ISSN: 0368-0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Том 63. № 11-12. С. 907 – 914. © 2020. Сарычев В.Д., Молотков С.Г., Кормышев В.Е., Невский С.А., Полевой Е.В.

УДК 669.017

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ<sup>\*</sup>

Сарычев В.Д.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля (sarychev\_vd@mail.ru) Молотков С.Г.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин

*им. профессора В.М. Финкеля* (sgmol@yandex.ru)

*Кормышев В.Е.*<sup>1</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник Управления

*научных исследований* (89236230000@mail.ru)

Невский С.А.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин

им. профессора В.М. Финкеля (nevskiy.sergei@yandex.ru)

Полевой Е.В.<sup>2</sup>, к.т.н., заместитель начальника технического отдела (Egor.Polevoj@evraz.com)

<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42) <sup>2</sup> АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (654043, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Космическое шоссе, 16)

Аннотация. Проведено математическое моделирование дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов воздухом. На первом этапе аналитически и численно решалась одномерная задача теплопроводности с граничными условиями третьего рода. Полученные распределения температуры на поверхности головки рельса и на глубине 20 мм от поверхности катания сравнивали с экспериментальными данными. В результате определяли значение коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности рельсовой стали. На втором этапе была создана математическая модель распределения температуры в рельсовом темплете, в условиях принудительного охлаждения и последующего остывания в условиях естественной конвекции. В основу предложенной математической модели положены уравнения Навье-Стокса и конвективной теплопроводности для закалочной среды и уравнение теплопроводности рельсовой стали. На границе рельс-воздух задавалось условие непрерывности тепловых потоков. В условиях самопроизвольного остывания изменение температурного поля моделировали уравнением теплопроводности с условиями третьего рода. Аналитическое решение одномерного уравнения теплопроводности показало, что расчетные значения температуры отличаются от экспериментальных данных на 10 %. При продолжительности охлаждения более 30 с происходит смена хода кривых зависимости температуры от времени, что связано со сменой механизмов охлаждения. Результаты численного анализа подтверждают это предположение. Анализ двухмерной модели охлаждения рельса методом конечных элементов показал, что на начальном этапе охлаждения температура поверхности головки рельсов как по центральной оси, так и по выкружке резко уменьшается. При продолжительности охлаждения свыше 100 с происходит стабилизация температуры до 307 К. В центральных областях головки рельса процесс охлаждения идет медленнее, чем в поверхностных. После прекращения принудительного охлаждения наблюдается нагрев поверхностных слоев, обусловленный сменой направления теплового потока от центральных областей к поверхности головки рельса, а затем происходит охлаждение со скоростями существенно меньшими, чем на первом этапе. Полученные результаты могут быть использованы для корректировки режимов дифференцированной закалки.

*Ключевые слова*: дифференцированная термическая обработка, рельсовая сталь, скорость охлаждения, математическое моделирование, уравнение теплопроводности, граничные условия третьего рода, метод конечных элементов.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-11-12-907-914

## Введение

Повышение потребительских свойств рельсов в условиях постоянного ужесточения условий их эксплуатации является важнейшей задачей железнодорожной отрасли. Основными требованиями, предъявляемыми потребителями к рельсовому прокату, являются высокая износостойкость, усталостная прочность, стойкость к хрупкому разрушению, высокая стойкость к образованию и развитию контактно-усталостных дефектов [1]. Выполнение этих требований достигается путем применения высокоуглеродистых (с содержанием углерода больше 0,8 - 0,9%) сталей перлитного и среднеуглеродистых (0,2 - 0,6% углерода) сталей бейнитного класса. В настоящее время большинство применяемых в мире рельсовых сталей относятся к перлитному классу. Механические свойства этих сталей зависят от межпластинчатого расстояния, объемной доли цементита в перлите, величины зерна, наличия избыточных фаз, дисперсности и распределения карбидных

<sup>\*</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-32-60001.

