

*Д.А. ПЛУГІН*, канд. техн. наук, доц., УкрДАЗТ, Харків

## **ДОСЛІДЖЕННЯ Й РОЗВИТОК КІЛЬКІСНИХ УЯВЛЕНЬ ПРО МІКРОСТРУКТУРУ СТАЛІ: МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ Й ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК**

Представлені нові теоретичні положення, і теорії механічних властивостей сталі, зокрема рейок, на основі реальної структури і електроповерхневих властивостей, явищ і процесів. Встановлено, що руйнування кристалічної решітки металу може відбуватися як шляхом відриву атомів, при якому решітки відразу розпадаються на дві частини, так і шляхом зсуву атомів, при якому решітка, поступово деформуючись, розпадається тільки після значного викривлення. Доведено, що наявний на рейці електричний потенціал створює в ній додаткові механічні напруги.

**Ключові слова:** залізнична рейка, ферит, цементит, мікроструктура, електроповерхневий потенціал, міцність, тріщина, руйнування.

**Постановка проблеми.** Однією з проблем експлуатації рейкової колії в залізничних тунелях є корозія, у тому числі електрокорозія від струмів витоку, та механічний знос рейок і рейкових скріплень, які в частині тунелів відбуваються дуже інтенсивно і завдають значних збитків. Вплив багатьох факторів на інтенсивність корозії та передчасного зносу є невивченим, заходи із захисту від корозії, передбачені діючими інструктивними документами, є недосконалими.

Виходячи з викладеного, встановлення впливу різних факторів на інтенсивність корозії та знос рейок і рейкових скріплень в тунелях є невирішеною науковою проблемою, а розробка заходів з їх запобігання, обґрунтування раціональних термінів служби рейок – дуже актуальним завданням.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Робота являє собою фрагмент досліджень [1 – 6], що спрямовані на встановлення впливу різних факторів на інтенсивність корозії та зносу елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях.

**Метою досліджень** є розробка нових теоретичних положень і теорій механічних властивостей сталі, зокрема залізничних рейок, на основі реальної структури і електроповерхневих властивостей, явищ і процесів.

**Нові дослідження.** Згідно з металографічними дослідженнями, виконаними в [7], у процесі експлуатації в головці рейки виникає сітка поверхневих

© Д.А. Плугін, 2013

тріщин, виявлення яких виконано за допомогою магнітного порошку. При цьому простежується тенденція зсуву смуги убік середини поверхні кочення в напрямку руху (рис. 1).

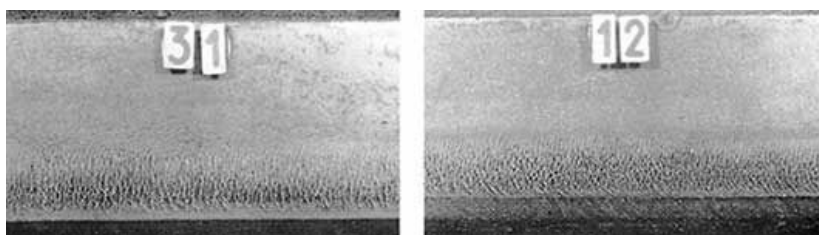


Рис. 1 – Тріщини в зоні хвилеподібного зносу головки рейки [7]

У смугі тріщин спостерігається зона хвилеподібного зносу. На різних поперечних і поздовжніх шліфах, вирізаних з рейок, зареєстровані тріщини глибиною від 0,7 до 0,9 мм, відстань між тріщинами складала приблизно 0,8 мм. Середнє збільшення довжини всіх тріщин, що досліджувалися, за рік складало від 0,32 до 0,57 мм. Відзначена зміна структури, найбільш значна в поверхні кочення, рис. 2.

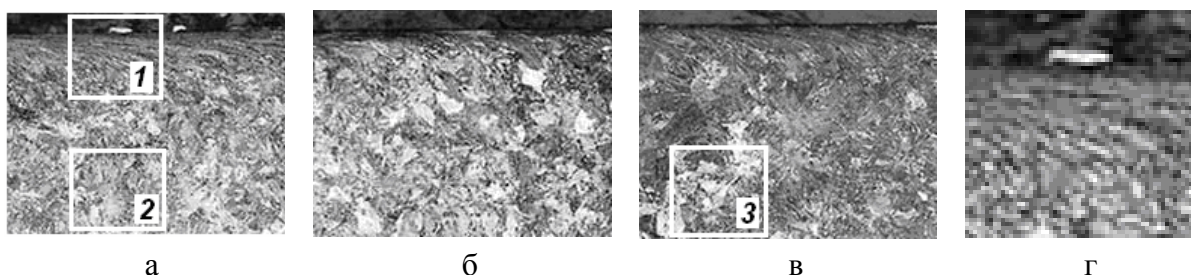


Рис. 2 – Мікроструктура сталі на поперечному шліфі внутрішньої рейки,  $\times 200$ : а – гребінь хвилі зношування; б – западина хвилі зношування; в – без хвилеподібного зносу; г – збільшений фрагмент 1 мікроструктури сталі  $\times 2000$

Згідно зі знімками на рис. 2, а – в, видимий розмір більших часток – до  $8 \text{ мм} = 8/200 = 0,004 \text{ мм} = 40 \text{ мкм}$ , видимий мінімальний –  $1 \text{ мм}$ , дійсний –  $1/200 = 0,005 \text{ мм} = 5 \text{ мкм}$ . Отже, мікроструктура сталі на цих знімках представлена на рівні зерен фериту. На рис. 2, г видима товщина ланцюжків, що нахиляються, і розмір найменших часток – близько  $1 \text{ мм}$ . Дійсна товщина –  $1/2000 = 0,5 \text{ мкм} = 5000 \text{ \AA}$ . Видимий розмір зерен близько  $1 \text{ см}$ , дійсний –  $10/2000 = 0,005 \text{ мм} = 5 \text{ мкм}$ .

