

УДК 539.3:620.172:625.143

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.109754>

Вплив охолодження до 213 К на міцність рейкової сталі

Л.С. Новогрудський¹ • М.Я. Оправхата¹ • О.В. Качура²

1 - Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка Національної академії наук України, м. Київ, Україна;

2 - КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 31 May 2017 / Accepted: 15 September 2017

Анотація. В статті приведено данні, що вказують на необхідність врахування в розрахунках на міцність колії зміни характеристик статичної міцності рейкової сталі перлітного класу після її тривалого напруження в залізничній колії при охолодженні до 213 К. Показано, що нехтування змінами характеристик статичної міцності рейкової сталі може суттєво вплинути на працездатність залізничних колій та безпеку вантажних та пасажирських перевезень. Встановлено, що під час безперервної довготривалої експлуатації рейок в колії механічні властивості рейкової сталі зазнають значних змін. Так при охолодженні до 213 К матеріалу рейки після експлуатації значення характеристик статичної міцності сталі знижуються нижче мінімального значення встановленого відповідними нормативними документами. На основі отриманих експериментальних даних виконано розрахунок допустимих напружень для матеріалу рейки після експлуатації в колії для різних температур і показано необхідність врахування зміни в процесі експлуатації значень характеристик міцності рейкової сталі при проведенні розрахунків на міцність залізничних рейкових колій. Виявленні значні зміни значень характеристик статичної міцності та розрахункових допустимих напружень рейкової сталі при знижених температурах можуть призвести до втрати несучої здатності рейок. Отримані результати підтверджують необхідність в проведенні розширених експериментальних досліджень впливу експлуатаційних факторів на механічні характеристики рейкової сталі.

Ключові слова: механічні характеристики, міцність, залізничні колії, рейкова сталь.

Вступ. Працездатність конструкцій і їх несучих елементів в значній мірі визначається рівнем вихідних значень механічних характеристик використаних конструкційних матеріалів. Для рейкового транспорту несучими елементами, що відповідають за безпеку руху поїздів, є колісні пари і рейки. Їх взаємодія при експлуатації відбувається в умовах динамічної дії складної системи зовнішніх факторів [1]. Тривала робота конструкційних елементів в таких умовах вимагає використання матеріалів з високим рівнем міцності, довговічності і зносостійкості. Регулювання співвідношення основних і легуючих хімічних елементів, режимів термообробки, дає можливість керувати вихідною мікроструктурою, твердістю, міцністю та рядом інших фізико-механічних властивостей матеріалу. А використання деформаційних методів обробки дозволяє не тільки надавати виробу необхідну геометричну форму, але і задавати напрямок максимальних значень цих властивостей [2].

Довговічність рейок залежить від конструкції, плану і профілю колії, навантаження від колісних пар, типу і якості рейок, іншого. Дія експлуатаційних факторів може суттєво змінити характер поведінки матеріалу рейок, його механічні властивості, здатність чинити опір деформуванню і руйнуванню, ресурсні показники [3, 4]. В процесі експлуатації також відбувається зниження несучої здатності рейок в наслідок спрацювання головки, корозії підшви, старіння і накопичення залишкових деформацій в металі, тощо. В результаті з'являються пошкодження, дефекти, які незважаючи на запас міцності матеріалу рейок, призводять до необхідності зниження швидкості руху рухомого складу або до повної його зупинки.

Міцності рейкової колії оцінюють насамперед по міцності основного несучого елемента верхньої будови колії, тобто по міцності рейок, шляхом порівняння розрахункових напружень в рейках з допустимими значеннями. За напруженнями, що виникають в інших елементах верхньої будови колії, а саме за напруженнями в шпалах, баласті, на основній площадці земляного полотна – оцінюють несучу здатність і здатність безаварійної експлуатації конструкції верхньої будови колії в цілому. В інженерних розрахунках

✉ М.Я. Оправхата
n.opravkhata@gmail.com

напружений стан рейок оцінюють за рівнем нормальних згинаючих напружень [5, 6]. Напруження в зоні контакту колеса та рейки розраховують за окремою методикою [7, 8] і враховують при проектуванні профілю рейок і виборі матеріалу для їх виготовлення.

