

О. І. Бабаченко, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-4710-0343
Г. А. Кононенко, д.т.н., с.д., ORCID 0000-0001-7446-4105
О. Є. Меркулов, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7867-0659
Р. В. Подольський, м.н.с., ORCID 0000-0002-0288-0641
Є. С. Клемешов, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-7446-410X
О. А. Сафронова, м.н.с., ORCID 0000-0002-4032-4275

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

МОДЕЛЮВАННЯ ФАЗОВО-СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У СТАЛІ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Анотація. Процес експлуатації транспортних засобів визначається взаємодією колеса і рейки. Результатом є вплив, що виникає від тертя кочення і особливо від тертя ковзання колеса по рейці при гальмуванні, відносно цих змін відбувається істотне зростання інтенсивності зношування коліс рухомого складу. Виходячи з досліджень останніх років відомо, що міцність перлітних рейкових сталей досягла межі. Виходячи з літературного аналізу було визначено сталі, що застосовуються в світовій практиці для виробництва залізничних рейок з бейніту та проведено співставлення з хімічними складами сталей, що застосовуються в різних сферах в Україні. З метою визначення впливу базових хімічних елементів через відомі ізотермічні (ТТТ) діаграми та фактичного хімічного складу на утворення структури з подальшою побудовою термодинамічних (ССТ) діаграм. Перспективним є підхід до підвищення опору через виготовлення залізничних рейок з бейнітною структурою. Методом математичного моделювання досліджено закономірності кінетики розпаду аустеніту марки 30ХГС з 0,28% С, 1,49% Si, 0,92% Mn, 0,99% Cr. Визначено інтервали швидкостей охолодження, в межах яких спостерігається зміна механізму структуроутворення при розпаді аустеніту. Показано, що при швидкості охолодження до $\sim 3^\circ\text{C}/\text{c}$ розпад аустеніту відбувається з утворенням доєвтектоїдного фериту і перліту; при $3^\circ\text{C}/\text{c} \dots 10^\circ\text{C}/\text{c}$ структура сталі складається з доєвтектоїдного фериту, перліту і бейніту; при $10^\circ\text{C}/\text{c} \dots 20^\circ\text{C}/\text{c}$ - з доєвтектоїдного фериту, перліту, бейніту і мартенситу; при $20^\circ\text{C}/\text{c} \dots 30^\circ\text{C}/\text{c}$ - з бейніту і мартенситу; при швидкості охолодження $50^\circ\text{C}/\text{c}$ розпад аустеніту відбувається з утворенням мартенситу. Критична швидкість охолодження для досліджуваної сталі знаходиться в інтервалі $30 \dots 50^\circ\text{C}/\text{c}$. Розроблено хімічний склад дослідних сталей для залізничних рейок і проведена виплавка в лабораторних умовах злитків масою до 10 кг.

Ключові слова: залізнична рейка, рейкова сталь, бейніт, моделювання, 30ХГС.

Посилання для цитування: Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Меркулов О. Є. Подольський Р. В., Клемешов Є. С., Сафронова О. А. Моделювання фазово-структурних перетворень у сталі для залізничних рейок нового покоління.

Стан питання. Процес експлуатації транспортних засобів визначається взаємодією колеса і рейки. Від параметрів цього багато в чому залежать безпека руху та основні техніко-економічні показники господарств колії та рухомого складу. Результатом є вплив, що виникає від тертя кочення і особливо від тертя ковзання колеса по рейці при гальмуванні, відносно цих змін відбувається істотне зростання інтенсивності зношування коліс рухомого складу [1-2], яке, в свою чергу, може призводити до катастрофічних результатів для локомотивного господарства. Також в процесі експлуатації рейки [3-4] в більшості випадків утворюються дефекти, що мають характер складнонавантаженого стану: її головка піддається зношуванню, зминанню, розтріскуванню і викришуванню, в металі можуть розвиватися контактнo-втомні пошкодження [5].