частиц [2, 3]. Конечная микроструктура рельсов, подвергаемых термообработке с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева, формируется под действием ряда технологических факторов прокатки и термической обработки [4]. Современные тенденции термической обработки рельсовой стали направлены на разработку и внедрение дифференцированной закалки непосредственно после прокатки рельсов. При такой термообработке упрочняется головка рельса, подвергающаяся наибольшей деградации в процессе эксплуатации. В качестве закалочных сред обычно применяют воздух, воду, водо-воздушные или водо-полимерные смеси. Охлаждение этими средами имеет как свои преимущества, так и недостатки.

В настоящее время большинство современных отечественных рельсов изготовлены с применением технологии дифференцированной закалки воздухом с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева, так как она обладает лучшей контролируемостью и большей экологичностью [5]. Несмотря на несколько сниженный (по сравнению с объемнотермоупрочненными рельсами) уровень ударной вязкости [6], рельсы, обработанные по данной технологии, обладают более однородной структурой и высокой стойкостью к образованию и развитию трещин контактно-усталостного происхождения в период эксплуатации. Послойные электронно-микроскопические исследования [7, 8] показали, что микроструктура дифференцированно закаленных рельсов имеет градиентный характер структурно-фазовых состояний, характеризующийся закономерным изменением фазового состава и параметров дефектной субструктуры по мере удаления от поверхности катания по центральной оси и выкружке головки рельсов. Установлено снижение относительного содержания зерен структурно-свободного феррита и зерен феррито-карбидной смеси с увеличением расстояния от поверхности охлаждения. Этот факт указывает на то, что поверхностный слой исследуемых образцов рельсов характеризуется сравнительно более неравновесным состоянием структуры из-за повышенной скорости его охлаждения. Действительно, экспериментальные данные [9] подтверждают, что на поверхности рельса скорость охлаждения составляет 4 – 8 °С/с, тогда как на расстоянии 10 мм от поверхности катания 2,0-2,5 °C/с. Различные скорости охлаждения поверхности и объема рельсов, неоднородное распределение температуры являются очевидной причиной формирования градиентных структурно-фазовых состояний по глубине рельса.

Поиск оптимальных режимов термической обработки, обеспечивающих высокие механические свойства рельсов, является сложной задачей, решение которой требует применения не только экспериментальных методов, но и математического моделирования [10, 11]. В настоящее время применение систем автоматизированного проектирования обработки материалов явля-

ется обычной практикой. Для рельсов из перлитной стали с помощью физического и численного моделирования проведено исследование влияния технологических условий на их свойства. Типичные задачи оптимизации производственных процессов основаны на моделировании различных вариантов нескольких процессов в соответствии с применяемой методикой оптимизации. Для решения задач промышленности обычно используются конечно-элементные (FE) методы моделирования для расчета целевой функции, аргументами которой являются свойства используемых продуктов. В этой связи решение оптимизационной задачи является дорогостоящим и идет непрерывный поиск альтернативных методов [12]. Кроме того, когда целевая функция включает в себя сложные микроструктурные параметры или свойства материалов, необходимо применение многомасштабного моделирования, что ведет к дальнейшему увеличению вычислительных затрат [13].

Целью настоящей работы является разработка механизма и математической модели, которая с достаточной точностью описывает процесс управляемого охлаждения рельсов.

#### Механизм охлаждения рельса воздухом

Для выявления механизма охлаждения рельса воздухом проведем сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей температуры от времени на поверхности и на глубине 20 мм. Предполагая, что теплообмен можно характеризовать некоторым средним постоянным коэффициентом теплообмена α и постоянной температурой охлаждающего воздуха Т, можно рассмотреть одномерную задачу теплопроводности с граничным условием третьего рода. Температура в рельсе на оси симметрии как функция продольной координаты и времени подчиняется одномерному уравнению теплопроводности с граничными условиями третьего рода, так как поперечный поток тепла на оси симметрии отсутствует. Поэтому решение обратной одномерной задачи теплопроводности с целью выяснения диапазона значений коэффициента теплоотдачи и температуры воздуха является определяющим в выявлении механизма охлаждения рельса воздухом. Экспериментальные зависимости температуры от времени на поверхности и на глубине 20 мм от головки рельса приведены в работе [9] при общем времени охлаждения  $t_1 = 200$  с. Глубину проникновения тепловых потоков можно оценить как  $s = \sqrt{at_1}$  (где a - коэффициент температуропроводности, для рельсовой стали  $a = 6 \cdot 10^{-6}$  м/с<sup>2</sup>, поэтому s = 35 мм). Сравнивая это значение с высотой рельса (180 мм), можно считать влияние охлаждения подошвы на процесс охлаждения головки незначительным. Поэтому можно рассматривать одномерную краевую задачу теплопроводности для полубесконечного стержня.