Отже проведення розрахунків колії на міцність та стійкість є важливим етапом при проектуванні нових конструкцій колії, оцінці напружено-деформованого стану її елементів, визначення допустимих навантажень та швидкостей руху поїздів, а також визначення мінімально необхідного рівня потужності конструкції верхньої будови колії. Результати розрахунків колії на міцність і стійкість також можуть бути використані при аналізі причин та прогнозуванні руйнувань елементів конструкцій залізничної колії, а також визначенні гранично допустимого пропущеного тоннажу, після якого необхідно здійснювати плановий чи капітальний ремонт.

Проте, для визначення значень допустимих напружень [5–8] використовуються характеристики статичної міцності сталі у вихідному (до початку експлуатації) стані. Тоді як з літератури відомо [9–11], що в сталях перлітного класу, до яких відносяться рейкові сталі, під дією циклічного навантаження, починаючи з першого циклу, у всьому об'ємі або в окремих об'ємах матеріалу, відбувається руйнування перлітної структури, що призводить до зміни його механічних властивостей. Значний вплив на механічні характеристики рейкової сталі має і навколишнє середовище. Зменшення пластичності матеріалу в умовах знижених температур може привести до виникнення в матеріалі рейок зон крихкого руйнування. В зимовий період частка таких пошкоджень досягає 68 %, в літній період – до 32 % від загальної кількості виявлених дефектів [12, 13]

Неврахування при розрахунках на міцність можливих змін значень характеристик статичної міцності рейкової сталі через дію експлуатаційних факторів таких, як циклічних навантажень і знижених температур може внести суттєві похибки в оцінку граничного стану залізничної колії. У зв'язку з цим виникає необхідність в дослідженні ступеня впливу найбільш дієвих експлуатаційних факторів діючих на рейкові колії.

Метою цієї роботи є встановлення ступеня впливу охолодження до 213 К на міцність рейкової сталі після її тривалої експлуатації в рейковому шляху.

Методика розрахунку. Діюча на сьогодні методика практичного розрахунку колії на міцність викладена в [5]. Розрахунок базується на законах теоретичної та будівельної механіки з використанням елементів теорії імовірності. Обґрунтування необхідності застосування теорії імовірності при визначенні напружено-деформованого стану рейкових колій виконано в роботах Петрова М.П. [14]. Подальший розвиток теоретичних обґрунтувань такого підходу, його розвиток при вивченні взаємодії рухомого складу з колією та експериментальне підтвердження виконано Веріго М.Ф., Коганом А.Я. [15, 16].

Згідно прийнятим правилам розрахунку [5], при побудові розрахункової схеми, рейка розглядається як балка нескінченної довжини незмінного перерізу, що вільно лежить на рівнопружних опорах. Із усього різноманіття експлуатаційних факторів, що діють на рейкові колії [1, 5] при розрахунку враховується силова дія рухомого складу (при цьому дія локомотива визначає міцність колії, а вагонів – залишкову деформацію), природно-кліматичні фактори та внутрішні напруження, які виникають при виготовленні, укладці та експлуатації рейок в колії [5, 6]. Загальна структура та послідовність проведення розрахунку залізничних колій приведено в [7].

Диференціальне рівняння згину рейки, навантаженої зосередженою силою, записується в наступному вигляді:

$$EI \frac{d^4 Z}{dx^4} + U_z Z = 0, \quad (1)$$

де E – модуль пружності сталі;

I – момент інерції перерізу рейки у вертикальній площині;

Z – прогин рейки;

U_z – модуль пружності підрейкової основи.

Розв'язок рівняння (1) дає можливість визначити згинаючий момент в будь-якому перерізі рейки $M_{дин.}$ та силу тиску рейки на опори $Q_{дин.}$:

$$\begin{aligned} M_{дин.} &= \frac{1}{4k} P_{екв.}^I = \frac{1}{4k} (P_{роз.} + \sum \bar{P}_i \mu_i), \\ Q_{дин.} &= \frac{kl}{2} P_{екв.}^{II} = \frac{kl}{2} (P_{роз.} + \sum \bar{P}_i \eta_i), \end{aligned} \quad (2)$$

де $P_{роз.}$ – розрахункове навантаження;

$P_{екв.}^I, P_{екв.}^{II}$ – еквівалентне навантаження;

k – коефіцієнт відносної жорсткості основи і рейки;

l – відстань між центрами осей колісних пар;

μ_i та η_i – ординати ліній впливу відповідно моментів та поперечних сил, взятих в перерізах під колесами візків, які розглядаються;

\bar{P}_i – середнє значення динамічної сили від i -ї колісної пари.

