более корректно рассчитывать температуру поверхностных слоев обода. Кроме того, расчеты проводились и по среднему во времени удельному тепловому потоку, который в большей степени соответствует технологии охлаждения колес с равномерным расположением спрееров по поверхности катания [2] (рис. 1, б). В расчетах использовалась зависимость удельного теплового потока от температуры поверхности из работы [5], которая аппроксимировалась аналитической зависимостью (рис. 2, кривая 2).

В патенте Российской Федерации [10] предлагается режим работы спрееров, приведенный на рис. 3, при котором на начальной стадии охлаждения реализуется прерывистый теплоотвод для снижения среднего теплового потока от поверхности катания. Максимальный удельный тепловой поток от поверхности катания составляет $q = -2,5 \cdot 10^6$ Вт/м² при работе 4-х

Рис. 1. Схема охлаждения колеса с осями вращения:
а — горизонтальной: 1 — колесо; 2 — спреер; 3 — ролик;
б — вертикальной

Fig. 1. Wheel cooling scheme with rotation axes:
а — horizontal: 1 — wheel; 2 — sprayer; 3 — roller;
б — vertical

Рис. 2. Зависимость удельного теплового потока q на поверхности катания колеса от ее температуры T : 1 — данные из работы [5]; 2 — аппроксимация кривой 1; 3 — данные из работы [7]

Fig. 2. Dependence of the specific heat flow q on the rolling surface of the wheel on its temperature T : 1 — data from [5]; 2 — approximation of curve 1; 3 — data from [7]

спрееров. Коэффициент заполнения спреерами поверхности катания $K_3 = nH / \pi D$ равен 0,25, где n — число спрееров, H — протяженность спреера (200 мм), D — диаметр колеса. Из рис. 4 видно, что кривая температуры поверхности минует область мартенсита. Скорость охлаждения на глубине 5 и 30 мм составляет $\partial T / \partial \tau = -60$ К/с и -9 К/с соответственно (где T — температура, τ — время).

На рис. 5 представлены результаты расчета для схемы регулирования теплоотвода путем отключения спрееров при $T_n < 250$ К (T_n — температура поверхности обода) и их включения при $T_n > 250$ К. Из рис. 5 ($K_3 = 0,38$) видно, что на поверхности возможно избежать образования мартенсита. Удельный тепловой поток достигает значения $q = -4,0 \cdot 10^6$ Вт/м² на границе образования бейнита. На глубине 30 мм

Таблица 1

Химический состав стали колес по ГОСТ 10791–2011 «Колеса цельнокатанные. Технические условия». Марка стали 2

Table 1

Chemical composition of steel wheels according to GOST 10791–2011 “All-rolled wheels. Specifications”. Steel grade 2

Массовая доля химических элементов, %								
Углерод	Марганец	Фосфор	Сера	Хром	Никель	Медь	Кремний	Ванадий
0,55–0,63	0,50–0,90	≤ 0,030	≤ 0,025	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	0,22–0,45	≤ 0,10

при температуре 650 °С скорость охлаждения равна $\partial T / \partial \tau = -10$ К/с. При такой схеме регулирования удельным тепловым потоком время на включение-отключение спрейеров составляет 0,5 с, что трудно реализовать на практике из-за инерционности всей

системы. На глубине 5 и 10 мм от поверхности катания должен образовываться бейнит.

При большем количестве спрейеров, установленных на поверхности катания ($K_3=0,76$), трудно обеспечить регулирование удельного теплового потока, чтобы избежать образования мартенсита на поверхности обода. При этом удельный тепловой поток достигает величины $q = -8,0 \cdot 10^6$ Вт/м², а максимальная скорость охлаждения на глубине 5 и 30 мм составляет $\partial T / \partial \tau = -200$ и -10 К/с соответственно.

При полном заполнении поверхности обода колеса спрейерами ($K_3=1$, рис. 6,) на поверхности катания образуется мартенсит, а удельный тепловой поток равен $q = -1,0 \cdot 10^7$ Вт/м². Скорость охлаждения на глубине 5 и 30 мм составляет $\partial T / \partial \tau = -250$ и -10 К/с соответственно, что не обеспечивает получение требуемых закалочных структур с твердостью 360–390 НВ на глубине 30 мм от поверхности катания.