Як бачимо з рис. 2, г, у поверхні головки рейки на гребені хвилі зношування спостерігається практична відсутність зерен фериту. В основному в поверхні головки рейки в цьому місці мікроструктура представлена набагато меншими частками (світлі й більш темні), які зливаються в ланцюжки, нахи-

лені до краю головки. Це обумовлене, мабуть, ковзанням цих ланцюжків у поверхневому шарі головки рейки з майже різким переходом від структури в обсязі до цього поверхневого шару.

У мікроструктурі сталі в зоні западини хвилі зношування (рис. 2, б) ланцюжкова структура й нахил ланцюжків виражені набагато слабкіше. У зоні без хвилеподібного зносу (рис. 2, в) ланцюжкова структура й нахил ланцюжків проявляються в значній мірі, однак нахил ланцюжків трохи менший, ніж в зоні під гребенем. Тобто виникнення на головці рейки поверхневого шару, що полягає із часток набагато меншого розміру, ніж зерна фериту, властиво сталі на всіх ділянках поздовжнього й поперечного профілів. Видима товщина цього шару становить 30 мкм. Дійсна товщина  $20/2000 = 0,01$  мкм = 10 нм, що відповідає середньому розміру зерна фериту в сталі (13 нм [8]).

Характерно, що невеликі частки покривають також поверхню зерен фериту й, як видно з рис. 3, а, і рис. 3, б, зв'язують їх між собою.

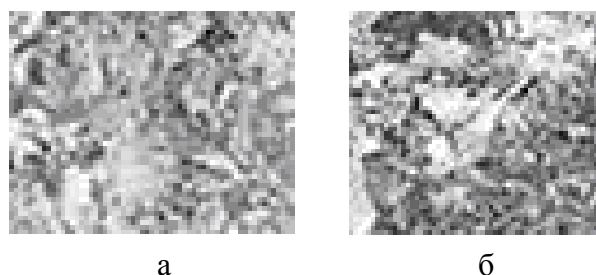


Рис. 3 – Мікроструктура сталі на поперечному шліфі внутрішньої рейки: а) збільшений фрагмент 2 мікроструктури сталі з рис. 2, а; б) збільшений фрагмент 3 мікроструктури сталі з рис. 2, в

Товщина ланцюжків, що нахилиються, і розмір найменших часток становлять приблизно 0,5 нм, або  $2500 \div 5000$  Å. Ці розміри набагато менші, ніж розміри зерен фериту (13 нм), однак суттєво перевищують середній розмір блоків фериту (700 Å) [9]. Це, а також принципово інший характер мікроструктури (зерна фериту, покриті дрібними частками, з'єднані цими частками), що відрізняється від мікроструктури сталі - дуже щільно злиті зерна фериту, свідчить про утворення на поверхні й у поверхневому шарі сталі в головці рейки структурних елементів, відсутніх у мікроструктурі ненавантаженої сталі.

Такими структурними елементами можуть бути поверхневі блоки фериту, електроповерхневий потенціал яких змінився за рахунок взаємодії з атомами кисню й установаження рівноважного (при рН 7) електроповерхневого потенціалу. Визначимо його.

Електроповерхневий потенціал за рахунок взаємодії з атомом кисню:

$$\psi_{\text{ЕП}}^0 = \frac{\psi_{0\text{Fe}} \cdot n_{\text{Fe}} + \psi_{0\text{O}} \cdot n_{\text{O}}}{\sum n} = -\frac{-1,77 \cdot 2 + 1,44 \cdot 3}{5} = -0,16 \text{ В}$$

де:  $\psi_{0\text{Fe}}$ ,  $\psi_{0\text{O}}$  – абсолютний електроповерхневий потенціал заліза та кисню;  
 $n_{\text{Fe}}$ ,  $n_{\text{O}}$  – кількість атомів заліза та кисню в молекулі  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Рівноважний (при рН 7) електроповерхневий потенціал:

$$\psi_{\text{ЕП}}^0 = -0,16\text{В} - 0,059 \cdot 7 = -0,63 \text{ В}$$

Відстань між потенціалвизначальними іонами (ПВІ)  $\text{Fe}^{2+}$   $a_0$  на поверхні блоків фериту:

$$a_0 = \sqrt{\frac{d_1 z e}{\varepsilon \varepsilon_0 \psi_{\text{ЕП}}^0}} = \sqrt{\frac{2,2 \cdot 10^{-10} \cdot 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot |-0,63|}} \left( \frac{\text{м} \cdot \text{Кл}}{\text{В}} \right) = 35,4 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 3,5 \text{ нм}$$

Сила латерального електроповерхневого відштовхування

$$f_{\text{ЛАТ}}^{\text{ЕП}} = \frac{z^2 e^2 \cdot b}{4 \varepsilon \varepsilon_0 a_0^3} = \frac{2^2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 b}{4 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (35 \cdot 10^{-10})^3} = 0,068 b \quad (1)$$

де:  $z$  – валентності ПВІ й ПРІ;  $\varepsilon$  і  $\varepsilon_0$  – відносна й абсолютна діелектричні проникності між ПВІ й ПРІ ( $\varepsilon = 1$ ,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ , Ф/м);  $e$  – заряд електрона ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл);  $b$  – розмір блоку  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , м.

