

СУЧАСНІ РЕЙКОВІ СТАЛІ І МОЖЛИВОСТІ ЕШП (Огляд). Повідомлення 2. Вимоги стандартів до хімічного складу сталі для залізничних рейок магістральних колій

Л. Б. Медовар, Г. П. Стовпченко, Г. О. Полішко,
Д. О. Коломієць, Є. О. Педченко, В. А. Зайцев

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Зроблено порівняння вітчизняного стандарту на залізничні рейки та сучасних закордонних. Показано, що в Україні вимоги до залізничних рейок значно м'якші в порівнянні з закордонними і не забезпечують сучасного рівня їх якості. Проаналізовано зв'язок сучасних металургійних технологій виробництва рейок та їх якості, зокрема можливості технології вакуум-вуглецевого розкислення рейкової сталі й відмови від розкислення алюмінієм. Показана доцільність розробки нового стандарту України на залізничні рейки та можливість використання електрошлакового переплаву для рейок найвищої якості. Бібліогр. 27, табл. 3.

Ключові слова: залізничні рейки; рейкові сталі; бейнітні; перлітні; гіперевтектноїдні; вакуум-вуглецеве розкислення; макроструктура; електрошлаковий переплав; стандарт

Зростання ролі, що її відіграє стандартизація, є загальновідомою. Але при заглибленні в проблеми рейкових сталей виявляється напрочуд велике різноманіття стандартів різних країн. З огляду на постійно зростаючі швидкості й навантаження на залізничні колії зроблено спробу співставити вимоги різних стандартів і виявити загальні тенденції, що можуть бути використані при подальшому розвитку.

Якість сьогодні є основною конкурентною перевагою і найважливішим критерієм для споживачів. В умовах всесвітньої глобалізації та відкритих ринків, росту різноманіття пропозиції товарів споживачі поряд з адекватною ціною вимагають від виробників міжнародних сертифікатів якості товарів, а в деяких випадках і підтвердження відповідності технології виробництва сучасному рівню.

За таких умов роль стандартів постійно підвищується так само як і вимоги, які вони регламентують. Вітчизняні стандарти у великій мірі наслідують сьогодні застарілий тогочасний передовий досвід радянської індустрії і особливості виробничих потужностей, що склалися історично. За 25 років в незалежній Україні вже проведено часткову гармонізацію стандартів з європейськими і світовими аналогами, але стандарт на залізничні рейки досі не повністю відповідає сучасному рівню.

В нашому огляді ми зосередимося на тих критеріях, що мають бути забезпечено на стадії металургійного виробництва (переважно виплавки і розливки сталі). Особливу увагу зосереджено на тих особливостях хімічного складу, які залежать від технології виробництва рейкової сталі і суттєвим чином впливають на безпеку і строк експлуатації залізничних колій. Відмітимо одну важливу обставину, яка стосується питання ефективності

стандартизації. Так, характерною рисою сучасного європейського стандарту на рейки [1] є і те, що окрім приймальних іспитів передбачено ще й проведення кваліфікаційних випробувань. Кваліфікаційні випробування за ним передбачають ряд вимог до працездатності, яких раніше не було в попередніх нормах. Вони також включають типові результати відповідних приймальних випробувань, які повинні контролювати задані властивості високоякісної залізничної сталі відповідно до норми EN ISO 9001 і вимагають від виробників застосовувати новітні перевірені технології. Основний принцип прийняття критеріїв базується на вимірних значеннях твердості [2]. У кваліфікаційних випробуваннях для залізничних рейок введено такі нормовані властивості сталей: в'язкість в злам, швидкість росту втоми, тест на витривалість, залишкові напруги в підшві рейок тощо [2].

Крім того, критичним параметром створення так званого «оксамитового шляху» є використання рейок максимальної довжини. Тож величина, яку регламентує вітчизняний стандарт (25 м), є значно нижчою за таку (100...150 м) у провідних виробників (NKK (Японія), Voestalpine Shinen (Австрія), British Steel (Великобританія), Arcelor Mittal (Англія, Франція), CRRC Corporation (Китай), МЕТЧЕЛ та ЕВРАЗ (Росія)), і має бути переглянута. Зрозуміло, що для випуску таких рейок необхідною є заміна прокатного обладнання на металургійному заводі, що потребує капіталовкладень, але є умовою виробництва конкурентної продукції.

Аналіз характерних систем легування і мікролегування сучасних рейкових сталей. Відомо, що перші рейки виготовляли з чавуну і сучас-

Таблиця 1. Хімічний склад сталей за вітчизняним стандартом ДСТУ 4344:2004, мас. %

| Марка сталі | C | Mn | Si | V | Ti | P | S | Al |
|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|---------------|-----------|-------|-------|
| | | | | | | Не більше | | |
| M74Ф* | 0,69...0,80 | 0,8...1,3 | 0,18...0,40 | 0,03...0,07 | — | 0,035 | 0,040 | 0,015 |
| K74Ф | —»— | —»— | —»— | —»— | — | 0,035 | 0,040 | —»— |
| E74Ф | —»— | —»— | —»— | —»— | — | 0,030 | 0,025 | —»— |
| M74Т* | —»— | —»— | —»— | — | 0,007...0,025 | 0,035 | 0,040 | —»— |
| K74Т | —»— | —»— | —»— | — | —»— | 0,035 | 0,040 | —»— |
| E74Т | —»— | —»— | —»— | — | —»— | 0,030 | 0,025 | —»— |
| M74* | —»— | —»— | —»— | — | — | 0,035 | 0,040 | 0,025 |
| K74 | —»— | —»— | —»— | — | — | 0,035 | 0,040 | —»— |
| E74 | —»— | —»— | —»— | — | — | 0,030 | 0,025 | —»— |
| M76Ф* | 0,71...0,82 | —»— | 0,25...0,40 | 0,03...0,07 | — | 0,035 | 0,040 | 0,015 |
| K76Ф | —»— | —»— | —»— | —»— | — | 0,035 | 0,040 | —»— |
| E76Ф | —»— | —»— | —»— | —»— | — | 0,030 | 0,025 | —»— |
| M76Т* | —»— | —»— | —»— | — | 0,007...0,025 | 0,035 | 0,040 | —»— |
| K76Т | —»— | —»— | —»— | — | —»— | 0,035 | 0,040 | —»— |
| E76Т | —»— | —»— | —»— | — | —»— | 0,030 | 0,025 | —»— |
| M76* | —»— | —»— | —»— | — | — | 0,035 | 0,040 | 0,025 |
| K76 | —»— | —»— | —»— | — | — | 0,035 | 0,040 | —»— |
| E76 | —»— | —»— | —»— | — | — | 0,030 | 0,025 | —»— |

*З початку 2011 р. рейки з мартенівської сталі не виробляються.

