

УДК 536.24 : 669.017

Численное моделирование температурно-структурного состояния железнодорожного рельса при его закалке

Покровский А. М.^{1,*}, Третьяков Д. Н.¹

* ampokr@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Изготовление высокопрочных железнодорожных рельсов является чрезвычайно актуальной проблемой, так как с каждым годом возрастает скорость движения и масса подвижного состава. При этом очень важно выбирать рациональные режимы термообработки, которые с одной стороны способствуют формированию требуемой структуры с заданной твердостью, а с другой стороны не приводят к короблению рельсов и разрушению на ранних стадиях эксплуатации за счет высокого уровня остаточных термонапряжений. В настоящей работе разработаны методики и программные средства для численного моделирования температурно-структурного состояния железнодорожного рельса при его термической обработке с помощью конечно-элементной среды ANSYS и C++. Представлены результаты моделирования применительно к объемной закалке в масле рельса, изготовленного из стали 85. Разработанные программные средства могут быть полезны для прогнозирования напряженно-деформированного состояния рельса в процессе термической обработки.

Ключевые слова: железнодорожные рельсы, закалка в масле, линейная нестационарная задача теплопроводности, теплофизические коэффициенты, метод конечных элементов, кинетика структурных превращений, аустенит, феррито-карбид, мартенсит

Введение

В настоящее время возрастает грузонапряженность железных дорог, увеличивается масса подвижного состава и скорость движения, поэтому актуальной проблемой является повышение надежности и долговечности рельсов. Для придания требуемых эксплуатационных свойств рельсам их в процессе изготовления подвергают термической обработке. При этом очень важно выбрать рациональные режимы термообработки, так как некорректные режимы могут привести к короблению рельсов, а также возникновению и росту трещиноподобных дефектов за счет высокого уровня остаточных термонапряжений. Экспериментальные методы исследования температурно-структурного состояния рельсов при термической обработке с целью рационализации ее режимов малоэффективны, так как не позволяют проследить всю кинетику формирования структуры, особенно во внутренних областях рельса. В связи с этим на первый план выходят численные методы

компьютерного моделирования, позволяющие проследить температурно-структурное состояние рельса в течение всего процесса термической обработки. В настоящей работе созданы программные средства и компьютерные методики для решения указанной задачи. Следует отметить, что температурно-структурное поле в процессе термообработки является исходной информацией для вычисления напряженно-деформированного состояния в рельсе посредством решения задачи термоупругопластичности для среды с нестационарной структурой [1].

В качестве объекта исследования был выбран железнодорожный рельс типа Р65 [2], изготовленный из стали 85 (рис. 1). В качестве термической обработки была использована объемная закалка, заключающаяся в сквозном нагреве рельса в печи до температуры 1000 °С и последующим охлаждением в масляной ванне при температуре 40 °С.

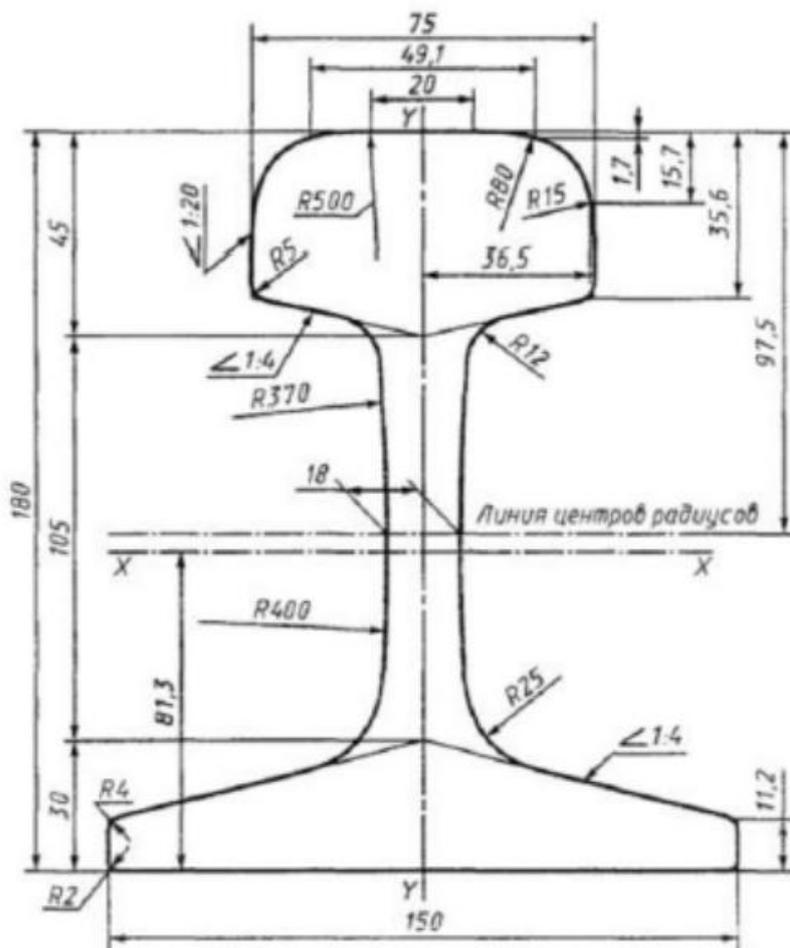


Рис. 1. Рельс Р65 (ГОСТ Р 51685-2000)