Напруження в рейках (по вісі головки σ_{z-o} та підшви σ_{n-o}) від дії згинаючого моменту, $M_{дин.}$, можуть бути визначені за формулами опору матеріалів для випадку чистого згину балки:

$$\sigma_{n-o} = \frac{M_{дин.}}{W_n}, \sigma_{z-o} = \frac{M_{дин.}}{W_z}, \quad (3)$$

де W_n і W_z – моменти опору рейки відповідно по низу підшви та по верху головки.

Врахування горизонтальних поперечних сил та позacentрового прикладення вертикальних сил здійснюють за допомогою введення спеціальних емпіричних коефіцієнтів, визначених для різних видів рухомого складу [5].

Напруження від згину та кручення в кромках підшви рейки σ_{n-k} знаходять за формулою

$$\sigma_{n-k} = f \sigma_{n-o}, \quad (4)$$

а напруження в кромках головки рейки σ_{z-k} за виразом

$$\sigma_{z-k} = m_{z-k} \sigma_{z-o}, \quad (5)$$

де f – коефіцієнт, що враховує дію горизонтальних поперечних сил і позacentрове прикладення вертикального навантаження;

m_{z-k} – коефіцієнт, що враховує перехід від осьових напружень в підшві до напружень в кромках головки.

Згідно з методикою розрахунку рейок на міцність [7] за небезпечне напруження приймають гарантовану границю плинності рейкової сталі $\sigma_{0,2}^{гарант.}$ з урахуванням рівня імовірності $\Phi = 0,999$. Гарантована границя плинності рейкової сталі є розрахунковою величиною і визначається з виразу:

$$\sigma_{0,2}^{гарант.} = \bar{\sigma}_{0,2} - \lambda_\Phi S_{\sigma_{0,2}}, \quad (6)$$

де $\bar{\sigma}_{0,2}$ – середнє значення умовної границі плинності матеріалу;

$S_{\sigma_{0,2}}$ – середнє квадратичне відхилення значень $\bar{\sigma}_{0,2}$;

λ_Φ – нормуючий множник для заданого рівня імовірності.

Допустимі розрахункові напруження для рейок залізничної колії визначають, як:

$$[\sigma]_{розр.} = \frac{\sigma_{0,2}^{гарант.} - \sigma_t}{n}, \quad (7)$$

де σ_t – температурні напруження;

n – коефіцієнт запасу.

Для оцінки напруженого стану в поперечному перерізі рейки під колесом рухомого складу умова міцності записується у вигляді [5]:

$$\sigma_{n-k} \leq [\sigma]_{розр.}; \sigma_{z-k} \leq [\sigma]_{розр.}, \quad (8)$$

де $[\sigma]_{розр.}$ – допустиме розрахункове напруження.

В основу розрахунку напружень при контактній взаємодії покладено класичну теорію Герца-Беляєва [7, 8]. При навантаженні осьовою силою циліндричних тіл розподіл напружень по площадці контакту має вигляд еліпсоїда, з найбільшим нормальним напруженням в центрі площадки контакту, величину якого можна визначити за формулою [7]:

$$\sigma_{max} = m_0 \sqrt[3]{\frac{P_{роз.} \cdot E^2}{R^2}}, \quad (9)$$

де m_0 – параметр, що характеризує співвідношення радіусів головки рейки та колеса по кругу кочення;

E – модуль пружності матеріалу;

R – радіус колеса по кругу кочення.

Величина еквівалентних напружень в небезпечній точці головки рейки визначається з виразу

$$\sigma_{екв.}^1 = 0,65 \sigma_{max}. \quad (10)$$

На поверхні кочення в центрі площадки контакту

$$\sigma_{екв.}^2 = n_1 \sigma_{max}, \quad (11)$$

а на краю еліпса

$$\sigma_{екв.}^3 = n_2 \sigma_{max}, \quad (12)$$

де n_1 і n_2 – коефіцієнти, що залежать від співвідношення радіусів головки рейки та колеса по кругу кочення rR і наведені в [7].