ні рейкові сталі також зберегли в своєму складі досить високий вміст вуглецю, який є найбільш ефективним і економічним зміцнювачем сплавів на основі заліза і основним легуєчим і структуроутворюючим елементом в них. Сьогодні вживані три основних типи сталей, структура яких визначається хімічним складом і термічною обробкою: перлітні, бейнітні і заевтектоїдні (гіперевтектоїдні). Структура з пластичного фериту і високоміцного цементиту є базовою для рейок із високоміцних перлітних сталей, в яких механічні властивості значною мірою визначаються відстанню між ламелями цементиту (Fe₃C), їх товщиною та розміром зерна [3, 4]. Є багато напрацювань щодо термічної (об'ємної, поверхневої та/або часткової) обробки рейок, правильність виконання якої є важливим чинником технологічного процесу одержання рейок преміум якості, але не відноситься до задач цього дослідження.

Хімічний склад рейкових сталей за вітчизняним стандартом [5] шість марок вуглецевої та

мікролегованої ванадієм і титаном (74Ф, 74Т, 74, 76Ф, 76Т і 76) різних способів виробництва (М — мартенівська, К — киснево-конвертерна, Е — електросталь) представлено в табл. 1.

Порівняння сортаменту рейок за вітчизняним стандартом з аналогами (Російський ГОСТ Р51685–2013 [6] та Європейський EN13674-1:2003+A1:2007 [1] стандарти) на рейки для магистральних залізниць показує суттєві відмінності на користь двох останніх (табл. 2, 3).

Відмітимо, що в українському стандарті досі залишаються рейкові сталі з низьким вмістом вуглецю (74Ф, 74Т, 74), які сьогодні не задовільняють зросталим вимогам до зносостійкості та попередження контактної-втомних пошкоджень. І, навпаки, відсутніми є заевтектоїдні (гіперевтектоїдні) марки сталі, для яких характерним є значно вищий вміст вуглецю (0,83...0,95 мас. %), і які завдяки цьому мають майже на 25 % кращу зносостійкість. Такі сталі протягом останніх років успішно використовують для будівництва вантажних залізниць

Таблиця 2. Хімічний склад рейкових сталей за ГОСТ Р 51 685–2013, мас. %

| Марка сталі | C | Mn | Si | V | Cr | N | P | S | Al |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-----------|-------|-------|
| | | | | | | | Не більше | | |
| 90ХАФ | 0,83...0,95 | 0,75...1,25 | 0,25...0,60 | 0,08...0,15 | 0,20...0,60 | 0,010...0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,004 |
| 76ХАФ | 0,71...0,82 | 0,75...1,25 | 0,25...0,60 | 0,05...0,15 | 0,20...0,80 | 0,010...0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,004 |
| 90ХАФ | 0,71...0,82 | 0,75...1,25 | 0,25...0,60 | 0,03...0,15 | 0,20...0,80 | — | 0,020 | 0,020 | 0,004 |
| 76ХАФ | 0,71...0,82 | 0,75...1,25 | 0,30...1,10 | 0,05...0,15 | 0,50...1,25 | — | 0,020 | 0,020 | 0,004 |
| 76ХФ | 0,83...0,95 | 0,75...1,25 | 0,25...0,60 | 0,08...0,15 | — | 0,010...0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,004 |
| 76ХСФ | 0,71...0,82 | 0,75...1,25 | 0,25...0,60 | 0,05...0,15 | — | 0,010...0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,004 |
| 90АФ | 0,71...0,82 | 0,75...1,25 | 0,25...0,60 | 0,03...0,15 | — | — | 0,020 | 0,020 | 0,004 |
| 76АФ | 0,83...0,95 | 0,75...1,25 | 0,25...0,60 | 0,08...0,15 | 0,20...0,60 | 0,010...0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,004 |

Таблиця 3. Хімічний склад сталей, механічні властивості і твердість рейок за європейським стандартом EN 13674-1:2003+A1:2007

| Марка сталі | Зразок | Хімічний склад, мас. % | | | | |
|-------------|---------|------------------------|-------------|-------------|------------------|------------------|
| | | C | Mn | Si | P _{max} | S _{max} |
| R200 | рідкий | 0,4...0,6 | 0,70...1,20 | 0,15...0,58 | 0,035 | 0,035 |
| | твердий | 0,38...0,62 | 0,65...1,25 | 0,13...0,60 | 0,040 | 0,040 |
| R220 | рідкий | 0,5...0,6 | 1,00...1,25 | 0,20...0,60 | 0,025 | 0,025 |
| | твердий | 0,48...0,62 | 0,95...1,30 | 0,18...0,62 | 0,030 | 0,030 |
| R260 | рідкий | 0,62...0,80 | 0,70...1,20 | 0,15...0,58 | 0,025 | 0,025 |
| | твердий | 0,60...0,82 | 0,65...1,25 | 0,13...0,60 | 0,030 | 0,030 |
| R260Mn | рідкий | 0,55...0,75 | 1,30...1,70 | 0,15...0,60 | 0,025 | 0,025 |
| | твердий | 0,53...0,77 | 1,25...1,75 | 0,13...0,62 | 0,030 | 0,030 |
| R320Cr | рідкий | 0,60...0,80 | 0,80...1,20 | 0,50...1,10 | 0,020 | 0,025 |
| | твердий | 0,58...0,82 | 0,75...1,25 | 0,48...1,12 | 0,025 | 0,030 |
| R350HT | рідкий | 0,72...0,80 | 0,70...1,20 | 0,15...0,58 | 0,020 | 0,025 |
| | твердий | 0,70...0,82 | 0,65...1,25 | 0,13...0,60 | 0,025 | 0,030 |
| R350LHT | рідкий | 0,72...0,80 | 0,70...1,20 | 0,15...0,58 | 0,020 | 0,025 |
| | твердий | 0,70...0,82 | 0,65...1,25 | 0,13...0,60 | 0,025 | 0,030 |
| R370CrHT | рідкий | 0,70...0,82 | 0,70...1,10 | 0,40...1,00 | 0,020 | 0,020 |
| | твердий | 0,68...0,84 | 0,65...1,15 | 0,38...1,02 | 0,025 | 0,025 |
| R400HT | рідкий | 0,90...1,05 | 1,00...1,30 | 0,20...0,60 | 0,020 | 0,020 |
| | твердий | 0,88...1,07 | 0,95...1,35 | 0,18...0,62 | 0,025 | 0,025 |