1. Решение задачи теплопроводности при закалке рельса

Вычисление температурного поля в рельсе в процессе термической обработки проводилось посредством решения линейной нестационарной задачи теплопроводности в объемной постановке. Для изотропного тела в случае отсутствия удельных источников энерговыделения эта задача описывается следующим дифференциальным уравнением [3]

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right], \quad (1)$$

где $t(x,y,z,\tau)$ – температура; x, y, z – координаты; τ – время; c – коэффициент теплоемкости; λ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность.

Для описания условий теплообмена использованы граничные условия третьего рода

$$\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_n = \alpha (t_c(\tau) - t_n(\tau)) . \quad (2)$$

где α – суммарный коэффициент теплоотдачи, учитывающий теплообмен конвекцией и излучением; t_c – температура окружающей среды; n – нормаль к поверхности; индекс «n» относится к значениям на поверхности.

Интегрирование уравнения (1) проведено при начальном условии

$$t(x, y, z, 0) = t_0 , \quad (3)$$

где t_0 – начальная температура.

Решение краевой задачи (1)-(3) сводится к минимизации следующего потенциала [4]

$$\chi = \frac{\lambda}{2} \int_V \left[\left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)^2 \right] dV + \int_V c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} t dV + \int_{S_\alpha} \alpha \left(\frac{1}{2} t - t_s \right) t dS , \quad (4)$$

где V – объем тела; S_α – площадь поверхности, на которой задан коэффициент теплоотдачи.

Минимизация функционала (4) для ансамбля конечных элементов приводит к следующему матричному уравнению

$$[C] \frac{\partial \{t\}}{\partial \tau} + [K] \cdot \{t\} = \{F\} , \quad (5)$$

где $[C]$, $[K]$ – глобальные матрицы теплоемкости и теплопроводности соответственно; $\{t\}$ – вектор-столбец температур в узлах конечно-элементной сетки; $\{F\}$ – вектор-столбец тепловой нагрузки в узлах.

Решения задачи теплопроводности проведено в конечно-элементной среде ANSYS [5] с использованием 8-ми узлового 3D элемента Solid 278. На рис. 2 представлена конечно-элементная модель рельса. Значения теплофизических коэффициентов принимались согласно [6] следующими: $\lambda = 21$ Вт/м·К ; $C = 450$ Дж/кг·К ; $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³ ; $\alpha = 1200$ Вт/м²·К. Проведенные расчеты показали, что охлаждение рельса до температуры масла 40 °С происходит приблизительно за 10 минут. В качестве иллюстрации на рис.3 и 4 представлено распределение температуры для времени охлаждения 40 и 100 с соответственно.

