

УДК 621.774.35

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.26.1071

## ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ ТРІЩИН У ГЕТЕРОФАЗНИХ ВКЛЮЧЕННЯХ ТИПУ «ЕВТЕКТИКА ВКЛЮЧЕННЯ – МАТРИЦЯ»

ГУБЕНКО С. І.<sup>1,2\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
ПАРУСОВ Е. В.<sup>3</sup>, *докт. техн. наук, с. н. с.*,  
ТЮТЕРЄВ І. А.<sup>4</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1\*</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 630-01-65, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

<sup>2\*</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 630-01-65, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

<sup>3</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, 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> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 474-33-55, e-mail: [tiutieriev.igor@pdaba.edu.ua](mailto:tiutieriev.igor@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0001-5472-0706

**Анотація.** *Мета роботи* – вивчення особливостей зародження тріщин у гетерофазних включеннях типу «евтектика включення–матриця» за деформації сталей. *Методика.* Дослідження проводили після деформації зразків зі сталей 08Ю, 12ГС, 08кп, 09Г2С, НБ-57, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 20...1 200 °С зі швидкістю переміщення захватів 1 680 мм/хв. Застосовано методи дослідження – петрографія, мікрорентгеноспектральний аналіз («Cameca MS-4, Nanolab-7»), оптична мікроскопія (Neophot-21). *Результати.* Встановлено, що різноманітність фаз, що становлять гетерофазні включення типу «евтектика включення–матриця», зумовлює їх різну поведінку за пластичної деформації. Показано, що зародження крихких чи в'язких мікротріщин відбувається уздовж внутрішніх міжфазних границь між металеву матрицею і другою неметалевою фазою евтектики. З'ясовано, що характер тріщин визначається рівнем пластичності фаз включень і температурою деформації. Показано, що критичні ступені деформації зразків, за досягнення яких виникали помітні мікротріщини уздовж внутрішніх міжфазних границь, залежать від температури та природи фаз включень «евтектика включення – матриця». Встановлено, що показники критичних ступенів деформації визначають рівень когезивної міцності внутрішніх міжфазних границь в гетерофазних включеннях «евтектика включення – матриця». *Наукова новизна.* З'ясовано особливості зародження мікротріщин в гетерофазних включеннях типу «евтектика включення – матриця». Показано, що характер мікротріщин, які утворилися уздовж міжфазних границь, залежить від температури, рівня пластичності та умов поєднання крихких та пластичних фаз у включеннях типу «евтектика включення – матриця», а також від температури деформації. Критичні ступені деформації сталей, коли виникали мікротріщини уздовж внутрішніх міжфазних границь, визначають когезивну міцність цих границь і залежать від температури та природи фаз включень типу «евтектика включення – матриця». *Практична значимість.* Використання отриманих результатів дозволить розробити технології отримання сталей з регламентованими видами гетерофазних неметалевих включень, що допоможе суттєво підвищити їх технологічні та експлуатаційні характеристики, а також запобігти утворенню різноманітних дефектів під час обробки сталей тиском та експлуатації виробів.

**Ключові слова:** *сталь; гетерофазні неметалеві включення; тріщини; фази; міжфазні границі*

## PECULIARITIES OF CRACK FORMATION IN HETEROPHASE INCLUSIONS OF THE “EUTECTICS OF INCLUSION – MATRIX” TYPE

GUBENKO S.I.<sup>1,2\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
PARUSOV E.V.<sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,  
TIUTIERIEV I.A.<sup>4</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1\*</sup> Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (067) 630-01-65, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

<sup>2\*</sup> Department of Materials Science and Materials Processing, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 630-01-65, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

<sup>3</sup> Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., 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> Department of Materials Science and Materials Processing, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 474-33-55, e-mail: [tiutieriev.igor@pdaba.edu.ua](mailto:tiutieriev.igor@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0001-5472-0706

