

УДК 621.774.35

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.281221.45.823

## ДЕГРАДАЦІЯ МЕЖ ВКЛЮЧЕННЯ – МАТРИЦЯ В АКТИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

ГУБЕНКО С. І.<sup>1,2</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
 ПАРУСОВ Е. В.<sup>3\*</sup>, *докт. техн. наук, с. н. с.*,  
 ЧУЙКО І. М.<sup>4</sup>, *к. т. н.*

<sup>1</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49107, Україна, тел. +38 (067) 630-01-65, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

<sup>3\*</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49107, Україна, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>4</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49107, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: [ferrosplav@ukr.net](mailto:ferrosplav@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

**Анотація.** *Мета роботи* – аналіз особливостей руйнування міжфазних меж включення – матриця за агресивних впливів і в процесі зносу через деградацію їх структури. *Методика.* Проводили випробування зразків сталей 08, R7, ШХ15 на малоциклову втому на повітрі і в корозійних середовищах (1–5 % водний розчин NaCl і 2–1 % водний розчин H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Застосовували метод випробувань схильності сталей до корозійного розтріскування на установці «ІМ-12». Випробування на втомну міцність проводили на машині типу «НУ». Зразки сталей 08кп, 08Ю, 08ГСЮТФ, ШХ15, R7, М74 піддавали витримці в атмосфері водню протягом 2 год., за 650 і 1 100 °С, тиск 5 і 10 МПа. Досліджено особливості зносу поверхні ковзання залізничних коліс (сталь R7), які працювали п'ять років під пасажирським потягом. *Методи досліджень:* металографічний («Neophot-21»), електронномікроскопічний («JSM-35»), петрографічний. *Результати.* Досліджено особливості руйнування міжфазних меж включення – матриця за різних агресивних впливів. Розглянуто роль меж включення – матриця в утворенні тріщин втомного, втомно-корозійного і водневого походження. *Наукова новизна.* Встановлено, що за впливу агресивних середовищ і циклічних напружень відбувається деградація структури міжфазних меж включення – матриця, що пов'язано не тільки з накопиченням міжфазних напружень, а й з полегшенням проникнення уздовж зазначених меж атомів поверхнево активної речовини з навколишнього середовища. В результаті відбувається втомно-корозійне руйнування меж включення – матриця, проявляється ефект адсорбційного зниження їх міцності. *Практична значимість.* Результати досліджень можуть бути корисні для розроблення прийомів цілеспрямованого впливу на неметалеві включення і межі включення – матриця за різних видів обробки сталей і експлуатації сталевих виробів.

**Ключові слова:** *сталь; неметалеві включення; міжфазні межі включення – матриця; напруження; дефекти; корозія; агресивне середовище; знос*

## DEGRADATION OF INCLUSION – MATRIX BOUNDARIES IN ACTIVE ENVIRONMENTS

GUBENKO S.I.<sup>1,2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
 PARUSOV E.V.<sup>3\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Senior Res.*,  
 CHUIKO I.M.<sup>4</sup>, *Ph. D.*

<sup>1</sup> Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Sq. Ac. Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (067) 630-01-65, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

<sup>2</sup> Department of Materials Science, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. + 38 (067) 630-01-65, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

<sup>3\*</sup> Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Sq. Ac. Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>4</sup> Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Sq. Ac. Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: [ferrosplav@ukr.net](mailto:ferrosplav@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