Умову міцності можна записати у вигляді:

$$\sigma_{екв.} \leq [\sigma]_{конт.}, \quad (13)$$

де $[\sigma]_{конт.} = [\sigma]_{ст.} / m$ – допустиме значення для найбільшого напруження в зоні контакту;

$[\sigma]_{ст.}$ – допустиме значення напруження на стиск;

m – значення коефіцієнта залежить від співвідношення півосей еліптичної площадки контакту [7].

Результати. Як видно з приведених вище формул методики, механічні характеристики матеріалу використовуються лише при розрахунку гарантованої границі плинності рейкової сталі. Для цього необхідно провести випробування на статичний розтяг [17, 18] стандартних циліндричних зразків і визначити середнє значення умовної границі плинності матеріалу $\bar{\sigma}_{0,2}$ та її середнє квадратичне відхилення $S_{\sigma_{0,2}}$.

Проведенні експериментальні дослідження [19–21] механічних властивостей рейкових сталей в умовах дії електричного струму, знижених температур та попереднього напрацювання показали, що підчас безперервної довготривалої експлуатації колії фізико-механічні властивості рейкової сталі зазнають значних змін.

За результатами механічних випробувань циліндричних зразків рейкової сталі в інтервалі температур від 293 К до 213 К (табл. 1) [19, 20] встановлено, що при охолодженні до 253 К матеріалу рейки після експлуатації значення границі міцності знижуються на 17 %, а умовної границі плинності – на 30 %. Подальше зниження температури випробувань до 213 К супроводжується лише незначною (~3 %) зміною температурного зміцнення.

Таблиця 1

Механічні характеристики рейкової сталі М76 після експлуатації в інтервалі температур від 293 К до 213 К

Температура випробувань, К	σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
293	1161	806	13,5	35,0
253	958	579	17,5	43,0
233	974	566	10,5	14,5
213	992	606	11,5	13,0

Виявленні значні зміни значень характеристик статичної міцності рейкової сталі при знижених температурах можуть призвести до втрати несучої здатності рейок.

Скориставшись приведеною вище методикою визначення допустимих напружень в елементах колії та отриманими експериментальними даними (див. табл. 1) механічних характеристик рейкової сталі, виконаємо розрахунок допустимих напружень для матеріалу рейки після експлуатації в колії для різних температур (табл. 2).

Таблиця 2

Значення гарантованої границі плинності та допустимих напружень

Стан матеріалу	Температура, К	$\sigma_{0,2}^{гарант.}$, МПа	$[\sigma]_{розр.}$, МПа
Мінімальне значення по ДСТУ 4344:2004	293	590	400
Після експлуатації	293	776	504
	253	519	321
	233	491	301
	213	456	276

Як видно з наведених у табл. 2 даних, значення допустимих розрахункових напружень матеріалу рейки після експлуатації при температурі 293 К значно більше (на 26 %) мінімального значення регламентованого нормативним документом [18]. Зниження температури випробувань до 253 К приводить до значного зменшення значення допустимого напруження – на 36 % відносно значення, отриманого при кімнатній температурі і на 20 % – відносно мінімального значення регламентованого нормативним документом. Подальше зниження температури до 213 К призводить до ще більшого зменшення значення допустимого напруження (більш ніж на 30 % – відносно мінімального значення регламентованого нормативним документом).

Неврахування в розрахунках на міцність рейкових колій зміни значень характеристик міцності та рівня допустимих розрахункових напружень рейкової сталі при зниженні температури нижче нормальної може суттєво вплинути на вирішення задач, зв'язаних з забезпеченням надійності, довговічності та безпечності експлуатації залізничних колій.

Висновки. Зміна значень механічних характеристик рейкових сталей в процесі роботи рейок в залізничних коліях призводить до суттєвого зниження рівня розрахункових допустимих напружень, що необхідно враховувати при проектуванні залізничних колій особливо тих, які працюють в умовах знижених температур. Отримані результати підтверджують необхідність в проведенні розширених експериментальних досліджень впливу експлуатаційних факторів на механічні характеристики рейкової сталі.

