

АНОТАЦІЯ

Подольський Р. В. Розробка хімічного складу та режимів термічної обробки високоміцних рейок сталей перлітного класу. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії PhD за спеціальністю 132 — «Матеріалознавство». — Український державний університет науки і технологій. — Дніпро, 2023.

Дисертаційну роботу присвячено розробці хімічного складу сталей та технологічних параметрів термічної обробки залізничних рейок на підприємствах України, що забезпечують підвищення експлуатаційних властивостей.

В роботі показано, що рейки українського виробництва за поточною технологією поступаються зарубіжним аналогам по механічним властивостям, та, як наслідок, по експлуатаційній довговічності. Пропускна здатність рейок, вироблених в Україні, становить 0,5 млрд. тонн брутто, в той час як аналогічний показник у Франції, Японії становить 1 млрд. тонн брутто, тобто в 2 рази більше. Показано, що підвищення характеристик міцності сталі за рахунок розробки нового хімічного складу та термічної обробки призводить до підвищення експлуатаційних характеристик.

Проведені дослідження впливу хімічних елементів на кінцеву структуру та механічні властивості сталі. На підставі даних досліджень було рекомендовано 3 сталі з дослідними хімічними складами для лабораторної виплавки та проведення подальших досліджень.

З літературного аналізу встановлено, що сталі, що застосовуються в виробництві залізничних рейок для досягнення перлітної структури необхідні швидкості охолодження в діапазонах 0,63...18,2°C/с. Показано, що для сталі 75ХГСМ необхідна швидкість охолодження складає від 0,63...0,14°C/с, оскільки застосування легуючих елементів Cr, Mn, Si, Mo збільшує інкубаційний період. Таким чином, область перлітного перетворення стає більш схильна до переміщення в бік менш інтенсивних швидкостей охолодження. У сталі М76Т відбувається

формування перлітної структури при швидкості охолодження в діапазоні 9,2...18,2°C/с, в сталі R350LHT - при швидкості охолодження близько 5°C/с. У сталях E76XF та E76XAF, до складу яких введено хром, після охолодження зі швидкостями 1 °C/с і менше, внаслідок розпаду переохолодженого аустеніту крім ферито-карбідної суміші перлітного типу спостерігається утворення надлишкового фериту. У сталі E76Ф швидкість охолодження для утворення структури перліт необхідна швидкість охолодження склала до 10°C/с.

Сучасні світові виробники рейкової продукції обрали кожен свій індивідуальний шлях технологічних рішень (застосовані технології виробництва і термічного зміцнення) для досягнення властивостей, за якими виконується випуск продукції. Цей перелік можна розділити на рейки без термічного зміцнення (Польща, Італія), рейки з диференційованим термічним зміцненням з прокатного нагріву (Японія, Австрія, США), рейки з диференційованим термічним зміцненням з окремого індукційного нагріву (Франція, Канада (нині завод закритий), Україна), рейки з об'ємним загартуванням в маслі з окремого пічного нагріву (Росія).

Виходячи з результатів аналізу літературних джерел виконано комплекс досліджень з метою встановлення закономірностей формування структурного стану та механічних властивостей по перетину головки залізничних рейок в умовах українського виробництва, виготовлених з високовуглецевої сталі, мікролегованої ванадієм (марка K76Ф). Проведені дослідження мікроструктури термічно зміцнених рейок українського виробництва. Встановлено наявність неоднорідності структури на поверхні кочення рейки і низьку дисперсність карбідної фази на глибині 11 мм від поверхні кочення виробу.

В роботі проведено дослідження з якого встановлено, що існуюча технологія термічної обробки, що застосовується на території України, не може забезпечити високий рівень твердості по перерізу головки рейки (до глибини 20 мм), що відповідає вимогам зарубіжних стандартів.