**Abstract. Purpose.** The aim of the work was to analyze the features of the destruction of the inclusion – matrix

interphase boundaries under aggressive influences and in the process of wear as a result of the degradation of their structure. **Methods.** The samples of steels 08, R7, ShKh15 were tested for low-cycle fatigue in air and in corrosive environments (1...5 % aqueous solution of NaCl and 2...1 % aqueous solution of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). A test method was used to test the tendency of steels to stress corrosion cracking on an IM-12 installation. Fatigue strength tests were carried out on an NU machine. Samples of steels 08kp, 08Yu, 08GSYuTF, ShKh15, R7, M74 were exposed to holding in an atmosphere of hydrogen for 2 h at of 650 and 1 100 °C, the pressure 5 and 10 MPa. The features of the wear of the rolling surface of railway wheels (steel R7), which have worked for 5 years under a passenger train, have been investigated. Research methods: metallographic ("Neophot-21"), electron microscopic ("JSM-35"), petrographic. **Results.** The features of the fracture of the interphase inclusion – matrix boundaries under various thermal-deformation and aggressive actions are investigated. The role of inclusion – matrix boundaries in the formation of cracks of fatigue, fatigue-corrosion and hydrogen origin is considered. **Scientific novelty.** It is shown that under the influence of aggressive media and cyclic stresses, the structure of the inclusion – matrix interphase boundaries degrades, which is associated not only with the accumulation of interfacial stresses, but also with the facilitation of the penetration of surfactant atoms from the environment along these boundaries. As a result, fatigue-corrosion destruction of the inclusion – matrix boundaries occurs, and the effect of an adsorptive decrease in their strength is manifested. **Practical significance.** The research results can be useful in the development of methods of targeted influence on non-metallic inclusions and inclusion – matrix boundaries in various types of steel processing and the operation of steel products.

**Keywords:** *steel; non-metallic inclusions; interphase inclusion-matrix boundaries; stresses; defects; corrosion; aggressive environment; wear*

**Вступ.** Відомо, що неметалеві включення в сталях являють собою центри зародження руйнування і сприяють зниженню механічних, технологічних і експлуатаційних властивостей, що пов'язано з концентрацією термічних і деформаційних напружень поблизу включень [1–5]. Міжфазні межі включення – матриця визначають дифузійну і механічну взаємодію між неметалевими включеннями і сталеву матрицю в процесі різних термомеханічних впливів [6–12].

Зазначені межі містять різного роду дефекти: структурні (міжфазні дислокації, сходинок, дефекти упаковки, внесені дислокації ґратки) і хімічні (сегрегації, стрибки концентрації елементів, граничні фази), які багато в чому визначають їх поведінку в різних умовах обробки сталей або експлуатації сталевих виробів [1; 6; 13–15]. Тріщиностійкість меж включення – матриця за різних видів термодформаційного і хімічного впливу визначається можливістю проходження релаксаційних процесів як у самих межах, так і в сталевій матриці поблизу включень [1–6; 16].

Термічні або деформаційні напруження, що виникають поблизу включень і вздовж меж включення – матриця, спричиняють руйнування останніх у результаті утворення

в'язких тріщин (порожнин) або крихких розшарувань.

**Мета роботи** – аналіз особливостей руйнування міжфазних меж включення – матриця за агресивних впливів і у процесі зносу через деградацію їх структури.

**Матеріали і методи досліджень.** Проводили випробування зразків сталей 08, R7, ШХ15 на малоциклову втому на повітрі і в корозійних середовищах (1...5 % водний розчин NaCl і 2...1 % водний розчин H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Застосовували метод випробувань схильності сталей до корозійного розтріскування на установці «ІМ-12». Випробування на втомну міцність проводили на машині типу «НУ» при базі  $N = 3 \cdot 10^6$  циклів навантаження [1]. Зразки сталей 08kp, 08Ю, 08ГСЮТФ, ШХ15, R7, M74 піддавали витримці в атмосфері технічного водню марки А протягом 2 год. за температур 650 і 1 100 °C, тиск газової фази 5 і 10 МПа [1].

Параметри дефектів визначали після вилежування зразків на повітрі протягом 200 год. із переглядом 100 полів зору під мікроскопом «Neophot-21» [1]. Досліджено особливості зносу поверхні ковзання залізничних коліс (сталь R7), які працювали близько п'яти років. Методи досліджень: металографічний («Neophot-21»), електронномікроскопічний («JSM-35»), петрографічний [1].

**Результати досліджень та їх обговорення.** У процесі експлуатації, коли сталеві вироби працюють в умовах динамічних, статичних, контактних і температурних навантажень, а також за дії агресивних середовищ, відбувається деградація структури меж включення – матриця. Це сприяє зародженню руйнування, якщо в зазначених межах утруднені релаксаційні процеси, які покликані знизити рівень міжфазних напружень.