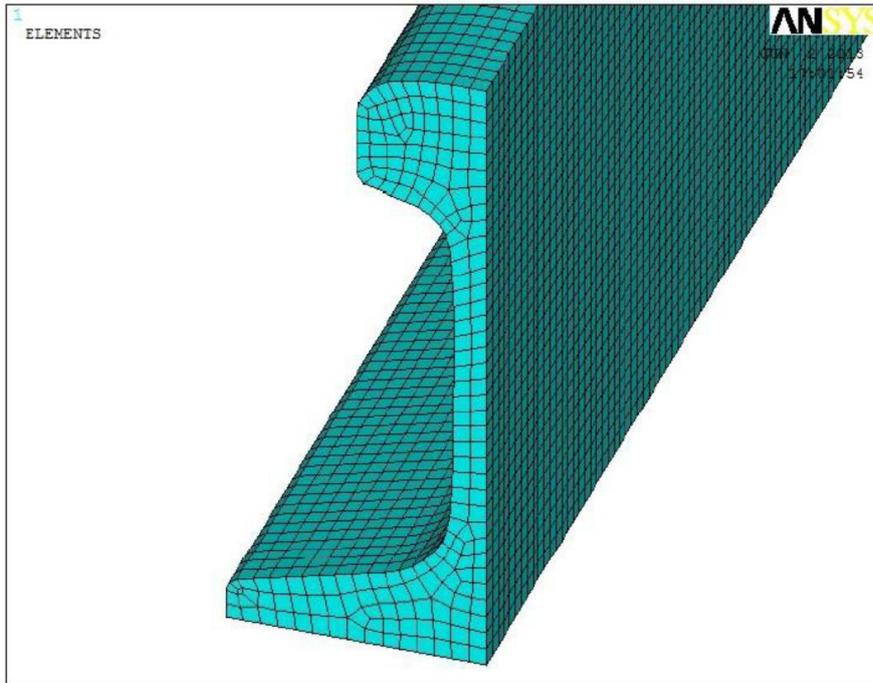


Рис. 2. Конечно-элементная модель железнодорожного рельса

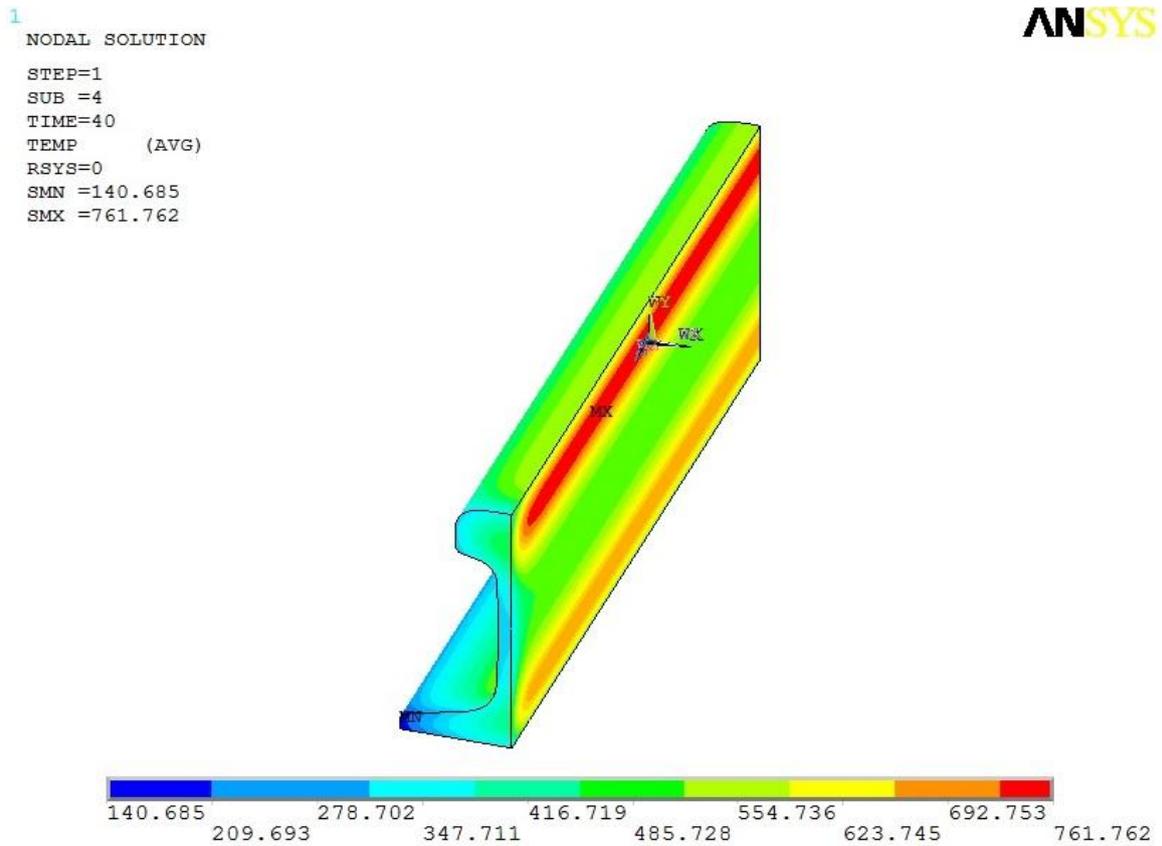


Рис. 3. Распределение температуры в оС для времени охлаждения 40 с

1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =10
 TIME=100
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 SMN =55.3229
 SMX =390.345

