

УДК 544.72:625.143.3

## ФІЗИКО-ХІМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРИЧИН УТВОРЕННЯ МІКРОТРІЩИН У РЕЙКОВІЙ СТАЛІ

Д-р техн. наук Л. В. Трикоз, канд. техн. наук Д. О. Потапов, інж. І. В. Багіянц

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ МИКРОТРЕЩИН В РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

Д-р техн. наук Л. В. Трикоз, канд. техн. наук Д. А. Потапов, инж. И. В. Багианц

## PHYSICAL AND CHEMICAL RATIONALE THE REASONS FOR THE FORMATION OF CRACKS IN THE RAIL STEEL

DSc L.V. Trykoz, PhD D.A. Potapov, eng. I.V. Bagiyanc

*У статті розглянуто механізм утворення мікротріщин у структурі рейкової сталі з позицій фізико-хімічної механіки дисперсних систем. Наявність однойменних зарядів на поверхні призводить до появи електровідштовхувальної сили, названої силою електроповерхневого латерального відштовхування. Ця сила знижує величину питомої поверхневої енергії і, відповідно, зменшує роботу утворення нових поверхонь, що створює умови для утворення і розвитку мікротріщин між зернами фериту і цементиту. Наведені у статті розрахунки показали, що найбільшою мірою поверхневий натяг знижують неметалеві включення, по границі яких і починається утворення тріщин.*

**Ключові слова:** електроповерхневий потенціал, електроповерхнє латеральне відштовхування, мікротріщини, рейкова сталь.

*В статье рассмотрен механизм образования микротрещин в структуре рельсовой стали с позиций физико-химической механики дисперсных систем. Наличие одноименных зарядов на поверхности вызывает появление электроотталкивающей силы, названной силой электроповерхностного латерального отталкивания. Эта сила снижает величину удельной поверхностной энергии и, соответственно, уменьшает работу образования новых поверхностей, что создает условия для образования и развития микротрещин между зернами феррита и цементита. Приведенные в статье расчеты показали, что в наибольшей степени поверхностное натяжение снижают неметаллические включения, по границе которых и начинается образование трещин.*

**Ключевые слова:** электроповерхностный потенциал, электроповерхностное латеральное отталкивание, микротрещины, рельсовая сталь.

*The article describes the mechanism for formation of cracks in the structure of the rail steel from the standpoint of physical and chemical mechanics of disperse systems. The presence of the like charges on the surface causes the force of electrostatic repulsion. This force is called the electrosurface lateral repulsion force. This force reduces the value of the specific surface energy. Thus it reduces the work of formation of new surfaces. This creates conditions for the formation and development of cracks between the grains of ferrite and cementite. Calculations in the article have showed that nonmetallic inclusions reduce the surface tension to the greatest extent. On the border of nonmetallic inclusions the crack begins. Modified Hriffits' formula allows to explain the*

*appearance of cracks between grains of ferrite and cementite. This could be the basis for the development of the theory of plastic flow of alloy in general and rail steel in particular.*

**Keywords:** *electrosurface potential, electrosurface lateral repulsion, microcracks, rail steel*

**Вступ.** Швидкість руху поїздів відображає рівень технічної оснащеності залізниць й якість організації руху. З підвищенням швидкості руху поїздів скорочуються терміни доставки вантажів, прискорюється проїзд пасажирів, поліпшується використання вагонів і локомотивів, збільшується провізна спроможність ліній. Однак у процесі експлуатації на поверхні кочення головки рейок та всередині них утворюються дефекти, які завдають економічні збитки залізничному транспорту, погіршуючи експлуатаційні показники роботи.