В роботі застосовано математичну модель, що дозволяє проводити прогноз зміни температурних полів та миттєву швидкість охолодження в залізничній рейці під час проходження диференційованого охолодження. Застосована модель

дозволяє визначати потрібні параметри термічної обробки для утворення структурних складових та досягнення регламентованого комплексу механічних властивостей сталі. Встановлено, що поточна технологія виробництва з застосування термозміцнення не припускає досягнення значень твердості по перерізу залізничної рейки на рівні ДСТУ EN 13674-1:2018, що пов'язано з недостатньо інтенсивним охолодженням, саме центральних ділянок головки рейки температура, якої складає - 680 °С.

В рамках досліджень встановлено, що для забезпечення твердості (370 НВ) в осьових ділянках головки рейки (глибина 20 мм) відповідно до вимог ДСТУ EN 13674-1:2018 є значна необхідність в розробленні нових перспективних параметрів термічної обробки чи розробці перспективних хімічних складів сталей, що підвищать інтенсивність охолодження в центральних ділянках головки рейки.

В результаті дилатометричних досліджень було побудовано діаграму розпаду переохолодженого аустеніту дослідної сталі з C=0,84%, Mn=0,95%, Si=0,44%, V=0,01%, Ca=0,0006% та встановлено, що при швидкостях охолодження 0,06-5,9°C/с структура складається переважно з перліту різної дисперсності, зі збільшенням швидкості охолодження до 64,3°C/с проходить утворення бейніту з подальшою зміною морфології з пір'ястого до голчастого.

Побудовано в результаті мікроструктурних досліджень структурну діаграму дослідної сталі з C=0,84%, Mn=0,95%, Si=0,44%, V=0,01%, Ca=0,0006%. Показано, що при швидкості охолодження до 5,9°C/с розпад аустеніту відбувається з утворенням перліту; при 5,9°C/с ... 64,3°C/с структура сталі складається з перліту і бейніту; з подальшим збільшенням швидкості до 118,3 °C/с структура складається переважно з мартенситу.

В результаті досліджень отримано залежність зміни дисперсності перліту від інтенсивності охолодження дослідної сталі з C=0,84%, Mn=0,95%, Si=0,44%, V=0,01%, Ca=0,0006% та залежність твердості сталі від міжпластинчастої відстані перліту при швидкості охолодження 0,06...5,9 °C/с.

В роботі застосовано математичну модель, яка дозволяє прогнозувати зміну температури, середню миттєву швидкість та середнє напруження по перерізу

зразка на прогартовуваність згідно EN ISO 642:1999, в процесі безперервного однобічного охолодження. Модель може бути використана для визначення необхідних параметрів термічної обробки залізничних рейок з досягненням необхідної структурної складової і твердості.

Розроблено хімічний склад дослідних сталей для залізничних рейок і проведена виплавка в лабораторних умовах злитків масою до 10 кг. Встановлено позитивний вплив гарячої пластичної деформації і подальшої термічної обробки на твердість. Після гарячої пластичної деформації в порівнянні з литим станом приріст твердості склав $\sim 14,1\%$; після гарячої пластичної деформації з подальшою термічною обробкою (без відпуску) приріст твердості склав $\sim 39,4\%$.

Проведено рентгеноструктурний аналіз та встановлено, що сталь 2 (0,70% C, 0,44% Si, 0,76% Mn, 0,0004% V) має більші розміри блоків мозаїки на 1,72%, меншу щільність дислокацій (відображення 110) на 3,5%, більшу щільність дислокацій (відображення 220) на 0,8%. Сталь 3 (0,80% C, 0,47% Si, 0,97% Mn, 0,0001% V) - збільшився середній розмір блоків мозаїки на 14%, збільшились напруження другого роду на 15% і щільність дислокацій на 29%. Сталь 4 (0,84% C, 0,44% Si, 0,95% Mn, 0,0103% V) в порівнянні з сталлю 1 (0,75% C, 0,33% Si, 0,89% Mn) мають менше значення блоків мозаїки на 5,3%, щільність дислокацій (відображення 110 та 220) збільшилась на 10 та 4 % відповідно. При порівнянні дослідних сталей 5 (0,90% C, 0,39% Si, 0,89% Mn, 0,0006% V) та сталі 1 (0,75% C, 0,33% Si, 0,89% Mn) встановлено, що розмір блоків мозаїки зменшився на 2,5 %, щільність дислокацій (відображень 110 та 220) збільшився на 5% та 17% відповідно.