Відповідно до цих даних представлені графіки зміни сили латерального електроповерхневого відштовхування  $f_{\text{ЛАТ}}^{\text{ЕП}}$  й притягання  $f_{\text{ПР}}$  в залежності від  $b$ , рис. 4.

Згідно із графіками (рис. 4), рівноважний розмір блоку фериту, що контактує з водою, рівний 400 нм (або  $4000 \text{ \AA} = 0,4 \text{ мкм}$ ), що відповідає розмірам найменших часток на рис. 2, г. Таким чином, найменші частки на рис. 2, г із середніми розмірами близько 0,5 мкм є блоками фериту з рівноважним електроповерхневим потенціалом  $\psi_{\text{ЕП}}^p = -0,67 \text{ В}$  по всіх гранях блоку.

Розглянемо механізм утворення такого рівноважного потенціалу.

При контакті сталі, що не містить окисної плівки, з повітрям молекули (атоми) кисню адсорбуються на поверхні блоків, відновлюються до аніонів  $O^{2-}$  за рахунок переходу на них електронів із блоку, рис. 5.

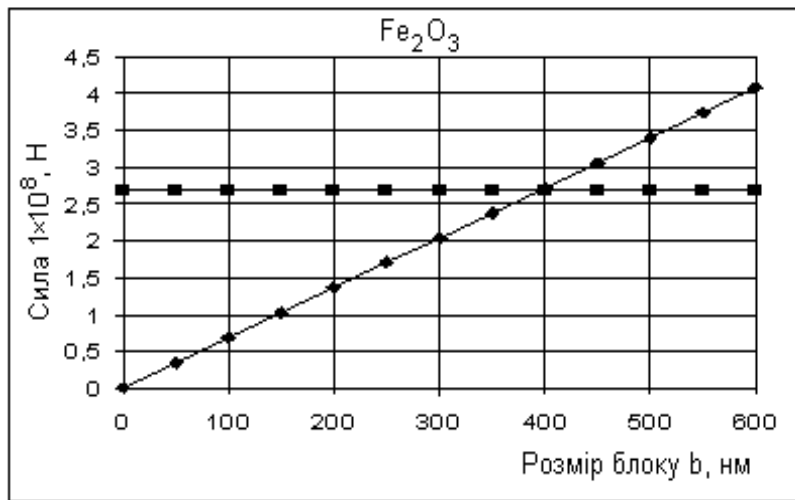


Рис. 4 – Залежність сил,  $H$ , латерального електроповерхневого відштовхування  $f_{\text{ЛАТ}}^{\text{ЕП}}$  ПВІ й притягання кутового катіона  $Fe^{2+}$  до решітці блоку  $f_{\text{ПР}}$  від розміру  $b$  (м) блоку  $Fe_2O_3$

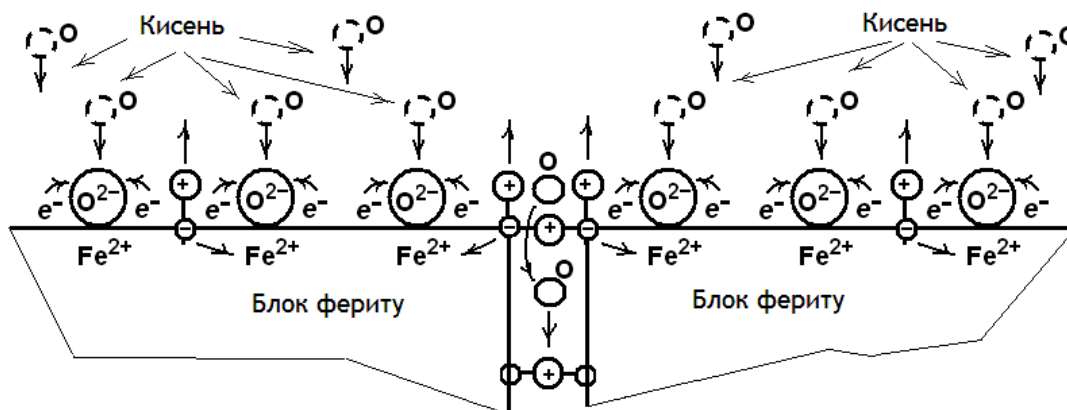


Рис. 5 – Адсорбція атомів кисню  $O$ , їх відновлення з перетворенням в аніони  $O^{2-}$  і проникання атомів кисню в прошарок протиіонів  $Fe^{2+}$

