

## РЕФЕРАТ

Роботи «Концептуальні основи вибору хімічного складу сталі для залізничних коліс з підвищеною стійкістю до утворення дефектів на поверхні кочення» авторів Кононенко Г.А. д.т.н., с.д., Снігура І.Р. канд.техн.наук., Подольський Р. В.

Залізничний транспорт є однією з найважливіших ланок у дорожньо-транспортному комплексі багатьох країн. Стратегічно важливим завданням є розробка конкурентоспроможних залізничних коліс, що мають службові та експлуатаційні характеристики на достатньому рівні відповідно до різних умов експлуатації. Одним із напрямків розвитку залізничного транспорту є збільшення навантаження на вісь. Але це може призвести до виникнення таких експлуатаційних дефектів як інтенсивне і нерівномірне зношування, накати, відколи. Для запобігання їх утворенню необхідно підвищувати характеристики міцності та твердості обода колеса. Існує ряд механізмів зміцнення сталі. Найдоступнішим у реалізації є твердорозчинне зміцнення базовими хімічними елементами, яке реалізується у вуглецевих сталях. Вміст вуглецю суттєво впливає на міцність та твердість, тому традиційно для високоміцних залізничних коліс застосовують вуглецеві сталі, що відрізняються підвищеним вмістом цього елемента. Але в такому випадку підвищується ймовірність утворення експлуатаційних дефектів в результаті теплового впливу, який виникає при складних умовах гальмування («білий шар», вищербини на повзуні). Таким чином, необхідна розробка методології обґрунтованого вибору вмісту хімічних елементів у сталі для залізничних коліс з підвищеною стійкістю до утворення дефектів, що експлуатуються при підвищених та високих навантаженнях на вісь та різних умовах гальмування, згідно з сучасними вимогами споживачів. При цьому в багатьох випадках високий рівень твердості та міцності повинен поєднуватися з не менш високими значеннями показників пластичності й в'язкості. Аналіз сучасних вимог до залізничних коліс показує, що в деяких випадках одночасно необхідно забезпечувати твердість обода на рівні 321- 415 НВ та відносно

видовження більше ніж 14% (колеса класу D згідно ААР М-107/М-208). Згідно ДСТУ ГОСТ 10791:2016 для високоміцних коліс марки Т твердість має бути не менше 320 НВ, а відносне видовження – не менше 9%. Досягнення відповідності якості залізничних коліс новим більш жорстким вимогам до залізничних коліс можливе тільки при комплексному підході до вдосконалення технології їх виробництва.

Таким чином, розвиток теоретичних положень про закономірності впливу хімічного складу та структурного стану сталей на механічні властивості, стійкість до утворення дефектів на поверхні кочення, розробка на цій основі хімічного складу сталі та технологічних параметрів термічної обробки (ТО) залізничних коліс, що забезпечують підвищення їх надійності і довговічності, є актуальною науково-технічною проблемою сучасного матеріалознавства, яка має наукове і практичне значення.

Набули розвитку уявлення про закономірності утворення дефектів на поверхні кочення залізничних коліс різних марок у процесі експлуатації. Їхнє утворення пов'язане з формуванням в результаті термічного впливу в поверхневих шарах обода колеса тендітної структурної складової - мартенситу, та його подальшого руйнування в процесі експлуатації.

На основі результатів фізичного моделювання процесу гальмування колеса встановлено залежність глибини мартенситного шару в обід колеса від вмісту вуглецю в межах 0,46-0,66%, що описується рівнянням другого ступеня та визначає чутливість залізничних коліс до утворення на поверхні кочення дефектів термічного походження.

Встановлено, що підвищення вихідної твердості (міцності) залізничних коліс за рахунок термічної обробки (без збільшення вмісту вуглецю в сталі) не впливає на їхню чутливість до утворення дефектів теплового походження..

Створено інтегровану базу даних та виконано розрахунково-аналітичну оцінку критичних температур фазових перетворень сталей для залізничних коліс поточного виробництва на основі прогнозних моделей, що враховують міжатомну взаємодію у розплавах.

Встановлено закономірності впливу хімічного складу сталей для залізничних коліс на їх механічні властивості на основі комплексних критеріїв складу.

На основі обчислювального експерименту визначено діапазони зміни елементів матричної системи, що забезпечують необхідні службові та експлуатаційні властивості залізничних коліс: вуглець (0,55-0,60%); марганець (0,8-1,0%); кремній (0,7-0,9%), обґрунтовано ефективність мікролегування сталі для залізничних коліс ванадієм з метою підвищення їх міцнісних властивостей.

Вперше встановлено закономірності фазових перетворень при безперервному охолодженні сталі для залізничних коліс із підвищеним вмістом кремнію та марганцю. Визначено інтервали швидкостей охолодження, в межах яких спостерігається зміна механізму структуроутворення при розпаді аустеніту.

Розроблено математичні моделі розрахунку швидкостей охолодження по перерізу обода колеса при охолодженні на вертикальній загартованій машині. Моделювання гарту колеса проводилося за допомогою методу кінцевих елементів (МКЕ) серед програмного комплексу ANSYS. Оцінка адекватності моделі шляхом порівняння даних, отриманих експериментально та в результаті моделювання показала її високу точність.