Залізничні рейки є одним із найважливіших елементів верхньої будови колії. Від стану рейок найбільшою мірою залежить і безпека руху поїздів, і продуктивність перевізного процесу. Міцність та експлуатаційна надійність рейок визначають швидкості руху й осьові навантаження рухомого складу. На сьогодні істотно змінилися режими навантаження й роботи колії і, зокрема, підвищилося осьове навантаження, збільшилися швидкості руху поїздів і вантажонапруженість ліній, що стало причиною підвищення рівня динамічного впливу коліс рухомого складу на колію. Зміна експлуатаційних умов значно впливає на одиночний вихід з ладу рейок через пошкодження. Аналіз причин одиночної зміни рейок показує, що більшу частину складають дефекти, виникнення яких пояснюється недостатньою контактнотомною міцністю їх матеріалу. Вони виникають і розвиваються всередині головки рейок без будь-яких зовнішніх ознак. У міру поступового розвитку втомної тріщини поперечний переріз рейки все більше послаблюється, і після досягнення нею критичного розміру для даних умов експлуатації настає остаточне

руйнування рейки, що може служити причиною сходу рухомого складу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Внаслідок особливої значимості рейок залізниць і металургійна промисловість приділяють велику увагу розробленню технологій, в яких дефекти і пошкодження є основою для оцінки всіх проблем, пов'язаних зі станом рейок. У роботі [1] зазначалося, що керівні документи з класифікації дефектів і пошкоджень, прийняті в різних країнах, різні, оскільки засновані на технологіях виготовлення, умовах експлуатації й методах обстеження рейок, характерних для кожної країни. Оскільки для умов експлуатації високошвидкісних ліній типові висока швидкість руху поїздів, невисокі осьові навантаження від рухомого складу і відносно невеликий вертикальний та поздовжній знос рейок, основними стають дефекти і пошкодження поверхні рейки контактнотомного походження.

Загальноприйнято, що основною причиною виникнення дефектів є силовий вплив у системі «колесо - рейка» [2, 3]. Втомні тріщини, що описані в роботі [2], є процесом поступового руйнування через створення та розвиток початкової тріщини. Цей процес може призвести до рейкових розривів під впливом навантаження, яке передається на головку рейки через невелику площу поверхні. Область контактної поверхні «колесо - рейка», як правило, перебуває в діапазоні від 1,5 до 3,0 см<sup>2</sup>, або до 5,0 см<sup>2</sup> у випадку зносу або дефектних коліс та/або рейок. Зростання тріщини залежить від багатьох факторів, і найбільш важливими серед них є: статичне навантаження на колесо, динамічне навантаження колеса, прокатні характеристики транспортного засобу, рейок, рейкова сталь, перепад температур, напруги в рейці, знос головки рейок,

геометрія і жорсткість колії. Для кожного типу дефекту швидкість росту тріщини може значно варіюватися. За даними роботи [3], пошкодження головок рейок спостерігаються в усьому світі через збільшення експлуатаційних навантажень, вантажонапруженості й швидкості руху поїздів. Вони виникають на поверхні і поширюються вниз під невеликим кутом 10-30 ° у головці рейки на глибину кількох міліметрів. Після цього тріщина або поширюється назад на поверхню, в результаті чого частина рейки піднімається, залишаючи неглибоку порожнину, або йде вниз у рейку. У першому випадку, який є найбільш поширеним, порожнина викликає сильні вертикальні ударні навантаження на залізничні транспортні засоби, які можуть призвести до подальшого пошкодження як рейки, так і рухомого складу.

У багатьох джерелах розглядаються й інші фактори, що призводять до появи або розвитку пошкоджень. Так, проведене дослідження в роботі [4] дозволило її авторам встановити, що дефекти рейок мають як сталеплавильне (встановлено в 37 % випадків), так і прокатне походження (встановлено в 56 % випадків). Мікродослідження цілого ряду зразків, вирізаних з різних частин рейки (головки, шийки та підшви), проведені в роботі [4], показали, що дефекти можуть мати вигляд