Досліджуючи деталі машин після тривалої експлуатації, а також проводячи випробування зразків сталей 08 і R7 на опір втомі (міцність від втоми) на повітрі поблизу включень різних типів, виявили безліч втомних тріщин, у тому числі таких,

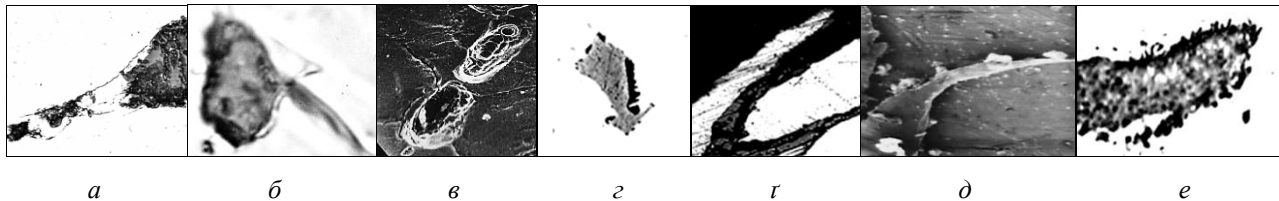


Рис. 1. Втомні тріщини (а, 08Ю), корозія (б, 08Ю, в – R7), водневі тріщини (г, М74) поблизу включень, а також частинки зносу (г, д) і корозія (е) на поверхні ковзання залізничного колеса; (а –  $\times 500$ , б, в –  $\times 600$ , г –  $\times 1000$ , г –  $\times 400$ , д –  $\times 200$ , е –  $\times 900$ )

Під час випробувань сталей 08, R7, ШХ15 на опір втомі (міцність від втоми) і малоциклової втоми встановлено, що включення різних типів являють собою центри зародження корозійних пошкоджень, а за ступенем їх шкідливого впливу проявляється тенденція до утворення регресного ряду: сульфіди (Fe, Mn) S, FeS–MnS  $\rightarrow$  корунд і шпінель  $Al_2O_3$ , MnO  $\cdot$   $Al_2O_3$ , MgO  $\cdot$   $Al_2O_3$ , (Mn, Mg)O  $\cdot$   $Cr_2O_3$   $\rightarrow$   $\rightarrow$  силікати  $SiO_2$ , MnO  $\cdot$   $SiO_2$ , FeO  $\cdot$   $SiO_2$   $\rightarrow$   $\rightarrow$  карбонітрид титану TiCN (табл. 1, дослідні плавки, що були програмно забруднені певними типами включень) [1; 17]. Дослідження показали, що практично завжди процес корозії починається на міжфазних межах включення – матриця (рис. 1, б, в), а потім поширюється в сталеву матрицю і у включення.

Відомо, що межі включення – матриця сталі являють собою своєрідну «поверхневу фазу», що характеризується такими

що беруть початок від меж включення – матриця (рис. 1, а). Процес зародження втомних тріщин залежить від ступеня пластичності включень і рівня когезивних міцності міжфазних меж включення – матриця, що визначають механізм утворення мікроруйнування поблизу включень.

Очевидно, роль зазначених меж особливо велика на стадії зародження втомних тріщин, а процес їх поширення в сталеву матрицю (швидкість росту тріщин) більшою мірою визначається структурою та властивостями останньої, а також умовами циклічних випробувань або роботи [1; 6].

параметрами як площа поверхні і поверхневий натяг. До цих меж може бути застосований метод поверхневих надлишків Гіббса, згідно з яким будь-який параметр або властивість системи у включенні і матриці має своє значення, а на межах включення–матриця існує його згущення або поверхневий надлишок [1; 6]. Останнє підтверджується у дослідженнях із обчислення значень різниць електродних потенціалів досліджуваних сталей для різних типів включень, які свідчать про значну величину градієнта потенціалу на міжфазних межах включення – матриця, що зумовлює появу великої щільності струму на цих межах [1, 6].

Міжфазні межі включення – матриця – це готові «канали» для проникнення атомів поверхнево активної речовини з навколишнього середовища, що зумовлено дефектною структурою цих меж і наявністю міжфазних напружень [1; 6]. Дифузії поверхнево активних елементів уздовж цих

меж сприяють міжфазні дислокації, які мають електричний заряд і взаємодіють між собою. Це створює різні за величиною і знаком електричні поля і сприяє їх взаємодії з іонами і атомами з активного середовища. Таким чином, завдяки вказаним межам адсорбція – це внутрішньо електростимульований процес.