Рассмотрим охлаждение стержня (y > 0), на границе которого (y = 0) задан тепловой поток [14]. Тепловой поток обусловлен газовым потоком с температурой  $T_c$  и разными коэффициентами теплоотдачи: в моменты времени от нуля до  $t_1$  коэффициент теплоотдачи равен  $\alpha_1$ , при  $t > t_1 - \alpha_2$ . Начальная температура стержня  $T_0$ . Математическая задача принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2}; \ 0 < \xi < \infty, \ \tau > 0; \\ \xi &= 0: \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} = \Theta, \ 0 < \tau < \tau_1; \ \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} = \kappa \Theta, \ \tau_1 < \tau < \infty; \end{aligned}$$
(1)  
$$\Theta(0, \xi) = 1, \end{aligned}$$

где  $\tau = \frac{t}{t_0}; \ \xi = \frac{y}{l_0}; \ \Theta = \frac{T - T_c}{T_0 - T_c}; \ \kappa = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}; \ t_0 = \frac{l_0^2}{a}; \ l_0 = \frac{\lambda}{\alpha_1}.$ 

Решение уравнения (1) в случае, когда коэффициент теплоотдачи не меняется ( $\kappa = 1$ ), можно записать в виде:

$$\Theta(\tau,\xi) = \Phi(\eta) + \exp(\xi+\tau) \left[ 1 - \Phi\left(\eta + \sqrt{\tau}\right) \right];$$
  
$$\eta = \frac{\xi}{2\sqrt{\tau}}; \ \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{z} \exp(-u^{2}) du.$$
 (2)

При переходе к размерным переменным из уравнения (2) получаем:

$$T(t, y) = T_{\rm c} + \Theta\left(\frac{t}{t_0}, \frac{y}{l_0}\right) \left(T_0 - T_{\rm c}\right).$$
(3)

В уравнении (3) величина  $t_0$  не определена, так как выражается через неизвестное значение коэффициента теплоотдачи

$$t_0 = \frac{\lambda^2}{a\alpha^2}.$$
 (4)

На поверхности рельса ( $\xi = 0$ ) и при определенных значениях  $T_0 = 815$  °C,  $T_c = 20$  °C зависимость (4) превращается в однопараметрическое семейство зависимостей

$$T(t,0) = T_{\rm c} + \exp\left(\frac{t}{t_0}\right) \left(1 - \Phi\sqrt{\frac{t}{t_0}}\right) \left(T_0 - T_{\rm c}\right).$$
(5)

Для сравнения температуры, вычисленной по формуле (5), с результатами эксперимента [9] введем следующую функцию:

$$\sum_{i=1}^{N} \left( T(t_i, 0) - T_i \right)^2, \tag{6}$$

где  $T_i$  – экспериментально определенная температура в момент времени  $t_i$ ; N – число измерений.

Методом наименьших квадратов находим, что  $t_0 = 567$  с. Тогда из уравнения (4) находим коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\lambda}{\sqrt{at_0}}.$$
(7)

Коэффициент теплопроводности рельсовой стали при температурах 500 – 800 °С изменяется от 42 до 25 Вт/(м·К) [15]. На поверхности головки рельса температура изменяется в интервале 600 – 400 °С [9], поэтому значение коэффициента теплопроводности примем равным среднему значению 35 Вт/(м·К). Тогда численное значение среднего коэффициента теплообмена а сжатый воздух – сталь равен 600 Вт/(м<sup>2</sup>·К). На глубине 20 мм температура изменяется в пределах 700 – 800 °С, поэтому коэффициент теплопроводности примем равным 24 Вт/(м·К); тогда  $l_0 \approx 40$  мм,  $\xi = 0,5$ .