тонкої або широко розкритої тріщини (типу порожнини), похилої тріщини, іноді тонкої звивистої тріщини. У більшості випадків тріщини повністю або частково заповнені неметалевими включеннями типу складних оксидів і окалини. З метою уточнення природи походження дефектів автори [4] проводили мікрорентгеноспектральні дослідження за допомогою растрового електронного мікроскопа. У результаті дослідження встановлено, що неметалеві включення є складними оксидами, в складі яких спостерігаються Si, Al, Mn, Ca, Na, K, Fe; в окремих випадках S і Ti. Оксиди подібного складу характерні для дефектів сталеплавильного походження. Відомо, що їх наявність може негативно позначатися на механічних властивостях рейок, у тому числі призводити до локального зниження пластичності, що у свою чергу може стати однією з причин, що сприяють утворенню та збільшенню дефектів у процесі прокатки. У табл. 1 наведені результати мікрорентгеноспектрального аналізу, з якого видно, що поблизу дефектів спостерігаються скупчення дрібних включень, які, очевидно, є вторинними – виділилися у твердому металі внаслідок дифузії кисню за місцем дефекту, що відбувається в процесі тривалої витримки заготовки при високій температурі.

Таблиця 1

Хімічний склад рейкової сталі поблизу тріщини

Номер зразка	Вміст елемента, %												
	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
1	13,94	48,98	0,24	5,32	23,17	0,05	2,39	0,55	0,22			2,83	2,32
2	8,36	52,98	0,28	5,69	26,74	0,03	2,64	0,32	0,11			1,8	1,06
3	14,26	51,85	0,14	5,03	23,74	0,01	2,23	0,28	0,12			1,6	0,69
4	4,02	1,44		0,05	0,23		0,06	0,03		0,19	0,08	1,01	93,07

Крім силового впливу, рейка має й тепловий нагрів від колісної пари, постійна температура якої може бути набагато вищою, ніж у рейки. У цьому випадку колесо забезпечує додаткове підвищення

температури на поверхні рейки, що додає термічної напруги і теплового розм'якшення, що може підвищити швидкість зносу рейки. Встановлено [5], що тепловий стрес незначно впливає на

швидкість зносу рейок, але теплове розм'якшення може підвищити швидкість зносу аж до порядку величини для розглянутих умов.

Ще один фактор, що прискорює вихід рейок, – електрокорозія. Про корозійний вплив на залізничні споруди часто забувають, оскільки він не передбачає негайної коригувальної реакції на рух поїздів [6]. Процес корозії є природним процесом, який відбувається повільно і безперервно протягом усього терміну служби всіх матеріалів і який може бути прискорений за рахунок блукаючих струмів від системи електрифікації залізниць. На процес електрохімічної корозії впливають погана рейкова ізоляція, забруднення баласту вантажами, що перевозяться, накопичення гальмівного пилу поблизу пасажирських платформ. Також пошкоджуються блукаючими струмами конструкції мостів, тунелів, труб, інших підземних споруд. Крім того, блукаючі струми можуть також викликати відмову інших життєво важливих систем, таких як системи сигналізації та зв'язку.

Крім корозії від струмів витоку, виникає й внутрішня корозія, обумовлена мікроструктурою сталі. Рейкова сталь – це кристалічне тіло, яке складається з дрібних кристалів фериту, що утворюють зерна, і перліту (суміші цементиту з феритом), розташованого, головним чином, на стиках феритних зерен, який утворює «сітку» або вкраплення між зернами (рис. 1). Наявність різних за вмістом вуглецю фаз і, відповідно, зерен і границь лежить в основі формування мікрогальванічних елементів (пар) і, відповідно, електрохімічної корозії сталі. Основна маса зерен, приблизно 80 % від загальної кількості, має розміри в інтервалі від 9 до 19 мкм, середній розмір – 13,5 мкм. Частинок з розміром менше 5 мкм практично немає. Відповідно, розвиток пластичних деформацій і пошкоджень від корозії може бути описано з точки зору фізико-хімічної механіки дисперсних систем, до яких належить сталь.