В результаті лабораторних досліджень встановлено, що стійкість до термічного впливу сталі з підвищеним вмістом кремнію та марганцю (марка «К») відрізняється незначно (приблизно на 12%) від марки «2». У той самий час стійкість до термічного впливу сталі марки «К» проти зі сталлю марки «Т» вище приблизно 44%. Позитивною особливістю марки «К» у порівнянні з маркою «Т» є нижчий рівень мікротвердості, щільності дислокацій та спотворень другого роду мартенситного шару. Результати впроваджені у виробництво на ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» (акт впровадження від 11.11.2020 р.).

Встановлено закономірності впливу температури випробувань на

11

показники міцності, пластичності та на ударну в'язкість сталі. Показано, що сталь марки «К» з підвищеним вмістом кремнію та марганцю, має високу пластичність і міцність при підвищених температурах (20-800°C), а при негативних температурах (до -60) має більш високі значення ударної в'язкості порівняно зі сталями, що застосовуються для залізничних коліс в Україні, що свідчить про високий рівень експлуатаційної надійності коліс із сталі марки «К». За результатами досліджень було розроблено та впроваджено ТУ у виробництво на ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» (ТУ У 30.2-23365425-713:2020 «Колеса суцільнокатані діаметром 957 мм висомічні з підвищеною експлуатаційною довговічністю» від 22.10.2020 р.).

Вперше встановлено закономірності фазових перетворень при безперервному охолодженні сталі хімічного складу (% мас.): 0,68 С, 0,49 Si; 0,7 Mn; 0,77 Cr; 0,22 Ni; 0,069 Mo; 0,087 V для залізничних коліс класу D відповідно до вимог стандарту ААР М-107/М-208. Визначено інтервали швидкостей охолодження, в межах яких спостерігається зміна закономірностей структуроутворення при розпаді аустеніту. Встановлено, що при швидкостях охолодження до 1 °С/с формується повністю перлітна структура, при швидкості охолодження 2 °С/с кінцева структура складається з 15% перліту, 25% бейніту, решта – мартенсит і залишковий аустеніт; при швидкостях охолодження 5 °С/с та більше розпад аустеніту проходить з утворенням мартенситу й залишкового аустеніту.

Вперше встановлено закономірності фазових перетворень при безперервному охолодженні сталі хімічного складу (% мас.): 0,58 С, 0,97 Si; 0,85 Mn; 0,083 V для залізничних коліс марки К. Визначено інтервали швидкостей охолодження, в межах яких спостерігається зміна закономірностей структуроутворення при розпаді аустеніту. Встановлено, що при малій швидкості охолодження (0,5 °С/с) структура досліджуваної сталі складається з перліту та невеликої кількості фериту (~12%), що утворився за межами колишнього аустенітного зерна та має вигляд розірваної сітки. Зі збільшенням швидкості охолодження (1-2 °С/с) змінюється морфологія та

підвищується дисперсність феритно-карбідної суміші: від середньопластинчастого перліту до високодисперсних структур сорбіту та трооститу загартування, а також зменшується кількість фериту в структурі до 8-10%. Утворення доевтектоїдного фериту та перліту повністю пригнічується в досліджуваній сталі при швидкості охолодження понад 20 °С/с. Подальше збільшення швидкості охолодження призводить до зменшення в структурі об'ємної частки бейніту та збільшення кількості мартенситу. При швидкості охолодження 50 °С/с та 120 °С/с відбувається зміна морфології мартенситних голок: зі збільшенням швидкості охолодження продукти розпаду аустеніту подрібнюються.

За результатами лабораторних досліджень розроблено хімічний склад сталі та температурно-часові параметри термічної обробки коліс, що в сукупності забезпечили отримання високого комплексу механічних властивостей дослідних коліс класу D з підвищеною стійкістю до зношування, які працюють в легких умовах гальмування при високих навантаженнях на вісь відповідно до вимог стандарту ААР М-107/М-208 та, як наслідок, підвищення надійності та довговічності цих виробів. Показана принципова можливість отримання високого комплексу характеристик міцності та пластичності залізничних коліс з формуванням мікроструктури без утворення мартенситу при термічній обробці за рекомендованими режимами в умовах виробництва ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ»:

- рекомендації щодо хімічного складу сталі для виробництва коліс класу D в промислових умовах (% мас.): C=0,67-0,70; Si=0,45-0,55; Mn=0,65-0,75; Cr= 0,75-0,80; Mo=0,06-0,10; Ni=0,20-0,25; V= 0,08-0,12;

- рекомендований режим обробки: нагрівання в кільцевій печі під зміцнюючу ТО до (840 ± 10)°С, тривалість охолодження – (170 ± 5) с, налаштування спреєра - ½ висоти обода, температура води – (25 ± 2)°С, зміна витрати води від 0 до (60...65) м³/год протягом першої хвилини, тривалість підстужування коліс – (35 ± 5) хв, відпуск при (600+10)°С, протягом 3 год. +15 хв.);

- результати порівняльних випробувань зразків з коліс класу D і C відповідно до вимог стандарту AAR M-107/M-208 показали, що зразки коліс класу D мають на ~ 10 % вищий рівень зносостійкості та на ~65% вищу стійкість до відшарування у порівнянні зі зразками, виготовленими із колеса класу C.

