

ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ РЕЙКОВОЇ СТАЛІ

М.Я. Оправхата, Л.С. Новогрудський

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

Abstract. According to the results of researches of pre-cyclically developed cylindrical samples of rail steel, it was established that the degree of influence of electric current pulses on the strength characteristics of steel significantly depends on the location of cutting samples from the rail and the number of load cycles. The functional dependence of the change in the values of the strength characteristics of steel on the number of preload cycles under the influence of electric current and without such influence is established.

Вступ. Залізнична колія працює в складних природно-кліматичних умовах, при постійній дії динамічних навантажень з боку рухомого складу та напружень, що виникають в елементах колії, зокрема в рейках при їх виготовленні, укладці та експлуатації, а також при впливі широкого спектру інших експлуатаційних факторів, скажемо електричного струму, агресивного середовища та ін. Умови роботи колії сприяють протіканню в матеріалі рейок складних, в більшості взаємопов'язаних фізичних процесів, здатних привести до значних змін конструкційних властивостей рейок. Згідно літературним даним [1, 2] із загальної кількості відмов колій ~95 % складають відмови рейок. В процесі експлуатації по мірі напрацювання відбувається спрацювання, пластична деформація матеріалу рейок, протікають корозійні та втомні процеси, включаючи контактну втому. Ці процеси носять незворотній характер і спричиняють утворення різноманітних пошкоджень та дефектів, кількість яких з часом зростає.

Особливу увагу слід приділяти дефектам в головці рейки, пов'язаним з контактнo-втомними процесами. Найбільш небезпечними є дефекти 11.1-2, 21.1-2 за каталогом дефектів [3], основними причинами виникнення яких є недостатня контактнo-втомна міцність металу та дефект 41.1-2 [3], появу якого пов'язують з недостатньою міцністю металу. Суттєво вплинути на утворення та розвиток дефектів, а також на зниження несучої здатності рейок може дія електричного струму, що протікає через рейки електрифікованих ділянок залізничних колій [4].

Мета роботи полягає в оцінці впливу експлуатаційних факторів, а саме напрацювання та імпульсів електричного струму (ІЕС), на довговічність рейкової сталі. Робота виконана в межах держбюджетної теми «Кінетика пластичного деформування конструкційних сплавів при складному навантаженні, а також в умовах екстремально низьких температур» (№ Держреєстрації 0117U002230, 2017–2021 рр.).

Методика досліджень. В якості об'єкту досліджень вибрано найбільш поширені на сьогодні на коліях АТ «Укрзалізниці» термозміцнені рейки типу Р65 (сталь перлітного класу М76) виробництва ПАТ «МК«АЗОВСТАЛЬ» як до, так і після експлуатації з сумарною кількістю пропущеного тоннажу за час експлуатації рейки в колії ~900 млн. тонн бруто.

Для визначення механічних характеристик з головки досліджуваних рейок виготовляли п'ятикратні циліндричні зразки діаметром робочої частини 4 мм. Зразки з рейки до експлуатації вирізали з верхніх шарів металу головки максимально близько до поверхні кочення у відповідності до вимог [5], а з рейки після експлуатації – з поверхневих шарів матеріалу, нагартованих контактною взаємодією колеса і рейки (шар товщиною до 10 мм), та з матеріалу, в якому не діяли контактні напруження (шар на глибині 20 мм від поверхні головки рейки). Випробування циліндричних зразків проводили в умовах статичного навантаження у відповідності з [6], а визначення твердості у відповідності до умов [7].

На рис. 1 приведена схема розміщення місць визначення значень твердості матеріалу головки досліджуваних рейок.

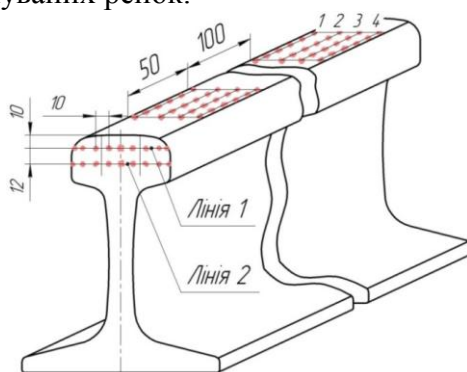


Рис. 1. Схема місць визначення твердості в поперечному перерізі рейки та на її поверхні.