Розглядаючи контактну взаємодію неметалевих включень і сталеві матриці в момент розвитку адсорбційних і корозійних процесів, слід враховувати, що відповідно до моделі конфігураційної локалізації валентних електронів, запропонованої в праці [18], між включенням і матрицею через міжфазну межу відбувається обмін електронами, оскільки включення являє собою донора електронів, а сталева матриця – акцептором електронів. На межі включення – матриця зосереджені атоми включення і матриці з найбільш порушеними електронними конфігураціями і зниженою статистичною вагою атомних стабільних конфігурацій.

Міжфазні дефекти (дислокації, дефекти упаковки – розщеплені дислокації), присутні в структурі межі включення –

матриця, розсіюють електрони, які рухаються через межу від включення до сталеві матриці, за рахунок пружних і електростатичних спотворень, і це впливає на електронну зонну структуру межі включення – матриця, створюючи локальні порушення розподілу зарядів і викликаючи неоднорідності в розподілі електронної щільності [19].

Таким чином, у міжфазній межі утворюються угруповання дефектів, що створюють різні за знаком і величиною електричні поля, і це сприяє перерозподілу самих дефектів, а також прискоренню дифузії атомів поверхнево активних елементів із навколишнього середовища. Очевидна також провідна роль міжфазних меж включення – матриця в підвищенні мікрохімічної гетерогенності сталей. Проникання корозійного середовища в межу включення–матриця сприяє утворенню продуктів корозії, обсяг яких, як правило, перевищує обсяг цих меж, що викликає додаткові напруження через розклинювальну дію продуктів корозії, і сприяє розвитку втомних тріщин.

Таблиця 1

Малоциклова довговічність (N), коефіцієнт впливу середовища ( $\beta_c$ ), межа втоми ( $\sigma_{-1}$ ) і коефіцієнт циклічної міцності ( $\beta$ ) сталей 08 / R7 / ШХ15 в корозійних середовищах 1 (5 % водний розчин NaCl) і 2 (1 % водний розчин H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) залежно від типу неметалевих включень

Середовище	Тип включення	$N \cdot 10^6$	$\beta_c$	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\beta$
1	(Fe, Mn)S, FeS–MnS	0,5 / 0,6 / 0,7	1,9 / 2,0 / 2,0	165 / 292 / –	0,77 / 0,79 / –
	MnO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (Mn, Mg)O·Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,1 / 1,2 / 1,3	1,4 / 1,5 / 1,46	156 / 295 / –	0,90 / 0,91 / –
	SiO <sub>2</sub> , MnO·SiO <sub>2</sub> , FeO·SiO <sub>2</sub>	1,4 / 1,4 / 1,4	1,5 / 1,43 / 1,4	176 / 334 / –	0,94 / 0,94 / –
	TiCN	1,7 / 1,6 / 1,7	1,3 / 1,38 / 1,35	203 / 356 / –	0,97 / 0,97 / –
2	(Fe, Mn)S, FeS–MnS	0,4 / 0,5 / 0,6	2,3 / 2,4 / 2,33	131 / 237 / –	0,61 / 0,64 / –
	MnO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (Mn, Mg)O·Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7 / 0,8 / 1,2	1,75 / 1,78 / 1,58	135 / 275 / –	0,78 / 0,8 / –
	SiO <sub>2</sub> , MnO·SiO <sub>2</sub> , FeO·SiO <sub>2</sub>	1,1 / 1,2 / 1,3	1,61 / 1,67 / 1,62	161 / 312 / –	0,86 / 0,88 / –
	TiCN	1,5 / 1,4 / 1,5	1,52 / 1,57 / 1,53	0,90 / 345 / –	0,91 / 0,94 / –

Таблиця 2

Параметри мікророзривів уздовж меж включення – матриця в сталі М74 після відпау у водні

Параметри дефектів	$P_{H_2} = 5$ МПа		$P_{H_2} = 10$ МПа
	$t, ^\circ\text{C}$		
	650 $^\circ\text{C}$	1 100 $^\circ\text{C}$	1 100 $^\circ\text{C}$
$N_0 / d, \text{ мкм} / l, \text{ мкм}$	166,0 / 7,0 / 62,0	368,0 / 18,0 / 86,0	584,0 / 30,0 / 124,0

Під час досліджень схильності неметалевих включень до утворення водневих тріщин в сталях 08кп, 08Ю, 08ГСЮТФ, ШХ15, Р7, М74, Р6М5 виявлено, що їх зародження відбувається на міжфазних межах включення – матриця і тільки поблизу сульфідних включень (рис. 1, з). Загальна кількість дефектів ( $N_d$ ), середній розмір розшарувань ( $d$ ) і середня довжина розшарування вздовж усієї поверхні включення – матриця ( $l$ ) зростає з підвищенням температури відпалу і тиску водню ( $P_{H_2}$ ) (табл. 2).