Закінчення табл. 3

| Марка сталі | Зразок | Хімічний склад, мас. % | | | | 10 ⁻⁴ (ppm) мас. % максимум | | σ _b , МПа | φ, % | Твердість поверхні кочення рейки, HB |
|-------------|---------|------------------------|-------------------|------------------|------------------|--|-----|----------------------|------|--------------------------------------|
| | | Cr | Al _{max} | V _{max} | N _{max} | O | H | | | |
| R200 | рідкий | ≤0,15 | 0,004 | 0,030 | 0,009 | 20 | 3,0 | — | — | — |
| | твердий | ≤0,15 | 0,004 | 0,030 | 0,010 | 20 | 3,0 | 680 | 14 | 200...240 |
| R220 | рідкий | ≤0,15 | 0,004 | 0,030 | 0,009 | 20 | 3,0 | — | — | — |
| | твердий | ≤0,15 | 0,004 | 0,030 | 0,010 | 20 | 3,0 | 770 | 12 | 220...260 |
| R260 | рідкий | ≤0,15 | 0,004 | 0,030 | 0,009 | 20 | 2,5 | — | — | — |
| | твердий | ≤0,15 | 0,004 | 0,030 | 0,010 | 20 | 2,5 | 880 | 10 | 260...300 |
| R260Mn | рідкий | ≤0,15 | 0,004 | 0,030 | 0,009 | 20 | 2,5 | — | — | — |
| | твердий | ≤0,15 | 0,004 | 0,030 | 0,010 | 20 | 2,5 | 880 | 10 | 260...300 |
| R320Cr | рідкий | 0,080...1,20 | 0,004 | 0,18...0,20 | 0,009 | 20 | 2,5 | — | — | — |
| | твердий | 0,75...1,25 | 0,004 | 0,030 | 0,010 | 20 | 2,5 | 1080 | 9 | 320...360 |
| R350HT | рідкий | ≤0,15 | 0,004 | 0,030 | 0,009 | 20 | 2,5 | — | — | — |
| | твердий | ≤0,15 | 0,004 | 0,030 | 0,010 | 20 | 2,5 | 1175 | 9 | 350...390 |
| R350LHT | рідкий | ≤0,30 | 0,004 | 0,030 | 0,009 | 20 | 2,5 | — | — | — |
| | твердий | ≤0,30 | 0,004 | 0,030 | 0,010 | 20 | 2,5 | 1175 | 9 | 350...390 |
| R370CrHT | рідкий | 0,40...0,60 | 0,004 | 0,030 | 0,009 | 20 | 1,5 | — | — | — |
| | твердий | 0,35...0,65 | 0,004 | 0,030 | 0,010 | 20 | 1,5 | 1280 | 9 | 370...410 |
| R400HT | рідкий | ≤0,30 | 0,004 | 0,030 | 0,009 | 20 | 1,5 | — | — | — |
| | твердий | ≤0,30 | 0,004 | 0,030 | 0,010 | 20 | 1,5 | 1280 | 9 | 400...440 |

з навантаженням на вісь 30 т та більше [7]. Досягнення високої міцності та твердості може йти як за рахунок збільшення вмісту вуглецю та легуючих елементів, так і шляхом термічної обробки чи обома шляхами для одержання оптимальної тонкої структури металу, що поряд з заданим хімічним складом забезпечує комплекс технологічних властивостей та строк служби рейок. Оскільки рейки є металомісткою продукцією масового випуску, то для їх легування зазвичай використо-

вують марганець і рідше хром (до 3 % в сумі), а також мікролегування ванадієм, ніобієм, титаном, молібденом.

Однак багатьма дослідженнями було показано, що легуванням можливо досягти твердості лише близько 350 одиниць за Брінелем (BHN). Тому, починаючи з 1990-х років, подальше її зростання забезпечують процесами термічної обробки.

Компанія «Ніппон кокан» (НКК, Японія) розробила високостійкі термозміцненні перлітні

рейки серії ТНН370 (клас міцності на розрив — 1300 МПа) для роботи на важконавантажених залізницях. У структурі цієї рейкової сталі міжпластинчата відстань в перліті (МВП) є менш 0,2 мкм, що забезпечується «онлайн» термообробкою. Поліпшення характеристик перлітових сталевих рейок досягнуто переважно за рахунок зменшення відстані між перлітними ламелями [8]. Оскільки досягнуте зменшення МВП в ТНН370 наближається до теоретично можливої (0,1 мкм), то можна вважати, що межу вдосконалення перлітових сталевих рейок також вже практично досягнуто.

Загально визначеними чинниками, що негативно впливають на контактну втоми кочення і знос, є неметалеві включення і велика МВП. Прийнято вважати, що зносостійкість рейкової сталі безпосередньо залежить від твердості і МВП. У той же час, в роботі [9] встановлено, що присутність доєвтектоїдного цементиту і розмір зерна аустеніту також грають важливу роль в появі контактної втоми кочення і зносу.