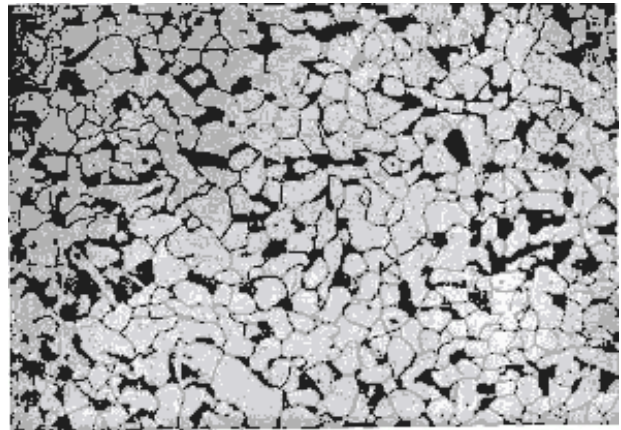


Рис. 1. Мікроструктура сталі

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою статті є обґрунтування формули для визначення фактичних характеристик міцності і втомних характеристик рейкового металу на основі фізико-хімічних уявлень, яка дає змогу дати кількісне силове трактування процесу утворення і зростання дефектів. Поглиблення цих уявлень і кількісний опис механізмів корозії сталі можливо і на основі врахування субмікроструктури сталі, електроповерхневих властивостей і взаємодій, їх впливу на процеси окислення, відновлення і перенесення кисню і води, а також продуктів корозії.

**Основна частина дослідження.** Залежно від впливу на безпеку руху всі дефекти та пошкодження рейок розподіляються на гостродефектні і дефектні. Усі дані про вилучення рейок за дефектами та пошкодженнями по Південній залізниці за останні чотири роки було розділено за цими двома критеріями [8]. Загальна кількість рейок, що була оброблена, складає 19015 шт.

На рис. 2 наведена загальна діаграма вилучення гостродефектних рейок по Південній залізниці (тут і далі позначення дефектів виконано згідно з роботою [9]). Загальний масив рейок – 3627 шт. Основними дефектами є: поперечні тріщини в головці у вигляді світлих або темних плям і злами через них внаслідок недостатньої контактної-втомної міцності

металу 21.2 (29,6 %), горизонтальне розшарування головки через наявність скупчень неметалевих включень 30Г.2 (19,4 %), гартівні тріщини в загартованому шарі металу головки 27.2 (13,8 %), поперечні тріщини в головці через порушення технології зварювання рейок 26.3 (5,1 %), тріщини в шийці від болтових та інших отворів у рейках 53.1 (4,85 %), поздовжні тріщини і виколи через них у місцях переходу головки в шийку 52.1 (4,66 %). Специфічний вплив рухомого складу та порушення режиму ведення поїзда, зокрема екстрене гальмування, призводять до зміни структури на поверхні кочення рейок і зміни напруженого стану усієї головки рейки і, як наслідок, може призводити до дефектів 21.2 і 30Г.2 й частково сприяти прискоренню появи дефектів: пробуксовка рейок колесами локомотивів 14 та поперечні тріщини в головці і злами через них внаслідок буксування, юза, проходу коліс із повзунами або вибоїнами 24.

Традиційно на першому місці є дефекти контактно-втомного походження. Проаналізуємо, з точки зору електроповерхневих властивостей, сили взаємодії між зернами фериту та цементиту та ймовірність виникнення втомної тріщини. Скористаємося для цього уявленнями про електроповерхневі потенціали простих речовин [10]. Ці уявлення засновані на тому, що електродний потенціал залежить від числа електронів на зовнішніх орбіталах атомів простих речовин – металів і неметалів. Значення електродного потенціалу є кількісною характеристикою окислювально-відновних властивостей