**Abstract. Purpose.** The goal of the work was to study the peculiarities of crack nucleation in heterophase inclusions of the “eutectic inclusion – matrix” type during steel deformation. **Methods.** The research was carried out after deformation of samples from steels 08Yu, 12GS, 08kp, 09G2S, NB-57, 08GSYUTF in the temperature range of 20...1 200 °C with the speed of movement of grips 1 680 mm/min. The research methods were used – petrography, micro-X-ray spectral analysis (Cameca MS-4, Nanolab-7), optical microscopy (Neophot-21). **Results.** It is established that the variety of phases that make up heterophase inclusions of the type “eutectic of inclusion – matrix” leads to their different behavior under conditions of plastic deformation. It is shown that the nucleation of brittle or viscous microcracks occurs along the internal interfacial boundaries between the metal matrix and the second phase of the eutectic. It is determined that the nature of cracks is determined by the level of plasticity of the inclusion phases and the deformation temperature. It is shown that the critical degrees of deformation of the samples, at the achievement of which there were noticeable microcracks along the internal interfacial boundaries, depend on the temperature and nature of the phases of inclusions “eutectic of inclusion – matrix”. It is established that the values of critical degrees of deformation determine the level of cohesive strength of the internal interfacial boundaries in heterophase inclusions “inclusion – matrix eutectic”. **Scientific novelty.** Peculiarities of microcracking nucleation in heterophase inclusions of the “inclusion – matrix eutectic” type have been established. It is shown that the nature of microcracks formed along the interfacial boundaries depends on the temperature, level of plasticity and conditions of combination of brittle and plastic phases in inclusions of the “eutectic of inclusion – matrix” type, as well as on the deformation temperature. It is shown that the critical degrees of deformation of steels, when microcracks occurred along the inner interfacial boundaries, determine the cohesive strength of these boundaries and depend on the temperature and nature of the phases of inclusions such as “inclusion – matrix eutectic”. **Practical significance.** The use of the results obtained will make it possible to develop technologies for producing steels with regulated types of heterophase nonmetallic inclusions, which will significantly increase their technological and operational characteristics, as well as prevent the formation of various kinds of defects during the processing of steels by pressure and the operation of products.

**Keywords:** steel; heterophase non-metallic inclusions; cracks; phases; interphase boundaries

**Вступ.** Відомо, що сталі містять різні типи гетерофазних включень різних типів, частка яких може становити до 10...30 % від загального вмісту неметалевих включень [1–7]. Ці включення містять фази, що мають різну пластичність [5; 8–10], вони мають неоднорідну будову міжфазних границь зі сталевою матрицею [11–13]. Усе це створює неоднорідності та концентрації напружень у структурі сталей і сприяє зародженню руйнування поблизу включень [14–20], а також суттєво знижує механічні, технологічні та експлуатаційні властивості сталей та виробів з них [21–25]. Вплив неметалевих включень, у тому числі гетерофазних, на руйнування сталей вивчався в працях [5; 6; 11; 20], де показано вплив типу включення на зазначені процеси.

**Мета роботи** – вивчення особливостей зародження тріщин у гетерофазних включеннях типу «евтектика включення – матриця» при деформації сталей.

**Матеріали та методики.** Дослідження проводили після деформації зразків зі сталей 08Ю, 12ГС, 08кп, 09Г2С, НБ-57, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 20...1 200 °C зі швидкістю переміщення захватів 1 680 мм/хв. [6; 20]. Застосовували методи дослідження: петрографія [5; 6; 20], мікрорентгеноспектральний аналіз («Cameca MS-4, Nanolab-7»), оптична мікроскопія (Neophot-21).

**Результати.** У гетерофазних включеннях типу «евтектика включення – матриця» однією з фаз є матриця сталі «м», іншою – фаза нв: сульфід, оксид, силікат, фосфід і т. п. [5; 7], тому розрізняють евтектики сульфід-матриця, силікат-матриця, оксид-матриця, фосфід-матриця. У таких включеннях присутня розгалужена мережа внутрішніх міжфазних границь нв ↔ м. У той же час для них характерна наявність міжфазних границь включення – матриця, які позначимо (нв + м) ↔ м; вони

включають мікроділянки, що чергуються, а саме  $нв \leftrightarrow м \text{ і } м \leftrightarrow м$ . Таким чином, ці міжфазні границі ( $нв + м$ )  $\leftrightarrow м$  не є суцільними (у традиційному розумінні міжфазної границі), оскільки наявність мікроділянок  $м \leftrightarrow м$ , де одна з фаз таких евтектик ( $м$ ) має безперервний зв'язок з основною структурою сталі без будь-яких міжфазних границь розділу (крім границь зерен), що дозволяє вважати їх уривчастими.