Аналіз причин і механізмів зародження водневих тріщин поблизу різних типів включень показав, що вони виникають тільки у випадках сульфідів і це пов'язано зі знаком термічних напружень [1]. Для появи мікророзривів водневого походження необхідна наявність не просто концентрації напружень, а поява напружень, що є розтяжними.

За інших рівних умов і відсутності будь-яких вихідних напружень, знак термічних напружень, що виникають поблизу включень, визначається різницею коефіцієнтів термічного розтягування (стиснення) включення  $\alpha_b$  і сталеві матриці  $\alpha_m$ , тобто  $(\alpha_m - \alpha_b)$ . Підрахунок величини термічних напружень дозволяє стверджувати, що для багатьох оксидів ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $FeO \cdot MnO$ ,  $TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $MnO \cdot SiO_2$ ,  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  та ін.) вираз  $(\alpha_m - \alpha_b)$  становить позитивну величину. У цьому випадку усадка включення менша усадки навколишньої сталеві матриці і включення піддається дії стиснених напружень. Що стосується включень сульфідів, для них вираз  $(\alpha_m - \alpha_b)$  постає негативною величиною. Це свідчить про наявність у матриці напружень, що є розтяжними, і саме це постає необхідною умовою утворення водневих мікророзривів.

Розтяжні напруження викликають висхідну дифузію водню, а рекомбінація його атомів (молізація  $2H \rightarrow H_2$ ) створює додаткові напруження, що викликають локальні розриви. Поява цих дефектів на межах включення – матриця свідчить, що вони постають активними колекторами для

водню, а рівень проникності міжфазних меж для водню залежить від ступеня їх когерентності, типу, дислокаційної структури [1; 6].

Комплексний підхід до механізму зношування різних виробів і деталей машин включає детальний аналіз причин і механізму утворення частинок зносу. Різноманіття умов роботи пар тертя дозволяє стверджувати, що загальним підходом може бути уявлення про втомну природу руйнування поверхневих шарів [20]. Для розуміння ролі неметалевих включень в утворенні частинок зносу слід брати до уваги загальну картину цього процесу з урахуванням впливу фазових і структурних змін, що відбуваються поблизу поверхні тертя в процесі експлуатації, які були вивчені на прикладі залізничних коліс [1; 17].

Втомні процеси пов'язані з виникненням поблизу поверхні ковзання зони пластичної деформації і ділянок «білого шару», а також із наявністю поблизу поверхні ковзання неметалевих включень. Тобто утворення частинок зносу має різні причини, а кінцева видима їх форма залежить від умов утворення. Відомо, що наявність частинок другої фази істотно підвищує швидкість утворення мікротріщин і їх об'єднання, що збільшує інтенсивність зносу (втомного і під час тертя) [21]. Автори пов'язують це з гальмівним впливом частинок на рухомі дислокації і вважають, що вплив включень на формування частинок зносу – один із найважливіших механізмів формування дефектів під час зносу. Глибина формування дефектів при цьому визначається глибиною перебування частинок неметалевих включень від зовнішньої поверхні.

Аналіз мікроструктури колісної сталі поблизу поверхні ковзання показав, що неметалеві включення сприяють неоднорідному розвитку деформації, появі турбулентної течії та утворенню зон із підвищеним ступенем деформації щодо середнього її значення в різних ділянках по ширині обода [1]. Неметалева включення поблизу поверхні ковзання колеса перебуває в складному напруженому стані, який

визначається системою контактних, динамічних і циклічних напружень. На нього діють нормальні стискні напруження від контактної тиску системи колесо – рейка, поздовжні зсувні напруження, що виникають у сталевій матриці за її деформації, а також напруження тертя на межах включення – матриця.

Гradient температур поблизу поверхні ковзання, що виникає в процесі експлуатації колеса, викликає неоднорідний розподіл деформацій у сталевій матриці, а також сил, що діють на включення. В результаті включення виявляються оточеними просторово неоднорідним полем внутрішніх напружень, що мають свої далекодієні поля. Таким чином, поблизу кожного включення формується певна схема напруженого стану, в якій співвідношення між величинами напружень постійно змінюється у процесі експлуатації колеса і в цих умовах сталеві матриця деформується в контакт з включенням.