На рис. 1 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений зависимостей температуры от времени при постоянном коэффициенте теплообмена 600 Вт/(м<sup>2</sup>·K). В первом приближении они различаются на 10 %. Однако анализ кривой *1* показывает, что до 30 с кривая является выпуклой и быстро спадает (скорость охлаждения 7 °C/c). При t > 30 с эта кривая вогнутая, скорость охлаждения значительно меньше (2 °C/c). Это обстоятельство указывает на смену механизма охлаждения вследствие протекания полиморфных превращений, обусловленных распадом аустенита на феррито-перлитную смесь.

Следует учитывать зависимости теплофизических постоянных материала (теплоемкости, плотности и теплопроводности) и закалочной среды (коэффициент теплоотдачи) от температуры изделия. В этом случае [16] простого аналитического решения уравнения теплопроводности не существует, поэтому обратимся к численному решению задачи. Краевая задача



Рис. 1. Зависимость температуры от времени на поверхности головки рельсов (1) и на глубине 20 мм (2) (линии – зависимости, полученные по формуле (3), точки – экспериментальные данные)

Fig. 1. Dependence of temperature on time at surface of the rail head (1) and at a depth of 20 mm (2) (lines – dependences obtained by formula (3), points – experimental data)

для уравнения теплопроводности с учетом вышеизложенных фактов примет вид:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right), \ T(y, 0) = T_0;$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_{y=0} = \alpha_1 \left( T(0, t) - T_{ext} \right);$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_{y=l} = \alpha_2 \left( T(l, t) - T_{ext} \right),$$
(8)

где  $H = c\rho T$  – энтальпия; c – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность материала;  $T_{ext}$  – температура закалочной среды.

Полученная система решалась с помощью неявной разностной схемы методом прогонки [17]. На рис. 2 представлены зависимости температуры от времени.

# Постановка математической задачи охлаждения рельса движущимся потоком воздуха

В настоящей работе будем рассматривать охлаждение рельса, обтекаемого воздухом со стороны головки и подошвы (рис. 3). Термообработка рельсов в воздушной среде согласно экспериментальным данным [9] происходит за время 90 – 200 с, дальнейшее охлаждение происходит в условиях естественной конвекции.



Рис. 2. Распределение температуры в головке рельса и закалочной среде:

*I* – поверхность рельса; *2* – на глубине 20 мм; *3* и *4* – на расстоянии от поверхности головки рельса 0,8 и 0,16 мм; 
 → экспериментальные значения температуры поверхности головки рельса; 
 → экспериментальные значения температуры на глубине 20 мм

# Fig. 2. Distribution of temperature in the rail head and in quenching medium:

*I* – rail surface; 2 – at a depth of 20 mm; 3 and 4 – at 0.8 and 0.16 mm distance from surface of the rail head;  $\blacksquare$  – experimental values of the rail head surface temperature;  $\bigcirc$  – experimental values of temperature at a depth of 20 mm

Поэтому задачу о распределении температуры необходимо разбить на два этапа.

На первом этапе принудительного охлаждения математическая модель будет включать в себя уравнения Навье-Стокса и конвективной теплопроводности для воздушного потока, переноса тепла в рельсе:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u}\nabla)\vec{u} = \nabla \left[ -pI + \mu \left( \nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right) \right];$$
  
$$\rho(\nabla \vec{u}) = 0; \tag{9}$$

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_1 c_1 (\nabla \vec{u}) \nabla T + \nabla \vec{q} = 0; \ \vec{q} = -\lambda_1 \nabla T; \quad (10)$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_2 c_2 (\nabla \vec{u}) \nabla T + \nabla \vec{q} = 0; \ \vec{q} = -\lambda_2 \nabla T.$$
(11)

На границе поверхность рельса – воздух выполняются условия непрерывности тепловых потоков

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n}; \ u_n = 0, \tag{12}$$

где  $\vec{u}$  – вектор скорости воздуха;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности воздуха и материала рельса;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность воздуха и материала рельса;  $c_1$  и  $c_2$  – удельная теплоемкость воздуха и материала рельса;  $\nabla$  – дифференциальный оператор набла;  $\Delta$  – оператор Лапласа.