В роботі на основі результатів рентгенофазового аналізу після термічної обробки дослідних сталей встановлено наявність виділень Fe_3C , які мають максимуми на тих самих кутах, що і α -Fe (матриця).

В результаті лабораторних досліджень, для дослідно-промислового опробування виробництва залізничних рейок рекомендовано наступний хімічний склад, % мас: C=0,84-0,92; Si=0,35-0,45; Mn= 0,80-0,95; V \leq 0,0015; B=0,003-0,005%, [N]=0,012-0,015%.

Ключові слова: Металопродукція залізничного призначення, фазовий склад, хімічний склад, термічна обробка, механічні властивості, структура, пластичність, математичне моделювання, модель, прогноз.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Монографії

1. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Рослик О. В., Майстренко К. М., **Подольський Р. В.** (2020). *Розробка сталей для металопродукції залізничного призначення: монографія*. Дніпро: Домінанта-принт. 298 с.

2. **Подольський Р. В.**, Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Романова Н. С., Сафронова А. О., Клемешов Е.С. (2022). *Застосування спеціалізованого програмного забезпечення в матеріалознавстві та термічній обробці металів та сплавів: методичний посібник*. Дніпро: Україн. держ. ун-т науки і технол. 66 с.

Публікації в зарубіжних фахових виданнях або виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних

3. Babachenko O. I., Kononenko G. A., **Podolskyi R. V.** (2021). Development of a calculated model of temperature change of rail steel K76F to determine the parameters of heat treatment, which will provide a given structural state and performance properties. *Science and innovation*. №4, 25-32. DOI: [10.15407/scine17.04.025](https://doi.org/10.15407/scine17.04.025) (Scopus)

4. Babachenko, O.I., Kononenko, H.A., **Podolskyi, R.V.**, Safronova O.A. (2021). Steel for Railroad Rails with Improved Operating Properties. *Mater Sci*. T.56, №6, 814–819. DOI: [10.1007/s11003-021-00499-1](https://doi.org/10.1007/s11003-021-00499-1) (Scopus)

5. Babachenko O. I., Kononenko G. A., **Podolskyi R. V.**, Safronova O.A., Taranenko A.O. (2022). Analysis of the structure of samples of rail steels of the new generation with improved operational properties. Part 1, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, T.44, № 12, 1661—1677. DOI: [10.15407/mfint.44.12.1661](https://doi.org/10.15407/mfint.44.12.1661) (Scopus)

6. Babachenko O. I., Kononenko G. A., **Podolskyi R. V.**, Safronova O.A., Baskevich O.S. (2023). Analysis of the structure of samples of rail steels of the new generation with improved operational properties. Part 2, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, T.45, № 1, 137—156. DOI: [10.15407/mfint.45.01.0137](https://doi.org/10.15407/mfint.45.01.0137) (Scopus)

Публікації у наукових фахових виданнях України

7. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., **Подольський Р. В.** (2022). Дослідження кінетики розпаду аустеніту при безперервному охолодженні сталі з 0,84% С, 0,44% Si, 0,95% Mn, 0,01% В, 0,0006% Са для залізничних рейок нового покоління. *Український журнал будівництва та архітектури*. №5, 7-12. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.251022.7.885

8. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., **Подольський Р. В.**, Сафронова О. А. (2021). Дослідження мікроструктури і твердості дослідних рейкових сталей в литому стані, після гарячої пластичної деформації і термічної обробки. *Метал та лиття України*. 1, 81-86. DOI:[10.15407/steelcast2021.01.081](https://doi.org/10.15407/steelcast2021.01.081)

9. Бабаченко О. І., Дьоміна К. Г., Кононенко Г. А., **Подольський Р. В.** (2020). Аналіз впливу деформаційного пророблення безперервнолитих заготовок на макро- і мікроструктуру конструкційних сталей (огляд). *Металознавство та термічна обробка металів*. 91 (4), 17-29. DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.241120.17.687

10. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., **Подольський Р. В.**, Сафронова О. А. (2020). Сталь для залізничних рейок з поліпшеними експлуатаційними властивостями. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 56 (6), 82-87. (http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2020_56_6_13)

11. **Подольський Р. В.**, Сафронова О. А., Меркулов О. Є., Кононенко Г. А., Бабаченко О. І., Сафронов О. Л. (2022). Аналіз відповідності дослідних сталей для залізничних рейок сучасним стандартам України та ЄС. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 36, 362-369. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-362-369.