З аналізу робіт різних авторів (Керенцева Д. Є., Бунькова Т. Г., Ражковського О. О. та ін.) слідує, що для збільшення часу експлуатації залізничної рейки потрібно досягнення в металі головки певного рівня твердості, зниження концентрації вуглецю і введення до складу сталей легуючих елементів з метою твердорозчинного зміцнення, зниження кількості карбідоутворюючих елементів. Доцільно також розглядати питання про формування структурного стану металу в області поверхні катання, тобто перехід до продуктів проміжного перетворення, зокрема, нижнього бейніту [6-8].

На підставі робіт Ражковського О. О. та Бунькової Т. Г., що провели математичне та практичне опробування роботи системи «колесо- рейка», встановлено оптимальне співвідношення твердості матеріалу, яке склало 0,91 (твердість 363НВ - колесо, 401НВ - рейка). Один з напрямків підвищення показників якості - це розробка хімічного складу та термічної обробки сталі для залізничних рейок нового покоління [14].

Виходячи з досліджень останніх років [9-15] відомо, що міцність перлітних рейкових сталей досягла межі [16]. Крім того, збільшення вмісту вуглецю вплине на ударну в'язкість та зварюваність матеріалів рейок [17]. Наприклад, у порівнянні з доевтектоїдною рейкою R200 подовження заевтектоїдної рейки R400НТ знижується на 6%. Отже, існує гостра потреба в інших альтернативних матеріалах. Застосування бейнітної сталі, що забезпечує як високу міцність, так і відмінну пластичність, вважається одним з найбільш перспективних напрямків.

Мета роботи: визначення впливу базових хімічних елементів через відомі ТТТ діаграми та фактичного хімічного складу на утворення структури з подальшою побудовою ССТ діаграм.

Матеріали та методики. Виходячи з літературного аналізу було визначено сталі, що застосовуються в світовій практиці для виробництва залізничних рейок з бейніту та проведено співставлення з хімічними складами сталей, що застосовуються в різних сферах в Україні. З метою визначення впливу базових хімічних елементів через відомі ізотермічні (ТТТ) діаграми [18-21] та фактичного хімічного складу (таблиця 1) [18-19] на утворення структури з подальшою побудовою термодинамічних (ССТ) діаграм.

Таблиця 1 – Хімічний склад сталі 30ХГС [20].

Маркування	Хімічний елемент, ваг. %				
	C	Si	Mn	Cr	Ni (Mo)
30ХГС	0,28	1,49	0,92	0,99	0,12

Як прийнято, при побудові термодинамічних (кривих) діаграм якщо за початок перетворення приймають момент переходу через критичні точки A_1 та A_3 , то лінії на діаграмах також вказують тривалість перебування сталі в субкритичному інтервалі при безперервному охолодженні, що забезпечує отримання певного відсотку розпаду переохолодженого аустеніту, а ізотермічні діаграми зазвичай будуються у тих самих координатах і вказують саме тривалість ізотермічної витримки при певних температурах, необхідної для отримання того чи іншого ступеня розпаду. Ґрунтуючись на цьому вдається наочно зіставити кінетику перетворення в ізотермічних умовах і за безперервного охолодження [18-19]. З урахуванням отриманих результатів експериментів за допомогою мікроструктурних досліджень, а також запису дилатометричних кривих отримуємо загальне, досить, правильне уявлення про перебіг перетворення в процесі і про вплив на нього швидкості охолодження. При одночасному використанні ізотермічних діаграм та використанні розрахунку можна створювати діаграми ССТ. За основу, як і в інших розрахункових методах, прийняті дані ізотермічних діаграм, але вони доповнені результатами обширних дилатометричних досліджень. На сьогодні дані дослідження можна спростити шляхом внесення відомих результатів щодо ізотермічних діаграм спільно з діаграмами структурного стану.

Моделювання проводилося за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) в середовищі програмного комплексу QForm [10].