Розроблено хімічний склад сталі та температурно-часові параметри термічної обробки коліс, що в сукупності забезпечило отримання високого комплексу механічних властивостей дослідних коліс класу D відповідно до вимог стандарту AAR M-107/M-208. Результати порівняльних випробувань зразків з коліс класу D та коліс класу C на стійкість до зношування та відшарування показали, що метал дослідних коліс класу D має більшу стійкість до відшарування на 65%, а стійкість до зношування – на 10%. Результати захищені патентом України на винахід UA 118143 від 24.07.2017 і впроваджені у виробництво на ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» (акт впровадження від 20.01.2017 р.);

За результатами проведених досліджень по визначенню силових параметрів випробувань, а також з урахуванням загальних вимог нормативної документації (ГОСТ 30480, ГОСТ 23.204) визначені раціональні режими для проведення порівняльних досліджень на стійкість до зношування та відшарування під навантаженням металу коліс класу C і D, виготовлених за стандартом AAR M -107/M-208. Методику випробувань узгоджено через Rusin Consulting Ltd з Association of American Railroads

Кількість публікацій за роботою: 3 монографії, кількість наукових статей -29, зокрема 9 у англomовних журналах з імпакт-фактором, загальна кількість посилань 88 на публікації авторів та h-індекс 4 (згідно баз даних Web of Science, Scopus, Google Shcolar та інших), 7 діючих патентів України.

Конєв

Сімур

Харченко

Перелік наукових публікацій претендентів, які увійшли до роботи:  
монографії, наукові посібники, статті, діючі патенти

**Монографії та навчальні посібники:**

1. Розробка сталей для металопродукції залізничного призначення. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Рослик О.В., Майстренко К.М., Подольський Р.В. Дніпро, «Домінанта-принт», 298 стор.
2. Методи дослідження структури та властивостей металів. Борисенко А.Ю., Зайцева Т.О., Кононенко Г.А., Тараненко А.О., Ключник Ю.О. Україна, Дніпро, НМетАУ, Навчальний посібник, частина 1. 2019, 52 с.
3. Методи дослідження структури та властивостей металів. Борисенко А.Ю., Зайцева Т.О., Кононенко Г.А., Тараненко А.О., Ключник Ю.О. Україна, Дніпро, НМетАУ, Навчальний посібник, частина 2. 2019, 44 с.

**Патенти та авторські свідоцтва:**

1. Патент на винахід UA 124367 C2: Пристрій для зміцнення диска залізничного колеса. Бабаченко О.І., Перков О.М., Кузьмичов В.М., Кононенко Г.А., Вакуленко І.О. Публікація: 01.09.2021, Бюл.№35.
2. Патент на винахід UA 121823: Спосіб термічної обробки залізничних коліс. Бабаченко, Кузьмичов В.М., Перков О.М., Кононенко Г.А. Публікація: 27.07.2020. Бюл. №14.
3. Методи дослідження структури та властивостей металів (частина 1) Борисенко А.Ю., Зайцева Т.О., Кононенко Г.А., Тараненко А.О., Ключник Ю.О. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Мінеконом розвитку і торгівлі України: 2019, № 86384.
4. Методи дослідження структури та властивостей металів (частина 2) Борисенко А.Ю., Зайцева Т.О., Кононенко Г.А., Тараненко А.О., Ключник Ю.О. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Мінеконом розвитку і торгівлі України: 2019, № 86385.
5. Патент на винахід: UA 118143: Сталь для суцільнокатаних коліс. Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Дьоміна К.Г., Кузьмичов В.М., Хулін А.М., Рослик А.В., Майстренко Е.Н. Публікація про видачу патенту 26.11.18 Бюл. № 22.
6. Патент на винахід: UA 115114: Спосіб термічного зміцнення залізничних коліс. Бабаченко О.І., Книш А.В., Кононенко Г.А., Дьоміна К.Г., Кузьмичов В.М., Хулін А.М. Публікація про видачу патенту 11.09.17 Бюл. № 17.
7. Патент України UA 122852 C2 на винахід. Сталерозливний ківш для позапічної обробки металу / Піптюк В.П., Самохвалов С.Є., Тогобицька Д.М., Логозинський І.М., Мазурук С.Л., Греков С.В., Красніков К.С., Снігура І.Р. – заявл. 29.07.19; опубл. 06.01.21, Бюл. № 1, 2021 р.
8. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 70524 Україна. «Методика вибору хімічного складу сталі в рамках діапазонів регламентованих ГОСТом, який забезпечує стабілізацію механічних властивостей металопродукції на раціональному рівні» / Тогобицька Д.М., Козачок О.С., Снігура І.Р. Заявл. № 70012 26.12.2016. Регистр. 20.02.17

**Публікації в зарубіжних фахових виданнях або виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science**

1. N. Yu. Filonenko, O.I. Babachenko, and G.A. Kononenko Structural State and Physicochemical Properties of Al–Cu System Alloys, Metallofizika i Noveishie Tekhnologii, 2020. – Vol. 42, No. 5.: pp. 611–620. (Q3)
2. Filonenko, N., Babachenko, A., Kononenko, G., Domina, E. Solubility of carbon, manganese and silicon in  $\alpha$ -iron of Fe-Mn-Si-C alloys, East European Journal of Physics, Vol.2020, No. 4, pp. 90–94, DOI: <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2020-4-12>. (Q4)