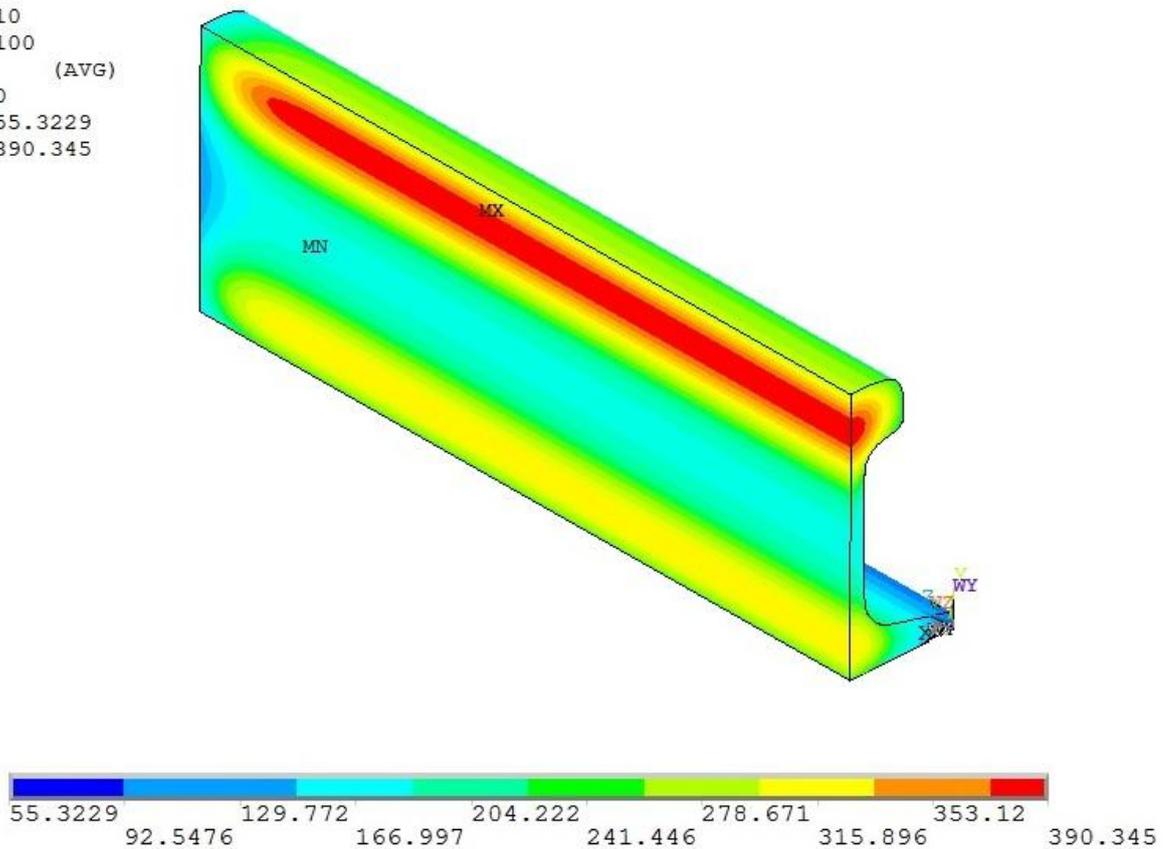


Рис. 4. Распределение температуры в °С для времени охлаждения 100 с

2. Моделирование структурообразования при закалке рельса

Расчет структурного состояния осуществлялся шаговым методом. При этом на каждом шаге по времени для анализируемого конечного элемента определялся вектор удельных долей аустенита, феррита-карбида и мартенсита соответственно $\{V_a, V_{фк}, V_m\}$. Плавная кривая изменения температуры в рассматриваемой точке рельса заменялась ломаной, то есть принималось, что на каждом k -ом шаге по времени температура t мгновенно меняется с t_{k-1} на t_k и остается постоянной на данном временном шаге.

Моделирование структурообразования проведено по теории изокINETических реакций. Для описания изотермического распада аустенита в феррито-карбид использовано уравнение Авраами [7]

$$V_{фк}(\tau) = 1 - \exp(-K\tau^n), \quad (6)$$

где K, n – зависящие от температуры эмпирические коэффициенты, определяемые по изотермической диаграмме (ИТД) превращений переохлажденного аустенита в феррито-карбид.

Зная для каждой температуры времена начала τ_n и конца τ_k феррито-карбидного превращения, значения коэффициентов K, n можно определить по формулам [8]

$$n(t) = 2,66 / \lg \frac{\tau_k}{\tau_n}, \quad K(t) = 0,01005 / (\tau_n)^{n(t)}. \quad (7)$$

Согласно правилу аддитивности, справедливому для изокинетических реакций [7], объемная доля феррито-карбида на k -ом шаге по времени определяется по уравнению (6) для времени $\tau_k + \Delta\tau$, где τ_k – время, необходимое для достижения накопленной к моменту τ_{k-1} степени превращения $V_{\phi k}^{k-1}$ при температуре t_k . Тогда объемная доля феррито-карбида на k -ом шаге [9]

$$V_{\phi k}(\tau_k) = 1 - \exp \left\{ -K(t_k) \left[\left(-\frac{\lg(1 - V_{\phi k}^{k-1})}{V_{\phi k}(t_n)} \right)^{1/n(t_n)} + \Delta\tau_k \right]^{n(t_k)} \right\}. \quad (8)$$

При моделировании структурного состава по формуле (8) необходимо вначале найти зависящие от температуры коэффициенты K, n . Для их вычисления по формуле (7) нужно знать времена начала τ_n и конца τ_k превращения. Эти времена можно определить по ИТД стали 85, представленной на рис. 5 [10], аппроксимировав на основании метода наименьших квадратов [11] феррито-карбидную область следующими парабололами

$$\lg \tau_n = 0,971 \cdot 10^{-4} (t - 520)^2 + 0,701 \text{ для } 480 \leq t \leq 650 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\lg \tau_n = -1,11 \cdot 10^{-3} |t - 520|^{1,3} + 2,31 \text{ для } 230 \leq t < 480 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\lg \tau_k = 0,975 \cdot 10^{-4} (t - 500)^2 + 1,42 \text{ для } 400 \leq t \leq 650 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$\lg \tau_k = -3,89 \cdot 10^{-4} (t - 230)^2 + 3,79 \text{ для } 230 \leq t < 400 \text{ }^\circ\text{C}$$