Кінцево-елементний аналіз процесу загартування експериментальної заготовки проводився за такими етапами:

1. Побудова геометричних об'єктів процесу загартування. Побудова геометрії експериментальної CAD-моделі проводилося в програмі КОМПАС. Креслення експортувалось в форматі *.stp в QForm. Потім геометрична модель розбивалася на плоскі чотирихвузлові кінцеві елементи з одним ступенем свободи (температура) розміром 2 мм.

2. Завдання початкових умов. В якості вихідних умов задавалася початкова температура перед загартуванням рівною 900°C з витримкою 1 хв на 1 мм перерізу деталі (1 год 40 хв).

3. Завдання граничних умов. У фізичному сенсі граничні умови приймалися як охолоджувачі вода та масло, які задавалися у вигляді даних у внутрішню бібліотеку за результатами аналізу в форматі *.qdat. Вони характеризуються коефіцієнтом тепловіддачі і температурою охолоджувача. Коефіцієнт тепловіддачі задавався як функція від температури поверхні металу.

Моделювання проводилося для сталі 30ХГС. Для цієї марки сталі через аналіз даних визначались та вносились дані зміни мікроструктури в момент часу через відомі ТТТ діаграми.

4. Для марки сталі 30ХГС визначали властивості за допомогою комп'ютерного методу «Call Phad», та «JmatPRO» та відомої ТТТ (рис. 1а). Комп'ютерний метод «Call Phad» та «JmatPRO» за хімічним складом сталі дозволяє визначити різні її мікроструктурні стани, що змінюються в процесі охолодження. Для вирішення теплової задачі задавалися наступні температурозалежні властивості сталі: щільність, питома теплоємність і температуропровідність.

5. Завдання чисельних параметрів розв'язувача. При вирішенні теплової задачі приймалися такі параметри розв'язувача: метод рішення - квазістатичний; тип розв'язувача - ітераційний; інтегрування за часом - неявне.

6. На останньому етапі моделювання проводилася адаптація моделі до реального процесу (зіставлення експериментальних даних в контрольних точках з чисельними результатами, подальше коректування моделі) і аналіз оптимальних результатів моделювання. Результати моделювання (температура в вузлах моделі на різній глибині) зіставлялися з експериментальними даними (ТТТ діаграми) і при значному розходженні вносилися поправки в чисельну модель.

Результатом моделювання процесу загартування є графік зміни швидкості охолодження, а також структурна діаграма зміни мікроструктури в момент часу. Значення швидкості охолодження експериментальної CAD- моделі в різних її зонах були отримані шляхом рішення методом кінцевих елементів диференціального рівняння теплопровідності (рівняння Фур'є). Ці дані були основними критеріями для

побудови об'ємних модельованих термокінетичних (CCT) діаграм (рис. 1, в). Результати моделювання показали, що при нагріванні зразків дослідних хімічних складів зі швидкістю 30°C/хв в сталі поліморфне $\alpha \rightarrow \gamma$ - перетворення починається в температурі $\sim 762^\circ\text{C}$ (A_{c1}), закінчується при $\sim 829^\circ\text{C}$ (A_{c3}). Для побудови CCT зразки нагрівали до температури 900°C (на $\sim 71^\circ\text{C}$ вище температури A_{c3} для даної сталі).