Влияние охлаждения до 213 К на прочность рельсовой стали

Л.С. Новогрудский, Н.Я. Оправхата, А.В. Качура

***Аннотация.** В статье приведены данные, указывающие на необходимость учета в расчетах на прочность пути изменения характеристик статической прочности рельсовой стали перлитного класса после ее длительного наработки в железнодорожном пути при охлаждении до 213 К. Показано, что пренебрежение изменениями характеристик статической прочности рельсовой стали может существенно повлиять на работоспособность железнодорожных путей и безопасность грузовых и пассажирских перевозок. Установлено, что во время непрерывной длительной эксплуатации рельсов в пути механические свойства рельсовой стали претерпевают значительные изменения. Так при охлаждении до 213 К материала рельса после эксплуатации значения характеристик статической прочности стали снижаются ниже минимального значения установленного соответствующими нормативными документами. На основе полученных экспериментальных данных выполнен расчет допустимых напряжений для материала рельсы после эксплуатации в пути для различных температур и показана необходимость учета изменений в процессе эксплуатации значений прочностных характеристик рельсовой стали при проведении расчетов на прочность железнодорожных рельсовых путей. Выявленные значительные изменения значений характеристик статической прочности и расчетных допустимых напряжений рельсовой стали при пониженных температурах могут привести к потере несущей способности рельсов. Полученные результаты подтверждают необходимость в проведении расширенных экспериментальных исследований влияния эксплуатационных факторов на механические характеристики рельсовой стали.*

***Ключевые слова:** механические характеристики, прочность, железнодорожный путь, рельсовая сталь.*

Influence cooling to 213 K for strength rail steel

L. Novogrudskii, N. Opravkhata, O. Kachura

***Abstract.** The paper presents, the data indicating the need to take into account in the calculation of the strength of the railway track of changing the characteristics of the static strength of rail steel perlite class after its long operating time in the railway track with cooling to 213 K. It is shown that neglecting changes in the static strength characteristics of rail steel can significantly affect the performance railways and the safety of freight and passenger transportation. It is established that during the long operation of the rails in transit, the mechanical properties of the rail steel undergo significant changes. When cooling to 213 K of rail material, the values of the static strength characteristics of steel are reduced below the minimum value established by regulatory documents. On the basis of the experimental data, the permissible stresses for the rails material were calculated after long-term operation in transit for different temperatures and it was shown that it is necessary to take into account changes in the operation of the strength characteristics of rail steel when calculating the strength of railway tracks. Significant changes in the values of the characteristics of static strength and permissible stresses of rail steel at low temperatures can lead to a loss of bearing capacity of the rails. The obtained results confirm the need for carrying out extensive experimental studies of the effect of operational factors on the mechanical characteristics of rail steel.*