3. N. Yu. Filonenko, O. I. Babachenko, G. A. Kononenko Influence of Overheating and Cooling Rate on the Structures and Properties of Alloys of the Fe–B System, *Materials Science*, 2019. Vol. 55, No. 3, pp. 440-446. DOI 10.1007/s11003-019-00323-x. (Q3)
4. N. Yu. Filonenko, A. I. Babachenko, G. A. Kononenko Structural State and Phase Transformations in Fe–B System Alloys, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2020. Vol. 42, No. 11, pp. 1559—1572. DOI 10.15407/mfint.42.11.1559. (Q3)
5. A. I. Babachenko, D. N. Togobitskaya, A. A. Kononenko, I. R. Snigura & O. V. Kuksa Justification for Choosing Alloying and Micro-Alloying Elements to Improve the Mechanical Properties of Railway Wheels. *Steel in Translation*, Vol.50, 2020, pp. 815–821. DOI <https://doi.org/10.3103/S0967091220110029>. (Q2).
6. Filonenko N, Babachenko O, Kononenko G, Domina K. Solubility of Carbon, Manganese and Silicon in  $\gamma$ -Iron of Fe-Mn-Si-C alloys. *Physics and Chemistry of Solid State 2020*, Volume 21, No. 3 P. 525-529. DOI 10.15330/PCSS.21.3.525-529. (Q4).
7. N. Filonenko, A. Babachenko, G. Kononenko Investigation of Silicon and Manganese Solubility in Cementite of Iron-Based Alloys. *East European Journal of Physics*. 2019, №2, pp. 46-51. DOI: <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2019-2-07>.
8. N. Filonenko, O. Babachenko, L. Bartashevskaya, G. Kononenko, N. Ivanov Influence of Overheating and Cooling Rate on the Structure and Physicochemical Properties of Al-Cu Alloys. 2019, *Solid State Phenomena* (Volume 291), pp. 42-51. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.291.42.
9. O.I. Babachenko, H.A. Kononenko, R.V. Podolskyi et al. Steel for Railroad Rails with Improved Operating Properties. 2021, *Mater Sci* 56, 814–819. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00499-1>
10. Babachenko A.I., Kononenko A.A. Influence of the chemical composition and structural state on tough properties of steel for railway wheels. 2008, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 30 (SPEC. ISS.), pp. 227-234.
11. Filonenko N., Galdina A. N., Babachenko A., & Kononenko G. (2019). Structural State and Thermodynamic Stability of Fe-B-C Alloys . *Physics and Chemistry of Solid State*, 20(4), 437-444. <https://doi.org/10.15330/pcss.20.4.437-444>
12. Filonenko, N.Y., Babachenko, O.O., Kononenko, G.A. Investigation of Carbon, Manganese and Silicon Solubility in  $\alpha$ -Iron of Fe-Mn-Si-C Alloys. *Proceedings of the 2020 IEEE 10th International Conference on "Nanomaterials: Applications and Properties"*, NAP 2020 (2020), №9309708. DOI 10.1109/NAP51477. 2020.9309708.

### Публікації у наукових фахових виданнях України

1. A.I. Babachenko, D.N. Togobitskaya, A.S. Kozachyok, A.A. Kononenko, A.V. Knysh, I.R. Snigur Optimization of chemical composition of steel for railroad wheels providing stabilization of mechanical and increase of operational properties – *Metallurgy and heat treatment of metals – 2017*, №3. – С. 32 – 39.
2. Порівняльні дослідження показників якості залізничних коліс різного способу виробництва // Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Дементьєва Ж.А. Подольський Р.В. // *Металлургическая и горнорудная промышленность – 2019-№1-2.*, - с. 54-61.
3. Надежность железнодорожных колес, изготовленных разными способами производства Бабаченко А.И., Кононенко А.А., Дементьєва Ж.А. Подольский Р.В., Шпак Е.А., Клиновая О.Ф. *Металл и литье Украины 2019*, г. Киев, №3-4 (310-311), с. 48-57.
4. Оценка склонности к образованию дефектов термического происхождения опытных сталей для железнодорожных колес А. И. Бабаченко, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский, Е. А. Шпак // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, 2019, м. Дніпро, №2 (251-252), с. 17-21.
5. Аналіз впливу деформаційного пророблення безперервнолитих заготовок на макро- і мікроструктуру конструкційних сталей (огляд) / О. І. Бабаченко, К. Г. Дьоміна, Г. А.

Кононенко, Р. В. Подольський. // *Металознавство та термічна обробка металів.* – 2020. – 91, №4. – с.17-29.

6. И.Р. Снигура, Д.Н. Тогобицкая. Особенности прогнозирования температур ликвидус и солидус железоуглеродистых сплавов на основе концепции направленной химической связи –Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии, сборник научных трудов, Вып. № 31, 2017 год, С. 243 – 252.

7. Д.Н. Тогобицкая, В.П. Піптюк, А.Ф. Петров, С.В. Греков, И.Р. Снигура, Ю.М. Лихачев, Л.А. Головки. Базы данных и модели для экспертной оценки эффективности использования ферросплавов при производстве стали – Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии, сборник научных трудов, Вып. № 31, 2017 год, С. 150 – 165.

8. И.Р. Снигура, Д.Н. Тогобицкая Прогнозирование температур плавления и кристаллизации хромоникелевых сталей. – *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті.* № 21, Вып. 1, 2018 год. – С. 67 – 72.