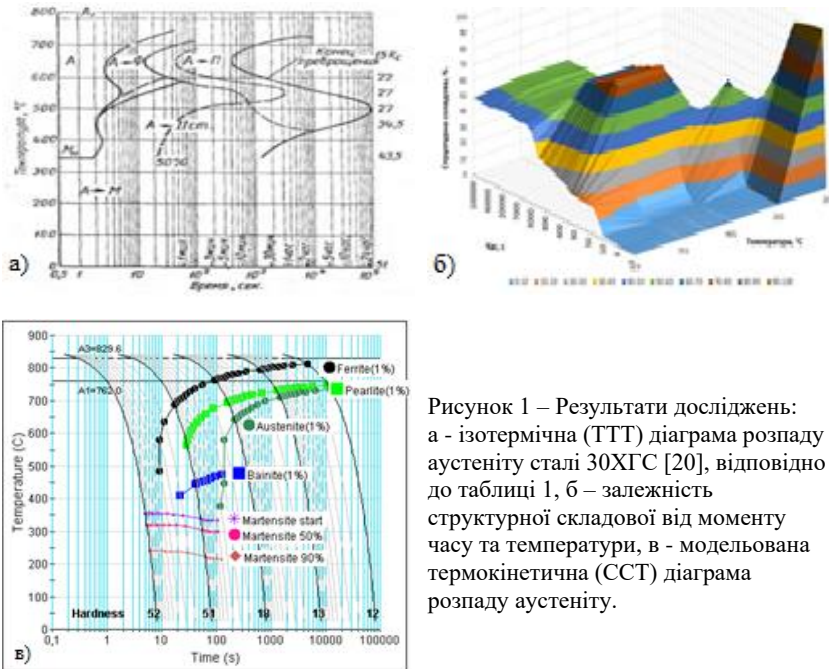


Рисунок 1 – Результати досліджень: а - ізотермічна (ТТТ) діаграма розпаду аустеніту сталі 30ХГС [20], відповідно до таблиці 1, б – залежність структурної складової від моменту часу та температури, в - модельована термокінетична (CCT) діаграма розпаду аустеніту.

На ТКД (рис. 1, в) для кожної швидкості охолодження нанесені значення твердості по Роквеллу і об'ємні частки структурних складових, виражені у відсотках. Аналіз ТКД (рис.1) показує, що температури початку і завершення утворення фериту, перліту і бейніту помітно зменшуються при збільшенні швидкості охолодження. Зі збільшенням швидкості охолодження відзначається тенденція зростання значень твердості, що пов'язано зі структурними змінами, що відбуваються в сталі: підвищенням дисперсності структурних складових, зменшенням кількості фериту і перліту в структурі, зростанням об'ємної частки бейніту і мартенситу.

Визначено інтервали швидкостей охолодження, в межах яких спостерігається зміна механізму структуроутворення при розпаді аустеніту. Показано, що при швидкості охолодження до $\sim 3^\circ\text{C}/\text{c}$ розпад аустеніту відбувається з утворенням доєвтектоїдного фериту і перліту; при $3^\circ\text{C}/\text{c} \dots 10^\circ\text{C}/\text{c}$ структура сталі складається з доєвтектоїдного фериту, перліту і бейніту; при $10^\circ\text{C}/\text{c} \dots 20^\circ\text{C}/\text{c}$ - з доєвтектоїдного фериту, перліту, бейніту і маргенситу; при $20^\circ\text{C}/\text{c} \dots 30^\circ\text{C}/\text{c}$ - з бейніту і маргенситу; при швидкості охолодження $50^\circ\text{C}/\text{c}$ розпад аустеніту відбувається з утворенням маргенситу. Критична швидкість охолодження для досліджуваної сталі знаходиться в інтервалі $30 \dots 50^\circ\text{C}/\text{c}$.

В умовах ІЧМ НАН України за результатами моделювання та аналітичних досліджень впливу хімічних елементів на механічні властивості конструкційних сталей були розроблені чотири варіанти дослідних сталей (табл. 2). Сталь 1 за хімічним складом базових елементів відповідає сталі 45ХГС з додаванням V. Сталь 2 за хімічним складом базових елементів відповідає сталі 30ХГС з додаванням Мо та V. Сталь 3 за хімічним складом повинна забезпечити після термічної обробки формування однорідної структури бейніту з високим рівнем механічних властивостей. Сталь 4 за хімічним складом відрізняється від сталі 2 додаванням Мо, V; а Si та Mn - до 1,5 та 1,7% відповідно, які будуть вводитися для забезпечення після термічної обробки формування структури безкарбідного бейніту.

Таблиця 2 – Фактичний хімічний склад дослідних плавок рейкових сталей, % мас.