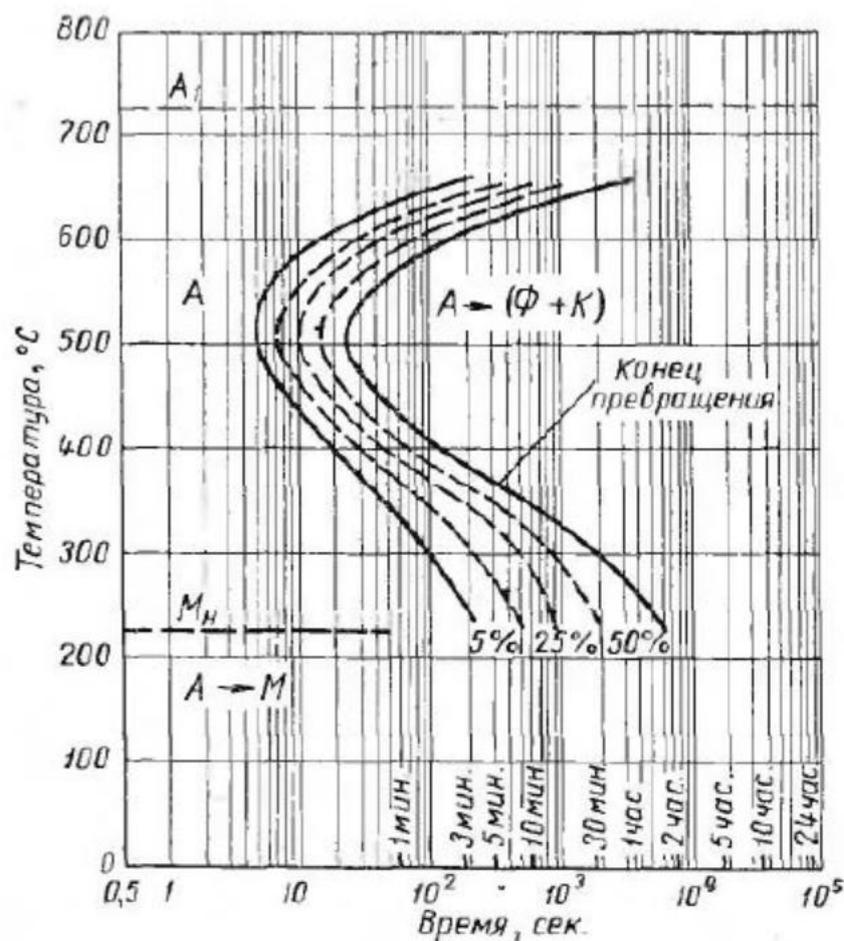


Рис. 5. Изотермическая диаграмма стали 85

Мартенситное превращение относится к атермическим превращениям, степень распада при которых определяется только температурой и не увеличивается со временем [12], поэтому в расчете удельной доли мартенсита использовалась чисто температурная зависимость

$$V_m = V_A^{фк} \frac{M_n - t}{M_n - t_n}, \quad (10)$$

где $V_A^{фк}$ — удельная доля аустенита, сохранившаяся после прохождения феррито-карбидной области; $M_n=230$ °С — температура начала мартенситного превращения; t_n — нормальная температура, равная 20 °С.

3. Обсуждение результатов математического моделирования

В качестве иллюстрации работы разработанных программных средств на рис. 6 и 7 соответственно представлено распределение структур в торцевом сечении рельса для времени охлаждения 40 с и в срединном сечении для времени охлаждения 100 с.

На рис. 8 и 9 соответственно приведены распределения структур в торцевом и срединном сечении для этого времени. Из рисунков видно, что минимальная удельная доля мартенсита в структуре закаленного рельса составляет 45 %. Максимальное содержание мартенсита (89 %) наблюдается в торцевом сечении у края подошвы рельса, в срединном сечении значение немного меньше 82 %. Последнее объясняется более интенсивным охлаждением торцевого сечения по сравнению со срединным.