Публікації, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

12. Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Дьоміна К.Г., **Подольський Р.В.** (2019). Дослідження впливу швидкості охолодження на структурний стан сталі К76Ф для звичайних рейок широкої колії. *Збірник наукових праць XV міжнародної конференції «Стратегія якості в промисловості і освіті»*. (3 – 6 червня 2019 р., м. Варна), 19-24

13. **Подольський Р. В.**, Дейнеко Л. М. (2020). Визначення подальших напрямів підвищення експлуатаційної надійності залізничних рейок нового покоління. *Всеукраїнська науково-технічна конференція "Молодая академия 2020"*. (21-22 травня 2020 р., м. Дніпро), 59.

14. **Подольський Р. В.**, Сафронова О. А., Бабаченко О. І., Кононенко Г. А. (2020). Дослідження впливу термічної обробки на формування мікроструктури та твердості дослідних рейкових сталей. *Всеукраїнська конференція молодих вчених "Молоді вчені - 2020"*. (12 березня 2021 р., Дніпро), 53–56.

15. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., **Подольський Р. В.** (2020). Імітаційне моделювання зміни теплового поля залізничної рейки під час диференційної термічної обробки. *VI Міжнародна науково технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем»*. (4-6 листопада 2020р., Дніпро), 17–18.

16. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., **Подольський Р. В.**, Сафронова О. А. (2020). Дослідження впливу режимів термічної обробки дослідних сталей для залізничних рейок нового покоління на механічні властивості. *Збірник наукових праць Інституту чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України «Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії»*. 247-255.

17. Бабаченко О.І., **Подольський Р.В.**, Кононенко Г.А., Сафронова О.А. (2019). Порівняльний аналіз способів термічної обробки залізничних рейок та визначенням подальших напрямків підвищення їх експлуатаційної надійності. *Збірник наукових праць Інституту чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України «Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії»*. 219-231.

18. Бабаченко О. А., Кононенко Г. А., **Подольський Р. В.** (2020). Дослідження мікроструктури та розподілу твердості рейок по перерізу при термічній обробці головки рейки, які створюються при виробництві за поточною технологією. *Матеріали міжнародної наукової конференції «Міждисциплінарні наукові дослідження: особливості та тенденції»*. (4 грудня 2020р, Чернігів), 50–56.

19. Бабаченко О.І., Дьоміна К.Г., Кононенко Г.А., Сафронова О.А., **Подольський Р.В.** (2021). Аналіз існуючих способів підвищення якості металопродукції залізничного призначення. *Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Литво. Металургія. 2021»*. (18-20 травня 2021 р, Запоріжжя), 256–259.

20. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Меркулов О.Є. **Подольський Р. В.**, Клемешов Є. С., Сафронова О. А. (2021). Моделювання фазовоструктурних перетворень у сталі для залізничних рейок нового покоління. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 212-222.

21. **Подольський Р.В.**, Сафронова О.А., Меркулов О.Є., Кононенко Г.А. (2022). Виготовлення рейкової сталі нового покоління. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні»*. (15-17 березня 2022, Дніпро), 244–247. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2022.01.044

22. **Подольський Р.В.**, Сафронова О.А., Меркулов О.Є., Кононенко Г.А. (2022). Аналіз вимог існуючої вітчизняної і світової нормативно-технічної документації до залізничних рейок. *Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції "Нові матеріали і технології в машинобудуванні"*. (28-29 квітня 2022, Київ), 155–157. (<http://metalcasting.kpi.ua/2022/paper/view/26318>)