На місці збіглого електрона залишається надлишковий катіон  $Fe^{2+}$ , який стає потенціалвизначальним іоном (ПВІ) на грані блоку, що контактує з повітрям. У результаті по поверхні внутрішніх граней блоків до них спрямовуються електрони, де вони є потенціалвизначальними (ПВЕ), відновлюючи виниклі катіони  $Fe^{2+}$ , а на їхньому місці на внутрішніх гранях блоків залишаються надлишкові катіони  $Fe^{2+}$ . На нейтралізованій в такий спосіб поверхні знову адсорбуються молекули (атоми) кисню з виникненням ПВІ  $Fe^{2+}$ . При виникненні ПВІ  $Fe^{2+}$  на внутрішній поверхні блоків у прошарку протиіонів (ПРІ)  $Fe^{2+}$  виникає надлишкове поле позитивного знака, з якого витісняють-

ся, що перебували там ПРІ  $\text{Fe}^{2+}$  за межі блоку. Тут вони з'єднуються з аніонами  $\text{O}^{2-}$ , що утворювалися за рахунок відновлення, утворюючи молекули оксиду  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Діаметр атома кисню  $\text{O}$ , рівний  $2 \cdot 0,66 = 1,32 \text{ \AA}$ , менше, ніж відстань між поверхнями блоків фериту, обумовленою діаметром катіонів  $\text{Fe}^{2+}$ , рівною  $2 \cdot 0,8 = 1,6 \text{ \AA}$  [10]. У результаті адсорбовані на поверхневому блоці атоми кисню дифузійним шляхом переміщуються в прошарок ПРІ між поверхневими блоками фериту. Тут процес відновлення атомів кисню й виникнення ПВІ  $\text{Fe}^{2+}$  на блоці фериту триває доти, поки не встановиться рівноважний електроповерхневий потенціал  $\psi_{\text{ЕП}}^{\text{P}} = -0,67 \text{ В}$  по всіх гранях поверхневого блоку фериту. Ці ж блоки знаходяться між поверхневими зернами фериту.

Таким чином, у сталі поверхневий шар зерен фериту вкритий блоками фериту розмірами близько  $0,5 \text{ мкм}$  із негативним рівноважним електроповерхневим потенціалом. У зв'язку з тим, що розміри цих блоків набагато більше, ніж блоків усередині сталі, а, відповідно, поверхнева концентрація ПРІ також набагато менше. Істотне зменшення абсолютної величини рівноважного електроповерхневого потенціалу поверхневих блоків фериту, у порівнянні з електроповерхневим потенціалом блоків фериту в зерні, приводить до значного ослаблення зв'язку цих блоків із зернами. Це обумовлює можливість зсуву поверхневих блоків під впливом навантаження від колеса. Механізм такого зсуву полягає в наступному.

На поверхневих блоках фериту перебувають гідратовані ПРІ  $\text{Fe}^{2+}$ , так що між поверхнями колеса й рейки перебувають два рівноважні ПЕШ, що контактують один з одним через гідратовані ПВІ  $\text{Fe}^{2+}$ , пов'язані з ПВІ  $\text{OH}^-$  (на границі з водою). У результаті навантаження від колеса сприймається цими ПВІ.

Сила, передана на один такий ПВІ при їхній поверхневій концентрації  $n$  дорівнює:

$$f_{\text{ЕД}} = \frac{\sigma_{\text{H}}}{n} = \frac{6,25 \cdot 10^8}{1,61 \cdot 10^{17}} \left( \frac{\frac{\text{H}}{\text{M}^2}}{\frac{1}{\text{M}^2}} = H \right) = 3,88 \cdot 10^{-9} = 0,39 \cdot 10^{-8} \text{ Н},$$

де  $\sigma_{\text{H}}$  – напруга в головці рейки від навантаження на вісь  $25 \text{ т}$ ,  $\sigma_{\text{H}} = 625 \text{ МПа}$  [4].

Сила  $f_{\text{ЕД}}$  перевищує силу зв'язку між  $\text{Fe}^{2+}$  і  $\text{OH}^-$  у цьому контакті  $f_{\text{ПР}}$ , рівну  $0,35 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$  [4]. Тим більше, ця сила перевищує суттєво меншу силу зв'язку молекули води з ПВІ й ПРІ (іон – дипольна взаємодія набагато слабкіше іон – іонної при порівнянності відстаней між ними). Для більш реального уявлення про ці сили, визначимо міцність одиничного контакту й напругу в ньому від прикладеної від колеса сили:

Міцність одиничного контакту  $\text{Fe}^{2+} - \text{OH}^-$  дорівнює:

$$R_{\Phi} = \frac{f_{\text{ПР}}}{a_{\text{Fe}}^2} = \frac{0,35 \cdot 10^{-8}}{1,6^2 \cdot 10^{-20}} \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right) = 1,37 \cdot 10^{11} \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right) = 137000 \text{ МПа},$$

що відповідає теоретичній міцності сталі (або модулю її пружності), де  $a_{\text{Fe}}^2$  – площа іона  $\text{Fe}^{2+}$  у кристалічних решітках фериту.

Напруга, передана на ПВІ, дорівнює:

$$\sigma_{\Phi} = \frac{f_{\text{ЕД}}}{a_{\text{Fe}}^2} = \frac{0,39 \cdot 10^{-8}}{1,6^2 \cdot 10^{-20}} \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right) = 1,52 \cdot 10^{11} \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right) = 152000 \text{ МПа},$$

що також порівнянне з теоретичною міцністю й перевищує міцність одиничного контакту  $\text{Fe}^{2+} - \text{OH}^-$ .