Заміри твердості виконували за допомогою твердоміра «Темп-4». Похибка вимірювання значення твердості за даними паспорта приладу не перевищувала $\pm 3\%$ [8].

Моделювання в лабораторних умовах циклічного напрацювання рейкової сталі проводили за умов одновісного циклічного розтягу циліндричних зразків. Напрацювання рейкової сталі проводили на базі до 4×10^6 циклів з частотою навантажування 10 Гц за синусоїдальним циклом. Параметри циклу навантажування вибирали максимально близькими до реальних умов роботи рейок в колії. За реальними оцінками [9–11] значення σ_{max} і σ_{min} циклу дорівнюють

$$\sigma_{max} = \sigma_{зал.} + \sigma_{темн.} + \sigma_{цикл.} = 300 \text{ МПа}; \quad \sigma_{min} = \sigma_{зал.} = 90 \text{ МПа}, \quad (1)$$

де $\sigma_{зал.}$ – залишкові напруження; $\sigma_{темн.}$ – температурні напруження; $\sigma_{цикл.}$ – циклічні напруження при згині. Тобто, коефіцієнт асиметрії циклу $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ складав 0,3.

Після циклічного напрацювання до певної кількості циклів циліндричні зразки випробовували при статичному навантаженні у відповідності з вимогами [6]. Частину зразків випробували при дії імпульсів електричного струму, параметри якого відповідали реально діючим в рейковій колії в пусковому режимі руху, а саме: щільність – 255 МА/м^2 , тривалість – 10^{-2} с , що відповідає швидкості руху електровозу 10–15 км/год. Дію струму (20 імпульсів) здійснювали при постійному рівні напружень, що дорівнював $0,6 \cdot \sigma_{0,2}$ рейкової сталі без напрацювання, з подальшим навантаженням зразків до руйнування без дії струму.

Результати та їх обговорення. За результатами проведених випробувань були визначені характеристики статичної міцності і пластичності рейкової сталі після циклічного напрацювання. В табл. 1 та табл. 2 приведені значення механічних характеристик рейкової сталі без та при дії ІЕС [12, 13].

Табл. 1. Механічні характеристики рейкової сталі до і після напрацювання

Кількість циклів N	σ_6 , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
10^0	1238 / 1189	881 / 796	12,5 / 12,5	42,5 / 39,5
10^2	1162 / 1303	770 / 901	13,0 / 14,0	30,5 / 38,5
10^3	– / 1175	– / 784	– / 14,0	– / 36,5
10^4	1275 / 1268	876 / 885	12,5 / 12,5	35,0 / 37,0
$3,5 \times 10^4$	– / 1153	– / 803	– / 13,0	– / 36,0
5×10^4	1140 / 1292	717 / 885	14,0 / 12,5	38,0 / 38,5
10^5	1287 / 1274	898 / 878	11,5 / 12,5	34,5 / 40,0
10^6	1091 / 1119	700 / 678	15,0 / 16,0	40,5 / 42,5
2×10^6	1096 / 1200	715 / 802	14,5 / 14,0	40,5 / 35,0
4×10^6	1131 / 1179	750 / 753	14,0 / 13,5	37,5 / 39,0

Примітка: без дії ІЕС / при дії ІЕС.

Табл. 2. Механічні характеристики рейкової сталі після експлуатації, $N = \sim 8 \times 10^6$ *

Місце вирізки		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Поверхневі шари (див. рис. 1)	1	1258 / 1218	934 / 931	15,0 / 13,0	42,0 / 43,5
	2	1368 / 1312	980 / 957	11,0 / 11,0	30,5 / 41,5
	3	1334 / 1261	1008 / 981	10,5 / 11,0	27,0 / 42,5
	4	1247 / 1230	960 / 903	9,0 / 14,0	31,5 / 43,5
На глибині 20 мм		1161 / 977	806 / 603	13,5 / 11,5	35,0 / 24,5

Примітка: без дії ІЕС / при дії ІЕС;

* умовна кількість циклів вирахована з сумарної кількості пропущеного тоннажу рейки після експлуатації.