У цьому відмінність включень типу «евтектика включення – матриця» від гетерофазних включень інших типів [5–7; 11; 12], які мають чітко виражені суцільні міжфазні границі включення – матриця. По суті, включення, що вивчаються в цій роботі, – це мікрокомпозитні утворення, в яких сталева матриця армована фазою включення.

Неметалеві включення типу «евтектика включення – матриця» містять фази  $нв$ , які, у разі їх непластичної поведінки під час деформації, можуть руйнуватися (рис. а),

або пластичні фази  $нв$ , що деформуються (рис. б), проте стислість деформації в такому композиті також може спричинити їх руйнування.

У включеннях зі структурою евтектичних колоній, що являють собою композитні формування різного виду, фази евтектики  $нв \text{ і } м$  розділені міжфазними границями  $нв \leftrightarrow м$ , які являють собою розгалужену мережу поверхневих дефектів і утворюють множинні вигини і повороти, а також складні стики із зовнішньою міжфазною границею ( $нв-м$ )  $\leftrightarrow м$ .

Різноманітність фаз  $нв$  у включеннях, що мають різну пластичність за різних температур, неминуче вносить свої особливості в процеси руйнування міжфазних границь  $нв \leftrightarrow м$ . Очевидно, механізм і кінетика руйнування границь  $нв \leftrightarrow м$  визначаються також їх когезивною міцністю, яка залежить від структури евтектик та умов сполучення кристалічних ґраток фаз  $нв \text{ і } м$  [11; 12].

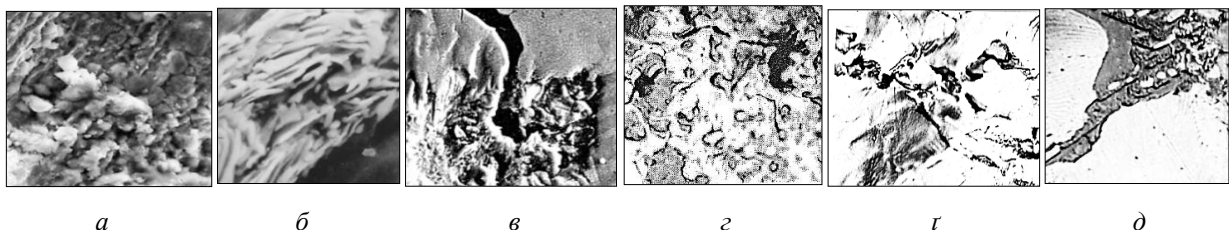


Рис. Тріщини в гетерофазних включеннях типу «евтектика включення–матриця» після деформації за температур 25 (а, д), 600 (б), 900 (в), 1100 (з), 1250 °С (г);  $\times 1500$

Для гетерофазних включень, що вивчаються, характерне утворення тріщин по міжфазних границях  $нв \leftrightarrow м$  (рис. в, з, д) за різних температур деформації, оскільки фази включень  $нв \text{ і } м$  виявляють різну пластичність, що сприяє концентрації напружень поблизу цих границь і в самих границях.

Очевидно, проявляється вплив граничних стиків на утворення тріщин уздовж внутрішніх міжфазних границь  $нв \leftrightarrow м$ . Концентрація міжфазних напружень у граничних стиках може спровокувати релаксацію напружень та утворення тріщин уздовж міжфазних границь  $нв \leftrightarrow м$  за будь-якої температури деформації. У той же час пластична поведінка сталєвої матриці за

різних температур, а також проковзування вздовж мікроділянок границь включення – матриця за високих температур деформації викликає часткову релаксацію напружень поблизу включення і вздовж границь  $нв \leftrightarrow м$  [6; 8]. Крім того, проковзування вздовж внутрішніх границь евтектик  $нв \leftrightarrow м$  за високотемпературної деформації також сприяє частковій релаксації напружень у граничних стиках.

Якщо фаза включення  $нв$  не деформована, в границях  $нв \leftrightarrow м$  виникають значні напруження, які є розклинювальними, що спричинює їх крихке руйнування. За наявності пластичних фаз  $нв$  зсувні напруження поблизу границі  $нв \leftrightarrow м$  сприяють відділенню фаз включення

в результаті виходу дислокацій з пластичних фаз нв і м на міжфазну границю, утворення дислокацій орієнтаційної невідповідності та зародження мікротріщин. Очевидно, величина критичного розміру мікротріщини залежить від когезивної міцності міжфазної границі нв↔м, а розкриття тріщини в цій міжфазній границі має супроводжуватися релаксаційними процесами, пов'язаними з трансформацією самої тріщини в процесі її розвитку в складній системі досліджуваних границь у включеннях евтектик.