На рис. 7 приведены расчеты с плавным регулированием удельного теплового потока при приближении температуры поверхности к температурной границе мартенсита T_m по алгоритму охлаждения, который может быть реализован при комбинированном охлаждении обода колеса водяными и газовыми струями с варьируемыми их расходами:

$$0,4q \text{ при } 100 \text{ К} + T_m < T_n < 250 \text{ К} + T_m;$$

$$0,1q \text{ при } 50 \text{ К} + T_m < T_n < 100 \text{ К} + T_m;$$

$$0,05q \text{ при } T_m < T_n < 50 \text{ К} + T_m.$$

Количество спрейеров, охлаждающих поверхность, равно 12 ($K_3 = 0,76$). Такое значение K_3 больше соответствует охлаждению колеса, приведенному на рис. 1, б. Из рис. 7 видно, что температура поверхности обода не достигает температурной границы мартенсита, т. е. плавная регулировка теплоотвода позволяет избежать образования мартенсита на поверхности. Однако на глубине 30 мм скорость охлаждения также невелика и составляет $\partial T / \partial \tau = -10$ К/с. Удельный тепловой поток на поверхности обода достигает величины $q = -7,0 \cdot 10^6$ Вт/м².

На рис. 8 приведены результаты расчета температуры поверхности обода при охлаждении 6 спрейерами

Рис. 3. Схема отвода тепла при охлаждении колеса по технологии, предложенной в работе [10]

Fig. 3. Scheme of heat removal during cooling of the wheel by technology, proposed in [10]

Рис. 4. Температура в ободу колеса в зависимости от времени на различном расстоянии от поверхности:

1 – 0 мм; 2 – 5 мм; 3 – 10 мм; 4 – 30 мм;

М – область мартенсита; Б – область бейнита;

Ф + П – область феррит + перлит

Fig. 4. Temperature in a wheel tread depending on time at different distance from the surface:

1 – 0 mm; 2 – 5 mm; 3 – 10 mm; 4 – 30 mm;

М – martensite area; Б – bainite area;

Ф + П – ferrite + perlite area

Рис. 5. Охлаждение поверхности катания колеса по схеме $T_n \leq 250^\circ\text{C}$ — отключение спрейеров, $T_n \geq 250^\circ\text{C}$ — включение спрейеров ($K_3 = 0,38$). Зависимость температуры (а) и скорости охлаждения (б) в ободу от времени на различном расстоянии от поверхности катания:

1 — 0 мм; 2 — 5 мм; 3 — 10 мм; 4 — 30 мм;

М — область мартенсита; Б — область бейнита; Ф + П — область феррит + перлит

Fig. 5. Cooling of the wheel rolling surface according to the scheme $T_n \leq 250^\circ\text{C}$ — sprayers disabling, $T_n \geq 250^\circ\text{C}$ — sprayers enabling ($K_3 = 0,38$). Dependence of temperature (a) and cooling rate (б) in the tread on time at various distance from the rolling surface:

1 — 0 mm; 2 — 5 mm; 3 — 10 mm; 4 — 30 mm;

М — martensite area; Б — bainite area; Ф + П — ferrite + perlite area

($K_3 = 0,38$) с учетом импульсного характера теплоотвода со скважностью 2,5. Температура поверхности представлена в виде импульсов (вследствие вращения колеса), которые практически исчезают на глубине 10 мм от поверхности катания. При этом максимальное значение скорости охлаждения составляет $\partial T / \partial \tau = -200$ К/с и -12 К/с на глубине 5 и 30 мм соответственно.

При замене удельного теплового потока, который реализуется при охлаждении поверхности катания по указанному выше алгоритму, средним удельным тепловым потоком при температуре ниже 550°C ($K_3 = 0,89$, практически равномерное расположение спрейеров на поверхности) колебания температуры поверхности отсутствуют. При этом скорость охлаждения составляет $\partial T / \partial \tau = -19$ К/с на глубине 30 мм, что превышает значение скорости охлаждения при регулировании температуры по схеме, приведенной на рис. 6 для $K_3 = 1$, которая равна $\partial T / \partial \tau = -13$ К/с. Это должно положительно сказываться на получении структур металла с большей твердостью на глубине 30 мм от поверхности катания.