Дія експлуатаційних навантажень на рейки в колії також приводить до зниження значень характеристик міцності матеріалу головки рейки на глибині 20 мм (див. табл. 2). Рівень значень границі міцності та умовної границі плинності матеріалу рейки після експлуатації (лінія 2, див. рис. 1) на ~ 8 % менше аналогічних значень матеріалу рейки до експлуатації. Характер зміни характеристик пластичності зберігається як і при циклічному напруженні за умов одновісного розтягу.

Суттєвої зміни зазнають значення механічних характеристик матеріалу поверхневого шару головки рейки після експлуатації (див. табл. 2) як в порівнянні із значеннями механічних характеристик рейок до експлуатації (див. табл. 1), так і після експлуатації (лінія 2, див. рис. 1, табл. 2). Високий рівень контактних напружень сприяє протіканню локалізованої пластичної деформації поверхневих шарів металу головки рейки. В результаті відбувається нагартування матеріалу, зменшення значень характеристик пластичності (більш ніж на 15 % порівняно з матеріалом до напруження), збільшення твердості і, як наслідок, виникають численні поверхневі тріщини, розвиток яких приводить до відшарування і викришування металу головки (дефекти 10.1-2, 11.1-2 та інші) [3]. Вплив контактної взаємодії колеса і рейки на механічну поведінку металу на поверхні головки можна відслідковувати за зміною твердості на поверхні рейки після її тривалої експлуатації в колії (рис. 2) [12].

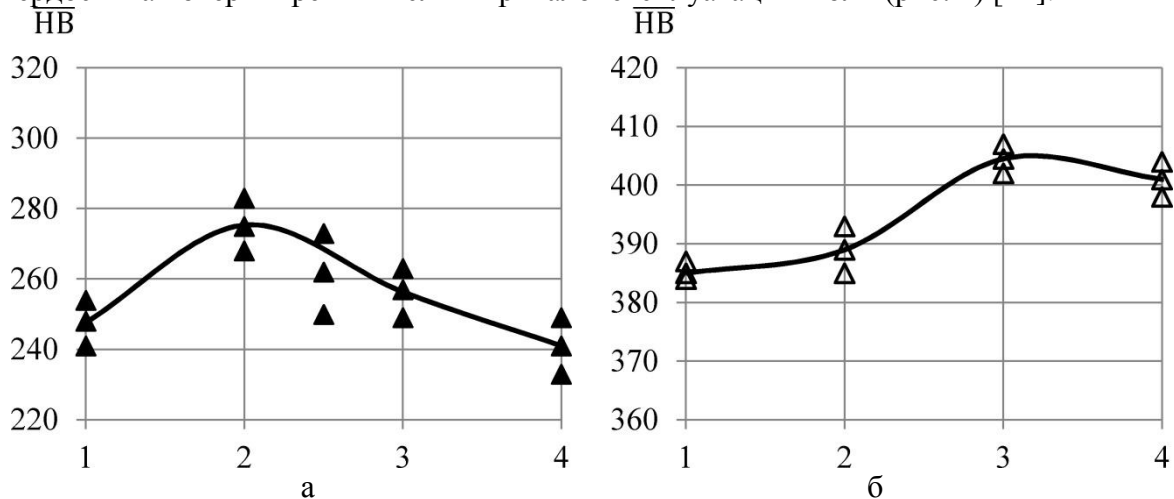


Рис. 2. Розподіл твердості по поверхні кочення рейки до (а) та після експлуатації (б).

Так, для рейки до експлуатації середнє значення твердості \overline{HV} на поверхні кочення по ширині головки не перевищує рівня 285 НВ, змінюючись в інтервалі 233–285 НВ (див. рис. 2,а). Різниця між середніми значеннями твердості по довжині рейки (довжина рейкової проби 650 мм) складає менше 30 НВ. В результаті тривалої експлуатації середнє значення твердості збільшується в 1,5 рази, при цьому різниця між значеннями по ширині головки зменшується до 20 НВ, а по довжині рейки – до 12 НВ. На поверхні кочення рейки в процесі експлуатації виникає зона підвищеної твердості

$\overline{HB} \geq 400$ HB, яка поширюється практично від вертикальної осі симетрії поперечного перерізу рейки, до внутрішньої кромки головки (рис. 2,б).

