

УДК 625.1.032.3

*Е. І. Даніленко, д.т.н., професор
(завідувач кафедри «Залізнична колія та колійне господарство», Державний економіко-технологічний університет транспорту)*

*В. В. Косарчук, д.т.н., професор
(завідувач кафедри «Теоретична та прикладна механіка», Державний економіко-технологічний університет транспорту)*

*Р. М. Йосифович, к.т.н.
(доцент кафедри «Залізнична колія та колійне господарство», Державний економіко-технологічний університет транспорту)*

*О. В. Агарков, к.т.н., доцент
(доцент кафедри «Теоретична та прикладна механіка», Державний економіко-технологічний університет транспорту)*

*О. Ю. Рафальський
(асистент кафедри «Теоретична та прикладна механіка», Державний економіко-технологічний університет транспорту)*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ РЕЙОК КОЛІЇ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Розглянуто результати експериментальної оцінки залишкового ресурсу рейок. Для проведення експерименту обрано 4 зразки рейок з напрацьованим тоннажем, які піддавалися циклічному навантаженню на триточковий згин. Результати показали, що напруження стиску від згину, рівень яких відповідає експлуатаційним, не значно впливає на дефектність рейок.

Ключові слова: залізничні рейки, циклічне навантаження, ультразвукова дефектоскопія, контактнo-втомні дефекти, залишковий ресурс.

Рассмотрены результаты экспериментальной оценки остаточного ресурса рельсов. Для проведения эксперимента выбраны 4 образца рельсов с наработанным тоннажем, которые подвергались циклической нагрузке на трехточечный изгиб. Результаты показали, что напряжение сжатия от изгиба, уровень которых соответствует эксплуатационным, незначительно влияет на дефектность рельсов.

Ключевые слова: железнодорожные рельсы, циклическое нагружение, ультразвуковая дефектоскопия, контактнo-усталостные дефекты, остаточный ресурс.

© Даніленко Е. І., Косарчук В. В., Йосифович Р. М., Агарков О. В., Рафальський О. Ю., 2017

За умовами проектування колії [1] величина нормальних напружень від згину балки не повинна перевищувати допустимого напруження, за яке приймається умовна (на базі випробувань $2 \cdot 10^6$ циклів) границя втоми матеріалу рейки при симетричному знакозмінному навантаженні, тобто σ_{-1} . Границя втоми матеріалу залежить, звісно, від марки рейкової сталі та технології виготовлення рейки.

Слід мати на увазі, що втомна довговічність рейок, що визначена за наведеною методикою, зменшується в процесі експлуатації. Причиною цього є постійне накопичення мікропошкоджень (а з часом і макротріщин) у матеріалі рейки внаслідок експлуатаційних навантажень. Так, за даними ВНДІЗТ, втомна довговічність нетермоміцнених рейок Р50 зменшується з 290 – 320 кН до 280, 250, 240 кН після пропуску вантажу 350, 400, 700 млн т бруто, відповідно.

Для проведення експериментальних досліджень за методикою ВНДІЗТ було відібрано лише чотири зразки (замість рекомендованих 6 – 8), що були вирізані з рейки, яка була вилучена з експлуатації через наявність на поверхні кочення дефектів типу 11.2 (викришування на поверхні головки рейки [2]). Це пояснюється тим, що для реалізації бази випробувань у 2 млн циклів з частотою 5 Гц потрібно 111 годин безперервної роботи пульсатора. Гідравлічний пульсатор типу ZDM-10-Pu, що використовувався для проведення експериментів, потребує періодичного охолодження робочої рідини (мастила). Крім того, для контролю розвинення дефектів у процесі циклічного навантаження використовували засоби ультразвукової діагностики (контроль здійснювали штатні працівники колієвимірально-дефектоскопічної станції Київського метрополітену). Такий контроль здійснювався після реалізації $4 \cdot 10^5$, $8 \cdot 10^5$, $1,2 \cdot 10^6$, $1,6 \cdot 10^6$ і $2 \cdot 10^6$ циклів навантаження. Тому термін виконання лише одного експерименту складав майже один місяць.

Зауважимо, що ультразвуковому контролю піддавали не тільки головку рейки, а й її бічні грані та підшву, оскільки при вказаній нижче схемі навантаження у підшві рейки діяли розтягуючі напруження. Дані дефектоскопічного контролю оформлювались у вигляді стандартного протоколу.