Такое охлаждение, с плавно изменяющимся во времени удельным тепловым потоком (по заранее заданной функциональной зависимости), может быть реализовано путем подачи на поверхность газожидкостного потока с изменяющимися расходами газа и жидкости. Для практической реализации такого отвода тепла от поверхности катания возможно использовать результаты воздушно-водоиспарительного охлаждения наг-

ретой поверхности, приведенные в [6]. Кроме того, целесообразно проведение лабораторных исследований охлаждения нагретой поверхности колеса при

Рис. 6. Охлаждение поверхности катания колеса по схеме $T_n \leq 250^\circ\text{C}$ — отключение спрейеров, $T_n \geq 250^\circ\text{C}$ — включение спрейеров ($K_3 = 1$). Зависимость температуры в ободу от времени на различном расстоянии от поверхности катания:

1 — 0 мм; 2 — 5 мм; 3 — 10 мм; 4 — 30 мм;

М — область мартенсита; Б — область бейнита; Ф + П — область феррит + перлит

Fig. 6. Cooling of the wheel rolling surface according to the scheme $T_n \leq 250^\circ\text{C}$ — sprayers disabling, $T_n \geq 250^\circ\text{C}$ — sprayers enabling ($K_3 = 1$). Dependence of the temperature in the tread on time at a different distance from the rolling surface:

1 — 0 mm; 2 — 5 mm; 3 — 10 mm; 4 — 30 mm;

М — martensite area; Б — bainite area; Ф + П — ferrite + perlite area

Рис. 7. Охлаждение поверхности катания колеса по алгоритму ($K_3=0,76$). Зависимость температуры в ободе от времени на различном расстоянии от поверхности катания: 1 — 0 мм; 2 — 5 мм; 3 — 10 мм; 4 — 30 мм; М — область мартенсита; Б — область бейнита; Ф + П — область феррит + перлит
Fig. 7. Cooling of the wheel rolling surface according to the algorithm ($K_3=0,76$). Dependence of the temperature in the tread on time at different distances from the rolling surface: 1 — 0 mm; 2 — 5 mm; 3 — 10 mm; 4 — 30 mm; М — martensite area; Б — bainite area; Ф + П — ferrite + perlite area

Рис. 8. Охлаждение поверхности катания колеса при циклическом отводе тепла ($K_3=0,38$). Зависимость температуры в ободе от времени на различном расстоянии от поверхности катания: 1 — 0 мм; 2 — 5 мм; 3 — 10 мм; 4 — 30 мм; М — область мартенсита; Б — область бейнита; Ф + П — область феррит + перлит
Fig. 8. Cooling of the wheel rolling surface during cyclic heat removal ($K_3=0,38$). Tread temperature dependence from time at different distance from rolling surface: 1 — 0 mm; 2 — 5 mm; 3 — 10 mm; 4 — 30 mm; М — martensite area; Б — bainite area; Ф + П — ferrite + perlite area

изменении теплоотвода (удельного теплового потока), в том числе с учетом его импульсного характера. При этом, возможно, изменятся и границы фазовых превращений на диаграмме неизотермического превращения аустенита, так как на существующей диаграмме эти границы получены для монотонно убывающей температуры во времени.

Экспериментальные исследования. При отработке технологии упрочнения на соответствие колес по-

вышенной твердости ТУ-0943-оп-01124323–2006 и ТУ-0943-оп-01124323–2007, а также ГОСТ 10791–2004 и ГОСТ 10791–2011 (табл. 2) проводились эксперименты с колесами различного химического состава и разной начальной температурой колеса перед охлаждением водяными струями. После отжига на макротемплете осуществлялись металлографические исследования структуры металла и измерялась твердость в сечении обода колеса. Результаты этих исследований

Таблица 2

Требования ТУ-0943-оп-01124323–2006 и ТУ-0943-оп-01124323–2007 «Колеса цельнокатанные из микролегированной стали с повышенными механическими свойствами», ГОСТ 10791–2004, ГОСТ 10791–2011

Table 2

Requirements TU-0943-оп-01124323–2006 and TU-0943-оп-01124323–2007 “Solid-rolled wheels from microalloyed steel with enhanced mechanical properties”, GOST 10791–2004, GOST 10791–2011