В умовах високих тисків і температур, що циклічно змінюються, взаємодія контактуючих поверхонь включення і сталеві матриці відбувається шляхом установа механічного контакту і розвитку дифузійних процесів уздовж міжфазних меж включення – матриця сталі. Контактне тертя підсилює неоднорідність деформації матриці колісної сталі поблизу включень, оскільки в кожній точці поверхні контакту порушуються елементарні дотичні сили тертя, що викликає появу додаткових дотичних напружень на міжфазній межі включення – матриця, спрямованих протилежно напрямку ковзання матриці щодо включення.

Волокна сталеві матриці огинають включення, яке служить гальмом для рухомих волокон, вигинаються і нерідко закручуються в петлі або спіралі, при цьому відбувається розшарування вздовж міжфазних меж включення – матриця (рис. 1, *г*), де концентруються стискні і зсувні напруження. Поблизу неметалевих включень частинки зносу мають вигляд петель, спіралей, аналогічних стружкам від різання (рис. 1, *д*). За даними праці [20], такі

частинки зносу передують пошкодженню і виявляються, головним чином, на поверхні ковзання перед локальним руйнуванням.

З огляду на вплив зовнішнього середовища на утворення частинок зносу на поверхні ковзання залізничних коліс слід мати на увазі, що наявність міжфазних меж включення – матриця з їх дефектною структурою і міжфазними напруженнями, а також утворення в них розшарувань сприяє прояві ефекту адсорбційного зниження міцності зазначеної поверхні ковзання (рис. 1, *е*), який енергетично характеризується зниженням роботи утворення нових поверхонь твердого тіла у процесі деформації і руйнування за впливу утворення на них адсорбційного шару [22]. Мабуть, для міжфазних меж включення – матриця особливо актуальне силове трактування ефекту адсорбційного зниження міцності, пов'язане з виникненням розклинювальних зусиль у цих межах, що сприяють проникненню адсорбційного шару в глиб від поверхні тертя (поверхні ковзання) [21], що, в свою чергу, сприяє відшаруванню включень від сталеві матриці і формуванню частинок зносу.

Розглядаючи деградацію міжфазних меж включення – матриця, яка відбувається за впливу активних середовищ і тертя, слід враховувати особливості атомно-електронної та дефектної структури, динаміки ґратки і термодинамічних параметрів, а також мезо- і мікроструктури поверхні і поверхневого шару деталей машин і механізмів, що відрізняються від таких в об'ємі матеріалу [23].

**Висновки.** Вплив неметалевих включень на зародження і розвиток руйнування сталей пов'язаний не тільки із самими частинками включень як концентраторами напружень у сталеві матриці, а і з активною роллю міжфазних меж включення – матриця. За впливу агресивних середовищ і циклічних напружень відбувається деградація структури міжфазних меж включення – матриця, що пов'язано не тільки з накопиченням міжфазних напружень, а і з полегшенням проникнення уздовж

