

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
*«Металлургия – 2022»***

Труды

XXIII Международной научно-практической конференции

23– 25 ноября 2022 г.

Часть 1

**Новокузнецк
2022**

Редакционная коллегия

д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,
д.т.н., профессор С.В. Коновалов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., доцент Д.А. Чинахов,
к.т.н. Р.А. Шевченко, к.т.н., доцент О.А. Полях,
к.т.н. Е.Н. Темлянцева, д.т.н., доцент В.В. Зимин

М 540 Металлургия : технологии, инновации, качество : труды
XXIII Международной научно-практической конференции.
В 2 частях. Часть 1 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр.
ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2022. – 390 с. : ил.

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и практики металлургических процессов, технологий обработки материалов, автоматизации, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов металлургического производства.

Конференция проводится ежегодно.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

АДМИНИСТРАЦИЯ ПРАВИТЕЛЬСТВА КУЗБАССА
ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

АО «РУСАЛ-НОВОКУЗНЕЦК»

АО «КУЗНЕЦКИЕ ФЕРРОСПЛАВЫ»

АО «НЗРМК им. Н.Е. КРЮКОВА»

ЛЯОНИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ, Г. АНЫШАНЬ, КНР

ОАО «ЧЕРМЕТИНФОРМАЦИЯ»

ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ»

ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК СИБГИУ»

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР МИРОВОГО УРОВНЯ «КУЗБАСС»

АО «КУЗБАССКИЙ ТЕХНОПАРК»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ РЕЛЬСОВ

Сарычев В.Д., Филяков А.Д., Чумаков И.И., Коновалов С.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, filyakov.1999@mail.ru*

Аннотация. В данной работе предложена математическая модель термического упрочнения рельсов и изотермическую диффузионную краевую задачу. Получено распределение температуры в рельсовом темплете в различные моменты времени. Установлено, что снижение температуры поверхностных слоев головки рельсов идет с большей скоростью, чем в центральных частях. На основе проведенных расчетов смоделирован рост колоний перлита.

Ключевые слова: математическая модель, компьютерное моделирование, закалка, рельсы, перлит.

RAIL'S HEAT TREATMENT MODELLING

Sarychev V.D., Filyakov A.D., Chumakov I.I., Konovalov S.V.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, filyakov.1999@mail.ru*

Abstract. This paper proposes a mathematical model of rail's heat treatment, including temperature calculation and isothermal diffusion boundary problem. Rail's temperature distribution in different time was achieved. The temperature distribution in the rail templet at different moments is obtained. The temperature reduction of the surface layers of the rail head has been found to be higher than in the central parts. Based on the calculations, the growth of pearlite colonies was modeled.

Keywords: mathematical model, computational modelling, heat treatment, rails, perlite.

Введение

Согласно анализу операционных результатов транспортно-логистического направления, грузооборот на инфраструктуре ОАО «РЖД» в 2021 году увеличился на 3,1 % и составил 3 320,3 млрд ткм. При этом груженный грузооборот железнодорожных перевозок в 2021 году увеличился на 3,7 % к уровню 2020 года, а порожний грузооборот — на 0,8 %. Увеличение грузооборота в основном было обусловлено увеличением объемов перевозок каменного угля, нефти и нефтепродуктов, удобрений, минерально-строительных грузов, а также грузов в контейнерах. Кроме того, росту грузооборота способствовало увеличение средней дальности грузовых перевозок на 0,9 % к уровню 2020 года, до 1 879 км. Такой рост дальности склады-

вался в основном за счет роста транзитных перевозок, в том числе контейнерных, по маршруту Китай – Европа – Китай [1].

Переориентация торговых цепочек в сторону Восточных стран, в частности увеличение поставок Кузбасского угля, приведет к росту объема грузоперевозок на Забайкальской, Восточно-Сибирской, Красноярской железных дорог. Пути отличаются тяжелыми условиями эксплуатации – высокая грузонапряженность, горноперевальные участки, кривые малого радиуса, перепады температур. В условиях поддержания и роста Российской экономики ожидается строительство новых и модернизация существующих железных дорог.

Опираясь на практический опыт зарубежных стран по увеличению осевой нагрузки до 45 тонн на ось и переходу на безбалластные пути, на отечественных дорогах можно добиться повышения нагрузки на ось при меньшей потребности в эксплуатационном обслуживании. Бейнитная сталь, обладающая лучшей вязкостью разрушения, износостойкостью и сопротивлением усталости, является лучшим выбором для замены перлитной стали в качестве нового материала для колес и рельсов.