Позитивний вплив подрібнення структурних складових і розвиненої комірчастої дислокаційної структури на збільшення міцності і пластичності показали полігонні випробування залізничних рейок Р65 сталі бейнітного класу марки E30XГ2САФМ. Інтенсивність бокового та вертикального зносу рейок зі сталі цієї марки на 10 і 23 % відповідно менше в порівнянні з інтенсивністю зносу об'ємно-загартованих рейок зі сталі марки E76Ф. Відзначимо, що отриманий ефект досягнуто при зміні хімічного складу сталі і не може бути віднесено тільки до рафінування структури, оскільки сталь додатково легована хромом, азотом, ванадієм і молібденом. Введення 0,07...0,08 % ванадію і 0,012...0,017 % азоту підвищило пластичні властивості і ударну в'язкість сталі з високим вмістом вуглецю, а також забезпечило підвищення опору рейок крихкому руйнуванню [10].

В роботі [11] виконано дослідження ефективності мікролегування рейкової сталі карбонітридоутворюючими елементами і визначено кількісний взаємозв'язок параметрів мікроструктури і механічних властивостей рейкової сталі. Вибрано оптимальний склад рейкової сталі, мікролегованої ванадієм. Запропоновано механізм, що пояснює ефективний вплив ванадію на опір втомному руйнуванню рейкової сталі, який полягає в локальному підвищенні температури в зоні біля вершини тріщини до значень, достатніх для виділення карбонітридів ванадію, які перешкоджають зростанню втомної тріщини.

Мікроструктура і поведінка при зносі в умовах контактної втоми кочення п'яти бейнітних сталей з низьким вмістом вуглецю і легуванням молібденом і бором досліджено авторами роботи

[12]. Зносостійкість збільшувалася при наявності в структурі сталі безкарбідного бейніту. Ступінь вмісту цієї форми бейніту в мікроструктурі збільшувалася при більш високому (з досліджених) вмісті вуглецю і швидкості охолодження. Сталь з вмістом 0,18 % С і 1,13 % Si в загартованому стані показала таку ж поведінку при зносі, як і перлітні рейки з загартованою голівкою 0,8 % С [13].

Придатність перлітних і бейнітних рейкових сталей для використання на залізницях, де є проблеми контактної-втомного руйнування при коченні колеса, досліджували фахівці компанії «Системтехник» [14]. Показано, що при правильному легуванні і контролі форми сульфідів, природно тверда сталь без термообробки може бути альтернативою рейкам із загартованою голівкою. Бейнітні рейкові сталі можуть забезпечити баланс між процесами зносу і контактної втоми втримуючи їх розвиток на невисокому рівні. Результати авторів роботи [14] також показують, що високохромиста сталь з середнім вмістом вуглецю і, отже, значно більшою міцністю, забезпечує кращу зносостійкість, ніж високомарганцовиста сталь з нижчим вмістом вуглецю.

Експериментальні результати, що було проаналізовано за допомогою нейронних мереж, вказують на те, що найважливішим фактором у подовженні кількості циклів до початку утворення тріщини в гіперевтектоїдних сталях є твердість, що досягнута шляхом збільшення швидкості охолодження від температури гарячої прокатки, однак відповідні легуючі добавки можуть ще більше посилити ефект. Більш тверді швидко охолоджені зразки демонструють менше пластичне течіння поверхні, ніж м'які повільно охолоджені. Стосовно хімічного складу було доведено, що для зміцнення фериту корисний кремній, який знижує напруження несумісності з цементитом і таким чином запобігає фрагментації і розчиненню ламелі. Це вигідно, оскільки більш глибоке розчинення цементиту виявлено в зразках з меншою кількістю циклів до ініціювання тріщини для заданої швидкості охолодження. Зразки, що містять ванадій, витримували довше і мали меншу пластичну деформацію на поверхні, ніж ті, що не мали аналогічної твердості [15].

Особливістю марочного складу всіх сталей за російським стандартом є тотальне мікролегування ванадієм, що пояснюється проявом позитивної дії самого елемента і особливостями сировинної бази виробництва. Ванадій використовують і в європейських марках сталей, однак лише у разі легування рейкової сталі хромом в кількості 0,75...1,25 %. В інших марках його максимальний вміст обмежено до 0,03 %.

Ще однією особливістю російського сортаменту є наявність марок сталей з вмістом 0,01...0,02 %

азоту. Це вже можна вважати легуванням азотом, яке є доволі ефективним способом покращення міцності. Однак сталі, леговані азотом, при зварювальному нагріві частково втрачають свої властивості за рахунок випаровування і шов, що утворюється, стає менш міцним ніж основний метал. Легування азотом також потребує введення до складу сталі нітридоутворюючих елементів, серед яких є ванадій, а також титан, вміст яких регламентовано в стандарті РФ. Відмінністю вимог ДСТУ до складу рейкових сталей також є регламентація добавок ванадію і титану, які створюють карбонітридне зміцнення сталі і стримують рост зерна при нагріванні. В той же час сучасні тенденції показують застережне відношення до мікролегування титаном, оскільки його нітриди мають ограничену форму і можуть провокувати утворення тріщин.

Відмітимо також, що у позначку марок сталі за європейським стандартом входять цифри, що показують нижню межу норми твердості поверхні катання рейки (за Брінеллем — *HB*), що вводить важливу кореляцію між нормованими властивостями і хімічним складом. Рейкові сталі преміум класу сьогодні мають твердість більше ніж 400 *HB*, що є можливим завдяки комплексу металургійних (в тому числі економного легування) та термообробних операцій.

Вимоги до вмісту газів, домішок і неметалевих включень та пов'язані з ними особливості технології сталеплавильного виробництва. Суттєвим недоліком вітчизняного стандарту є те, що в ньому не регламентовано загальну масову частку кисню у сталі, яка не має перевищувати 0,0020 % (20 частин на мільйон (далі ppm)) за сучасними вимогами. В російському стандарті введено ще й обмеження масової частки кисню в високоглиноземних оксидних включеннях, що не повинна перевищувати 0,0010 % (10 ppm). Введення обмеження їх вмісту є ознакою відсутності присадок алюмінію, що разом з необхідністю забезпечення регламентованого на низькому рівні вмісту кисню вимагає перегляду стереотипів, які склалися щодо технології розкиснення.