9. Піптюк В.П., Тогобицька Д.М., Логозинський І.М., Левин Б.А., Петров О.П., Греков С.В., Снігура І.Р. Перспективи генерації феросплавів нового покоління для легування та мікролегування сталі. – *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.* – Випуск 4 (117). – Дніпро, 2018. – С. 52 – 60.

10. Розробка хімічного складу сталі та режимів термічної обробки залізничних коліс, що забезпечують підвищення їх ресурсу в різних умовах експлуатації / О. І.Бабаченко, Г. А. Кононенко, К. Г. Дьоміна, Ж. А. Дементьева, Р.В. Подольський, О.А. Сафронова // *Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд: Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2016–2020 рр.* – 2020. – с.495-499.

11. В.П. Піптюк, С.В. Греков, Г.О. Андрієвський, І.Р. Снігура. Чисельні дослідження процесів плавлення кускових феросплавів при введенні в ківш на випуску плавки. – *Матеріали XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції Спеціальна Металургія: Вчора, сьогодні, завтра.* – 2018 год, С. 386 – 394.

12. Снігура І.Р., Тогобицька Д.М., Греков С.В. Новий підхід до обґрунтування рішень для ефективного засвоєння легуючих добавок при позапічній обробці сталі – *Збірник матеріалів Всеукраїнської конференції молодих вчених «Молодь і наука. Практика інноваційного пошуку».* – м. Дніпро 2019, 18 грудня 2019 р. – С. 134 – 137

13. Петров А.Ф., Снигура И.Р., Головки Л.А., Цюпа Н.А. Прогнозирование времени плавления комплексных ферросплавов методом физико-химического моделирования // «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вып. 33. – С. 205 – 214. (In Russian). DOI 10/52150/2522-9117-2019-33-205-214

14. Снігура І.Р., Тогобицька Д.М., Піптюк В.П., Греков С.В., Петров О.П., Головки Л.А. Фізико-хімічні передумови для розробки комплексних співвідношень властивостей металургійних розплавів з метою прогнозування закономірностей розподілу елементів при доведенні сталі на УВП // «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Вип. 34. – С. 150 – 158. (In Ukrainian). DOI 10/52150/2522-9117-2020-34-150-158

15. Розробка рекомендацій щодо швидкостей охолодження залізничних коліс з застосуванням моделювання в програмному комплексі QFORM VX 8.2 для формування однорідної ферито-перлітної структури// О.І. Бабаченко, Г.А. Кононенко, Є.С. Клемешов, Р.В. Подольський.// *Системні технології* – 2021 - 134, №3. - с. 13-22. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-134-2021-02>

16. Філоненко Н.Ю., Бабаченко О. І., Кононенко Г. А. Вплив перегріву та швидкості охолодження на структуру та фізико-хімічні властивості сплавів системи Fe-V. Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2019. – Т. 55, №3. – с.130-136.

17. Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Дьоміна К.Г. Розробка хімічного складу та вдосконалення технології виробництва для підвищення експлуатаційної надійності і довговічний залізничної металопродукції. *Металл и литье Украины*, № 7-9, 2019, С.75-83.

18. О. І. Бабаченко, Г. А. Кононенко, А. М. Хулін Моделювання методом кінцевих елементів зміни температури за перетином обода в процесі термічної обробки залізничних

коліс зі сталей різного хімічного складу. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2018. №1. С. 10-17.

19. Бабаченко А.И., Филиппов А.А., Дементьева Ж.А., Кононенко А.А. Разработка новой системы микролегирования стали для высокопрочных железнодорожных колес. Сборник научных трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение». 2017, №96, С. 13 – 17.

20. Бабаченко А.И., Кононенко А.А., Дедик М.А. Разработка режимов охлаждения железнодорожного колеса на вертикальной закалочной машине с помощью математической модели расчета скоростей охлаждения. *Науковий вісник «Сучасні проблеми металургії»*, 2017, №20, С.14-21.

### **Публікації, що засвідчують апробацію матеріалів**

1. Тогобицкая Д.Н., Бабаченко А.И., Кононенко А.А., Кукса О.В., Снигура И.Р. Прогнозирование АС1, АС3 и механических свойств конструкционных сталей методом физико-химического моделирования – *Материалы XX международной научно-технической конференции «Информационные технологии в металлургии и машиностроении»*. – г. Днепр, 17 – 19 марта, 2020 г. – С. 264 – 266.

2. Бабаченко А. И. Дослідження впливу структур гартування на показники в'язкості руйнування залізничних коліс / А. И. Бабаченко, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский. // Міжнародна конференція «Університетська наука - 2020». – 2020. – №1. – С. 152–154.

3. Снигура И.Р., Тогобицкая Д.Н. Прогнозирование температур ликвидус металлических расплавов на основе легких металлов с позиции концепции направленной химической связи – *Материалы международной научно-технической конференции «Информационные технологии в металлургии и машиностроении»*. – г. Днепр, 28 – 30 марта, 2017 г. – С. 78.

4. Снигура И. Р. Разработка моделей для численного прогнозирования температур ликвидус и солидус металлических расплавов – *Матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції «Проблеми математичного моделювання»*. – м. Кам'янське, 24-26 травня, 2017 р. – С. 59 – 61.