вимірюваного електрода по відношенню до окислювально-відновних властивостей водневого електрода. Проста речовина з негативним стандартним електродним потенціалом має надмірну кількість електронів у поверхневому шарі або дипольний шар (за рахунок тунелювання електронів) ще до занурення електрода в розчин, тобто має абсолютний потенціал поверхні. Атоми лужних металів мають у зовнішній орбіті 1 електрон, який притягується до одного протона ядра, а кожен із семи електронів галогенів притягується сімома протонами ядра. У зв'язку з цим лужні метали легше інших речовин віддають електрони і окислюються. Навпаки, галогени легше інших речовин приймають електрони і відновлюються. Потенціал поверхні, утворений за рахунок окислювально-відновної реакції, названо абсолютним електроповерхневим потенціалом [10] для відображення місця його виникнення (на поверхні речовини), відмінності від поверхневого потенціалу (закріпленого в електрохімії терміном) та його електростатичної природи (утворений зарядами). По суті, цей електроповерхневий потенціал є абсолютною величиною, на відміну від вимірюваного стандартного електродного потенціалу. У табл. 2 наведено електроповерхневі потенціали  $\Delta\psi_{эл}^0$  тих елементів, які були ідентифіковані в роботі [7]. Оскільки автори [7] вважають, що включення являють собою оксиди, розрахуємо за методикою [10, 11] також і електроповерхневі потенціали оксидів.

Таблиця 2

Електроповерхневі потенціали хімічних елементів рейкової сталі поблизу тріщини

Елемент	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
$\Delta\psi_{эл}^0$ , В	-1,108	1,44	-3,69	-2,99	-1,23	1,41	-4,25	-4,2	-2,96	-2,52	-2,24	-2,51	-1,77
Сполука	Fe <sub>3</sub> C	--	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	VO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
$\Delta\psi_{эл}^0$ , В	1,66	--	1,125	0,33	-0,55	-1,43	2,35	1,38	-0,17	-0,12	0,03	0,14	-0,156