Небажаність алюмінію як розкислювача давно відома для високовуглецевих кордових і канатних марок сталей. Виробники не тільки виключають присадки алюмінію, але і уникають використання феросплавів з високим вмістом алюмінію [16, 17] і максимально застосовують можливості вакуум-вуглецевого розкиснення. Аналогічні підходи є ефективними і при виплавці підшипникових сталей, для яких характерним є контактно-втомне руйнування [18], оскільки включення оксиду і нітриду алюмінію чинять дуже шкідливий вплив.

Зазначимо добре відомий факт, що найбільш повно вимогам щодо вмісту шкідливих домішок

та неметалевих включень задовільняють високовуглецеві, зокрема підшипникові, сталі, що вироблено способами ЕШП та ВДП [19].

Проблема неметалевих включень оксиду алюмінію загострюється ще й тому, що вони схильні до агломерування з утворенням великих агрегатів, які провокують утворення тріщин. В той же час власний досвід показує можливість глибокого розкиснення сталей близьких за вмістом вуглецю [20, 21] з максимальним використанням вакуум-вуглецевого і прецизного фінального розкиснення присадками сілікокальцію (феррокальцію). Аналогічні висновки зроблено в роботі [22], результати якої показують, що розкиснення без використання алюмінію дозволяє одержати загальний вміст кисню в сталі нижче 20 ppm, що відповідає вимогам чистої рейкової сталі.

За даними роботи [23] вміст кисню у залізничній сталі мінімальний (5 ppm) при розкисненні карбідом кальцію (CaC_2), що вводять у метал в конверторі. Коли метал розкислюють за допомогою сталевого дроту, наповненого кальцієм або сілікокальцієм, вміст кисню у рейковій сталі становить приблизно 8 та 11 ppm відповідно. Порівняння різних процесів розкиснення залізничної сталі в умовах ВАТ «НТМК» показує, що обмеження вмісту алюмінію (не більше 30 ppm) або використання дроту з наповнювачем із карбіду кальцію або кальцію є більш ефективним, ніж використання дроту заповненого сілікокальцієм [23].

В той же час автори роботи [24] показали, що при вмісті кисню менш ніж 25 ppm в рейковій сталі знаходять переважно крихкодеформовані оксидні включення типу CaOAl_2O_3 , які є більш небезпечними з точки зору утворення контактно-втомних дефектів в процесі експлуатації рейок ніж деформовані сілікати, що знаходять при більшому вмісті кисню. При вмісті кисню понад 40 ppm загальна забрудненість сталі зростає до другого балу і неметалеві включення представлені переважно сілікатами.

Тож, високий вміст алюмінію, що його зараз регламентує вітчизняний стандарт, слід замінити на максимально допустимий його рівень, що не має перевищувати 40 ppm, як це рекомендовано європейським стандартом, оскільки за таких умов забезпечується низька забрудненість сталі неметалевими включеннями і залишається гнучкість технології розкиснення для досягнення формування включень сприятливої морфології.

Про застарілість технічних умов на рейки свідчить і те, що не регламентується вміст водню, а лише вказано, що: «Технологія виготовлення рейок повинна гарантувати відсутність в них флокенів» і, крім того, пропонується використовувати протифлокенове оброблення, яке сьогодні є зайвим за умови забезпечення відповідного рівня водню в

рідкій сталі. Заданий в сучасних стандартах рівень водню не повинен перевищувати 1,5...3,0 ppm, причому для сталей підвищеної міцності вимоги є більш жорсткими. Тобто, для одержання рейок високої якості необхідним є використання технологій та обладнання вакуумної обробки сталі. Причому згадане раніш вакуум-вуглецеве розкислення сталі без присадок сильних розкислювачів дає додаткове зниження вмісту водню при вакуумуванні, оскільки відбувається його перехід в пухирі CO, що утворюються при цьому. Більш того, вакуумування з одночасним вакуум-вуглецевим розкисленням дозволяє скоріше досягти бажаного рівня водню, що підвищує економічність обробки [20].

Вимоги до вмісту сірки, фосфору і кольорових металів також стають жорсткішими [25], оскільки вони негативно впливають на циклічну міцність сталі і тут так само слід керуватися найкращими зразками. Відмітимо, що знефосфорення нижче певної границі є технічно складним і витратним, а глибоке знесірчення веде до зниження здатності металу рейок до механічної обробки (шліфування), яка є частиною процедур підтримання задовільного стану залізничної колії.

Таким чином, чистоту металу за вмістом газів та неметалевих включень в традиційному сталеплавильному циклі визначають операції вакуумування і розкислення, технологію яких має бути оптимізовано за кількістю та складом присадок розкислювачів, що додають, тривалістю та інтенсивністю перемішування при продувці в ковші, здатністю шлаку асимілювати неметалеві включення. Важливою є і організація процесу розливання, оскільки необхідно запобігти вторинному окисленню металу, сформувати бездефектну поверхневу кірку і виключити усадку в центральній зоні, що в максимальному ступені реалізується при використанні електрошлакового переплаву.

Вимоги до макроструктури рейкового металу. Важливим кроком вперед в європейському стандарті є детальний опис ознак для бракування за макроструктурою і наведення еталонних перерізів рейок з описаними особливостями недоліків макроструктури. Російський і вітчизняний стандарти навпаки не приділяють належної уваги макроструктурі металу рейок. Так в ДСТУ вказано тільки, що: «...У рейках не допускають розшарування (залишки усадкової раковини і підусадкової крихкості), внутрішніх тріщин, плямисту ліквіацію, темні і світлі кірочки, чужорідні неметалеві і шлакові вкраплення», що не дає необхідної деталізації і може допускати різночитання при прийомці рейок.