Таким чином, навантаження від колеса приводить до руйнування одиничних гідратованих контактів і сплющує ПЕШ між колесом і головкою рейки, перетворюючи його в ПЕШ із одним загальним шаром ПРІ  $\text{OH}^-$ .

Стиснення ПЕШ на поверхні головки рейки з подвоєнням кількості ПРІ в ньому під колесом приводить до виникнення надлишкового заряду ПРІ на поверхні зерна, що контактує з водою. Латеральна рухливість цих ПРІ приводить до їхнього рівномірного перерозподілу по всій поверхні зерна, у результаті чого надлишкова концентрація ПРІ на кожній грані буде менше в 6 разів і складе  $1,61 \cdot 10^{17} / 6 = 0,27 \cdot 10^{17} \text{ 1/м}^2$ , при цьому встановлюється рівноважний електроповерхневий потенціал  $\psi_{\text{ЕП}}^{\text{P}} = 1,36 / 6 = 0,23 \text{ В}$ .

Відповідно, поверхнева концентрація надлишкових ПВІ складе:

$$n = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \psi_{\text{ЕП}}^{\text{P}}}{d_1 \cdot ze} = \frac{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot |-0,23|}{2,33 \cdot 10^{-10} \cdot 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = \frac{2 \cdot 10^{-12}}{7,46 \cdot 10^{-29}} = 0,27 \cdot 10^{17} \left( \frac{1}{\text{м}^2} \right),$$

а відстань між ними:

$$a_0 = \sqrt{\frac{1}{n}} = \sqrt{\frac{1}{0,27 \cdot 10^{17}}} = \sqrt{3,72 \cdot 10^{-17}} = 6,1 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 6,1 \text{ нм}$$

де  $d_1$  – відстань між ПВІ й ПРІ (м).

Величина  $d_1$  дорівнює сумі радіусів катіона  $\text{Fe}^{2+}$  і аніона  $\text{OH}^-$ :

$$d_1 = (0,8 + 1,53) \cdot 10^{-10} = 2,33 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Сила відштовхування між блоками в смузі блоків, що ковзають, довжиною  $l$ , яка виникає на чотирьох поздовжніх гранях з шести та передається на крайні зерна, дорівнюватиме:

$$F_{\text{ЛАТ.ГР}}^{\text{ЕП}} = 4 \cdot \frac{z^2 \cdot e^2 \cdot l}{4\pi\epsilon\epsilon_0 \cdot a_0^3} = 4 \cdot \frac{4 \cdot 2,56 \cdot 10^{-38} \cdot 4000 \cdot 10^{-10} \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{1,1116 \cdot 10^{-10} \cdot 85^4 \cdot 10^{-40}} = 0,014 \text{ Н}$$

Торцева сила, що притягує крайні блоки до суміжних зерен кристалічної решітки:

$$F_{\text{ПР.Б}} = 2f_{\text{ПР}} \frac{l^2}{a_0^2} = 2 \cdot 1,45 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{4000^2 \cdot 10^{-20}}{85^2 \cdot 10^{-20}} = 6,4 \cdot 10^{-5} \text{ Н,}$$

де:  $f_{\text{ПР}}$  – сила притягання між ПВЕ й ПРІ  $\text{Fe}^{2+}$  в одиничному контакті між блоками в зерні фериту, Н [4].

Як бачимо, латеральна сила відштовхування між іонами перевищує силу, що притягає крайні блоки до решітки, отже, смуга поверхневих блоків повинна видавлюватися з під колеса по сторонах. Однак цьому зсуву перешкоджають триваючі смуги поверхневих іонів, у результаті чого кожне зерно виявляється під дією зустрічних сили виштовхування й сили, що перешкоджає виштовхуванню, які складаються алгебраїчно залежно від напрямків. Найбільша результуюча сила, що видавлює блок, виникає на перехідному майданчику між горизонтальною й бічною поверхнями головки рейки. Результуючу силу видавлювання при цьому можна представити як:



$$F_{\text{ОТР}} = 2F_{\text{ЛАТ.ГР}}^{\text{ЕП}} \cdot \cos 45^\circ = 1,41 \cdot F_{\text{ЛАТ}}^{\text{ЕП}} = 1,41 \cdot 0,014 = 0,02 \text{ Н}$$

Так як сила електроповерхневого відштовхування між блоками значно перевищує силу, що притягає блок до зерна, у шар, що зміщується, блоків (ланцюжок) будуть залучатися інші шари блоків, які стають доступними кисневим атомам і воді, і потенціали яких стають рівними  $-0,67 \text{ В}$ .

При цьому встановлюється рівноважний стан:

$$F_{\text{ЛАТ.ГР}}^{\text{ЕП}} = F_{\text{ПР.Б}} \cdot N_{\text{СМ}} \quad (2)$$

звідки число шарів блоків, що залучаються в зсув дорівнює:

$$N_{\text{СМ}} = \frac{F_{\text{ЛАТ.ГР}}^{\text{ЕП}}}{F_{\text{ПР.Б}}} = \frac{0,014}{0,000064} = 219 \quad (3)$$

Зона зсуву блоків розподіляється під кутом  $45^\circ$  від контакту уздовж рейки, рис. 6.