№ злитка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V
Сталь 1	0,47	0,59	0,9	0,02	0,02	1,01	0,15	0,03	0,02	0,02	0,07
Сталь 2	0,37	1,02	1,38	0,02	0,02	0,77	0,19	0,03	0,01	0,02	0,09
Сталь 3	0,37	1,42	1,56	0,01	0,01	1,17	0,21	0,04	0,03	0,02	0,23
Сталь 4	0,37	1,11	1,35	0,02	0,02	0,74	0,17	0,03	0,03	0,03	0,15

Висновки

1. Показано, що найбільш ефективним способом підвищення твердості сталей є управління їх хімічним складом шляхом легування, мікролегування і зменшення кількості шкідливих домішок. Перспективним є підхід до підвищення опору через виготовлення залізничних рейок з бейнітною структурою.

2. Методом математичного моделювання досліджено закономірності кінетики розпаду аустеніту марки 30ХГС з 0,28% C, 1,49% Si, 0,92% Mn, 0,99% Cr. Визначено інтервали швидкостей охолодження, в межах яких

спостерігається зміна механізму структуроутворення при розпаді аустеніту. Показано, що при швидкості охолодження до $\sim 3^\circ\text{C}/\text{c}$ розпад аустеніту відбувається з утворенням доєвтектоїдного фериту і перліту; при $3^\circ\text{C}/\text{c}$... $10^\circ\text{C}/\text{c}$ структура сталі складається з доєвтектоїдного фериту, перліту і бейніту; при $10^\circ\text{C}/\text{c}$... $20^\circ\text{C}/\text{c}$ - з доєвтектоїдного фериту, перліту, бейніту і мартенситу; при $20^\circ\text{C}/\text{c}$... $30^\circ\text{C}/\text{c}$ - з бейніту і мартенситу; при швидкості охолодження $50^\circ\text{C}/\text{c}$ розпад аустеніту відбувається з утворенням мартенситу. Критична швидкість охолодження для досліджуваної сталі знаходиться в інтервалі $30 \dots 50^\circ\text{C}/\text{c}$.

3. Розроблено хімічний склад дослідних сталей для залізничних рейок і проведена виплавка в лабораторних умовах злитків масою до 10 кг.

Перелік посилань

1. Шур Е. А. К вопросу об оптимальном соотношении твердости рельсов и колес. Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути: Материалы научно-практической конференции. Москва : ВНИИЖТ. 2003. С. 87-93.
2. Harder R. Creep Force – Creepage and Frictional Work Behaviour in Non-Hertzian Counter formal Rail/Wheel Contacts. Proceedings of INHA'99 STS-Conference on Wheel/Rail Interface. Moscow. 1999. V. 1. p. 207 – 214.
3. Воробьев А. А. Исследование напряженного состояния пятна контакта колеса и рельса. *Вестник ИрГТУ*. 2009. С. 42–47.
4. Paul B., Hashemi J. User's Manual for Program CONTACT. Technical Report No. 4. FRA/ORD-78/27/PB286097. NTIS. Springfield. VA. Sept. 1977.
5. Большаков В. И., Долженков И. Е., Зайцев А. В. Оборудование термических цехов. технологии термической и комбинированной обработки металлопродукции. Изд. 2-е. Днепропетровск : РИА Днепр-VAL. 2010. 619 с.
6. Медовар Л. Б., Цыкуленко К. А., Цыкуленко А. К. Бейнитные стали для рельсов. *Проблемы специальной электрометаллургии*. 1998. № 3. С. 10-20.
7. Devis. K. Sawley. *Railway Track Structures*. 1998. 11. p.14-17.
8. Рельсовая сталь для железных дорог Северной Америки. ЖДМ. № 11-1999.
9. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Рослик О. В., Майстренко К. М., Подольський Р. В. Розробка сталей для металлопродукції залізничного призначення. Дніпро : «Домінанта-принт». 2021. 298 с.
10. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Розробка розрахункової моделі зміни температури рейкової сталі K76Ф для визначення параметрів термічної обробки. *Science and Innovation*. 2021. 17 (4). С. 25–32. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.025>
11. Подольський Р. В., Дейнеко Л. М. Визначення подальших напрямів підвищення експлуатаційної надійності залізничних рейок нового покоління. Всеукраїнська науково-технічна конференція "Молодая академия 2020". 2020. № 1. С. 59.
12. Подольський Р. В., Сафронова О. А., Бабаченко О. І., Кононенко Г. А. Дослідження впливу термічної обробки на формування мікроструктури та