В зависимости от температуры бейнитного превращения существуют две различные формы бейнита: верхний бейнит и нижний бейнит. Верхний бейнит, получаемый в области высоких температур (~400–500 °C), состоит из более крупных пластин бейнитного феррита и карбидов, по сравнению с нижним бейнитом, образующимся при более низких температурах (300–400 °C).

Бейнитные рельсы могут быть изготовлены путем естественного воздушного охлаждения после прокатки. Они имеют твердость свыше 400 НВ и более высокие значения ударной вязкости по сравнению с перлитными рельсовыми сталями, подвергнутыми закалке.

Для разработки новых видов продукции, в том числе рельсов из бейнитных марок стали и перспективах использования тепла прокатного нагрева, необходим комплекс исследований по оптимизации текущего оборудования, применяемого для термической обработки рельсов. Этот комплекс исследований включает блок по математическому моделированию процессов термического упрочнения рельсов. Целью настоящей работы является описание основных этапов математического моделирования термоупрочнения рельсов.

Статья представлена двумя частями: в первой – производится решение тепловой задачи, во второй – моделирование превращения аустенит – перлит в диффузионном приближении.

Тепловая задача

Задача распределения температур в рельсе в процессе термического упрочнения будем рассматривать в одномерной и двумерной постановках [2]. При одномерной геометрии, когда считается, что температура зависит от времени и только от глубины, анализ экспериментальной кривой охлаждения показывает, что существует два режима охлаждения: первый - кривая является выпуклой и быстро спадает и реализуется скорость охлаждения 7 °C/c, во втором режиме скорость охлаждения составляет 2 °C/c.

Для математического моделирования использовались граничные учи-

тывающие смену механизма охлаждения разными коэффициентами теплоотдачи, которые были определены при сравнении экспериментальных и расчетных зависимостей температуры от времени в определенной точке.

Двумерная тепловая задача распадается на два этапа: принудительного охлаждения движущимся воздухом и охлаждение в спокойном воздухе. В первом случае решается сопряженная задача теплообмена, включающая уравнения Навье-Стокса и конвективной теплопроводности для воздушного потока, переноса тепла в рельсе с граничными условиями сопряжения (создан проект в Comsol Multiphysic (рисунок 1)). На втором этапе решается только тепловая задача для рельса с граничными условиями выражаются через коэффициент теплоотдачи. В результате моделирования получено распределение температуры в рельсе 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 разных слоях.