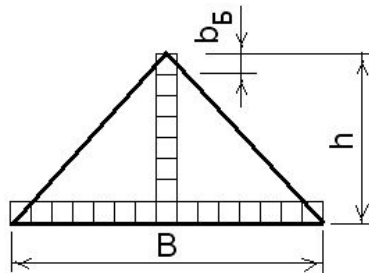


Рис. 6 – Зона залучення блоків у зсув під дією навантаження від колеса

Кількість ланцюжків блоків, що залучаються в зсув під впливом навантаження від колеса, можна визначити за схемою на рис. 6. Ця кількість блоків визначиться половиною добутку блоків по висоті  $h$  зони зсуву на кількість блоків по ширині зони зсуву  $B$ :

$$N_{\text{СМ}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{b_B} \cdot \frac{B}{b_B} = \frac{h \cdot 2h \cdot \text{tg} 45^\circ}{2b_B^2} = \frac{h^2 \text{tg} 45^\circ}{b_B^2} \quad (4)$$

Підставимо це вираження в (3):

$$\frac{h^2 \text{tg} 45^\circ}{b_B^2} = \frac{F_{\text{ЛАТ}}^{\text{ЕП}}}{F_{\text{ПР.Б}}} \quad (5)$$

Із цього рівняння висота  $h$  визначиться вираженням:

$$h = \sqrt{\frac{F_{\text{ЛАТ.ГР}}^{\text{ЕП}} \cdot b_{\text{Б}}^2}{F_{\text{ПР.Б}} \cdot \text{tg} 45^\circ}} = \sqrt{\frac{0,014 \cdot 4000^2 \cdot 10^{-20}}{6,4 \cdot 10^{-5} \cdot 1}} = 5,92 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 5,9 \text{ мкм} \quad (6)$$

що відповідає висоті шару, що зміщується, блоків фериту на поперечному профілі.

Це свідчить про коректність розкритого механізму зношування головки рейки по вертикалі. Таким чином, механізм зношування головки рейки по вертикалі полягає в тому, що під впливом навантаження від колеса сплющуються ПЕШ на поверхневих блоках і колесі, що приводить до збільшення концентрації ПРІ в них і виникненню сили латерального електроповерхневого відштовхування між блоками на поверхні головки рейки, яка зміщує шари й витісняє крайні блоки на верхньому закругленні головки назовні й усередину колії. Блоки, що витісняються усередину колії будуть зрізатися ребордою колеса, а блоки, що витісняються назовні, будуть приводити до наростання.

На відміну від зсуву блоків фериту в поперечному профілі, де сила, латерального електроповерхневого відштовхування між блоками, тобто сила їх витиснення  $f_{\text{ЛАТ}}^{\text{ЕП}}$ , долає силу зв'язку між блоками  $F_{\text{ПР.Б}}$ , і при цьому відбувається витиснення на кромку головки рейки, зсув блоків у поздовжньому напрямку головки рейки відбуватися не може, тому що крайових блоків у цьому випадку немає, і зсуву перешкоджає лобовий опір зустрічних блоків і зерен. У результаті у формулі для сили латерального електроповерхневого відштовхування величина  $l$  буде не постійною, як у поперечному профілі, а змінною

$$F_{\text{ЛАТ.ГР}}^{\text{ЕП}} = \frac{4z^2 e^2 b_{\text{Б}} l}{4\pi\epsilon\epsilon_0 a_0^4} = \frac{4 \cdot 2^2 \cdot 2,56 \cdot 10^{-38} \cdot 13 \cdot 10^{-6} l}{1,116 \cdot 10^{-10} \cdot 81^4 \cdot 10^{-40}} = 11,16 \cdot l \quad (7)$$

Відповідно, їй перешкоджає сила відриву зерна під таким же кутом, але в протилежному напрямку, у зв'язку із чим тангенсом кутів зневажимо:

$$F_{\text{ПР.З}} = 2 \cdot f_3 \cdot N_3 = 2 \cdot 1,45 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{13^2 \cdot 10^{-12}}{23,1^2 \cdot 10^{-20}} = 0,78 \text{ Н} \quad (8)$$

Рівність сил:

$$F_{\text{ЛАТ.ГР}}^{\text{ЕП}} = F_{\text{ПР.З}}, \quad 11,16 \cdot l = 0,78, \quad l = 0,78/11,16 = 0,069 \text{ м} = 6,9 \text{ см}, \quad (9)$$

що відповідає даним про довжину хвилі короткохвильового хвилеподібного зносу  $1 \div 10$  см [11].

Слідом за видавлюванням першого зерна на поверхню головки рейки відбувається поступове видавлювання інших зерен, у результаті чого накопичується хвиля зношування зазначеної довжини. Подібно цій же формулі встановлюється рівняння сил видавлювання блоку над поверхнею рейки:

$$F_{\text{ПР.Б}} = 2 \cdot f_B \cdot N_B = 2 \cdot 1,45 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{4000^2 \cdot 10^{-20}}{35^2 \cdot 10^{-20}} = 0,00038 \text{ Н} \quad (10)$$

$$F_{\text{ЛАТ.ГР}}^{\text{ЕП}} = \frac{4 \cdot 2^2 \cdot 2,56 \cdot 10^{-38} \cdot 4000 \cdot 10^{-10} l}{1,116 \cdot 10^{-10} \cdot 81^4 \cdot 10^{-40}} = \frac{1638 \cdot 10^{-45} \cdot l}{4,79 \cdot 10^7 \cdot 10^{-50}} = 34,2 \cdot 10^{-2} \cdot l = 0,342 \cdot l \quad (11)$$

Рівність сил:

$$F_{\text{ЛАТ.ГР}}^{\text{ЕП}} = F_{\text{ПР.Б}}, \quad 0,342 \cdot l = 0,00038, \quad l = 0,00038/0,34 = 0,0011 \text{ м} = 1,1 \text{ мм}, \quad (12)$$

що відповідає відстані 0,8 мм між тріщинами, рис. 1.