- твердості дослідних рейкових сталей. Всеукраїнська конференція молодих вчених "Молоді вчені-2020". 2020. № 1. С. 53-56.
13. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Імітаційне моделювання зміни теплового поля залізничної рейки під час диференційної термічної обробки. VI Міжнародна науково технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем». 2020. № 6. С. 17–18.
 14. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронова О. А. Дослідження впливу режимів термічної обробки дослідних сталей для залізничних рейок нового покоління на механічні властивості. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2020. № 34. С.2 47-255. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2020-34-247-255>
 15. Babachenko O. I., Kononenko H. A., Podolskyi R. V., Safronova O. A. Steel for Railroad Rails with Improved Operating Properties. *Materials Science*. 2021, 56, p. 814–819. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00499-1>
 16. Sharma S., Sangal S., Mondal K. Wear behaviour of bainitic rail and wheel steels. *Materials Science and Technology*. 2016. 32 (4). 266–274. <https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1112537>
 17. Pointner P. High strength rail steels-The importance of material properties in contact mechanics problems. *Wear* 265 2008. 1373–1379. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.015>
 18. Попова Л. Е., Попов А.А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-растворах в сплавах титана: Справочник термиста. 3-е изд. Перераб. и доп. Москва : Металлургия. 1991. 503 с.
 19. Попов А. А., Попова Л. Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. Справочник термиста. Москва-Свердловск : Государственно научно-техническое издательство машиностроительной литературы. 1961. 430 с.
 20. Delbart G., Constant A. Courbes de transformation des aciers de fabrication francaise. Saint-Germain en Laye. 1956. 140 p.
 21. Винаров С. М. Авиационные стали. Оборонгиз. 1945. (переведены данные Дубинина Г. Н.).

References

1. Shur E.A. (2003). K voprosu ob optimal'nom sootnoshenii tverdosti rel'sov i koles [On the question of the optimal ratio of the hardness of rails and wheels]. *Sovremennye problemy vzaimodejstviya podvizhnogo sostava i puti: Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii [Proceedings of scientific-practical conference Modern problems of interaction between rolling stock and tracks]*. VNIIZhT. Moskva 2003. p.p. 87-93 [In Russian].
2. Harder R. (1999). *Creep Force – Creepage and Frictional Work Behaviour in Non-Hertzian Counter formal Rail/Wheel Contacts. Proceedings of IHHA'99 STS-Conference on Wheel/Rail Interface*. Moscow. 1999. Vol. 1. p.p. 207-214.
3. Vorob'ev A.A. (2009). Issledovanie naprjazhennogo sostojanija pjatna kontakta kolesa i rel'sa [Investigation of the stress state of the wheel-rail contact spot]. *Vestnik IrGTU [ISTU Bulletin]*, 2009, 42–47.