Дослідні зразки виготовлені із проб рейок типу Р50 у кількості 5 шт. Усі проби вирізані з однієї рейки виробництва металургійного заводу «Азовсталь», яка була вилучена з експлуатації після пропущення нормативного тоннажу. Проби рейок були надані СП «Служба колії, тунельних споруд і будівель» Київського метрополітену у лютому 2014 р. (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд зразків рейки для проведення експериментів

Із чотирьох проб рейок були виготовлені зразки довжиною 1200 мм. Перед випробуванням зразки чистили від бруду та іржі за допомогою керосину. У центральній частині зразків (на головці рейки) були підготовлені площадки для наклейки тензорезисторів на відстані 50 мм від центральної вертикальної осі. Додаткова термообробка зразків не проводилась. Дослідження проводили за нормальних умов при кімнатній температурі.

Для проведення експериментів на циклічну витривалість використовували гідравлічний пульсатор типу ZDM-10-Рu виробництва Німеччини, що був доукомплектований спеціально виготовленими шарнірними опорами і роликми для передачі осьового навантаження. Установка атестована Укртестметрстандартом у 2012 р. Для вимірювання поздовжніх деформацій рейки і контролю напружень в умовах триточкового згину використовували фольгові тензорезистори з базою 20 мм виробництва київського заводу «Веда», що наклеювались на головку рейки симетрично відносно осі ролика на відстані 50 мм. Покази тензорезисторів фіксували за допомогою тензостанції типу Adam 3016 виробництва Гонконгу.

Експерименти на циклічну витривалість зразків проводили по схемі трьох точково-го згину балки (зразка рейки) відповідно до ГОСТ 14019-80 «Металлы. Методы испытания на изгиб» (рис. 2, а). Реалізовано дві схеми навантаження: з реалізацією стискаючих (схема № 1, рис. 2, б) та розтягуючих (схема № 2, рис. 2, в) нормальних напружень на поверхні головки рейки. Параметри режимів навантаження визначались із умов роботи залізничних рейок в умовах Київського метрополітену і наведені у роботі авторів [3].

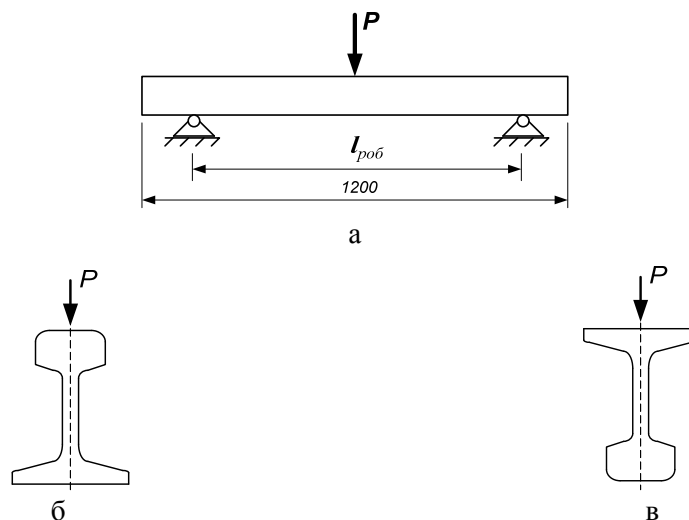


Рис. 2. Схеми навантаження зразків

З огляду на тривалість експериментів два зразки навантажувались ступінчато з проміжним УЗ-контролем дефектів. Два інші зразки навантажувались у безперервному режимі. Для них УЗ-контроль провадили до початку і після завершення експерименту. Реалізовані режими навантаження наведені у табл. 1.

На рис. 3 показаний зразок, що встановлений у захватах випробувальної установки.

За такої схеми навантаження у зоні контакту ролика з рейкою виникають досить високі контактні напруження. Для мінімізації їх впливу на можливий розвиток дефектів типу 11.2 у процесі навантаження із наявних рейкових проб були вибрані два зразки, у яких у центральній зоні була мінімальна кількість дефектів. Саме ці зразки використовувались при реалізації першої схеми навантаження.

Таблиця 1. Режими навантаження дослідних зразків

	Зразок № 1	Зразок № 2	Зразок № 3	Зразок № 4
Схема навантаження	№ 1	№ 2	№ 2	№ 1
Максимальна сила, кН	91	31	31	91
Коефіцієнт асиметрії, r	0,22	0,19	0,19	0,22
Частота, Гц	5	5	5	5
Режим навантаження	ступінчастий*	ступінчастий*	безперервний	безперервний
Число циклів навантаження	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1,82 \cdot 10^6$
Форма циклу	синус.	синус.	синус.	синус.
Відстань між опорами, $l_{роб}$, мм	1000	600	600	1000

* – після реалізації $4 \cdot 10^5$, $8 \cdot 10^5$, $1,2 \cdot 10^6$, $1,6 \cdot 10^6$ і $2 \cdot 10^6$ циклів навантаження зразки піддавали дефектоскопічному контролю.