23. **Подольський Р.В.**, Сафронова О.А., Меркулов О.Є., Кононенко Г.А. (2022). Визначення та систематизування шляхів підвищення зносостійкості залізничних рейок. *Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Литво. Металургія. 2022»*. (04-06 жовтня 2022 р, Харків-Київ), 217–219. (<https://files.nas.gov.ua/PublicMessages/Documents/0/2022/10/221010082843999-9454.pdf>)

ABSTRACT

Podolskyi R.V. Development of chemical composition and modes of heat treatment of high-strength rails of pearlite class steels.— Qualification scientific work regarded as an equivalent to a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy PhD in specialty 132 - "Material Science". - Ukrainian State University of Science and Technology. - Dnipro, 2023.

The dissertation is devoted to the development of the chemical composition of steels and technological parameters of heat treatment of railway rails at enterprises of Ukraine, which ensure the improvement of operational properties.

It is shown in the work that rails of Ukrainian production according to current technology are inferior to foreign analogues in terms of mechanical properties and, as a result, in operational durability. The throughput capacity of rails produced in Ukraine is 0.5 billion gross tons, while a similar indicator in France, Japan is 1 billion gross tons, i.e. 2 times more. It is shown that increasing the strength characteristics of steel due to the development of a new chemical composition and heat treatment leads to an increase in operational characteristics.

The influence of chemical elements on the final structure and mechanical properties of steel was studied. Based on these studies, 3 experimental chemical compositions of steels were recommended for laboratory smelting and further research.

From the literature analysis, it was established that steels used in the production of railway rails require cooling rates in the range of 0.63...18.2°C/s to achieve pearlite structure. It is shown that for steel 75XГCM the required cooling rate is from 0.63...0.14°C/s, since the use of alloying elements Cr, Mn, Si, Mo increases the incubation period. Thus, the region of pearlitic transformation becomes more prone to move towards less intensive cooling rates. In M76T steel, the pearlite structure is formed at a cooling rate in the range of 9.2...18.2°C/s, in R350LHT steel - at a cooling rate of about 5°C/s. In E76XΦ and E76XAΦ steels, which contain chromium, after cooling at rates of 1 °C/s and less, as a result of the disintegration of supercooled austenite, in addition to the ferrite-

carbide mixture of the pearlite type, the formation of excess ferrite is observed. In E76F steel, the cooling rate required for the formation of the pearlite structure was up to 10°C/s .

Modern global manufacturers of rail products have each chosen their own individual path of technological solutions (applied production and thermal strengthening technologies) to achieve the properties according to which the products are manufactured. This list can be divided into rails without thermal strengthening (Poland, Italy), rails with differentiated thermal strengthening from rolling heating (Japan, Austria, USA), rails with differentiated thermal strengthening from separate induction heating (France, Canada (now the factory is closed), Ukraine), rails with volume hardening in oil from separate furnace heating (Russia).

Based on the results of the analysis of literary sources, a complex of studies was carried out with the aim of establishing the regularities of the formation of the structural state and mechanical properties at the intersection of the head of railway rails in the conditions of Ukrainian production, made of high-carbon steel, microalloyed with vanadium (K76F brand). Studies of the microstructure of thermally strengthened rails of Ukrainian production have been conducted. The presence of heterogeneity of the structure on the rolling surface of the rail and the low dispersity of the carbide phase at a depth of 11 mm from the rolling surface of the product were established.

In the work, a study was conducted, from which it was established that the existing heat treatment technology used in Ukraine cannot provide a high level of hardness in the section of the rail head (up to a depth of 20 mm), which meets the requirements of foreign standards.

The work uses a mathematical model that predicts changes in temperature fields and the instantaneous cooling rate in a railway rail during differential cooling. The applied model allows determining the required heat treatment parameters for the formation of structural components and achieving a regulated set of mechanical properties of steel. It has been established that the current production technology using heat strengthening does not allow the cross-sectional hardness values of the railway rail to be reached at the level of European standards, which is due to insufficiently intense cooling, namely the central sections of the rail head, the temperature of which is -680°C .