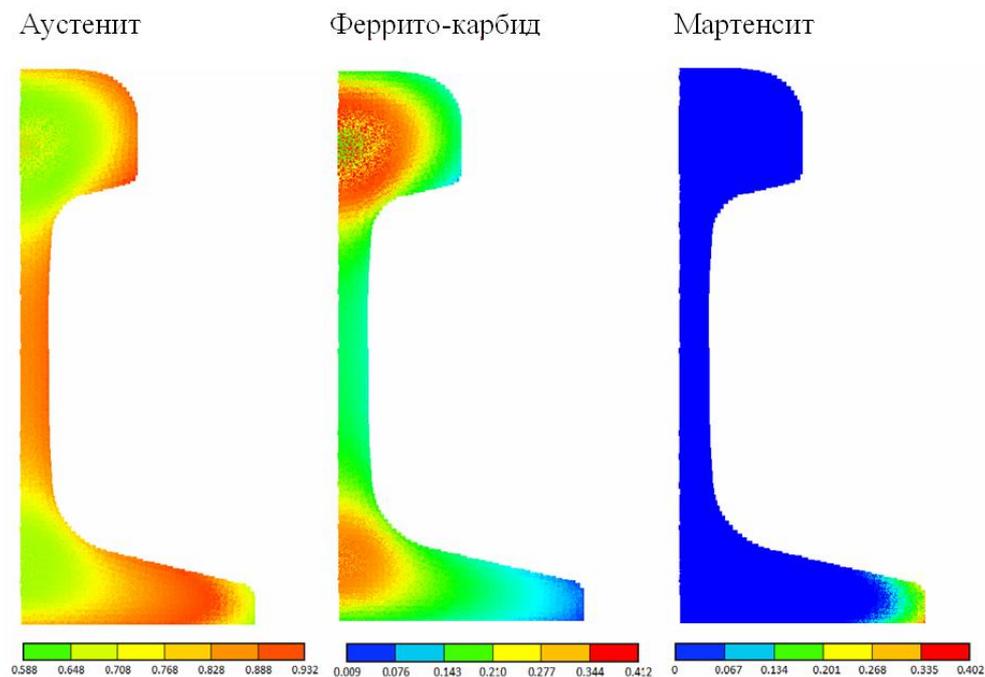


Рис. 7. Распределение структуры в торцевом сечении для времени охлаждения 40 с

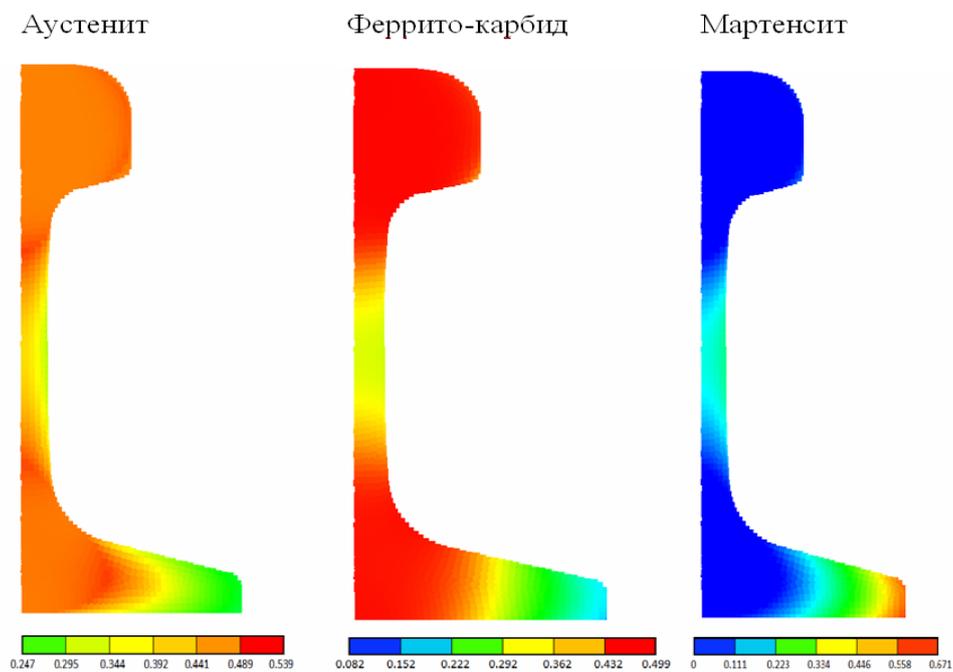


Рис. 7. Распределение структуры в срединном сечении для времени охлаждения 100 с

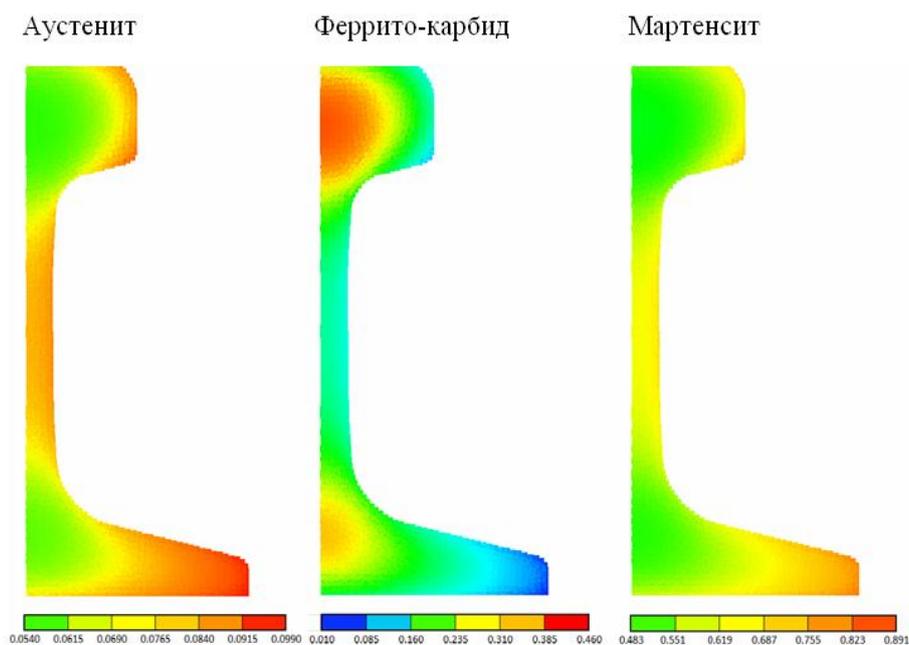


Рис. 8. Распределение структуры в торцевом сечении после охлаждения

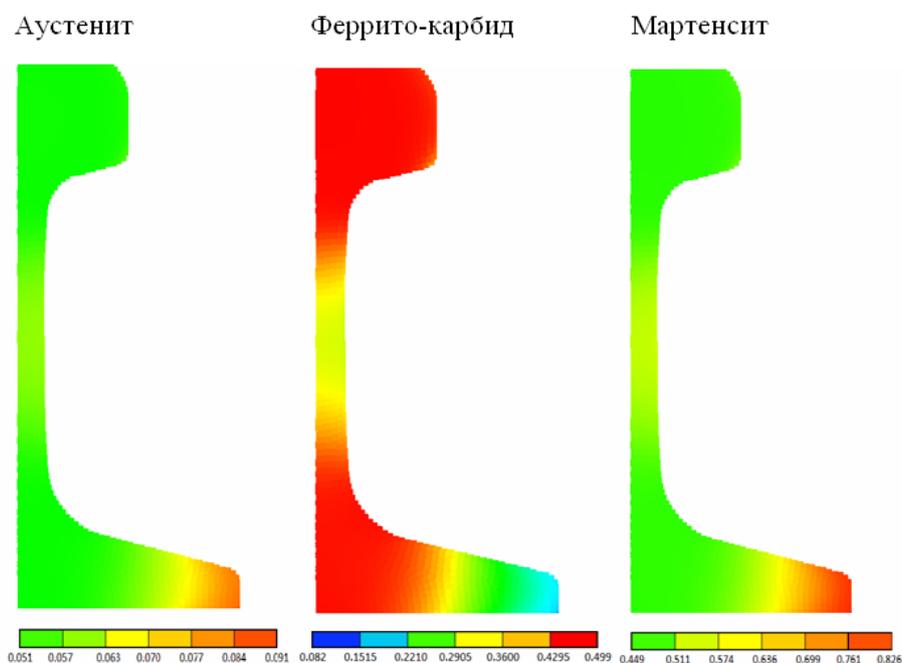


Рис. 9. Распределение структуры в срединном сечении после охлаждения

Остаточный аустенит, достигающий 9 % в структуре, присутствует за счет неполного прохождения мартенситного превращения, так как рельс охлаждается не до нормальной температуры, а до температуры масляной ванны 40 °С. Головка рельса имеет структуру, состоящую приблизительно из 5 % остаточного аустенита, 20 % феррито-карбида и 75 % мартенсита в торцевом сечении и 5, 45 и 50 % в срединном сечении соответственно. Таким образом, проведенная термическая обработка обеспечивает закаленную структуру в поверхностных областях рельса.

Заключение

Анализ полученных в работе результатов позволил сформулировать следующие выводы:

1. Разработанные программные средства позволяют адекватно моделировать температурное поле и фазовый портрет в железнодорожном рельсе в процессе термической обработки.

2. Посредством математического моделирования показано, что после закалки в масло рельса Р65 из стали 85 структура вблизи торца у края подошвы рельса содержит до 89 % мартенсита. Максимальная удельная доля феррита-карбида во внутренних областях составляет около 50 %.

3. Созданные программные средства могут служить основой для численного определения временных и остаточных термических напряжений в рельсе.