Нормативный документ	Содержание элементов, % масс.			Среднее значение твердости обода колеса на глубине 30 мм от поверхности катания, НВ
	Углерод	Марганец	Хром	
ТУ-0943-оп-01124323–2007	0,46–0,54	0,85–1,2	0,8–1,1	360–390
ТУ-0943-оп-01124323–2006	0,68–0,78	0,8–1,2	≤ 0,25	360–390
ГОСТ 10791–2004 (марка стали 2)	0,44–0,52	0,8–1,2	—	> 248
ГОСТ 10791–2011 (марка стали 2) взамен ГОСТ 10791–2004 и ГОСТ 9036–88	0,55–0,63	0,5–0,9	≤ 0,3	> 255

Примечание. Приведено содержание основных элементов, влияющих на твердость обода при закалке.

Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований по охлаждению колес

Table 3

Wheel cooling experimental results

№ эксперимента	Температура колеса перед охлаждением, °С	Температура отпуска, °С, время отпуска	Содержание элементов, % масс.			Среднее значение твердости обода колеса на глубине 30 мм от поверхности катания, НВ	Структура металла обода колеса на глубине 30 мм от поверхности катания	Удовлетворение требованиям ТУ-0943-оп-01124323–2007 по твердости металла на глубине 30 мм от поверхности катания
			С	Mn	Cr			
1	850	530, 2 ч 10 мин	0,49	1,07	0,8	313–337	Сорбит, бейнит, перлит (отдельные зерна)	Нет
2	840	500, 2 ч 00 мин	0,77	0,75	0,2	340	Перлит-ферритная. Перлит сорбитообразный и мелкопластинный	Нет
3	971	500, 2 ч 5 мин	0,77	0,81	0,08	373–388	Перлит-ферритная	Да
4	926	500, 2 ч 40 мин	0,77	0,75	0,2	367	Перлит-ферритная. Перлит сорбитообразный мелкопластинный	Да

Рис. 9. Распределение твердости металла по сечению обода колеса (эксперимент № 4, табл. 2)

Fig. 9. Distribution of metal hardness over the cross section of the wheel tread (experiment No. 4, table 2)

представлены в табл. 3. Их анализ показывает, что соответствие требованиям указанных ТУ и нормам ГОСТ 10791–2004 и ГОСТ 10791–2011 обеспечивается для колес с повышенным содержанием углерода и повышенной температурой нагрева колеса перед закалкой до 926 °С. На рис. 9 приведены результаты измерения твердости по сечению обода колеса.

Выводы. 1. На основании проведенных теоретических исследований и анализа экспериментальных

данных процесса охлаждения железнодорожных колес было установлено, что невозможно получение структуры металла без мартенсита на поверхности обода и одновременно удовлетворяющей требованиям ТУ по твердости (360–390 НВ на глубине 30 мм от поверхности катания) только в процессе охлаждения колеса водяными струями. В этой связи на практике после закалки осуществляется отпуск колеса, связанный с дополнительными энергетическими и, соответственно, финансовыми затратами.

2. Для получения структуры металла на поверхности катания без мартенсита с максимально возможной твердостью на глубине обода только в процессе охлаждения колеса необходимо использовать всю поверхность катания колеса и теплоотвод осуществлять по заранее заданной зависимости удельного теплового потока от времени. При этом целесообразно рассмотреть вопрос о необходимости реализации твердости 360–390 НВ на глубине 30 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог колесной продукции [Электронный ресурс] / Выпускной металлургический завод. 2019. URL: https://omk.ru/upload/docs/OMK_RW_Ru.pdf (дата обращения: 28.05.2019 г.).
2. Железнодорожные колеса и бандажи KLV [Электронный ресурс] / Компания «ИНТЕРПАЙП Украина», Днепрпетровск. 2019. URL: <https://interpipe.biz/upload/catalog/20140524234716e25c2ad1b7429587ef1dee7120fa9378.pdf> (дата обращения: 24.05.2019 г.).
3. Исаченко В. П., Кушнырев В. И. Струйное охлаждение. М.: Энергоатомиздат, 1984. 216 с.