За температур деформації 25...800 °С у включеннях евтектик сульфід – матриця, фази яких нв і м є пластичними, внаслідок неоднорідності деформації, пов'язаної з різною деформованістю цих фаз, а також із гальмуванням деформації міжфазними границями нв↔м, спостерігали появу крихких тріщин здебільшого вздовж границь нв↔м, а також у стиках цих границь із зовнішніми границями включення–матриця.

За підвищенням температури деформації до 850 °С і вище у зв'язку з розвитком проковзування вздовж границь нв↔м характер мікротріщин поступово змінюється: поряд із крихкими тріщинами з'являються в'язкі тріщини (мікропорожнини). У включеннях силікатних евтектик, які за температур 25...600 °С непластичні, спостерігали виникнення крихких тріщин на міжфазних границях нв↔м, а також у місцях безлічі стиків цих границь із зовнішніми границями включення–матриця.

За температур вище 600 °С силікатні фази евтектик пластичні, проте у зв'язку зі стисненням деформації вздовж границь нв↔м поблизу цих границь з'являються крихкі тріщини. В результаті збільшення

пластичності силікатних евтектик за підвищенням температури деформації до 900 °С, а також із розвитком проковзування вздовж границь нв↔м, яке починається за температури 950 °С [5; 6; 8], уздовж цих границь виникали крихкі та в'язкі тріщини, причому за підвищенням температури деформації до 1 200 °С поступово збільшувалася частка в'язких тріщин на досліджуваних границях.

Включення фосфідних евтектик містять фази нв, які за температур 25...1 200 °С пластично не деформуються і крихко руйнуються. Крихкі тріщини формуються на границях розділу фаз евтектики нв↔м і поширюються через ці границі. Крім того, за всіх температур деформації фосфідна фаза крихко руйнується.

Таким чином, характер руйнування міжфазних границь нв↔м у гетерофазних включеннях типу «евтектика включення – матриця» залежить від ступеня пластичності фази нв включення, яка визначається температурою деформації, а також від ймовірності пластичної поведінки цих границь. Крім того, проявляється вплив високого ступеня дисперсності структури евтектичних колоній, численних вигинів границь нв↔м, а також стиків міжфазних границь включення – матриця (нв-в)↔м і внутрішніх границь включень нв↔м, що створюють складний напружений стан у цих ділянках, характер якого залежить від рівня пластичної поведінки всіх зазначених міжфазних границь.

У досліджуваних включеннях за різних температур спостерігали зародження як крихких тріщин уздовж міжфазних границь нв↔м, так і в'язких тріщин за пластичної поведінки фази нв, а також у разі реалізації проковзування вздовж границь, що вивчається за високих температур.

Таблиця

**Вплив температури на критичний ступінь деформації ( $\epsilon_{кр}$ , %), за досягнення якої руйнуються міжфазні границі у включеннях типу «евтектика включення – матриця»**

Включення, сталь	Температура деформації, °С					
	25	600	900	1 100	1 200	1 250
(Mn,Fe)S-м, 08ГСЮТФ	10,3	14,3	19,2	28,2	оплавлено	оплавлено
FeO·SiO <sub>2</sub> -м, 08кп	4,5	7,3	15,2	19,4	22,0	оплавлено
MnO-м, 08кп	5,7	9,9	17,8	22,3	24,0	25,1

Застосовуючи методики, викладені в працях [6; 20], визначали критичні ступені деформації зразків розтягуванням  $\epsilon_{кр}$ , за досягнення яких виникали помітні мікротріщини вздовж міжфазних границь нв $\leftrightarrow$ м. Аналіз результатів досліджень показав, що  $\epsilon_{кр}$  істотно залежить від температури деформації, що визначає рівень пластичності фази включення нв і границі нв $\leftrightarrow$ м, пов'язаний з можливістю проковзування (табл.). Що температура деформації і рівень пластичності фази нв, то більша величина  $\epsilon_{кр}$  для усіх вивчених включень.

Тріщини в гетерофазних включеннях типу «евтектика включення – матриця» у ході розвитку пластичної деформації розвиваються за три стадії.