Список литературы

1. Лешковцев В.Г., Покровский А.М. Расчет закалочных напряжений в стальных деталях с учетом упруговязкопластических свойств и изменения фазового состава // Известия РАН. Механика твердого тела. 1999. № 2. С. 101-107.
2. ГОСТ Р 51685-2000. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2001. 23 с.
3. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассобмен: учеб. пособие для вузов. М.: Издат. дом МЭИ, 2006. 550 с.
4. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Fox D.D. The finite element method for solid and structural mechanics. 7th ed. N.Y.: Elsevier, 2014. 657 p. DOI: [10.1016/B978-1-85617-634-7.00016-8](https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-634-7.00016-8)
5. Олферьева М. А., Морозов Е. М., Каплун А. Б. ANSYS в руках инженера. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
6. Вафин Р.К., Покровский А.М., Лешковцев В.Г. Прочность термообрабатываемых прокатных валков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 264 с.
7. Christian J.W. The Theory of Transformations in Metals and Alloys. Part I. Oxford: Pergamon, 2002. 1200 p.
8. Покровский А.М., Рыжиков А.В. Численное моделирование температурно-структурного состояния биметаллического прокатного валка в процессе его наплавки // Известия вузов. Машиностроение. 2015. № 2. С. 22–28.
9. Покровский А.М., Лешковцев В.Г., Вейнов А.М., Грушко О.А., Плескач Б.В. Математическое моделирование температурно-структурного состояния при закалке композитных прокатных валков // Сталь. 2006. № 2. С. 63–65.
10. Попов А.А., Попова Л.Е. Справочник термиста: Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. М.: Машгиз, 1961. 430 с.