Блок витісняється з поверхневого шару блоків на зерні фериту, при цьому на місці витиснутого блоку утворюється в цьому шарі поперечна (по ширині головки рейки) щілина шириною 400 нм. У цю щілину відразу проникає вода й на поверхні блоків фериту, що оголилися під цією щілиною встановлюється рівноважний електроповерхневий потенціал  $-0,67$  В.

У результаті зменшується кількість контактів утворених одиничними осередками, з поверхневим зерном. Катіони  $\text{Fe}^{2+}$  у цих осередках оголюються. Прошарок між зернами фериту є доступним для проникання в нього молекул води. Останні гідратують катіони, що звільнилися,  $\text{Fe}^{2+}$ , що викликає розклинення між зернами в нормальному до поверхні напрямку.

Енергія гідратації катіона  $\text{Fe}^{2+}$  дорівнює  $U^{\text{Г}} = 1875$  кДж/моль. Робота розриву суміжного зв'язку  $\text{Fe}^{2+}$  – ПВЕ дорівнює  $U_{\text{р}} = f d_1$ . З рівняння  $f d_1 = U^{\text{Г}}$  знаходимо:

$$f = \frac{U^{\Gamma}}{d_1} \quad (13)$$

Кількість контактів із осередків пропорційно щільності поверхневого заряду, а отже, величині електроповерхневого потенціалу.

Останній для зерен фериту усередині сталі дорівнює  $-1,77$  В, а для поверхневих зерен  $-0,67$  В, тобто число катіонів, що звільнилися,  $Fe^{2+}$  пропорційно  $(1,77 - 0,67)/1,77 = 0,62$  В, а число збережених контактів  $Fe^{2+}$  – ПВЕ поверхневих зернах - пропорційно  $0,38$  В.

Виходячи із цього співвідношення рівняння (13) прийме вигляд:

$$0,38 f d_1 = 0,68 U^{\Gamma} \quad (14)$$

Величина сили розриву зв'язку  $Fe^{2+}$  – ПВЕ із цього рівняння дорівнює:

$$f = \frac{0,62 \cdot 1875000}{0,38 \cdot 2,52 \cdot 10^{-10} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} \left( \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{МОЛЬ}}}{\frac{\text{М} \cdot 1}{\text{МОЛЬ}}} = \frac{H \cdot \text{М}}{\text{М}} \right) = 1,63 \cdot \frac{1,87 \cdot 10^6}{15,2 \cdot 10^{13}} = 0,2 \cdot 10^{-7} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$$

що суттєво вище сили зв'язку  $Fe^{2+}$  – ПВЕ  $f = 1,45 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$ .

Таким чином, витиснення поверхневого блоку фериту із шару блоків на поверхневій зерні приводить до проникання молекул води в прошарок між зернами фериту, значному зменшенню абсолютної величини електроповерхневого потенціалу поверхневого зерна, звільненню катіонів заліза  $Fe^{2+}$  з одиничних контактів, утворених цементитовими осередками, їх гідратації й виникнення за рахунок цього сильного тиску, що розклинює, що розриває зв'язки  $Fe^{2+}$  – ПВЕ. Поверхнєве зерно відривається від тих, що лежать нижче, і процес триває. У результаті розвивається тріщина.

Визначимо додаткову силу латерального електроповерхневого відштовхування між блоками фериту в підшві рейки від потенціалу в контактному проводі. Напруженість електричного поля, створюваного струмом у контактних проводах, при напрузі  $3000$  В и відстані від контактного проводу до обробки тунелю  $h = 1$  м складе:

$$E = \frac{U}{h} \left( \frac{\text{В}}{\text{М}} \right) = \frac{3000}{1} = 3000 \frac{\text{В}}{\text{М}}, \quad (15)$$

де:  $U$  – напруга в контактних проводах, В;  $h$  – відстань від контактного проводу до обробки тунелю, м.

Відстань до підшви рейки дорівнює приблизно 10 м. Напруженість електричного поля в ланцюзі контактний провід – підшва рейки складе, відповідно, 300 В/м. Різниця потенціалів по висоті рейки між підшвою і головкою рейки складе

$$U = E \cdot h_n = 300 \cdot 0,15 = 45 \text{ В.}$$

Потенціал на підшві рейки +22,5 В, на головці –22,5 В, а електроповерхневий потенціал на підшві рейки  $22,5/24 = 0,94$  В.

У результаті, значну частину часу перед тим, як поїзд із електротягою зайде в тунель, підшва рейки буде анодом і кородуватиме. Разом з тим, позитивний потенціал на підшві рейки викликає додаткову силу латерального електроповерхневого відштовхування, яке викликає виникнення і розвиток тріщин у підшві рейки.