значених меж атомів поверхнево активної речовини з навколишнього середовища. В результаті відбувається втомно-корозійне руйнування значених меж, проявляється ефект адсорбційного зниження їх міцності.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.
2. Губенко С. И. Неметаллические включения и прочность сталей. Физические основы прочности сталей: монография. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium Academic Publishing, 2015. 476 с.
3. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium Academic Publishing, 2016. 549 с.
4. Губенко Светлана. Физическая природа пластичности и упрочнения металлов при деформации. Germany – Mauritius, Beau Bassin : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. 341 с.
5. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений. Днепропетровск : НМетАУ, ИЦ Системные технологии, 2014. 301 с.
6. Губенко С. И. Межфазные границы включение – матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение – матрица и свойства сталей. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2017. 506 с.
7. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпозитные включения в сталях. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2019. 330 с.
8. Губенко С. И., Беспалько В. Н., Жиленкова Е. В. Влияние температуры и степени деформации на характер изменения эвтектических боридов в высокохромистой стали с бором. *Теория и практика металлургии*. 2006. № 4–5. С. 158–160.
9. Губенко С. И. Природа всплесков микронеоднородной деформации в стали с неметаллическими включениями. *Физико-химическая механика материалов*. 1999. № 2. С. 53–59.
10. Губенко С. И. Коллективные дислокационные эффекты, или фазовые переходы в границах неметаллическое включение – матрица стали. *Физика металлов и металловедение*. 1990. Т. 6. С. 184–188.
11. Губенко С. И. Локальные пики параметров и процессов на границах неметаллическое включение – матрица стали. *Сталь*. 1999. № 8. С. 64–67.
12. Губенко С. И. Влияние межфазных границ «неметаллическое включение – матрица» на когезионную прочность стали. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. № 1. С. 11–17.
13. Губенко С. И. К вопросу о строении межфазных границ неметаллическое включение – матрица в стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1994. № 6. С. 105–112.
14. Губенко С. И., Иськов М. В. Структура и сопротивление разрушению межфазных границ неметаллическое включение – матрица стали. *Теория и практика металлургии*. 2004. № 5. С. 30–38.
15. Губенко С. И. Влияние проскальзывания вдоль границ неметаллическое включение – матрица на распределение локальной микронеоднородной деформации в армко-железе и стали. *Физика металлов и металловедение*. 1996. Т. 82, вып. 3. С. 167–175.
16. Gubenko S. Role of Inclusion – Matrix Steel Interphase Boundaries in the Development of Relaxation Processes near Nonmetallic Inclusions. *Metal Science and Heat Treatment*. 2020. Vol. 62, № 5. Pp. 299–305.
17. Gubenko S. I. Influence of Nonmetallic Inclusions and Corrosion Products on the Wear Resistance of Railroad Wheels. *Steel in Translation*. 2019. Vol. 49, № 6. Pp. 427–431.
18. Самсонов Г. В., Прядко И. Ф., Прядко Л. Ф. Конфигурационная модель вещества. Киев : Наукова думка, 1971. 230 с.
19. Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. Москва : Издательство иностранной литературы, 1962. 584 с.
20. Марченко Е. А. О природе износа поверхностей металлов при трении. Москва : Наука, 1979. 118 с.
21. Suh N. P. The Delamination Theory of Wear. *Wear*. 1973. Vol. 23, № 1. Pp. 111–124.
22. Лихтман В. И., Щукин Е. Д., Ребиндер П. А. Физико-химическая механика материалов. Москва : Изд-во АН СССР, 1962. 303 с.
23. Иванов И. А., Губенко С. И., Кононов Д. П. Поверхность деталей машин и механизмов. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 156 с.

### REFERENCES

1. Gubenko S.I. and Oshkadev S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 2016, 528 p. (in Russian).
2. Gubenko S.I. *Nemetallicheskie vkluchenija i prochnost stali* [Non-metallic inclusions and strength of steel]. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium Academic Publishing, 2015, 476 p. (in Russian).
3. Gubenko S.I. *Nemetallicheskiye vklyucheniya i plastichnost' staley* [Non-metallic inclusions and ductility of steels. The physical basis of the ductility of steels]. Saarbrücken : LAP LAMBERT, Palmarium Academic Publishing, 2016, 549 p. (in Russian).