На втором этапе ставилась граничная задача третьего рода для уравнения теплопроводности (11), которая имеет вид:

$$\vec{q} = \alpha_i (T - T_{ext}), \tag{13}$$



Рис. 3. Обтекание рельса воздушным потоком

Fig. 3. Air flow around the rail

где <br/>  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $T_{ext}$  — температура воздуха.

На поверхности головки рельса задавали значение  $\alpha_1$ , на подошве –  $\alpha_2$ , на остальной поверхности  $\alpha_3$ .

Системы уравнений (9) – (11) на всех этапах решали методом конечных элементов по схеме адаптивных сеток [17, 18] в пакете Comsol Multiphysics. На участках большой кривизны шаг сетки уменьшается до 0,2 мм, неравномерность сетки характеризуется параметром сжатия h = 1,2. Для итерационного решения системы используется обобщенный метод второго порядка точности по времени. Исходные данные по воздушному потоку и теплофизические характеристики материалов приведены в таблице.

#### Результаты и их обсуждение

На рис. 4 приведено распределение температур в рельсе на этапе принудительного охлаждения в различные моменты времени.

На начальном этапе охлаждения температура поверхности головки рельсов как по центральной оси, так и по выкружке резко уменьшается: если в момент времени t = 0 с ее значение составляло 1088 К, то при t = 50 с и t = 100 с -456 и 380 К соответственно (рис. 4, *a*,  $\delta$ ). В моменты времени t > 100 с идет стабилизация температуры до 307 К (200 с). Тепловой поток направлен от центральных частей рельса к его поверхности. В центральных областях рельса процесс охлаждения протекает медленнее, чем в поверхностных, что подтверждается данными электронно-микроскопических исследований [7, 8]. Поверхностный слой исследуемых образцов рельсовой стали характеризуется сравнительно более неравновесным состоянием структуры. Подобная теплофизическая ситуация наблюда-

### Теплофизические характеристики рельсовой стали и воздуха

Thermophysical characteristics of the rail steel and air

Характеристика	Значение
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	
стали	1047
воздуха	716
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	
стали	7911
воздуха	1,29
Теплопроводность, Вт/(м·К)	
стали	40
воздуха	24
Давление воздуха, мм вод. ст. (Па)	1000 (104)
Начальная температура рельса, К	1088
Температура воздуха, К	293

лась в работах [19, 20], посвященных изучению термомеханического упрочения арматурного проката.

Распределение температур на втором этапе естественного охлаждения приведено на рис. 5.

На этапе естественного охлаждения (рис. 5) сначала происходит нагрев поверхностных слоев рельса как по центральной оси, так и по выкружке, это обусловлено потоком тепла от центральных областей к поверхности. Затем происходит охлаждение со скоростями меньшими, чем на первом этапе.

#### Выводы

В настоящей работе смоделирована теплофизическая ситуация, возникающая при дифференцированной термообработке рельсов в воздушной среде.



Рис. 4. Распределение температур (К) в рельсе на этапе принудительного охлаждения: a-50 с; b-100 с; b-150 с; c-200 с

Fig. 4. Temperature distribution (K) in the rail at the stage of forced cooling: a - 50 s;  $\delta - 100$  s;  $\epsilon - 150$  s;  $\epsilon - 200$  s



Рис. 5. Распределение температур (К) в рельсе на этапе естественного охлаждения: a - 200 с;  $\delta - 1200$  с