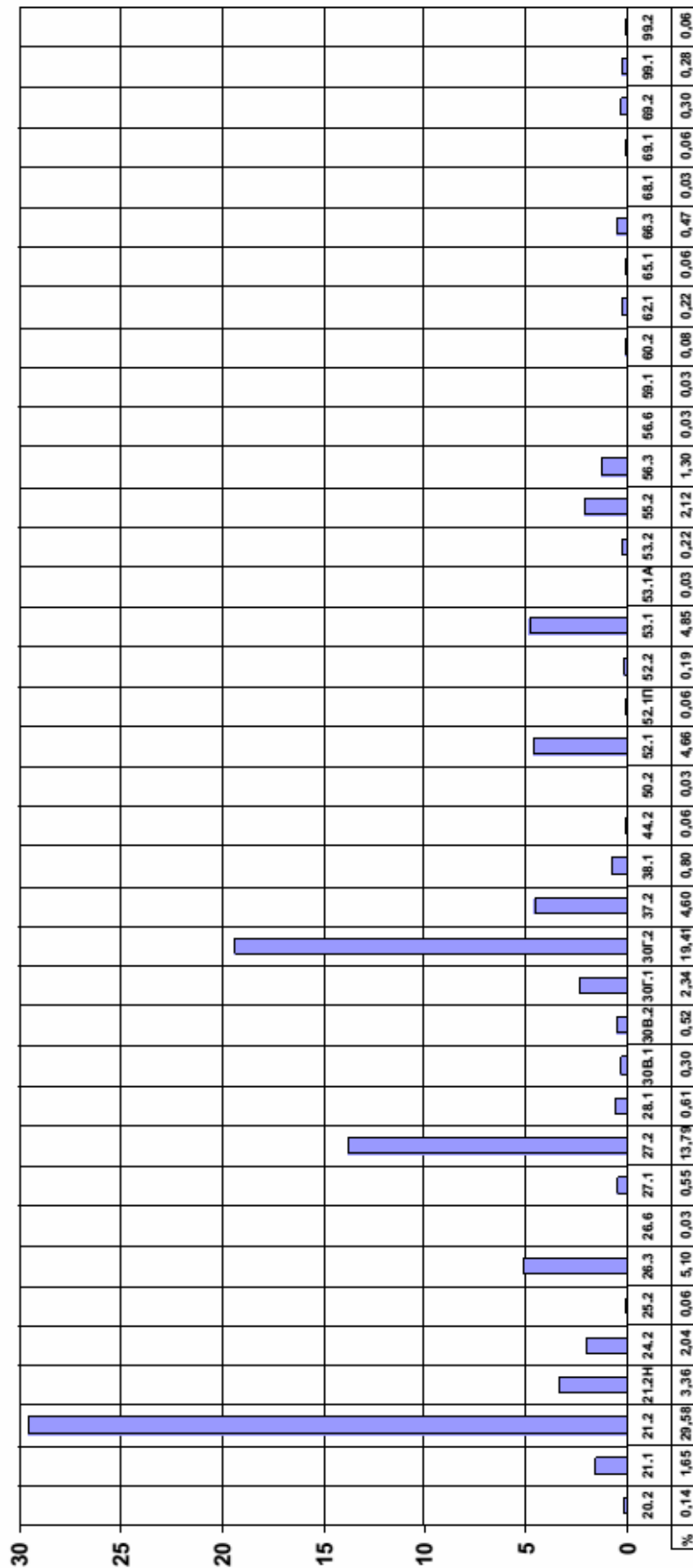


Рис. 2. Діаграма вилучення гостродфектних рейок по Південній залізниці

Як бачимо з даних табл. 2, оксиди мають більш позитивний електродний потенціал у порівнянні із залізом, через що утворюється гальванічна пара, корозія починає протікати за контактним типом, внаслідок якої залізо кородує з великою швидкістю, що перевищує звичайну корозію в кілька разів.

Розглянемо термодинамічний аспект даної проблеми. Для утворення тріщини необхідно затратити роботу на утворення двох нових поверхонь між зернами структурних елементів сталі. Ця робота визначається як поверхневий натяг на границі двох фаз. Роль вільної поверхневої енергії і поверхневого натягу у формуванні різних властивостей матеріалів виключно висока. Так, відповідно до теорії Гріфітса [12] реальна міцність  $p_0$  твердого пружно-крихкого тіла залежить від величини поверхневого натягу за формулою

$$p_0 \approx \left( \frac{\sigma E}{l} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

де  $E$  – модуль Юнга, МПа;  $l$  – довжина тріщини, м;  $\sigma$  – поверхнева енергія або поверхневий натяг, Дж/м<sup>2</sup>.

За визначенням питома вільна поверхнева енергія дорівнює роботі, яку необхідно витратити для утворення одиниці площі поверхні. При цьому робота витрачається на розрив зв'язків і виведення певного числа молекул на поверхню. Ця теорія пояснює сутність різних ефектів Ребіндера (зниження міцності) як зниження питомої вільної поверхневої енергії твердих тіл у результаті фізико-хімічного впливу середовища і внаслідок цього зменшення роботи утворення нових поверхонь. У тілах, здатних до пластичної плинності (метали, сплави), розвиток тріщини супроводжується значним пластичним деформуванням. У цьому випадку зв'язок міцності тіла з поверхневою енергією може бути описано

формулою, схожою з рівнянням Гріфітса (1), в якому величина  $\sigma$  містить, крім істинної поверхневої енергії, роботу пластичних деформацій на одиницю поверхні тріщини. Визначимо фізичний зміст цієї роботи.

Наявність однойменних зарядів на поверхні призводить до їх електростатичного відштовхування уздовж цієї поверхні. Ці сили спрямовані проти сил поверхневого натягу в тангенціальному напрямку і знижують його. У літературі щодо поверхневих явищ подібні сили називаються латеральними (бічними) [10]. З огляду на зв'язок поверхневого натягу  $\sigma_0$  з міцністю твердих тіл за теорією Гріфітса, можна дійти висновку, що поверхневий натяг твердих речовин змінюється подібно до рідких при зміні потенціалу. Це свідчить про значущість латеральних сил відштовхування  $\sigma_{LAT}$  і порівнянності величин цих сил з величинами поверхневого натягу, а отже, силами зв'язку між частинками в кристалічній ґратці, які зумовлюють  $\sigma_0$ . Таким чином, реальна міцність має бути пов'язана з величинами  $\sigma_0$  і  $\sigma_{LAT}$  співвідношенням

$$p_0 \approx \left( \frac{\sigma_0 - \sigma_{LAT}}{l} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

де  $\sigma_{LAT}$  – електроповерхнє латеральне відштовхування (сила, яка припадає на одиницю довжини поверхні), Н/м;  $l$  – довжина можливої тріщини (розмір зерна в мікроструктурі сталі), м.