As part of the research, it was established that in order to ensure hardness (370 HB) in the axial sections of the rail head (depth 20 mm) in accordance with the requirements of European standards, there is a significant need for the development of new promising heat treatment parameters or the development of promising chemical compositions of steels that will increase the intensity of cooling in the central sections of the rail head.

As a result of dilatometric studies, a diagram of the decomposition of undercooled austenite of the experimental steel with C=0.84%, Mn=0.95%, Si=0.44%, B=0.01%, Ca=0.0006% was constructed and it was established that at cooling rates of 0.06-5.9°C/s the structure consists mainly of pearlite of different dispersion, with an increase in the cooling rate up to 64.3°C/s the formation of bainite takes place with a subsequent change in morphology from feathery to acicular.

It was built as a result of microstructural studies, the structural diagram of the experimental steel with C=0.84%, Mn=0.95%, Si=0.44%, B=0.01%, Ca=0.0006%. It is shown that at a cooling rate of up to 5.9°C/s, austenite disintegrates with the formation of pearlite; at 5.9°C/s ... 64.3°C/s the steel structure consists of pearlite and bainite; with a further increase in speed to 118.3 °C/s, the structure consists mainly of martensite.

As a result of the research, the dependence of the change in pearlite dispersion on the intensity of cooling of the test steel with C=0.84%, Mn=0.95%, Si=0.44%, B=0.01%, Ca=0.0006% and the dependence of steel hardness on the interlaminar distance of pearlite at a cooling rate of 0.06...5.9 °C/s.

The work used a mathematical model that allows predicting the change in temperature, the average instantaneous speed and the average stress along the section of the sample for hardenability according to EN ISO 642:1999, in the process of continuous one-sided cooling. The model can be used to determine the necessary parameters of thermal treatment of railway rails to achieve the required structural component and hardness.

The chemical composition of experimental steels for railway rails was developed and ingots weighing up to 10 kg were smelted in laboratory conditions. A positive effect of hot plastic deformation and subsequent heat treatment on hardness was established. After hot plastic deformation, in comparison with the cast state, the increase in hardness

was ~14.1%; after hot plastic deformation followed by heat treatment (without tempering), the increase in hardness was ~39.4%.

X-ray structural analysis was carried out and it was established that steel 2 (0.70% C, 0.44% Si, 0.76% Mn, 0.0004% B) has larger sizes of mosaic blocks by 1.72%, less dislocation density (reflection 110) by 3.5%, the density of dislocations (reflection 220) by 0.8%. Steel 3 (0.80% C, 0.47% Si, 0.97% Mn, 0.0001% B) - the average size of the mosaic blocks increased by 14%, the second-order stresses increased by 15% and the dislocation density by 29%, Steel 4 (0.84% C, 0.44% Si, 0.95% Mn, 0.0103% B) compared to Steel 1 (0.75% C, 0.33% Si, 0.89% Mn) have a smaller value of mosaic blocks by 5.3%, the density of dislocations (reflections 110 and 220) increased by 10 and 4%, respectively. When comparing experimental steels 5 (0.90% C, 0.39% Si, 0.89% Mn, 0.0006% B) and steel 1 (0.75% C, 0.33% Si, 0.89% Mn) it was found that the size of the mosaic blocks decreased by 2.5%, the size of dislocations (reflections 110 and 220) increased by 5% and 17%, respectively.

In the paper, based on the results of X-ray phase analysis after heat treatment, the presence of Fe_3C , which have maxima at the same angles as $\alpha\text{-Fe}$ (matrix), was established.

As a result of laboratory studies, the following chemical composition, mass %, is recommended for experimental and industrial testing of the production of railway rails: C=0.84-0.92; Si=0.35-0.45; Mn= 0.80-0.95; $V \leq 0.0015$; B=0.003-0.005%, [N]=0.012-0.015%.

Keywords: Metal products for railway purposes, phase composition, chemical composition, heat treatment, mechanical properties, structure, plasticity, mathematical modeling, model, forecast.