Аналіз експериментальних даних, що відображують вплив ІЕС на поведінку рейкової сталі, виявив наступні закономірності зміни значень її механічних характеристик. Дія ІЕС несуттєво (до 5 %) зменшує значення характеристик міцності сталі до експлуатації та практично не змінює значення її характеристик пластичності (див. табл. 1). Зміна значень характеристик статичної міцності циклічно напрацьованої при різній кількості циклів за умов одновісного розтягу рейкової сталі внаслідок дії ІЕС незначна навіть на базі $>10^6$ циклів. Дія ІЕС на зразки рейкової сталі з напрацюванням приводить до збільшення значень відносного видовження після розриву та зменшенню значень відносного звуження після розриву (див. табл. 1).

Для внутрішнього шару (на глибині 20 мм) матеріалу рейки після експлуатації в колії дія ІЕС значно зменшує рівень характеристик міцності: σ_g – на 16 %, а $\sigma_{0,2}$ – на 25 %. Значення характеристик пластичності зразків після напрацювання в колії змінюються наступним чином: δ – на 15 %, ψ – на 30 %.

Слід підкреслити, що проходження ІЕС через зразки, вирізані з поверхневих шарів головки рейки після експлуатації, приводить до зниження значень характеристик міцності сталі на ~ 6 % (табл. 2). В той же час значення характеристик пластичності матеріалу збільшуються (табл. 2), зокрема значення відносного звуження після розриву збільшується більш, ніж на 30 %.

Незначний вплив дії ІЕС на значення характеристик міцності металу верхніх шарів головки рейки після експлуатації вірогідно пояснюється тим, що при циклічному навантажуванні відбувається вичерпання в матеріалі поверхневих шарів головки рейки ресурсу джерел деформації з низьким енергетичним бар'єром, а енергетичний рівень ІЕС вибраних параметрів може бути недостатнім для стимулювання руху дислокацій при більш високих рівнях енергетичних бар'єрів.

На основі проведених досліджень механічних властивостей рейкової сталі, циклічно напрацьованої в лабораторних умовах, та після експлуатації в рейковій колії, встановлено функціональну залежність зміни значень характеристик міцності сталі, як без, так і після дії ІЕС, від числа циклів попереднього навантаження, яку можна аналітично описати за допомогою кінетичного степеневого рівняння виду

$$f(x) = ae^{-bx}, \quad (2)$$

яке для опису залежності значень умовної границі плинності від кількості циклів навантаження має вигляд:

$$\sigma_{0,2}(N) = \sigma_{0,2}e^{-bN}, \quad (3)$$

а в лінеаризованому вигляді –

$$\ln[\sigma_{0,2}(N)] = \ln[\sigma_{0,2}] - bN, \quad (4)$$

де N – кількість циклів навантаження; b – параметр рівняння апроксимації, що характеризує кут нахилу дотичної до графіку функції (2); $\sigma_{0,2}$ – значення умовної границі плинності сталі до початку циклічного навантаження (без або при дії ІЕС).

Розв'язуючи рівняння (4) відносно кількості циклів навантаження N , прийнявши при цьому за граничне значення $\sigma_{0,2}(N)$, мінімальне значення, вказане в нормативних документах на залізничні рейки $\sigma_{0,2}^{\min \text{ ДСТУ}}$ [5], маємо можливість визначити граничну кількість циклів навантаження рейки як без, так і при дії ІЕС, як

$$N_{\text{гр}} = \frac{1}{b} \ln \left[\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2}^{\min \text{ ДСТУ}}} \right], \quad N_{\text{гр}}^{\text{ІЕС}} = \frac{1}{b} \ln \left[\frac{\sigma_{0,2}^{\text{ІЕС}}}{\sigma_{0,2}^{\min \text{ ДСТУ}}} \right]. \quad (4)$$

Згідно результатів розрахунку гранична кількість циклів навантаження при дії ІЕС становить $8,5 \times 10^6$, а без урахування дії ІЕС вона складатиме $8,7 \times 10^7$ циклів.