4. Gubenko Svetlana. *Fizicheskaya priroda plastichnosti i uprochneniya metallov pri deformatsii* [Physical nature of plasticity and strengthening of metals upon deformation]. Germany – Mauritius, Beau Bassin, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020, 341 p. (in Russian).
5. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskih vklyucheniy* [Physics of steel fracture near non-metallic inclusions]. Dnipropetrovsk: NMetAU, Information Technology Systems Technologies, 2014, 301 p. (in Russian).
6. Gubenko S.I. *Mezhfaznie granitsi vkluchenie – matritsa i svoisrva stalej* [Interphase boundaries inclusion – matrix and properties of steels]. Germany – Mauritius, Palmarium academic publishing, 2017, 506 p. (in Russian).
7. Gubenko S. *Geterofaznyke mikrokompozitnyye vklyucheniya v stalyakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium Academic Publishing, 2019, 330 p. (in Russian).
8. Gubenko S.I., Bepalko V.N. and Zhilenkova E.V. *Vliyaniye temperatury i stepeni deformatsii na kharakter izmeneniya evtekticheskikh boridov v vysokokhromistoy stali s borom* [Influence of temperature and degree of deformation on the nature of changes in eutectic borides in high-chromium steel with boron]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2006, no. 4–5, pp. 158–160. (in Russian).
9. Gubenko S.I. *Priroda vspleskov mikroneodnorodnoy deformatsii v stali s nemetallicheskim vklyucheniyami* [The nature of bursts of micro-inhomogeneous deformation in steel with non-metallic inclusions]. *Fiziko-himicheskaya mehanika materialov* [Physical and Chemical Mechanics of Materials]. 1999, no 2, pp. 53–59. (in Russian).
10. Gubenko S.I. *Kollektivnyye dislokatsionnyye efekty, ili fazovyye perekhody v granitsakh nemetallicheskiye vklyucheniy – matritsa stali* [Team dislocation effects or phase transformations in ‘nonmetallic inclusion – matrix’ boundaries in steel]. *Fizika Metallov i Metallovedenie* [Fizika metallov i metallovedenie]. 1990, no. 6, pp. 184–188. (in Russian).
11. Gubenko S.I. *Lokal'nyye piki parametrov i protsessov na granitsakh nemetallicheskiye vklyucheniy – matritsa stali* [Local peaks of parameters and processes at the non-metallic inclusion – matrix boundaries of steel]. *Stal'* [Steel]. 1999, no. 8, pp. 64–67. (in Russian).
12. Gubenko S.I. *Vliyaniye mezhfaznykh granits “nemetallicheskiye vklyucheniy – matritsa” na kogeziyuyuyu prochnost' stali* [Influence of interphase boundaries “non-metallic inclusion – matrix” on the cohesive strength of steel]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2006, no 1, pp. 11–17. (in Russian).
13. Gubenko S.I. *K voprosu o stroyenii mezhfaznykh granits nemetallicheskiye vklyucheniy – matritsa v stali* [To the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion – matrix in steel]. *Izvestiya AN SSSR. Metally* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1994, no. 6, pp. 105–112. (in Russian).
14. Gubenko S.I. and Iskov M.V. *K voprosu o stroyenii mezhfaznykh granits nemetallicheskiye vklyucheniy – matritsa v stali* [On the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion – matrix in steel]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2004, no. 5, pp. 30–38. (in Russian).
15. Gubenko S.I. *Vliyaniye proskal'zyvaniya vdol' granits nemetallicheskiye vklyucheniy – matritsa na raspredeleniye lokal'noy mikroneodnorodnoy deformatsii v armko-zheleze i stali* [Influence of slippage along the boundaries of a non-metallic inclusion – matrix on the distribution of local micro-inhomogeneous deformation in armco iron and steel]. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metal Science]. 1996, vol. 82, no. 3, pp. 167–175. (in Russian).
16. Gubenko S. *Role of Inclusion – Matrix Steel Interphase Boundaries in the Development of Relaxation Processes near Nonmetallic Inclusions*. *Metal Science and Heat Treatment*. 2020, vol. 62, no. 5, pp. 299–305.
17. Gubenko S.I. *Influence of Nonmetallic Inclusions and Corrosion Products on the Wear Resistance of Railroad Wheels*. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, no. 6, pp. 427–431.
18. Samsonov G.V., Pryadko I.F. and Pryadko L.F. *Konfiguratsionnaya model' veshchestva* [Configuration model of matter]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1971, 230 p. (in Russian).
19. Van Buren. *Defekty v kristallakh* [Defects in crystals]. Moscow : Publishing House of Foreign Literature Publ., 1962, 584 p. (in Russian).
20. Marchenko Yev.A. *O pripode iznosa poverhnostej metallov pri rtenii* [On the nature of the wear of metal surfaces in friction]. Moscow : Nauka Publ., 1979, 118 p. (in Russian).
21. Suh N.P. *The Delamination Theory of Wear*. *Wear*. 1973, vol. 23, no. 1, pp. 111–124.
22. Lihtman V.I., Zchukin E.D. and Pebinder P.A. *Phiziko-himicheskaja mehanika materialov* [Physico-chemical mechanics of materials]. Moscow : Academy of Science of the USSR Publ., 1962, 303 p. (in Russian).
23. Ivanov I.A., Gubenko S.I. and Kononov D.P. *Poverkhnost' detaley mashin i mekhanizmov* [Surface of machine parts and mechanisms]. Saint-Petersburg : Lan' Publ., 2021, 156 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 12.12.21.