В європейському стандарті (в оригіналі це таблиця D.1. Дефектуючі вади сірчаних відбитків) перелічено можливі недоліки структури (за сірча-

ними відбитками) і їх розмежування на припустимі і неприпустимі, та надано еталонні фото вказаних структур. Неприпустимими визнано такі дефекти як: негативна сегрегація в ободі; підповерхневі пухирі; подвійна позитивна і центральна сегрегація в шийці, яка поширюється на головку та підшову.

Зрозуміло, що рівень вираження макросегрегації знаходиться в прямій кореляції з умовами тверднення сталі та вмістом малорозчинних компонентів та домішок. Тому, щоб гарантувати низький рівень сегрегаційних дефектів, необхідно обмежувати вміст домішок (як це пропонується в сучасних стандартах), що ліквують, і забезпечувати сприятливі умови тверднення сталі (висока швидкість тверднення, мала двофазна зона, збереження підживлення усадки тощо).

З точки зору одержання зливків металу з мінімальною сегрегацією найкращим визнаним способом сьогодні є використання переплавних процесів спеціальної електрометалургії, зокрема електрошлакового переплаву.

Висока якість структури зливку, що формується при класичному ЕШП, можлива тільки за умови невеликої продуктивності процесу, що зрозуміло веде до високої собівартості металу й в попередні роки не дозволяло використовувати ЕШП для виробництва рейок в промислових масштабах. Однак вже зараз авторами цієї роботи розроблено, впроваджено у виробництво і продовжується вдосконалення процесів як з використанням попереднього підігріву електроду для зниження втрат електроенергії на його плавлення і зменшення перегріву металу, так і з використанням рідкого металу замість електроду, що дозволяє суттєво збільшити енергоефективність виробництва продукції зі збереженням її високої якості.

В разі використання нових підходів до вдосконалення технології та обладнання електрошлакового переплаву особливості процесу можуть бути повернені на його користь і в наступному повідомленні буде розглянуто можливі варіанти реалізації процесів електрошлакового переплаву з рідким металом та так званого «ремануфакчурина», що дозволяють зробити використання ЕШП доцільним для виробництва рейок високої якості.

Тенденції покращення сортаменту і якості рейок.

Таким чином, можна виділити наступні тенденції змінення складу рейкових сталей:

для швидкісних і важконавантажених колій залізничники повинні використовувати рейкові сталі більшої міцності, якої досягають переважно за рахунок підвищення вмісту вуглецю (заевтектоїдні (гіперевтектоїдні)), а не інших легуючих елементів; рейкові сталі з підвищеними експлуатаційними характеристиками мають більшу чистоту за

вмістом кисню та неметалевих включень, морфологія яких є важливою для попередження контактно-втомних пошкоджень;

вводити більш жорсткі обмеження вмісту фосфору, сірки та кольорових металів;

надважливою ланкою забезпечення властивостей рейок є термічна обробка (якої ми не торкались в цьому дослідженні), тож будь-яка новація або зміна складу рейкової сталі має бути тісно узгоджено з технологією її виробництва.

Відповідно до порівняння проведеного нашими попередниками [26, 27] та висновків власного аналізу нормативних документів, можна зробити висновок, що вимоги вітчизняного стандарту ДСТУ 4344:2004 за показниками якості металу і механічними властивостями є нижчими за такі в розглянутих аналогах за наступними позиціями:

не передбачено кваліфікаційних випробувань рейок (визначення в'язкості руйнування, статичної та циклічної тріщиностійкості), характеристик втоми, залишкової напруги в підшві рейок тощо), що не дозволяє гарантувати експлуатаційні показники;

максимальна довжина рейок регламентується 25-ма метрами, що є недостатнім для сучасних залізниць, тому бажано передбачити виробництво рейок довжиною 100...150 м і прописати вимоги до їх якості;

значно нижчими є вимоги до вмісту сірки, фосфору, кольорових металів, не регламентується допустимий вміст кисню (в тому числі в неметалевих включеннях) і алюмінію, а також водню у рейкових сталях і відповідно не визначено методи їх контролю.

Для підвищення якості рейок, що мають випускатися в Україні, необхідно провести гармонізацію вітчизняного стандарту ДСТУ 4344:2004 з європейським стандартом EN 13674-1:2003+A1:2007 на рейки широкої колії, що дозволило б металургам забезпечити потреби «Укрзалізниця» у високоякісних рейках та конкурувати на світовому ринку.

З цією метою слід виконати низку модернізаційних та організаційних заходів для забезпечення відповідності технології виготовлення сучасним вимогам і повного циклу випробувань рейок:

виконати комплекс інжинірингових робіт з аудиту та стандартизації окремих ланок і навскрізної технології виробництва (виплавки, позапічної обробки, розливки, прокатки та термообробки) рейкових сталей (найбільш придатними для цього є металургійні комбінати ПАТ «Азовсталь» і ПАТ «Дніпровський меткомбінат»), щоб забезпечити стабільний гарантований рівень якості і властивостей сучасних рейкових сталей, що будуть виготовлятися;

відпрацювати технології розкислення рейкової сталі без використання алюмінію на базі вакуум-вуглецевого розкислення для забезпечен-

ня вимог до вмісту кисню в рейковому металі, а також розробити заходи ефективного видалення водню з рідкої рейкової сталі;

провести реконструкцію існуючого або ініціювати будівництво нового рейкобалкового стану, щоб мати можливість прокатувати рейки 120...150 м завдовжки. В якості альтернативи можна розглянути доцільність використання стикового зварення більш коротких рейок в 100-метрові в пристосованих промислових умовах з організацією ефективної локальної термообробки стикових з'єднань для забезпечення їх рівномірності основному металу рейок;

розробити регламенти кваліфікаційних випробувань рейок; кваліфікаційні випробування повинні проводитися щонайменше один раз на п'ять років, а також при суттєвих змінах технології заводів, що виробляють рейки; додаткові випробування на залишкові напруги слід проводити на всі типи сталевих рейок кожні два роки максимум, оскільки рівень повздовжніх напруг деформації в рейках може досягати 250 МПа.