4. О возможности достижения высоких скоростей охлаждения при струйном охлаждении образцов в твердом состоянии / Д.А. Мирзаев [и др.] // Физика металлов и металловедение. 1999. Т. 88. № 6. С. 55–58.

5. Динер А. Обзор литературы по теплоотдаче при струйном охлаждении // Черные металлы. 1976. № 4. С. 26–29.

6. Сатановский А.Л. Воздушно-водоиспарительное охлаждение оборудования и материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04. Киев: АН УССР, 1974. 49 с.

7. Колеса локомотивов: изготовление, эксплуатация, упрочнение, обеспечение надежности / С.Н. Киселев [и др.]. Казань: Печать-Сервис-XXI век, 2010. 272 с.

8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.

9. Программа для расчета термических процессов модификации поверхности материалов: свидетельство о гос. рег. № 2018617509 Рос. Федерация / А. М. Лыков. № 2018614422; заявл. 03.05.2018; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 7.

10. Способ термической обработки железнодорожных колес: пат. № 2140997 С1 Рос. Федерация: МПК C21D 9/34 / А. П. Сидоров [и др.]. № 98115209; заявл. 05.08.1998; опубл. 10.11.1999, Бюл. № 31.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛЫКОВ Алексей Михайлович,

д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Высшая математика и физика», ФГБОУ ВО ГУЗ

ИВАНОВ Владимир Петрович,

канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра «Высшая математика и физика», ФГБОУ ВО ГУЗ

ЛЫКОВ Денис Дмитриевич,

инженер-технолог, ООО «Компания МАТТЕХ»

Статья поступила в редакцию 21.01.2019 г., актуализирована 25.05.2019 г., 28.06.2019 г., принята к публикации 12.09.2019 г.

Для цитирования: Лыков А. М., Иванов В. П., Лыков Д. Д. Расчет теплообмена при изготовлении железнодорожных колес повышенной твердости // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 1. С. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-48-55>.

Calculation of heat transfer during the manufacture of railway wheels of increased hardness

A. M. LYKOV¹, V. P. IVANOV¹, D. D. LYKOV²

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “State University of Land Management” (FGBOU VO GUZ), Moscow, 105064, Russia

²Limited Liability Company MATTEX (MATTEX Company LLC), Moscow, 129085, Russia

Abstract. The article is devoted to the study of temperature conditions in the tread of a railway wheel during the production of wheels with increased hardness of the rolling surface. It is shown that obtaining a metal structure on the wheel surface without martensite and with hardness of 360–390 HB required by technical conditions at a depth of 30 mm from the rolling surface is difficult to realize by varying technological parameters: the number of sprayers, changing the water supply to the rolling surface due to the switch on/off the sprayers. To achieve the highest cooling speeds in the mass of the wheel tread, including at a depth of 30 mm, it is necessary to use the largest possible rolling surface in the heat removal process. It is advisable to remove heat from the rolling surface according to a predetermined dependence of the specific heat flux on time.

It was established by experimental studies that the required hardness at a depth of 30 mm was achieved with an increased carbon content in steel and with an increase in the temperature of heating of the wheel before cooling with water sprayers of more than 900 °C.

To optimize the cooling process, it is advisable to carry out additional theoretical studies with more correctly specified boundary conditions of heat transfer on the tread surface and with refinement of the boundaries of phase transformations. It is advisable to carry out experimental studies on cooling the wheel surface with the possibility of varying the heat removal when using a gas-liquid flow as a cooling agent.

Keywords: railway wheel tread; structure; rolling surface; martensite; bainite; perlite

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-48-55>

REFERENCES

1. *Catalog of wheeled products*. Vyksa Steel Works, 2019. URL: https://omk.ru/upload/docs/OMK_RW_Ru.pdf (retrieved on 28.05.2019).

2. *KLW railway wheels and bandages*. The company “INTER-PIPE Ukraine”, Dnepropetrovsk, 2019. URL: <https://interpipe.biz/upload/catalog/20140524234716e25c2ad1b7429587ef1dee7120fa9378.pdf> (retrieved on 24.05.2019).

3. Isachenko V. P., Kushnyrev V. I. *Struynoe okhlazhdenie* [Jet cooling]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 216 p.