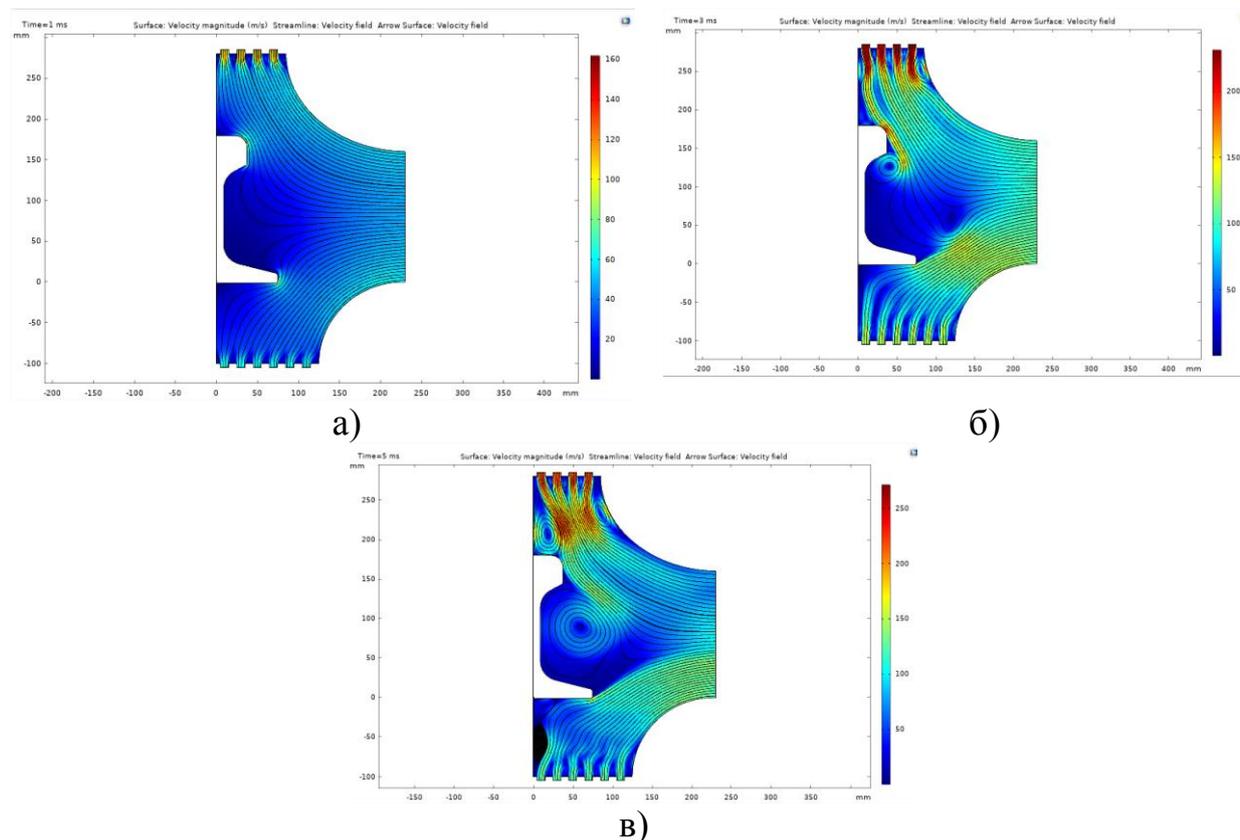


Рисунок 1 – Обтекание рельса воздушным потоком в различные моменты времени: а) 10 мкс; б) 50 мкс; в) 100 мкс.

Моделирование превращения аустенит – перлит

Структурно-фазовые превращения при закалке рельсов могут быть смоделированы с разной степенью детализации. Обычно используется JMAK-Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK), где доля фракции перлита определяется через экспоненциальную функцию времени с двумя параметрами, за-

висящими от температуры. Для определения которых этих параметров используется изотермическая диаграмм. Далее используя зависимость температуры от времени в точках сечения рельса, найденную в первом этапе, определяется зависимость доли фракции перлита от времени. Алгоритм и программа расчетов была разработана ранее и верифицирована на закалке арматуры.

Этот подход наиболее простой, но не дает значений размеров перлитных колоний и расстояния феррит-цементитных ламелей. В настоящее время проводятся интенсивные исследования с использованием модели фазового поля и уравнения диффузии для определения межпластинчатого расстояния перлита. Модель позволяет прогнозировать объемную долю перлита, межслойное расстояние и распределение концентрации углерода в аустените. Таким образом, модель позволяет прогнозировать прочностные и эксплуатационные свойства перлитных сталей, в том числе твердость, износостойкость и долговечность в зависимости от технологических параметров. Однако, продолжительность моделирования одного теплового цикла составляет около 4 ч, а решение, основанное на уравнении ЖМАК, составляет несколько секунд. Поэтому для моделирования структурно-фазовых превращений при закалке рельсов предложено использовать смешанный подход.

Моделирование превращения аустенит – перлит в диффузионном приближении основано на решении краевой задачи, которая формулируется ниже.

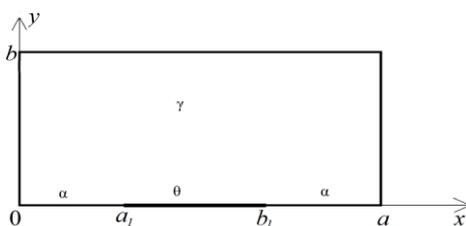


Рисунок 2 – Схема области роста перлита

Начально-краевая задача включает.

Уравнения диффузии в области $0 < x < a; 0 < y < b$:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D \frac{\partial c}{\partial y}$$

Граничные условия на сторонах прямоугольника принимаем в виде

$$y = 0, 0 \leq x \leq a : \frac{\partial c}{\partial y}(x, 0) = 0; \quad y = b, 0 \leq x \leq a : \frac{\partial c}{\partial y}(x, b) = 0;$$

$$x = 0, 0 \leq y \leq b : \frac{\partial c}{\partial x}(0, y) = 0; \quad x = a, 0 \leq y \leq b : \frac{\partial c}{\partial x}(a, y) = 0$$

Начальные условия:

в области прямоугольника вне нижней стороны:

$$c(0, x, y) = c_a; \quad 0 \leq x \leq a; \quad 0 < y \leq b:$$

на нижней стороне прямоугольника:

$$c(0, x, 0) = \begin{cases} c_c, & 0 < x < a_1; \\ c_f, & a_1 < x < b_1; \\ c_c, & b_1 < x < a \end{cases}$$

Коэффициент диффузии зависит от концентрации и принимает вид:

в кусочно-постоянном виде

$$D(c) = \begin{cases} D_\alpha, & 0 < c < c_1; \\ D_\gamma, & c_1 < c < c_2; \\ D_\theta, & c > c_2. \end{cases}$$

или в аналитическом виде

$$D(c) = H(c_2 - c)(D_\gamma + (D_\alpha + D_\gamma)H(c_1 - c)) + D_\theta(c - c_2)$$