Попередньо кваліфікаційний іспит має містити випробування наступних показників: в'язкість руйнування; швидкість підростання втомних тріщин; випробування на витривалість; залишкові напруги в підшві рейок; відхилення центральної лінії; міцність на розрив і подовження; сегрегація; інші кваліфікаційні вимоги [27] та визначити ключові сертифіковані лабораторії для їх проведення; виконати аудит і за необхідності вдосконалити методи неруйнівного і автоматичного контролю якості залізничних рейок.

Безумовно, що одним із стимулів позитивних змін і орієнтиром на сучасні найкращі зразки для забезпечення високої якості і конкурентоспроможності нових рейок має стати науково обґрунтований Державний стандарт на магістральні рейки, що має відображати сучасні тенденції забезпечення і покращення їх якості. Зокрема, виділення і обґрунтування прогресивних вимог до рейкових сталей, а також визначення технічних і технологічних можливостей їх забезпечення є важливою умовою завчасної підготовки виробництва до випуску високоякісної продукції. Фахівці залізниць і металургії сьогодні вважають, що методи поліпшення чистоти і властивостей сталей для залізничних рейок в традиційному металургійному циклі практично вичерпано. Тому доцільно розглянути можливості, які дасть використання електрошлакових технологій, продукція яких гарантує одержання щільного металу рафінованого складу та структури з мінімальними проявами сегрегації і формування неметалевих включень сприятливої морфології, що має покращити експлуатаційні властивості рейок.

Висновки

1. Підвищення строку служби рейок досягають збільшенням їх довжини (100...150 м), вдосконаленням технології металургійного виробництва (забезпечення сталої якості, мінімум відхилень складу і шкідливих домішок, розробки нових марок рейок з підвищеним вмістом вуглецю та мікролегуванням, забезпеченням ефективної термообробки для одержання сприятливої мікроструктури тощо).

2. Сучасні тенденції змінення складу рейкових сталей наступні:

для швидкісних і важконавантажених колій залізничники використовують рейкові сталі більшої міцності, якої досягають перш за все за рахунок підвищення вмісту вуглецю (заевтектоїдні (гіперектектоїдні)), а не інших легуючих елементів;

рейкові сталі з підвищеними експлуатаційними характеристиками мають більшу чистоту за вмістом газів: кисню (і, відповідно, оксидних неметалевих включень), водню і азоту (за виключенням марок з карбонитридним зміцненням);

суттєве зниження вмісту алюмінію, що поряд з вимогою до низького вмісту кисню потребує перегляду технології розкиснення з відмовою від присадок алюмінію, щоб запобігти утворенню алюмінатів, що можуть провокувати тріщини;

більш жорсткі обмеження вмісту фосфору та сірки.

3. Суттєвою ланкою забезпечення властивостей рейок є зміна складу рейкової сталі, що має бути тісно узгоджено з технологією термічної обробки.

4. Вимоги вітчизняного стандарту ДСТУ 4344:2004 за показниками якості металу і механічними властивостями є нижчими за такі в європейському EN 13674-1:2003+A1:2007 і російському аналогах. Тому, щоб зробити вітчизняний стандарт дієвим інструментом підвищення якості рейок, що будуть випускати в Україні, необхідно провести його гармонізацію з європейським стандартом на рейки широкої колії, що дозволило би вітчизняному виробникові забезпечити потребу Укрзалізниці та конкурувати на світовому ринку.

5. Необхідно створити сертифікаційний базис, комплекс інжинірингових робіт з аудиту та стандартизації окремих ланок і розробки на основі кращих аналогів проекту навскрізної технології виробництва рейкових сталей, щоб забезпечити з самого початку стабільний гарантований рівень їх якості і властивостей: відпрацювати технології розкиснення рейкової сталі без використання алюмінію на базі вакуум-вуглецевого розкиснення для забезпечення вимог до вмісту кисню і водню.

6. Зважаючи на те, що залізничники і металурги сьогодні вважають, що методи поліпшення чистоти і властивостей сталей для залізничних рейок

в традиційному металургійному циклі практично вичерпано, доцільно розглянути можливості, які дасть використання електрошлакових технологій.

Список літератури/References

- (2007) *Railway applications—track—rail*. Pt 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above. EN 13674-1:2003+A1:2007.
- Vitez, I., Oruč, M., Krumes, D., Kladarić, I. (2007) Damage to railway rails caused by exploitation. *Metallurgija*, 46(2), 123–128.
- (2005) *Steels: Processing, structure, and performance* (#05140G. Chapt. 15. High-carbon steels: Fully pearlitic microstructures and applications. ASM International. https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/Chapter_15_WEB.pdf
- https://www.voestalpine.com/schienen/static/sites/schienen/downloads/Definitive_guidelines_on_the_use_of_different_rail_grades_xINNOTRACK_deliverable_report_D4_1.5GLx_nur_in_Englisch_verfuegbarx.pdf
- Conventional rails of road-gage railways*. General specifications. DSTU 4344:2004. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
- (2014) Railway rails. General specifications. GOST R 51 685–2013 [in Russian].
- Saeki, K., Iwano, K. (2013) Progress and prospects of rail for railroads Nippon Steel & Sumitomo Metal. *Technical Report*, 105, 21–25.
- Girsch, G., Keichel, J., Gehrman R. et al. (2009) Advanced rail steels for heavy haul application-track performance and weldability. In: *Proc. of 9th Int. Heavy Haul Conf.* (Shanghai, China, June 22–25, 2009), 171–178.
- Ordenez, R., Garcasal, C. I., Kalay, S., Deardo, J. (2010) Development of high performance steels for rail. In: *Proc. of Joint Rail Conf. 2010*, 1 (Urbana, Illinois, USA, April 27–29, 2010), 129–133.
- Dementiev, V.P., Korneva, L.V., Serpiyanov, A.I. et al. (2007) Technology of production and exploitation of experimental rails NKMK on East Siberian Railway. In: *Proc. of All-Russian Sci.-Pract. Conf. on Problems and Prospects of Research, Design, Construction and Exploitation of Russian Railways* (10–11 October 2007, Irkutsk), Vol. 1, 29–34 [in Russian].
- Pan, A.V. *Development and implementation of new technologies for current and prospective production of rails*: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Moscow [in Russian].
- Jin, N., Clayton, P. (1997) Effect of microstructure on rolling/sliding wear of low carbon bainitic steels. *Wear*, 202(2), 202–207.
- Marais, J. J., Mistry, K. C. (2003) Rail integrity management by means of ultrasonic testing. *Fatigue & Fract. of Eng. Mat. & Struct.*, 26(10), 931–938.
- Mädler, K., Zoll, A., Heyder, R., Brehmer, M. Rail materials — alternatives and limits. www.railway-research.org/sl.3.4.1.pdf
- Solano-Alvarez, W., Peet, M.J., Pickering, E.J. et al. (2017) Synchrotron and neural network analysis of the influence of composition and heat treatment on the rolling contact fatigue of hypereutectoid pearlitic steels. *Mater. Sci. and Engin.*, 707, 259–269.
- Sychkov, A.B., Zhigarev, M.A., Perchatkin, A.V. et al. (2006) High-carbon rod from steel with higher chromium content. *Metallurg*, 4, 59–62 [in Russian].
- Zazyan, A.S. (2006) Regulation of amount and composition of nonmetallic inclusions during performance of out-of-furnace treatment of high-carbon steel. *Chyorn. Metallurgiya*, 10, 40–44 [in Russian].