Получено распределение температуры в рельсовом темплете в различные моменты времени на участках принудительного охлаждения и самопроизвольного остывания. Установлено, что снижение температуры поверхностных слоев головки рельсов идет с большей скоростью, чем в центральных частях. Этот факт дает качественное объяснение формированию неравновесных структурно-фазовых состояний в данных слоях. Найденные зависимости температуры от координат и времени могут быть использованы для корректировки режимов дифференцированной термической обработки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Kuziak R., Pidvysots'kyy V., Pernach M., Rauch L., Zygmunt T., Pietrzyk M. Selection of the best phase transformation model for optimization of manufacturing processes of pearlitic steel rails // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2019. Vol. 19. No. 2. P. 535 – 546.
- Yahyaoui H., Sidhom H., Braham C., Baczmanski A. Effect of interlamellar spacing on the elastoplastic behavior of C70 pearlitic steel: Experimental results and self-consistent modeling // Materials and Design. 2014. Vol. 55. P. 888 – 897.
- Kapp M.W., Hohenwarter A., Wurster S., Yang B., Pippan R. Anisotropic deformation characteristics of an ultrafine- and nanolamellar pearlitic steel // Acta Materialia. 2016. Vol. 106. P. 239 – 248.
- Борц А.И., Шур Е.А., Рейхарт В.А., Базанов Ю.А. Результаты испытаний рельсов, подвергнутых дифференцированной закалке с прокатного нагрева. Влияние особенностей технологии производства на их свойства // Промышленный транспорт XXI век. 2009. № 4. С. 32 – 36.
- Павлов В.В., Корнева Л.В., Козырев Н.А. Выбор технологии для термического упрочнения железнодорожных рельсов // Сталь. 2007. № 3. С. 82 – 84.

- Корнева Л.В., Юнин Г.Н., Козырев Н.А., Атконова О.П., Полевой Е.В. Сравнительный анализ показателей качества рельсов ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат» и зарубежных производителей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 12. С. 38 42.
- Gromov V.E., Volkov K.V., Ivanov Yu.F., Morozov K.V., Alsarayeva K.V., Konovalov S.V. Formation of structure, phase composition and faulty substructure in the bulk- and differentially-hard-tempered rails // Progress in Physics of Metals. 2014. Vol. 15. No. 1. P. 1 33.
- Gromov V.E., Morozov K.V., Ivanov Yu.F., Glezer A.M. Analysis of structure-phase states in-a-bulk hardened and a head-hardened rails // AIP Conference Proceedings. 2014. Vol. 1623. P. 191 – 194.
- Волков К.В., Полевой Е.В., Темлянцев М.В., Атконова О.П., Юнусов А.М., Сюсюкин А.Ю. Моделирование воздухоструйной закалки с печного нагрева железнодорожных рельсов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2014. № 3 (9). С. 17 – 23.
- Sahay S.S., Mohapatra G., Totten G.E. Overview of pearlitic rail steel: Accelerated cooling, quenching, microstructure, and mechanical properties // Journal of ASTM Int. 2009. Vol. 6. No. 7. P. 1 – 26.
- Pointner P. High strength rail steels the importance of material properties in contact mechanics problems // Wear. 2008. Vol. 265. No. 9. P. 1373 – 1379.
- Behrens B.-A., Denkena B., Charlin F., Dannenberg M. Model based optimization of forging process chains by the use of a Genetic Algorithm. – In book: 10<sup>th</sup> Int. Conference on Technology of Plasticity ICTP. – Aachen, 2011. P. 25 – 30.
- Li G., Liu Z., Chen L., Hou X. Numerical calculation of the comprehensive heat transfer coefficient on the surface of rail in the spray cooling process // Journal of Metallurgical Engineering. 2015. Vol. 4. P. 13 17.
- Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. – 488 с.
- Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. / Под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

- 16. Тихонов А.Н., Кальнер В.Д., Гласко В.Б. Математическое моделирование технологических процессов и метод решения обратных задач в машиностроении. М.: Машиностроение, 1990. 264 с.
- Duda P. A general method for solving transient multidimensional inverse heat transfer problems // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 93. P. 665 – 673.
- Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
- **19.** Математические модели и механизмы формирования градиентных структур в материалах при внешних энергетических

воздействиях: монография / В.Д. Сарычев, С.А. Невский, А.Ю. Грановский, В.Е. Громов. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. – 320 с.