4. Paul B., Hashemi J. (1977). *User's Manual for Program CONTACT*. Technical Report No. 4. FRA/ORD-78/27/PB286097. NTIS. Springfield. VA. Sept. 1977.
5. Bol'shakov V.I., Dolzhenkov I.E., Zajcev A.V. *Oborudovanie termicheskikh cehov. tehnologii termicheskoi i kombinirovannoi obrabotki metalloprodukcii [Equipment for thermal shops. technologies of thermal and combined processing of metal products]*. 2nd ed. Dnepropetrovsk. RIA Dnepr-VAL. 2010. 619 p. [In Russian].
6. Medovar L.B., Cykulenko K.A., Cykulenko A.K. (1998). Bejnitnye stali dlja rel'sov [Bainitic steel for rails]. *Problemy special'noj jelektrometallurgii [Problems of special electrometallurgy]*, 1998, 10-20. [In Russian].
7. Devis K. (1998). Sawley. *Railway Track Structures*, 1998, 11, 14-17
8. Rel'sovaja stal' dlja zheleznyh dorog Severnoj Ameriki (1999). [Rail steel for North American railways]. *ZhDM*, 1999, 11. [In Russian].
9. Babachenko O.I., Kononenko G.A., Roslik O.V., Majstrenko K.M., Podol'skij R.V. (2021). Rozrobka stalej dlja metalloprodukcii zaliznichnogo pryznachennja [Development of steels for railway metal products]. Dnipro. «Dominanta-print». 2021. 298. [In Ukrainian].
10. Babachenko O.I., Kononenko G.A., Podolskyi R.V. (2021). Development of a model for calculating changes in K76F rail steel temperature to determine the heat treatment parameters. *Science and Innovation*, 2021, 17 (4), 25-32. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.025>
11. Podol'skij R.V., Dejneko L.M. (2020). Vznachennja podal'shij naprjamiv pidvishhennja ekspluatacijnoi nadijnosti zaliznichnih rejok novogo pokolinnja [Determination of further ways to improve the operational reliability of the new generation of railway tracks]. *Vseukrains'ka naukovo-tehnichna konferencija "Molodaja akademiya 2020" [All-Ukrainian scientific and technical conference "Young Academy 2020"]*, 2020, 1, p. 59. [In Ukrainian].
12. Podol'skij R.V., Safronova O.A., Babachenko O.I., Kononenko A.A. (2020). Doslidzhennja vplivu termichnoi obrobki na formuvannja mikrostrukturi ta tverdosti doslidnih rejkovih stalej [Research of influence of heat treatment on formation of microstructure and hardness of experimental rail steels]. *11 Vseukrains'ka konferencija molodih vchenih "Molodi vcheni-2020" [11 All-Ukrainian Conference "Young Scientists 2020"]*, 2020, 1, p.p. 53-56. [In Ukrainian].
13. Babachenko O.I., Kononenko G.A., Podol'skij R.V. (2020). Imitacijne modeljuvannja zmini teplovogo polja zaliznichnoi rejki pid chas diferencijnoi termichnoi obrobki [Simulation modeling of changes in the thermal field of the railway rail during differential heat treatment]. *VI Mizhnarodna naukovo tehnichna konferencija «komp'juterne modeljuvannja ta optimizacija skladnih sistem» [VI International Scientific and Technical Conference "Computer Modeling and Optimization of Complex Systems"]*, 2020, 6, p.p. 17-18. [In Ukrainian].
14. Babachenko O.I., Kononenko G.A., Podol'skij R.V., Safronova O.A. (2020). Doslidzhennja vplivu rezhimiv termichnoi obrobki doslidnih stalej dlja zaliznichnih rejok novogo pokolinnja na mehanichni vlastivosti [Research of influence of modes of heat treatment of experimental steels for railway rails of new generation on mechanical properties]. *Fundamental'ni i prikladni problemi chornoj metalurgii*

- [*Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*], 2020, 34, 247-255 [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2020-34-247-255>
15. Babachenko O.I., Kononenko H.A., Podolskyi R.V. et al. (2021). Steel for Railroad Rails with Improved Operating Properties. *Materials Science*, 2021, 56, 814–819 <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00499-1>
 16. Sharma S., Sangal S., Mondal K. (2016). Wear behaviour of bainitic rail and wheel steels. *Materials Science and Technology*, 2016, 32 (4), 266–274. <https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1112537>
 17. Pointner P. (2008). High strength rail steels - The importance of material properties in contact mechanics problems. *Wear*, 2008, 265, 1373-1379. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.015>
 18. Popova L.E., Popov A.A. (1991). *Diagrammy prevrashheniya austenita v staljah i beta-rastvorah v splavah titana: Spravochnik termista [Diagrams of austenite transformation in steels and beta-solutions in titanium alloys: Thermist's Handbook]*. (3th ed.). Moskva: Metalurgija. 1991. 503 p. [In Russian].
 19. Popov A.A., Popova L.E. (1961). *Izotermicheskie i termokineticheskie diagrammy raspada pereohlazhdennogo autenita: Spravochnik termista [Isothermal and thermokinetic diagrams of the decay of supercooled authenite. Thermist's handbook]*. Moskva-Sverdlovsk: Gosudarstvenno nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noj literatury. 1961. 430 p. [In Russian].
 20. Delbart G., Constant A. (1956). *Courbes de transformation des aciers de fabrication francaise*. Saint-Germain en Laye. 1956. 140p.
 21. Vinarov S.M. (1945). *Aviacionnye stali [Aviation steels]*. G. N. Dubinin (Ed.). Oborongiz. 1945. [In Russian].