Формула (2) дасть змогу більш ефективно управляти міцнісними характеристиками та іншими властивостями різних матеріалів, а також гетерогенними процесами шляхом впливу на електроповерхнє властивості систем. Існування латеральних сил та їх важлива роль у поверхневих явищах підтверджується численними експериментальними і теоретичними дослідженнями. Відповідно до рівняння

Ліпмана [12], поверхневий натяг  $\sigma$  електрода зменшується при збільшенні або зменшенні потенціалу від потенціалу нульового заряду за формулою

$$d\sigma = -qd\varphi, \quad (3)$$

де  $q$  – поверхневий заряд, Кл;  $\varphi$  – різниця потенціалів, В.

Взаємодії, пов'язані з електрокапілярним ефектом, названо електроповерхневим латеральним відштовхуванням [10]. Ці сили пов'язані з існуванням поверхневого  $\chi$ -потенціалу та електроповерхневого потенціалу  $\psi_{EP}^0$ , тобто зумовлені дією пов'язаних і вільних зарядів поверхні. За своєю природою вони можуть бути тільки відштовхувальними. Електроповерхнє латеральне відштовхування  $\sigma_{LAT}^{EP}$  на поверхні можна уподібнити електрокапілярному ефекту, що виникає при зміщенні електричного потенціалу ртуті від

потенціалу нульового заряду  $\Delta\varphi$ , що викликає зменшення поверхневого натягу  $d\sigma$  у рівнянні Ліпмана (3). Формула для електроповерхневого латерального відштовхування, виведена в роботі [10], має вигляд

$$\sigma_{LAT}^{EP} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0(\psi_{EP}^0)^2}{2\delta_0^2} \cdot \frac{S}{L}, \quad (4)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність;  $\varepsilon_0$  – електрична стала;  $\delta_0$  – відстань між поверхневими зарядами, м;  $S$  – площа поверхні частинки, м<sup>2</sup>;  $L$  – довжина частинки, м.

У такому вигляді величину електроповерхневого латерального відштовхування  $\sigma_{LAT}^{EP}$  легко визначити за величиною електроповерхневого потенціалу речовин  $\varphi_{EP}^0$  і розмірами частинки. Зробимо відповідні розрахунки для сполук з табл. 3.

Таблиця 3

Величини електроповерхневого латерального відштовхування хімічних елементів рейкової сталі поблизу тріщини

Сполука	Fe <sub>3</sub> C	--	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	VO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
$\Delta\psi_{EP}^0$ , В	1,66	--	1,125	0,33	-0,55	-1,43	2,35	1,38	-0,17	-0,12	0,03	0,14	-0,156
$\sigma_{LAT}^{EP}$ , мДж/м <sup>2</sup>	2033	--	597	64	267	2283	1198	593	17	11	0,7	15	19

З джерела [13] відомо, що величина поверхневого натягу твердих тіл змінюється в широких межах від 100 до 3000 мДж/м<sup>2</sup>. Розрахунок за формулою (4) дають дані такого ж порядку, що свідчить про правильність теоретичних уявлень про розвиток тріщин у мікроструктурі сталі. Відповідно, найбільше зниження міцності за формулою (2) відбуватиметься на границях неметалевих включень і цементиту, що пояснює створення умов для

утворення та розвитку тріщини під час динамічного навантаження на рейку.