20. Сарычев В.Д., Хаимзон Б.Б., Невский С.А., Ильященко А.В., Гришунин В.А. Математические модели механизмов ускоренного охлаждения проката // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 4. С. 326 – 332.

> Поступила в редакцию 23 декабря 2019 г. После доработки 22 июня 2020 г. Принята к публикации 26 октября 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 11-12, pp. 907-914.

## SIMULATION OF DIFFERENTIATED THERMAL PROCESSING OF RAILWAY RAILS BY COMPRESSED AIR

V.D. Sarychev<sup>1</sup>, S.G. Molotkov<sup>1</sup>, V.E. Kormyshev<sup>1</sup>, S.A. Nevskii<sup>1</sup>, E.V. Polevoi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

#### <sup>2</sup> JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant", Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

- Abstract. Mathematical modeling of differentiated thermal processing of railway rails with air has been carried out. At the first stage, onedimensional heat conduction problem with boundary conditions of the third kind was solved analytically and numerically. The obtained temperature distributions at the surface of the rail head and at a depth of 20 mm from the rolling surface were compared with experimental data. As a result, value of the coefficients of heat transfer and thermal conductivity of rail steel was determined. At the second stage, mathematical model of temperature distribution in a rail template was created in conditions of forced cooling and subsequent cooling under natural convection. The proposed mathematical model is based on the Navier-Stokes and convective thermal conductivity equations for the quenching medium and thermal conductivity equation for rail steel. On the rail - air boundary, condition of heat flow continuity was set. In conditions of spontaneous cooling, change in temperature field was simulated by heat conduction equation with conditions of the third kind. Analytical solution of one-dimensional heat conduction equation has shown that calculated temperature values differ from the experimental data by 10 %. When cooling duration is more than 30 s, change of pace of temperature versus time curves occurs, which is associated with change in cooling mechanisms. Results of numerical analysis confirm this assumption. Analysis of the two-dimensional model of rail cooling by the finite element method has shown that at the initial stage of cooling, surface temperature of the rail head decreases sharply both along the central axis and along the fillet. When cooling duration is over 100 s, temperature stabilizes to 307 K. In the central zones of the rail head, cooling process is slower than in the surface ones. After forced cooling is stopped, heating of the surface layers is observed, due to change in heat flow direction from the central zones to the surface of the rail head, and then cooling occurs at speeds significantly lower than at the first stage. The obtained results can be used to correct differential hardening modes.
- *Keywords*: differentiated thermal processing, rail steel, cooling rate, mathematical modeling, thermal conductivity equation, boundary conditions of the third kind, finite element method.

## DOI: 10.17073/0368-0797-2020-11-12-907-914

#### REFERENCES

1. Kuziak R., Pidvysots'kyy V., Pernach M., Rauch L., Zygmunt T., Pietrzyk M. Selection of the best phase transformation model for optimization of manufacturing processes of pearlitic steel rails. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2019, vol. 19, no. 2, pp. 535–546.