5. Снігура І. Р., Тогобицька Д. М. Прогнозування комплексу властивостей сталей і сплавів для оцінки засвоєння легуючих компонентів – *Матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ»*. - м. Дніпро, 18 – 19 травня, 2017 р. – С. 14.

6. Снигура И. Р., Тогобицкая Д.Н. Роль учета межатомного взаимодействия при прогнозировании температур ликвидус и солидус металлических расплавов – *Международная научно-техническая конференция «Университетская наука 2017»: Сб. тезисов докладов, 1-й том*. Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2017. – С. 54 – 56.

7. D. N. Togobitskaia, I. R. Snihura Prediction of liquidus and solidus temperatures of steels and alloys for special purposes. IX International conference of young scientists on welding and related technologies, 23-26 May 2017, Kyiv, Ukraine. p. 228.

8. Снигура И.Р., Тогобицкая Д.Н. Дослідження функціонального взаємозв'язку температур плавлення та кристалізації з параметрами міжатомної взаємодії – *Материалы XX международной научно-технической конференции «Информационные технологии в металлургии и машиностроении»*. – г. Днепр, 27 – 29 марта, 2018 г. – С. 94.

9. Тогобицкая Д.Н., Петров А.Ф., Лихачев Ю.М., Снигура И.Р. Информационно-интеллектуальный ресурс решения задач прогнозирования физико-химических свойств сталей и сплавов – *Материалы XX международной научно-технической конференции «Информационные технологии в металлургии и машиностроении»* – г. Днепр, 27 – 29 марта, 2018 г. – С. 97.

10. Модель розрахунку зміни температури для розробки параметрів термічної обробки, яка забезпечить однорідну дисперсну структуру по перерізу ободу залізничних коліс / А. И.Бабаченко, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский, Є. С. Клемешов. // *Матеріали*

всеукраїнської науково-методичної конференції "Проблеми математичного моделювання". – 2020. – №1. – С. 46–48.

11. Піптюк В.П., Греков С.В., Андриевский Г.А., Снігура І.Р. Проверка адекватности исследований эффективности использования ферросплавов на основе компьютерного моделирования и промышленных экспериментов – Материалы XX международной научно-технической конференции «Информационные технологии в металлургии и машиностроении». – г. Днепр, 27 – 29 марта, 2018 г. – С. 88.

12. Дослідження впливу термічної обробки на формування мікроструктури та твердості дослідних рейкових сталей / Р. В. Подольський, О. А. Сафронова, О. І. Бабаченко, А. А. Кононенко. // 11 Всеукраїнська конференція молодих вчених "Молоді вчені - 2020". – 2020. – №1. – С. 53–56.

13. Тогобицька Д.М., Белькова А.І., Степаненко Д.О., Ліхачов Ю.М., Снігура І.Р. Бази даних про властивості матеріалів – інформаційна основа моделювання металургійних систем і процесів. – Материалы международной научно-технической конференции «Информационные технологии в металлургии и машиностроении». – г. Днепр, 26 – 28 марта, 2019 г. – С. 37

14. Бабаченко О. І. Встановлення раціональних швидкостей охолодження ободу залізничного колеса класу С по ААР М107/М208 / О. І. Бабаченко, Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський. // Матеріали 80 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – 2020. – С. 190–192.

15. І.Р. Снігура, Д.М. Тогобицька Фізико-хімічне моделювання розподілу елементів в системі «метал-шлак» на основі параметрів міжатомної взаємодії. Литво. Металургія. 2019: Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції . – Запоріжжя, 2019. – С. 355 – 357.

16. Тогобицька Д.М., Снігура І.Р., Петров О.П., Головка Л.А., Ходотова Н.Є. Фізико-хімічні критерії та моделі для прогнозування часу плавлення комплексних феросплавів – Материалы XX международной научно-технической конференции «Информационные технологии в металлургии и машиностроении». – г. Днепр, 17 – 19 марта, 2020 г. – С. 267 – 269.

17. Снігура І.Р., Тогобицька Д.М., Петров О.П., Цюпа Н.О. Особливості впливу мікронеоднорідності марганецьвмісних феросплавів на час їх плавлення з урахуванням параметрів міжатомної взаємодії. Університетська наука - 2020: тези доп. Міжнар. Науково – техн. Конф. (Маріуполь, 20-21 травня 2020р): в 4 т. Т. 1.: факультеті металургійний, енергетичний / «ПДТУ». – Маріуполь: ПДТУ, 2020. – С. 50 – 51.

18. А.Ф. Петров, Л.А. Головка, І.Р. Снігура Использование метода физико-химического моделирования для оценки степени усвоения хромсодержащих ферросплавов. Литво. Металургія. 2020: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції (8-10 вересня 2020 р., м. Запоріжжя) / Під заг. ред. Д.т.н., проф.. Пономаренко О.І. – Запоріжжя, ФОП Мокшанов В.В. – С. 279 – 280.

19. Бабаченко О. І. Дослідження впливу хімічного складу сталі для залізничних коліс в межах марочного на мікроструктуру та механічні властивості при різних швидкостях охолодження / О. І. Бабаченко, Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський., О.А. Сафронова // матеріали міжнародної наукової конференції «Міждисциплінарні наукові дослідження: особливості та тенденції» (Т. 2), 4 грудня, 2020 рік. Чернігів, Україна: МЦНД. – 2020. – №2. – С. 44–49.