### **Висновки.**

Встановлено, що руйнування кристалічної решітки металу може відбуватися як шляхом відриву атомів, при якому решітки відразу розпадаються на дві частини, так і шляхом зсуву атомів, при якому решітка, поступово деформується, розпадається тільки після значного викривлення. Теоретичними дослідженнями і розрахунками доведено, що наявний на рейці електричний потенціал створює в ній додаткові механічні напруги, які з точки зору забезпечення міцності колії безпечні, проте сприяють виникненню первинних мікротріщин і прискоренню розвитку пластичних деформацій, а отже, зносу рейок.

**Список літератури:** 1. *Плугін А.А.* Аналіз впливу агресивних дій на конструкції та споруди залізниць: Верхня будова колії в залізничних тунелях / [А.А. Плугін, А.М. Плугін, Д.А. Плугін та ін.] // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2011. – Вип. 122. – С. 187 – 201. 2. *Плугін Д.А.* Оцінка можливого впливу замкненого простору в тунелі на величину потенціалу на рейці / [Д.А. Плугін, А.М. Плугін, А.А. Плугін, О.С. Тіряєв] // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2011. – Вип. 127. – С. 175 – 183. 3. *Плугін А.А.* Теоретические предпосылки создания количественной теории электрокоррозии стали и защиты от нее / [А.А. Плугин, А.Н. Плугин, Ю.Н. Горбачова и др.] // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2012. – Вип. 129. – С. 169 – 173. 4. *Плугін Д.А.* Дослідження й розвиток кількісних уявлень про мікроструктуру сталі: механічні властивості сталі залізничних рейок / Д.А. Плугін // Вісник НТУ. – 2013. – № 47 (1020). – С. 106 – 112. 5. *Плугін Д.А.* Коррозия верхнего строения пути в железнодорожных тоннелях: Определение сроков эксплуатации / Д.А. Плугин //

Промышленный транспорт Казахстана. – Алматы: КУПС. – 2013. – № 3 (40). – С. 13 – 19.

**6.** *Plugin D.A.* Electro-corrosion of constructions of railway tunnels / [*D.A. Plugin, A.N. Plugin, A.I.A. Plugin, O.S. Borzyak*] // *Aplikovane vědecke novinky – 2013: IX Mezinar. vědecko-prakt. konf.*, 27 červ.-5 serp. 2013 p.: materialy konf. – Praha, 2013. – P. 52 – 58.

**7.** *Гейдер Р.* Исследование характера износа рельсов в кривой / *Р. Гейдер* // *Железные дороги мира.* – 2001. – № 12. – С. 67 – 73.

**8.** Анализ ферритного зерна в малоуглеродистой стали ASTM E 112 plate I, ASTM E 1382 [Электронный ресурс] / ПРЕСС-РЕЛИЗ № 12. – Режим доступа: [http://siams.com/releases/solutions/grain\\_astm.pdf](http://siams.com/releases/solutions/grain_astm.pdf).

**9.** *Плугин А.Н.* Механизмы формирования структуры, прочности и долговечности стали и железобетона на основе электроповерхностного потенциала простых веществ / [*А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Д.А. Плугин и др.*] // *Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Збірник наукових праць. Серія Технічні науки.* – Луганськ: Будівництво. – 2010. – С. 250 – 270.

**10.** *Равдель А.А.* Краткий справочник физико-химических величин / [Под. ред. *А.А. Равделя, А.М. Пономаревой*]. – [8-е изд., перераб.]. – Л.: Химия. – 1983. – 231 с.

**11.** *Немпе Т.* Rail grinding as an integral part of technically and economically efficient track maintenance / *Т. Немпе, Т. Siefer* // *Rail Engineering International.* – 2007. – № 3. P. 6 – 12.

*Надійшла до редколегії 05.11.13*

УДК 625.143:620.193.7

**Дослідження й розвиток кількісних уявлень про мікроструктуру сталі: механізм зношування й тріщиноутворення залізничних рейок / Д.А. ПЛУГІН** // *Вісник НТУ «ХПІ».* – 2013. – № 64 (1037). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 130 – 143. – Бібліогр.: 11 назв.

Представлены новые теоретические положения и теории механических свойств стали, в частности железнодорожных рельсов, на основе реальной структуры и электроповерхностных свойств, явлений и процессов. Установлено, что разрушение кристаллической решетки металла может происходить как путем отрыва атомов, при котором решетки сразу распадаются на две части, так и путем смещения атомов, при котором решетка, постепенно деформируясь, распадается только после значительного искривления. Доказано, что имеющийся на рельсе электрический потенциал создает в нем дополнительные механические напряжения.

**Ключевые слова:** железнодорожный рельс, феррит, цементит, микроструктура, электроповерхностный потенциал, прочность, трещина, разрушение.

Presented new theoretical concepts and theories of the mechanical properties of steel, particularly railway rails, based on the real structure and surface electrical properties, phenomena and processes. Found that the destruction of the crystal lattice of the metal can occur through separation of the atoms, wherein the lattice immediately split into two parts, and by displacing atoms, wherein the lattice is gradually deformed, decays only after a significant curvature. It is proved, that an on railway rails electric potential it creates additional mechanical strain.

**Keywords:** railway rails, ferrite, cementite, microstructure, electrosurface potential, strength, crack, destruction.