18. (2017) Advantages of Si deoxidation of bearing steels for steel cleanness and for composition and morphology of non-metallic inclusions. Bearing steel technologies. Ed. by J. M. Beswick. Vol. 11: Progress in steel technologies and bearing steel quality assurance. ASTM STP1600, *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 48–62.
19. Gurchenko, P.S., Solonovich, A.A. (2015) Prospects of application of carbon steels for bearings and gears with strengthened by controlled volumetric-surface quenching from induction heating. *Litio i Metallurgiya*, **1**, 91–97 [in Russian].
20. Tyagny, V.V., Stovpchenko, A.P., Grishchenko, Yu.N. et al. (2007) Increase in efficiency of metal degassing for railway wheels. *Stal*, **8**, 30–33 [in Russian].
21. Projdak, Yu.S., Stovpchenko, A.P., Kamkina, L.V. et al. (2008) Experimental investigation of gas saturation of high-strength rope steel in out-of-furnace treatment process. In: *Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej. Chestochowa, Wydawnictwo Politechniki Czestochwskiej*, 360–363.
22. Wei Wu, Liu Liu (2008) Application of Al-free deoxidizer in rail steel manufacture. *J. of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, **15(5)**, 534–537.
23. Garber, A.K., Arsenikin, A.M., Grigorovich, K.V. et al. (2008) Analysis different technology variants for rail steel deoxidation in OSJC NTMK. *Elektrometallurgiya*, **10**, 3–7 [in Russian].
24. Kozurev, Z.A., Protopopov, E.V., Aizatylov, R.C., Boikov, D.V. New production technology of rail steel. *Izvestiya. Chern. Metallurgiya*, 2012; **55(2)**, 25–29 [in Russian]. DOI: 10.17073/0368-0797-2012-2-25-29.
25. <http://www.indexbox.ru/news/rossijskie-relysy-vytesnyayut-import/2016>: Index box
26. Rudyuk, O., Pykhtin, Ya., Ivanysenko, L., Bezpoyasova, A. (2013) Analysis of requirements of standards for main-line railway rails. *Standartyzatsiya, Sertyfikatsiya, Yakist*, **5**, 3–8 [in Ukrainian].
27. Sladojević, B. et al. (2011) New requirements for the quality of steel rails. *Metallurgija-MJoM*, **17(4)**, 213–219.

СОВРЕМЕННЫЕ РЕЛЬСОВЫЕ СТАЛИ И ВОЗМОЖНОСТИ ЭШП (Обзор).

Сообщение 2. Требования стандартов к химическому составу стали для железнодорожных рельсов магистральных путей

Л. Б. Медовар, А. П. Стовпченко, А. А. Полишко, Д. А. Коломиец, Е. А. Педченко, В. А. Зайцев

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Сделано сравнение отечественного стандарта на железнодорожные рельсы и современных зарубежных. Показано, что в Украине требования к железнодорожным рельсам значительно мягче по сравнению с зарубежными и не обеспечивают современного уровня их качества. Проанализирована связь современных металлургических технологий производства рельсов и их качества, в частности возможности использования вакуум-углеродного раскисления рельсовой стали и отказа от раскисления алюминием. Показана целесообразность разработки нового стандарта Украины на железнодорожные рельсы и возможность использования электрошлакового переплава для рельсов высокого качества. Библиогр. 27, табл. 3.

Ключевые слова: железнодорожные рельсы; рельсовые стали; бейнитные; перлитные; гиперэвтектидные; вакуум-углеродное раскисление; макроструктура; электрошлаковый переплав; стандарт

MODERN RAIL STEELS. APPLICATION OF ESR (Review). Information 2.

Requirements of standards to chemical composition of steels for railway rails of main-line tracks

L.B. Medovar, A.P. Stovpchenko, A.A. Polishko, D.A. Kolomiets, E.A. Pedchenko, V.A. Zaitsev

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The comparison of national standard on railway rails and modern foreign ones is made. It is shown that requirements in Ukraine to the railway rails are less strict as compared with foreign ones and do not provide the updated level of their quality. The relation of present metallurgical technologies of rail production and their quality, in particular, the feasibility of applying the vacuum-carbon deoxidation of rail steel and refuse from aluminium deoxidation, is analyzed. The need in the development of new standard of Ukraine for the railway rails and opportunity of electroslag remelting application for the high-quality rails are shown. Ref. 27, Tabl. 3.

Key words: railway rails; rail steels; bainite; pearlite; hypereutectoid; vacuum-carbon deoxidation; deoxidation; macrostructure; electroslag remelting; standard

Надійшла 02.05.2018