4. Mirzaev D. A., Schastlivtsev V. M., Karzunov S. E., Yakovleva I. L., Okishev K. Yu. *O vozmozhnosti dostizheniya vysokikh skorostey okhlazhdeniya pri struynom okhlazhdenii obrastsov v tverdom sostoyanii* [On the possibility of achieving high cooling rates during jet cooling of samples in the solid state]. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and metal science], 1999, Vol. 88, no. 6, pp. 55–58.

5. Diner A. *Obzor literatury po teplootdache pri struynom okhlazhdenii* [Literature review on heat transfer during jet cooling]. *Chernye metally* [Ferrous metals], 1976, no. 4, pp. 26–29.

6. Satanovskiy A. L. *Vozdushno-vodoisparitel'noe okhlazhdenie oborudovaniya i materialov. D-ra tekhn. nauk avtoref. diss.* [Air-water cooling equipment and materials. Dr. tech. sci. diss. synopsis]. Kiev, AN USSR Publ., 1974, 49 p.

7. Kiselev S. N., Kiselev A. S., Neklyudov A. N., Savrukhin A. V. *Kolesa lokomotivov: izgotovlenie, ekspluatatsiya, uprochnenie, obespechenie nadezhnosti* [Locomotive wheels: manufacturing, operation, hardening, reliability assurance]. Kazan', Pechat'-Servis-XXI vek Publ., 2010, 272 p.

8. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967, 599 p.

9. Lykov A. M. *Program for calculating thermal processes of surface modification of materials*. Certificate of state reg. No. 2018617509, publ. 25.06.2018, Bull. No. 7 (in Russ.).

10. Sidorov A. P. Method of heat treatment of railway wheels. Patent No. 2140997, publ. 10.11.1999, Bull. No. 31 (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Aleksey M. LYKOV,

Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department "Higher Mathematics and Physics", FGBOU VO GUZ

■ E-mail: alykov49@mail.ru (A. M. Lykov)

Vladimir P. IVANOV,

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department "Higher Mathematics and Physics", FGBOU VO GUZ

Denis D. LYKOV,

Process Engineer, MATTEX Company LLC

Received 21.01.2019

Revised 25.05.2019, 28.06.2019

Accepted 12.09.2019

For citation: Lykov A. M., Ivanov V. P., Lykov D. D. Calculation of heat transfer during the manufacture of railway wheels of increased hardness. Vestnik of the Railway Research Institute. 2020. 79 (1): 48–55 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-48-55>.

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Ч. 2 / под ред. А. Б. Косарева, Г. В. Гричиани. М.: РАС, 2019. 300 с.

Рассмотрены важные экономические факторы, влияющие на развитие железнодорожного транспорта, проблемы, связанные с подвижным составом, процессами управления перевозками, совершенствованием локомотивной тяги и токосъема электроподвижно-

го состава, а также вопросы пути, путевого хозяйства, металло- и материаловедения.

Сборник рассчитан на научных и инженерно-технических работников железнодорожного транспорта.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.

БИБЛИОТЕКА СПЕЦИАЛИСТА

Хладотранспорт и основы теплотехники / Ю. И. Матяш, В. П. Ключа, О. А. Ворон, С. Н. Науменко. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. 360 с.

В монографии рассмотрены вопросы, касающиеся рефрижераторного подвижного состава, эксплуатирующегося на железных дорогах России, обозначены пути его развития и совершенствования. С учетом современных достижений в области материаловедения предложены пути улучшения конструкции кузова рефрижераторных транспортных средств, позволяющие в значительной степени снизить коэффициент теплопередачи, практически исключить коррозию и обеспечить ресурс работы до 40 лет без ухудшения эксплуатационных показателей. Дано обоснование целесообразности использования рефрижераторных контейнеров для перевозки скоропортящихся грузов.

В данной книге изложены материалы для создания унифицированной системы электроснабжения рефрижераторных контейнеров и современных средств контроля, а также непрерывной регистрации основных режимов перевозимого скоропортящегося груза.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, занятых в сфере организации и управления перевозками скоропортящихся грузов, аспирантов и студентов вузов железнодорожного профиля, а также широкого круга лиц, интересующихся вопросами развития рефрижераторных перевозок в России и за рубежом.