Висновки. За результатами досліджень попередньо циклічно напрацьованих циліндричних зразків рейкової сталі встановлено, що ступінь впливу імпульсів

електричного струму на характеристики міцності сталі суттєво залежить від місця вирізки зразків з рейки та кількості циклів навантаження.

Так циклічне напруження в лабораторних умовах за умов одновісного циклічного розтягу циліндричних зразків не виявило значного впливу на характеристики статичної міцності, як без, так і після дії ІЕС. Натомість для матеріалу рейки довготривала експлуатація в колії (сумарний вплив згину та контактної взаємодії від динамічних навантажень) приводить до зміни характеристик міцності, як поверхневих шарів металу головки (зміцнення), так і матеріалу на глибині 20 мм (знеміцнення). Дія ІЕС в більшій мірі проявляється на глибині 20 мм матеріалу головки рейки після її напруження в колії.

Після перевищення певної кількості циклів попереднього навантаження дія ІЕС приводить до зменшення значень характеристик міцності матеріалу термозміцнених рейок нижче мінімального рівня, встановленого нормативними документами для рейок певного типу.

Література

1. Колотушкин С. А. Дефектоскопия рельсов Экспериментального кольца на службе транспортной науки / С. А. Колотушкин, В. А. Рейхарт // Вестник ВНИИЖТ. – 2002. – № 6. – С. 33–36.
2. Большая энциклопедия транспорта: в 8 т. – М. : Большая Российская энциклопедия, 2003. – Т. 4: Железнодорожный транспорт / [гл. ред. Н. С. Конарев]. – [2-е изд.]. – 2003. – 1093 с.
3. Нормативно-техническая документация. Классификация дефектов рельсов НТД/ЦП-1-93. Каталог дефектов рельсов НТД/ЦП-2-93. Признаки дефектных и остродефектных рельсов НТД/ЦП-3-93. – [Утв. МПС РФ 1993-03-22]. – М. : Транспорт, 1993. – 56 с.
4. Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / [гл. ред. Н. С. Конарев]. – М. : Большая Российская энциклопедия, 1994. – 559 с.
5. ДСТУ 4344:2004. Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні умови. – [Введений 2005-01-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2005. – (Державний Стандарт України).
6. ДСТУ EN 10002-1:2006. Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN 10002-1:2001, IDT). – [Введений 2008-07-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2008. – (Державний Стандарт України).
7. ДСТУ ISO 6506-1:2007 Матеріали металеві. Визначення твердості за Брінеллем. Частина 1. Метод випробування (ISO 6506-1:2005, IDT). – [Введений 2009-01-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2010. – (Державний Стандарт України).
8. Твердомер электронный малогабаритный переносной программируемый. Паспорт ТЭМП-4.4271-001 ПС.
9. Марков Д. П. Оптимизация колесно-рельсовой трибосистемы / Д. П. Марков // Вестник ВНИИЖТ. – 2004. – № 6. – С. 32–38.
10. Богданов В. М. Современные проблемы системы колесо-рельс / В. М. Богданов, С. М. Захаров // Железные дороги мира. – 2004. – № 1. – С. 57–62.
11. Остаточные напряжения и прочность железнодорожных рельсов // Труды ЦНИИ МПС, Вып. 491. – М. : Транспорт, 1973, – 68 с.
12. Новогрудский Л. С. Об оценке механических характеристик рельсовых сталей в условиях эксплуатации / Л. С. Новогрудский, С. З. Стасюк, Н. Я. Оправхата // Проблемы прочности. – 2010. – № 3. – С. 142–150.
13. Стрижало В. А. Влияние электрического тока на механические характеристики рельсовой стали / В. А. Стрижало, Л. С. Новогрудский, Н. Я. Оправхата // Проблемы прочности. – 2010. – № 4. – С. 145–153.