Рис. 3. Загальний вигляд випробувальної установки із встановленим зразком рейки

Розглянута схема № 1 навантаження зразка рейки лише певною мірою моделює роботу рейки у колії метрополітену, адже в даних експериментах поверхневі шари головки рейки постійно перебувають під дією лише стискаючих напружень, що циклічно змінюються. Контактними напруженнями у даних експериментах нехтували, адже їх вплив уже на відстані 30 мм від осі ролика не позначався на величині нормального напруження від згину. Проте слід зауважити, що в реальних умовах напруження в рейці складаються з контактних напружень, напружень від згину рейки у поздовжній площині, згинаючих напружень від позacentрового прикладення вертикального навантаження, напружень від стисненого кручення, температурних та залишкових напружень. Слід також урахувати, що навіть на прямолінійних ділянках шляху можлива поява дотичних зусиль на контактній площадці, які діють у поздовжньому (при проковзуванні коліс) і поперечному (при вилянні візка) напрямках. Ці дотичні зусилля призводять до збільшення напружень у поверхневих шарах головки рейки, що може викликати появу пластичних деформацій.

Тому оцінку довговічності рейок слід проводити за умов раціонального поєднання як експериментальних досліджень, так і теоретичних розрахунків напружено-деформованого стану. Проте такий комплексний аналіз виходить за межі даної роботи. З наведеного у роботі [3] аналізу умов роботи рейок витікає, що вибір схеми навантаження зразка за умов трьох точкового згину має принципове значення. Величина розтягуючих напружень в головці рейки може досягати 20 – 25% від величини стискаючих напружень за умов рівнопружної основи. В реальних умовах основа не є рівнопружною, до того ж і колеса і рейки можуть мати нерівності, тому рівень розтягуючих напружень може бути значно вищим.

Тому для більш точної оцінки залишкового ресурсу рейок були проведені експериментальні дослідження циклічного згину рейок з реалізацією розтягуючих напружень у головці рейки (схема № 2, рис. 2, в). З цією метою на згаданій випробувальній установці була досліджена поведінка двох зразків рейок з дефектами типу 11.2 в умовах циклічного навантаження за умови розміщення зразків головкою вниз (рис. 4). Режими навантаження вказані у табл. 1.



Рис. 4. Загальний вигляд випробувальної установки із встановленим за схемою № 2 зразком рейки

Після реалізації $4 \cdot 10^5$, $8 \cdot 10^5$, $1,2 \cdot 10^6$, $1,6 \cdot 10^6$ і $2 \cdot 10^6$ циклів навантаження також проводили дефектоскопічний контроль головки рейки, підшви та її бічних граней. За результатами дефектоскопічного контролю не виявлено появи поперечних тріщин (тобто дефектів типу 21) у досліджених зразках. При цьому не виявлено також суттєвого збільшення розмірів наявних дефектів типу 11.2. Таким чином, як попередній висновок, можна вважати, що стискаючі напруження від згину, рівень яких відповідає експлуатаційним, несуттєво впливають на дефектність рейки.

Основним чинником появи поверхневих дефектів на головці рейки слід вважати високі контактні напруження, що виникають внаслідок взаємодії коліс рухомого складу з рейками залізничної колії. Чисельний аналіз рівнів контактних напружень за умов руху візка на прямолінійній ділянці колії наведено, зокрема, в роботах авторів [4, 5], а також в інших публікаціях [6-8].

На основі проведених експериментальних і теоретичних досліджень був зроблений висновок про можливість подовження нормативних термінів експлуатації рейок в умовах Київського метрополітену.