***Keywords:** mechanical properties, strength, railroad, rail steel.*

References

1. Kharris, U.Dzh., Zakharov, S.M., Landgren, Dzh., Torne, Kh. and Ebersen, V. (2002), *Obobshchenie peredovogo opyta tiazhelovesnogo dvizheniia: voprosy vzaimodeistviia kolea i rel'sa* [Summary of advanced experience in heavy transport: issues of wheel-rail interaction], in Zakharov, S.M. and Bogdanova, V.M. (ed), Intekst, Moscow, Russia.
2. Ashkenazi, E.K. (1969), *Anizotropiya mashinostroitel'nykh materialov* [Anisotropy of engineering materials], Mashinostroenie, Leningrad, Russia.
3. Strizhalo, V.A. (1978), *Tsiklicheskaya prochnost' i polzuchest' metallov pri malotsiklovom nagruzhennii v usloviyakh nizkikh i vysokikh temperature* [Cyclic strength and creep of metals under low-cycle loading at low and high temperatures], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
4. Troshchenko, V.T. (1981), *Deformirovaniye i razrusheniye metallov pri mnogotsiklovom nagruzhennii* [Deformation and Fracture of Metals under Multicyclic Loading], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
5. Danilenko, E.I. and Rybkin, V.V. (2004), *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoyi kolyyi na mitsnist' i stiykist'* [Rules for calculation of the railway track for durability and stability], Transport Ukrayiny, Kiev, Ukraine.
6. *Pravila proizvodstva raschetov verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti na prochnost'*, (1954), Transzheldorizdat, Moscow, Russia.
7. Yakovleva, T.G., Karpushchenko, S.I., Klinov, N.N., Putrya, N.N. and Smirnov, M.P. (1999), *Zheleznodorozhnyi put'* [The railway], in Yakovlevoi, T.G., (ed.), Transport, Moscow, Russia.
8. Pysarenko, H.S., Kvitka, O.L. and Umans'kyy, Ye.S. (2004), *Opir materialiv* [Strength of materials], in Pysarenka, H.S., (ed.), Vyshcha shkola, Kiev, Ukraine.
9. Izotov, V.I., Pozdnyakov, V.A., Luk'yanenko, E.V. and dr. (2008), "Evolutsiya dislokatsionnoi struktury i obrazovaniye mikrotreshchin pri ustalosti perlitno-ferritnoi stali" [The evolution of the dislocation structure and the formation of microcracks in the fatigue of perlite-ferritic steel], *Fizika metallov i metallovedeniye*, vol. 105, no. 5, pp. 549–559.
10. Savrai, R.A., Makarov, A.V., Tabatchikova, T.I. and dr. (2009), "Osobennosti povedeniya perlita razlichnoi morfologii pri tsiklicheskom rastyazhenii" [Peculiarities of perlite behavior of different morphology under cyclic tension], *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, no. 5, pp. 15–20.
11. Izotov, V.I., Get'manov, M.E., Burzhanov, A.A. and dr. (2009), "Vliyanie struktury perlitnoi stali na mekhanicheskie svoystva i osobennosti razrusheniya pri izgibnom nagruzhennii" [Influence of the structure of pearlite steel on mechanical properties and fracture characteristics under bending loading], *Fizika metallov i metallovedeniye*, vol. 108, no. 6, pp. 638–648.
12. Zhulev, G.G. and Akhmetova, A.R. (2010), "Temperatura zakrepleniya rel'sovykh pletei" [Fastening temperature of railways], *Put' i putevye khozyaistvo*, no. 11, pp. 14–15.
13. Lysyuk, V.S. and Bugaenko, V.M. (2006), *Povrezhdeniya rel'sov i ikh diagnostika* [Rail damage and diagnostics], ITsK Akademkniga, Moscow, Russia.
14. Petrov, N.P. and Stoikovoi, N.Ya. (1915), *Davlenie kolea na rel'sy zheleznykh dorog, prochnost' rel's i ustoychivost' puti* [The Pressure of Wheels on Rails. Strength of the Rails and Stability of the Track], Elektro-Tipografiya Petrograd, Russia.
15. Kogan, A.Ya. (1997), *Dinamika puti i ego vzaimodeystvia s podvizhnym sostavom* [Dynamics of rail track and its interaction with the rolling stock], Transport, Moscow, Russia.
16. Verigo, M.F. (1997), *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava v krivykh malogo radiusa i bor'ba s bokovym iznosom rel'sov i grebnei kolea* [Interaction of the track and rolling stock in the curves of small radius and the struggle with lateral wear of rails and crests of wheels], Transport, Moscow, Russia.
17. BS EN 10002-1 (2001), Tensile testing of metallic materials. Method of test at ambient temperature.
18. DSTU 4344:2004 (2005), *Reyky zvychayni dlya zaliznyts' shyrokoii kolyyi, Zahal'ni tekhnichni umovy, Derzhspozhyvstandart Ukrayiny*, Kiev, Ukraine.
19. Novogrudskii, L.S., Stasyuk, S.Z. and Opravkhata, N.Ya. (2010), "On the assessment of the mechanical characteristics of rail steels under operating conditions", *Strength of Materials*, vol. 42, no. 3, pp. 344–351, <https://doi.org/10.1007/s11223-010-9223-3>.
20. Strizhalo, V.A., Novogrudskii, L.S. and Opravkhata, N.Ya. (2010), "Influence of electric current on the mechanical characteristics of rail steel", *Strength of Materials*, vol. 42, no. 4, pp. 471–477, <https://doi.org/10.1007/s11223-010-9238-9>.
21. Novogrudskii, L.S., Opravkhata, N.Ya. and Voron, M.M. (2012), "Issledovaniye struktury rel'sovoi stali pri vozdeystvii IET" [Investigation of the structure of rail steel under the action of electric current], *Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin i sooruzhenii*, vol. 36, pp. 171–176.