O. I. Babachenko, Dr. Sci., Senior Researcher, ORCID 0000-0003-4710-0343

G. A. Kononenko, Dr. Sci., Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7446-4105

O. Ye. Merkulov, Dr. Sci., Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7867-0659

R. V. Podolskyi, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-0288-0641

E. S. Klemeshov, Ph.D., Researcher, ORCID 0000-0001-7446-410X

O. A. Safronova, Junior Researcher., ORCID 0000-0002-4032-4275

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

MODELING OF PHASE-STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN STEEL FOR NEW GENERATION RAILWAY TRACKS

Summary. The process of operation of vehicles is determined by the interaction of the wheel and rail. The result is the effect arising from the friction of rolling and especially from the friction of the wheel sliding on the rail during braking, in relation to these changes there is a significant increase in the intensity of wear of the wheels of rolling stock. Based on research in recent years, it is known that the strength of pearlitic rail steels has reached its limit. Based on the literature analysis, steels used in world practice for the

production of railway rails from bainite were identified and compared with the chemical compositions of steels used in various fields in Ukraine. In order to determine the influence of basic chemical elements through known isothermal (TTT) diagrams and the actual chemical composition on the formation of the structure with the subsequent construction of thermokinetic (CCT) diagrams. A promising approach is to increase resistance through the manufacture of railway rails with bainitic structure. The regularities of the decay kinetics of austenite grade 30HGS with 0.28% C, 1.49% Si, 0.92% Mn, 0.99% Cr were studied by the method of mathematical modeling. The intervals of cooling rates, within which the change of the mechanism of structure formation at austenite decay is observed, are determined. It is shown that at the cooling rate up to $\sim 3^\circ\text{C/s}$ the decay of austenite occurs with the formation of pre-eutectoid ferrite and perlite; at $3^\circ\text{C/s} \dots 10^\circ\text{C/s}$ the steel structure consists of pre-eutectoid ferrite, perlite and bainite; at $10^\circ\text{C/s} \dots 20^\circ\text{C/s}$ - from pre-eutectoid ferrite, perlite, bainite and martensite; at $20^\circ\text{C/s} \dots 30^\circ\text{C/s}$ - from bainite and martensite; at a cooling rate of 50°C/s the decay of austenite occurs with the formation of martensite. The critical cooling rate for the investigated steel is in the range of $30 \dots 50^\circ\text{C/s}$. The chemical composition of experimental steels for railway rails was developed and ingots smelting up to 10 kg were smelted in the laboratory.

Key words: railway rail, rail steel, bainite, modeling, 30HGS.

For citation: Babachenko O.I., Kononenko G.A., Merkulov O.Ye., Podolsky R.V., Klemeshov E.S., Safronova O.A. Modelyuvannya fazovo-strukturnykh peretvoren u stali dlya zaliznychnykh reyok novoho pokolinnya [Modeling of phase-structural transformations in steel for new generation railway tracks]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 2021, 35, 212-222. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-212-222

*Стаття надійшла до редакції збірника 23.11.21 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування
(Протокол засідання редакційної колегії
збірника №4 від 22 грудня 2021 року)*