**Висновки з досліджень і перспективи подальшого розвитку в даному напрямку.** Уточнена формула Гріфітса дозволяє дати пояснення появи мікротріщин між зернами фериту і цементиту, що може бути покладено в основу розвитку теорії пластичної плинності сплавів взагалі і рейкової сталі зокрема.



*Список використаних джерел*

1. Рельсовая сталь для высокоскоростных линий [Текст] // Железные дороги мира. – 2006. – № 11. – С. 71-77.
2. Popovic, Z. The Importance of Rail Inspections in the Urban Area -Aspect of Head Checking Rail Defects [Internet] / Z. Popovic, L. Lazarevic, L. Brajovic, M. Vilotijevic // International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities. – Procedia Engineering, 2015. – Vol. 117. – P. 596-608. Available from: doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.220
3. Peng, D. NDI of Rail Squats and Estimating Defect Size and Location Using Lock-In Thermography. ENG [Internet] / D. Peng, R. Jones // Scientific Research Publishing. – 2013. – Vol. 05. – № 1. – P. 29-38. Available from: <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2013.51005>
4. Троцан, А. И. Исследование причин образования поверхностных дефектов рельсов [Текст] / А.И. Троцан, В.В. Каверинский, А.О. Носоченко, И.М. Кошулэ // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – Маріуполь, 2012. – Вип. 25. – С. 106-114.
5. Asih, A.M.S. Modelling the Effect of Steady State Wheel Temperature on Rail Wear [Internet]/ A.M.S. Asih, K. Ding, A. Kapoor // Tribology Letters. – 2013. – Vol. 49. – Is. 1. – P. 239-249. Available from: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11249-012-0061-2>.
6. Recommended Maintenance Practices for Stray Current Corrosion on DC Electrified Systems / K. Zan, V. Mawley, M. Ramos, S. Singh // 2014 Joint Rail Conference [Internet]. ASME International; 2014, Apr 2. Available from: <http://dx.doi.org/10.1115/jrc2014-3712>.
7. Структура стали [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://svarchik.ru/struktura.htm>.
8. Звіт про науково-дослідну роботу «Розробка технологічних вказівок на використання старопридатних рейок довжиною 12,5 та 25 метрів в коліях КП «Харківський метрополітен»» [Текст] // В.Г. Вітольберг, О.М. Даренський, Д.О. Потапов [та ін.]. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – 62 с.
9. Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів на залізницях України. Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень рейок на залізницях України / ЦП-0284/0285 [Текст] : наказ № 050-Ц/од від 02.02.2013. – К.: Укрзалізниця, 2013. – 194 с.
10. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портланд-цемента, бетона и конструкций из них [Текст]: монография; в 3-х т. Т.1. Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Л.В.Трикоз [и др.]; под ред.А.Н. Плугина. – К.: Наук. думка, 2011. – 331 с.
11. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портланд-цемента, бетона и конструкций из них [Текст]: монография; в 3-х т. Т.3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин, [и др.]; под ред. А.Н.Плугина. – К.: Наук. думка, 2012. – 287 с.
12. Щукин, В. Д. Коллоидная химия [Текст] / В.Д. Щукин, А.В. Перцов, Б.А. Амелина. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 352 с.
13. Воюцкий, С. С. Курс коллоидной химии [Текст] / С.С. Воюцкий. – М.: Химия, 1976. – 511 с.

---

Трикоз Людмила Вікторівна, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net. Потапов Дмитро Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-59. E-mail: ppx\_xiit@kart.edu.ua.

---

Багіянець Ірина Вікторівна, інженер Українського державного університету залізничного транспорту.  
Тел. +38 (057) 730-19-49. E-mail: bagira54017@ukr.net.

Trykoz Liudmyla, doct. of techn. sciences, professor Department Building Materials, Constructions and Structures  
Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net.

Potapov Dmytro, PhD, Department Track and Track Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport.  
Tel. +38 (057) 730-10-59. E-mail: ppx\_xiit@kart.edu.ua.

Bagiyanc Irina, engineer of Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-19-49.  
E-mail: bagira54017@ukr.net.

Стаття прийнята 30.06.2016 р.