20. І.Р. Снігура, Д.М. Тогобицька, В.П. Піптюк, С.В. Греков Генерація комплексних параметрів впливу на розподіл елементів в системі «метал-шлак» при позапічній обробці сталі. Литво. Металургія. 2020: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції (8-10 вересня 2020 р., м. Запоріжжя) / Під заг. ред. Д.т.н., проф.. Пономаренко О.І. – Запоріжжя, ФОП Мокшанов В.В. – С. 301 – 303

22. Д.М. Тогобицька, В.П. Піптюк, І.Р. Снігура, С.В. Греков, О.В. Кукса Новий підхід до вирішення задач оцінки ефективності засвоєння добавок при позапічній обробці сталі –

Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ». - м. Дніпро, 24 червня, 2021 р. – С. 26.

23. Бабаченко А. И. Параметры качества поверхностного слоя обода цельнокатаного колеса при торможении в условиях эксплуатации / А. И. Бабаченко, Л. Н. Дейнеко, Р. В. Подольский // 1 Регіональні патонівські читання / А. И. Бабаченко, Л. Н. Дейнеко, Р. В. Подольский. – м. Дніпро: ДТЗЕ им. Е.О. Патона, 2018. – (Збірник тез). – С. 57–59.

24. Подольський Р. В. Особливості мікроструктури залізничних коліс, виготовлених різними способами виробництва/ Р.В.Подольський, Г.А.Кононенко // X Міжнародна конференція молодих вчених "Молоді вчені 2019 - від теорії до практики" / Р. В. Подольський, Г. А. Кононенко. – м. Дніпро: НМетАУ, 2019. – (ISBN 978-617-7433-47-6). – С. 66–71.

25. Бабаченко А. И. Сравнительные исследования эксплуатационной надежности цельнокатаных и литых железнодорожных колес для грузовых вагонов / А. И. Бабаченко, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский // Матеріали 79 Міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту" / А. И. Бабаченко, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский. – м. Дніпро: ДВНЗ ДИИТ, 2019. – (УДК 656.2). – С. 314–315.

26. Studying the effect of the structural condition of carbon steels and carbon content in them on the destruction mechanics during cyclic loading. Babachenko O. I., Kononenko G. A., Podolskyi R.V. Asgarov K., Çuğ H., Turkey, The International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology (IMSMATEC 19), Cappadocia, p. 1-6.

27. Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Клемешов Є.С., Подольський Р.В. Застосування моделювання в програмному комплексі QFORM VX 8.2 для визначення раціональних швидкостей охолодження ободу залізничних коліс. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в металургії і машиностроєнні» (16-18 марта 2021, Днепр), Днепр, - 2021- С. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.003>

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

29. О. І. Бабаченко, Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський, О. А. Сафронова. Визначення критичних температур сталі для залізничних коліс класу С. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Литво. Металургія. 2021», м. Запоріжжя, 18-20 травня 2021 року – 2021.- С. 259–262.

30. Бабаченко О.І. Встановлення раціональних швидкостей охолодження при термічній обробці залізничного колеса марки ER7 за EN 13262/ Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Сафронова О.А // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції "Нові матеріали і технології в машинобудуванні". – 2021. – С. 24–26.

31. Бабаченко О.І. Вплив швидкості охолодження при затвердінні безперервнолитої заготовки на особливості дендритної структури вуглецевої сталі марки EA1N / Бабаченко О.І., Дьоміна К.Г., Кононенко Г.А., Дементьєва Ж.А., Сафронова О.А., Подольський Р.В. // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції "Нові матеріали і технології в машинобудуванні". – 2021. – С. 26–27.

32. Бабаченко О.І. Визначення критичних температур сталі ER8 для залізничних коліс/ Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Сафронова О.А. // Міжнародна конференція «Університетська наука - 2021». – 2021. – №1. – С. 64–66.

33. Бабаченко О.І. Вплив швидкості охолодження при затвердінні безперервно-литої заготовки на характеристики дендритної структури вуглецевої сталі марки ОС/ Бабаченко О.І., Дьоміна К.Г., Кононенко Г.А., Подольський Р.В. Сафронова О.А.. // Міжнародна конференція «Університетська наука - 2021». – 2021. – №1. – С. 66–67.

34. Статистичний аналіз механічних властивостей залізничних коліс марки ER7 за EN 13262 та марки 2 за ДСТУ ГОСТ 10791:2016 ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» / Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Сафронова О.А., Марцінішин В. В. Болгарія, Технічний університет, м. Варна. Збірник наукових праць XVI міжнародної конференції «Стратегія якості в промисловості і освіті», (2 червня – 5 червня 2021 р., м. Варна), с. 24-27.

35. Визначення гранично допустимих швидкостей охолодження ободу залізничних коліс для формування однорідної структури / О. І.Бабаченко, Г. А. Кононенко, Є. С. Клемешов, Р. В. Подольський. // Збірник наукових праць Інституту чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України «Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – №34. – с.219-228. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2020-34-219-228>

36. Babachenko O. I., Kononenko G. A. Development of steel chemical composition for railway wheels with high complex of operational properties. 6th INTERNATIONAL CONFERENCE HighMatTech 2019, 2019, Kyiv, Ukraine, p. 33.