- Yahyaoui H., Sidhom H., Braham C., Baczmanski A. Effect of interlamellar spacing on the elastoplastic behavior of C70 pearlitic steel: Experimental results and self-consistent modeling. *Materials and Design*. 2014, vol. 55, pp. 888–897.
- Kapp M.W., Hohenwarter A., Wurster S., Yang B., Pippan R. Anisotropic deformation characteristics of an ultrafine- and nanolamellar pearlitic steel. *Acta Materialia*. 2016, vol. 106, pp. 239–248.
- 4. Borts A.I., Shur E.A., Reikhart V.A., Bazanov Yu.A. Results of tests of rails subjected to direct differential quenching. Influence of production technology on their properties. *Promyshlennyi transport XXI vek.* 2009, no. 4, pp. 32–36. (In Russ.).
- Pavlov V.V., Korneva L.V., Kozyrev N.A. Selecting a thermal-hardening technology for rails. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 3, pp. 313–315.
- Korneva L.V., Yunin G.N., Kozyrev N.A., Atkonova O.P., Polevoi E.V., Comparative analysis of rail product quality indexes of JSC "Novokuznetsk metallurgical plant" and foreign manufacturers. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 12, pp. 38–42. (In Russ.).
- Gromov V.E., Volkov K.V., Ivanov Yu.F., Morozov K.V., Alsarayeva K.V., Konovalov S.V. Formation of structure, phase composition and faulty substructure in the bulk- and differentiallyhard-tempered rails. *Progress in Physics of Metals*. 2014, vol. 15, no. 1, pp. 1–33.
- Gromov V.E., Morozov K.V., Ivanov Yu.F., Glezer A.M. Analysis of structure-phase states in-a-bulk hardened and a head-hardened rails. *AIP Conference Proceedings*. 2014, vol. 1623, pp. 191–194.
- Volkov K.V., Polevoi E.V., Temlyantsev M.V., Atkonova O.P., Yunusov A.M., Syusyukin A.Yu. Simulation of air jet hardening from furnace heating of railway rails. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2014, no. 3 (9), pp. 17–23. (In Russ.).
- Sahay S.S., Mohapatra G., Totten G.E. Overview of pearlitic rail steel: Accelerated cooling, quenching, microstructure, and mechanical properties. *Journal of ASTM Int.* 2009, vol. 6, no. 7, pp. 1–26.
- 11. Pointner P. High strength rail steels the importance of material properties in contact mechanics problems. *Wear*. 2008, vol. 265, no. 9, pp. 1373–1379.
- Behrens B.-A., Denkena B., Charlin F., Dannenberg M. Model based optimization of forging process chains by the use of a Genetic Algorithm. In: 10<sup>th</sup> Int. Conference on Technology of Plasticity ICTP, Aachen, 2011, pp. 25–30.
- Li G., Liu Z., Chen L., Hou X. Numerical calculation of the comprehensive heat transfer coefficient on the surface of rail in the spray cooling process. *Journal of Metallurgical Engineering*. 2015, vol. 4, pp. 13–17.

- Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of Heat in Solids. London: Oxford University Press, 1947. (Russ. ed.: Carslaw H., Jaeger J. Teploprovodnost' tverdykh tel. Moscow: Nauka, 1964, 488 p.).
- Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirskii Yu.V. etc. *Marochnik stalei i splavov* [Brand of Steels and Alloys]. Zubchenko A.S. ed. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 784 p. (In Russ.).
- 16. Tikhonov A.N., Kal'ner V.D., Glasko V.B. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov i metod resheniya obratnykh zadach v mashinostroenii [Mathematical Modeling of Technological Processes and Method for Solving Inverse Problems in Mechanical Engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 264 p. (In Russ.).
- 17. Duda P. A general method for solving transient multidimensional inverse heat transfer problems. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016, vol. 93, pp. 665–673.
- Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. Vychislitel'naya teploperedacha [Computational Heat Transfer]. Moscow: Editorial URSS, 2003, 784 p. (In Russ.).
- 19. Sarychev V.D., Nevskii S.A., Granovskii A.Yu., Gromov V.E. Matematicheskie modeli i mekhanizmy formirovaniya gradientnykh struktur v materialakh pri vneshnikh energeticheskikh vozdeistviyakh: monografiya [Mathematical Models and Mechanisms of Formation of Gradient Structures in Materials under External Energy Influences: Monograph]. Novokuznetsk: SibGIU, 2017, 320 p. (In Russ.).

- Sarychev V.D., Khaimzon B.B., Nevskii S.A., Il'yashchenko A.V., Grishunin V.A. Mathematical models of mechanisms for rolled products accelerated cooling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 4, pp. 326–332. (In Russ.).
- *Funding*. The work was financially supported by the RFBR grant 19-32-60001.

#### Information about the authors:

V.D. Sarychev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel (sarychev\_vd@mail.ru)
S.G. Molotkov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel (sgmol@yandex.ru)
V.E. Kormyshev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Department of Scientific Researches (89239230000@mail.ru)
S.A. Nevskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel (nevskiy\_sa@physics.sibsiu.ru)
E.V. Polevoi, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Technical Department (Egor.Polevoi@evraz.com)

Received December 23, 2019 Revised June 22, 2020 Accepted October 26, 2020