ЛІТЕРАТУРА

1. Даніленко Е.І., Рибкін В.В. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. – К.: Транспорт України, 2006. – 168 с.
2. Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів та рейок залізниць України (ЦП-0060, 0061) / За ред. Е.І. Даніленка, А.М. Орловського. – К.: Міністерство транспорту України, 2000. – 148 с.
3. Даніленко Е.І., Косарчук В. В., Пилипенко А.П., Йосифович Р.М., Рафальський О.Ю. Обґрунтування методики експериментальної оцінки залишкового ресурсу рейок залізничної колії метрополітену // Зб. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2015. – № 26–27. – С. 26–38.
4. Косарчук В.В. Прогнозирование долговечности рельсов по критерию возникновения трещин контактной усталости / Косарчук В.В., Агарков А.В. // Зб. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2012. – № 20. – С. 77–90.
5. Агарков О.В. Визначення контактних напружень в рейках залізничної колії за допомогою методу скінченних елементів / Агарков О.В. // Зб. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2014. – № 24. – С. 39–44.
6. *Matin Sh. Sichania, Roger Enbloma, Mats Berg* Comparison of non-elliptic contact models: Towards fast and accurate modelling of wheel-rail contact // *Wear*. – 2014. – 314. – P. 111–117.
7. *Mehmet Ali Arslan*. 3-D Rail-Wheel contact analysis using FEA / Mehmet Ali Arslan, Oguz Kayabasi // *Advances in Engineering Software*. – 2012. – 45. – P. 325–331.
8. *Sladkowski A., Sitarz M.* Analysis of wheel-rail interaction using FE software // *Wear*. – 2005. – 258. – P. 1217–1223.

Eduard I. Danilenko, Doctor of Science (Engineering), Professor
(Head of the Department of Railroad Track and Track Facilities State University for Transport Economy and Technologies)

Valeriy V. Kosarchuk, Doctor of Science (Engineering), Professor
(Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, State University for Transport Economy and Technologies)

Roman M. Yosufovuch, Ph.D. (Engineering)
(Associate Professor, Department of Railroad Track and Track Facilities State University for Transport Economy and Technologies)

Oleksandr V. Agarkov, Ph.D. (Engineering)
Associate Professor, Department of Theoretical and Applied Mechanics, State University for Transport Economy and Technologies)

Oleh Rafalskyi

(Assistant Professor, Department of Theoretical and Applied Mechanics, State University for Transport Economy and Technologies)

EXPERIMENTAL REMAINING RESOURCE ESTIMATION OF METRO RAIL TRACK

The results of the experimental remaining resource estimation of rails are considered. For the experiment selected samples of 4 rails with accumulated tonnage, that are subjected to cyclic loading of a three-point bend. The results showed that compressive stress from bending, which corresponds operational level, does not significantly affect rail defects.

Keywords: rails, cyclic loading, ultrasonic flaw detection, contact-fatigue defects residual life.

REFERENCES

1. *Danilenko E.I., Rybkin V.V.* Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist, Kiev, Transport Ukrainy Pub., 2006, 168 p.
2. Klyasyfikatsiia i kataloh defektiv i poshkodzhen elementiv strilochnykh perevodiv ta reioz zaliznyts Ukrainy (TsP-0060, 0061)/ Za red. E.I. Danilenko, A.M. Orlovskoho. – K.: Ministerstvo transportu Ukrainy, 2000. – 148 p.
3. *Danilenko E.I., Kosarchuk V. V., Pylypenko A.P., Yosyfovych R.M., Rafalskyi O.Yu.* Obgruntuvannia metodyky eksperymentalnoi otsinky zalyshkovoho resursu reioz zaliznychnoi kolii metropolitenu, Zb. nauk. prats DETUT. Seriia «Transportni systemy i tekhnolohii», 2015, No. 26-27, P. 26–38.
4. *Kosarchuk V.V.* Prohnozyrovanye dolhovechnosti relsov po kryteriyu voznyknovenyia treshchyn kontaktnoi ustalosty, Zb. nauk. prats DETUT, Seriia «Transportni systemy i tekhnolohii», 2012, No. 20, P. 77 – 90.
5. *Aharkov O.V.* Vyznachennia kontaktnykh napruzhen v reikakh zaliznychnoi kolii za dopomohoiu metodu skinchennykh elementiv / Aharkov O.V. // Zb. nauk. prats DETUT. Seriia «Transportni systemy i tekhnolohii», 2014, No. 24, P. 39-44
6. *Matin Sh. Sichania, Roger Enbloma, Mats Berg* Comparison of non-elliptic contact models: Towards fast and accurate modelling of wheel–rail contact // Wear, 2014, No. 314, P. 111 – 117.
7. *Mehmet Ali Arslan.* 3-D Rail-Wheel contact analysis using FEA / Mehmet Ali Arslan, Oguz Kayabasi // Advances in Engineering Software, 2012, No. 45, P. 325 – 331.
8. *Sladkowski A., Sitarz M.* Analysis of wheel-rail interaction using FE software // Wear, 2005, No. 258, P. 1217 – 1223.