37. Тогобицка Д.Н., Кононенко А.А., Снигура И.Р., Кукса О.В. Разработка критериев для экспертной оценки механических свойств конструкционных сталей Международная НТК «Университетская наука - 2019». - Мариуполь, 2019, Т.4, 1-й ГВУЗ «ПГТУ», С. 21-23.

38. Бабаченко А.И., Кононенко А.А., Филиппов А.А. Разработка химического состава стали для железнодорожных колес, обеспечивающего повышение их ресурса в различных условиях эксплуатации. МАТЕРИАЛЫ 78 Международной научно-практической конференции «ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА». 17.05 – 18.05.2018, Днепр. С. 284-286.

39. Babachenko, O., Kononenko, N., Snigura, I., & Togobytska, N. (2021). Optimisation of chemical composition of high-strength structural steels for achieving mechanical property requirements. Paper presented at ESAFORM 2021. 24th International Conference on Material Forming, Liège, Belgique. doi: 10.25518/esaform21.3654.

40. Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Хулін А.М., Шпак О.А. Дослідження кінетики розпаду аустеніту при безперервному охолодження сталі для залізничних коліс з підвищеною зносостійкістю Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «МАШИНИ І ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ МЕТАЛІВ» 18–20 жовтня 2018 року, Кам'янське. С. 37.

41. Filonenko Nataliia, Babachenko Oleksandr, Kononenko Ganna, Ivanov Nikita The peculiarities of thermodynamic function and  $\tau$ -phase. Materials of the international scientific & practical conference Physical&chemical geotechnologies – 2018 10-11 жовтня, 2018, м. Дніпро, С. 83-84.

42. A. Varabash, A. Kononenko, A. Myrgorodska New steel development for high-strength railway wheels. Engineer of the Third Millennium: Students' Scientific Conference. Дніпро: 2017. С. 7-8.

43. Бабаченко О.І., Рослік О.В., Кононенко Г.А., Хулін А.М. Розробка хімічного складу сталі для залізничних коліс, що забезпечують виконання вимог стандарту ААР М-107/М-208 до коліс класу D. Наукові праці 77 Міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту". 2017, С. 277-279.

44. Бабаченко А.И., Кононенко А.А., Дедик М.А. Математическая модель расчета скоростей охлаждения по сечению обода колеса при охлаждении на вертикальной закалочной машине в промышленных условиях. Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні», НМетАУ. Дніпро. 28–30 березня 2017 року, С.30.

45. Бабаченко А. И., Дёмина Е. Г., Кононенко А. А., Хулин А. Н. Исследование влияния фактора формы литых заготовок на особенности процесса горячей пластической деформации цельнокатаных колёс  $\varnothing$  957 мм Наукові праці 77 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», – ДНУЗТ, 11 – 12 травня 2017 рік, м. Дніпро, Україна, С. 287-288.

Данні про цитування праць виконавців, які ввійшли до представленої роботи «Концептуальні основи вибору хімічного складу сталі для залізничних коліс з підвищеною стійкістю до утворення дефектів на поверхні кочення» авторів Кононенко Г.А. д.т.н., с.д., Снігура І.Р. канд.техн.наук., Подольський Р. В.

| № п.п.                             | Назва статті (монографії), автори, назва видання, рік, том, сторінка або DOI  | Кількість посилань згідно бази даних |        |                |
|------------------------------------|---|--------------------------------------|--------|----------------|
|                                    |   | Web of Science                       | Scopus | Google Scholar |
| 10                                 | Babachenko O.I., Kononenko, G.A. Influence of the chemical composition and structural state on tough properties of steel for railway wheels. 2008, Metallofizika i Noveishie Tekhnologii, 30 (SPEC. ISS.), pp. 227-234. Published: DEC 2008   | 1                                    | 2      | 4              |
|                                    | ****  |                                      |        |                |
| 3                                  | Filonenko, N. Yu., Babachenko, O. I., Kononenko, G. A. Influence of Overheating and Cooling Rate on the Structures and Properties of Alloys of the Fe-B System, Materials Science, 2019. Vol. 55, No. 3, pp. 440-446. Published: NOV 2019   | 1                                    | 1      | 1              |
|                                    | *****   |                                      |        |                |
| 12                                 | Filonenko, N.Y., Babachenko, O.O., Kononenko, G.A. Investigation of Carbon, Manganese and Silicon Solubility in $\alpha$ -Iron of Fe-Mn-Si-C Alloys. Proceedings of the 2020 IEEE 10th International Conference on "Nanomaterials: Applications and Properties", NAP 2020 (2020), №9309708. DOI 10.1109/NAP51477. 2020.9309708. Published: NOV 2020 | 1                                    | 1      | 1              |
| 11                                 | Filonenko, N. Yu., Galdina, A. N., Babachenko, O.I., & Kononenko, G.A (2019). Structural State and Thermodynamic Stability of Fe-B-C Alloys. Physics and Chemistry of Solid State, 20(4), 437-444. <a href="https://doi.org/10.15330/pcss.20.4.437-444">https://doi.org/10.15330/pcss.20.4.437-444</a><br>Published: JAN 2020                       | 1                                    | 0      | 1              |
|                                    | *****   |                                      |        |                |
| <b>Загальна кількість цитувань</b> |   | 4                                    | 4      | 7              |
| <b>h-індекс робіт</b>              |   | 1                                    | 1      | 1              |