Здесь $H(\cdot)$ – функция Хейвисайда. Где c_1 и c_2 определяются из условий

$$f_\alpha(T, c_1) = f_\gamma(T, c_1); \quad f_\theta(T, c_2) = f_\gamma(T, c_2)$$

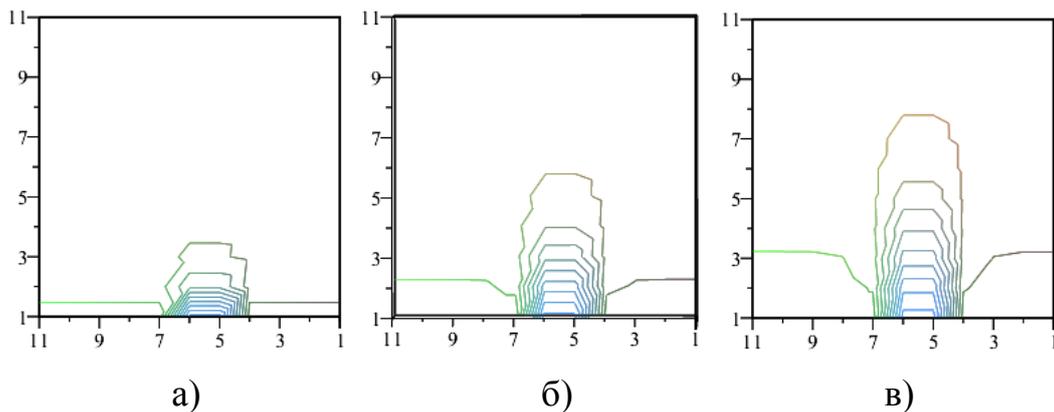


Рисунок 3 – Модель роста колонии перлита (голубой цвет) при $T=750^\circ \text{K}$, в различные моменты времени: а) 10 мкс; б) 50 мкс; в) 100 мкс.

Заключение

1. Предложена математическая модель термоупрочнения рельсов, включающая расчет температур и изотермическую диффузионную краевую задачу.

2. 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.

3. На основе проведенных расчетов получены распределения температур по сечению рельса в различные моменты времени и смоделирован рост колоний перлита.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного

фонда (проект № 22-79-10229).

Библиографический список

1. Корнева Л.В., Дементьев В.П., Елисеев С.В., Поздеев В.Н., Хоменко А.П., Черняк С. С. Разработка технологии производства железнодорожных рельсов из стали бейнитного класса повышенной эксплуатационной стойкости для условий Сибири // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 1 (37). С.47 – 57.

2. Сарычев В.Д., Молотков С.Г., Кормышев В.Е., Невский С.А., Полевой Е.В. Моделирование дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов сжатым воздухом // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Том 63. №11-12. 907-914 С.

УДК 669.71.017

ВЛИЯНИЕ МЕДИ НА СТРУКТУРУ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ СПЛАВОВ Al – 40%Si

Афанасьев В. К., Попова М.В., Малюх М.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, starostina_ma1976@mail.ru*

Аннотация. Изучены особенности изменения микроструктуры и температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) высоколегированных алюминиевых сплавов специального назначения на основе системы Al– 40 % Si – Cu. Установлено, что легирование медью в больших количествах снижает ТКЛР тройных сплавов во всем температурном интервале испытаний. Сравнительный анализ полученных данных показал, что значения ТКЛР полученного сплава Al-40 % Si-40 % Cu значительно ниже коэффициента линейного расширения промышленных сплавов инварного типа во всем интервале испытания. Полученные результаты позволяют утверждать, что легирование медью способствует наибольшему снижению ТКЛР тройных сплавов Al – Si – Cu.

Металлографический анализ высоколегированных сплавов демонстрирует наличие крупных пластинчатых кристаллов первичного кремния. Рентгеноспектральный микроанализ исследуемых образцов, полученный с помощью растрового электронного микроскопа, подтверждает наличие в сплавах Al – 40 % Si – 15÷ 40 % Cu между пластинчатыми кристаллами кремнистой фазы частицы фазы $CuAl_2$.

Ключевые слова: высоколегированные сплавы, легирование, микроструктура, температурный коэффициент линейного расширения.

Научное издание

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО**
«Металлургия – 2022»

Труды XXIII Международной научно-практической конференции

Часть 1

Под общей редакцией А.Б. Юрьева

Технический редактор	Г.А. Морина
Компьютерная верстка	Н.В. Ознобихина

Подписано в печать 16.11.2022 г.
Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага офисная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 22,8 Уч.-изд. л. 25,2 Тираж 300 экз. Заказ № 295

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42
Издательский центр СибГИУ