11. Деммель Д. Вычислительная линейная алгебра: теория и приложения. Москва: Мир, 2001. 429 с.
12. Арзамасов Б.Н., Макаров В.И., Мухин Г.Г. и др. Материаловедение. 8-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.

Numerical Simulation of Thermal-Structural State of the Railway Rail During Hardening

A.M. Pokrovsky^{1,*}, D.N. Tretyakov¹

* ampokr@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: railway rails, quenching in oil, linear non-stationary problem of heat conduction, thermal coefficients, finite element method, the kinetics of structural transformations, austenite, ferrite-carbide, martensite

The production of high-strength rails is an extremely urgent problem, because every year increases the speed and weight of rolling stock. It is very important to choose a rational modes of heat treatment, which on the one hand contribute to the formation of the desired structure with a given hardness, and on the other hand do not lead to warping of the rails and destruction in the early stages of operation due to the high level of residual thermal stresses. Experimental methods for research of thermal-structural state rail during heat treatment with a view to rationalizing modes are ineffective because they do not allow to trace the kinetics of structure formation, especially in the internal areas of the rail. Therefore, at the forefront methods of mathematical modeling. In the present work, the developed methods and software for numerical simulation of temperature and structural condition of the railway rail when it is heat treated. The solution to the problem of linear unsteady heat conduction carried out in a bulk formulation using finite-element ANSYS environment using 8-node 3D element Solid278. Mathematical modeling of transformation of austenite to ferrite-carbide implemented using the C++ programming language theory isokinetic reactions, which is based on the additivity rule for the transition from isothermal kinetics of austenite to non-isothermal conditions. To describe the isothermal transformation kinetics of austenite to ferrite-carbide used the equation of Avrami. The results of mathematical modeling as applied to bulk quenching in oil rail type R65, made of steel 85. It is established that the cooling of the rail to oil temperature 40 ° C occurs in approximately 10 minutes. Through mathematical modeling shows that after quenching the structure near the end at the edge of the base of the rail contains up to 89 % of martensite. The maximum share of ferrite-carbide in inner areas is about 50 %. Developed software tools necessary for the subsequent modeling of the stress-strain state of the rail in the process of heat treatment.

References

1. Leshkovtsev V.G., Pokrovskii A.M. Calculation of quench stresses in steel parts with regard to elastoviscoplastic properties and phase composition changes. *Izvestiya RAN. Mekhanika*

- tverdogo tela* = *Proceedings of RAS. Mechanics of Solids*, 1999, no. 2, pp. 101-107. (in Russian).
2. GOST P 51685-2000. Rel'sy zhelezodorozhnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard of RF 51685-2000. Railway rails. General specifications]. Moscow, Standards Publishing House, 2001. 23 p. (in Russian).
 3. Tsvetkov F.F., Grigor'ev B.A. *Teplomassoobmen* [Heat and Mass Transfer]. Moscow, Moscow Power Engineering Institute Publ., 2006. 550 p. (in Russian).
 4. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Fox D.D. *The finite element method for solid and structural mechanics*. 7th ed. N.Y., Elsevier, 2014. 657 p. DOI: [10.1016/B978-1-85617-634-7.00016-8](https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-634-7.00016-8)
 5. Olfer'eva M.A., Morozov E.M., Kaplun A.B. *ANSYS v rukakh inzhenera* [ANSYS. Practical Guide for Engineers]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003. 272 p. (in Russian).
 6. Vafin R.K., Pokrovskii A.M., Leshkovtsev V.G. *Prochnost' termoobrabatyvaemykh prokatnykh valkov* [Strength of heat-treatable mill rolls]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 264 p. (in Russian).
 7. Christian J.W. *The Theory of Transformations in Metals and Alloys. Part I*. Oxford, Pergamon, 2002. 1200 p.
 8. Pokrovsky A.M., Ryzhikov A.V. Numerical modeling of temperature and structural states of bimetallic rolls during surfacing. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 2, pp. 22-28. (in Russian).
 9. Pokrovskii A.M., Leshkovtsev V.G., Veinov A.M., Grushko O.A., Pleskach B.V. Mathematical modeling of temperature-structural state in hardening of composite rolls. *Stal'*, 2006, no. 2, pp. 63–65. (in Russian).
 10. Popov A.A., Popova L.E. *Spravochnik termista: Izotermicheskie i termokineticheskie diagrammy raspada pereokhlazhdennogo austenite* [Handbook of specialist in thermal treatment of metal: Diagrams of transformation of austenite in steels and beta solution in titanium alloys]. Moscow, Mashgiz Publ., 1961. 430 p. (in Russian).
 11. Demmel' D. *Vychislitel'naia lineinaia algebra: teoriia i prilozheniia* [Computational linear algebra: theory and applications]. Moscow, Mir Publ., 2001. 429 p. (in Russian).
 12. Arzamasov B.N., Makarov V.I., Mukhin G.G., et al. *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 648 p. (in Russian).