Перша стадія включає локалізацію деформації і зародження крихких або в'язких тріщин шляхом розшарування вздовж міжфазних границь нв $\leftrightarrow$ м, або поблизу цих границь і в численних їх згинах, також у численних стиках границь нв $\leftrightarrow$ м із зовнішніми границями включення–матриця.

На другій стадії відбувається зростання тріщин у межах включень.

На третій відбувається поширення мікроруйнувань у металеву матрицю (рис. в, г).

### Висновки

Результати досліджень показали, що різноманітність фаз, які становлять гетерофазні включення «евтектика включення – матриця», зумовлює їх різну поведінку за пластичної деформації. У той самий час, зародження крихких чи в'язких мікротріщин відбувається уздовж внутрішніх міжфазних границь між металевою матрицею і другою неметалевою фазою евтектики. Характер тріщин визначається рівнем пластичності фаз включень, і температурою деформації.

Критичні ступені деформації зразків, за досягнення яких виникали помітні мікротріщини уздовж внутрішніх міжфазних границь, залежать від температури та природи фаз включень «евтектика включення – матриця». Значення критичних ступенів деформації показують рівень когезивної міцності внутрішніх міжфазних границь у гетерофазних включеннях «евтектика включення – матриця».

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhe Rong, Hongbo Liu, Peng Zhang, Feng Wang, Geoff Wang, Baojun Zhao, Fengqiu Tang, Xiaodong Ma. The Formation Mechanisms and Evolution of Multi-Phase Inclusions in Ti-Ca Deoxidized Offshore Structural Steel. *Metals*. 2022. № 12. Pp. 511. URL: <https://www.mdpi.com/journal/metals>
2. Yan Wang, Li-guang Zhu, Jin-xia Huo. Relationship between crystallographic structure of complex inclusions MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MnS and improved toughness of heat-affected zone in shipbuilding steel. *Journal of Iron and Steel Research International* (IF1.263).
3. Miao Z., Long H., Cheng G., Qiu W., Zhong S., Yu D. Agglomeration and Clustering of CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO Leading to Super Large-Size Line-Shape Inclusions in High Carbon Chromium Bearing Steel. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022. Vol. 53, iss. 1, pp. 512–525.
4. Ahmad H., Zhao B., Lyu S., Huang Z. Formation of Complex Inclusions in Gear Steels for Modification of Manganese Sulphide. *Metals*. 2021. № 11. Pp. 2051.
5. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпонитные включения в сталях. Germany–Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2019. 330 с.
6. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.
7. Губенко С. И., Беспалько В. Н. Виды и структура гетерофазных включений в сталях. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 1 (84). С. 30–35.
8. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016. 549 с.
9. Gubenko S. I.. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50, № 10. Pp. 730–739.
10. Belchenko G. I., Gubenko S. I. Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgy*. 1983. № 4. Pp. 80–84.

11. 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.
12. Губенко С. И. Структура многофазных неметаллических включений в сталях. *Теория и практика металлургии*. 1999. № 1. С. 22–27.
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. Gubenko S. I. Team dislocation effects or phase transformations in “nonmetallic inclusion – matrix” boundaries in steel. *Physics of Metals and Metal Science*. 1990. Vol. 6. Pp. 184–188.
16. Губенко С. И. Локальные пики параметров и процессов на границах неметаллическое включение – матрица стали. *Сталь*. 1999. № 8. С. 64–67.
17. Gubenko S. I., Parusov E. V., Parusov O. V. The role of inclusion-matrix boundaries in steels fracture processes. *Chernye Metally*. 2021. № 6. Pp. 42–47.
18. Gubenko S. I. Relaxation Processes near Inclusions and at Inclusion/Matrix Interfaces. *Russian Metallurgy (Metally)*. Vol. 2021, № 5. Pp. 611–620.
19. Gubenko S. I. 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.
20. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений. Днепро : НМетАУ, ІІС Системные технологи, 2014. 301 с.
21. Pinchuk S. I., Gubenko S. I., Belaya E. V. The influence of non-metallic inclusions on the corrosion and strength properties of wheel steel. *Metallurgical & Mining Industry*. 2015. № 9. Pp. 89–95.
22. 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.
23. Губенко С. И., Иванов И. А., Кононов Д. П. Влияние качества стали на усталостную прочность цельнокатаных колес. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2018. Т. 84, № 3. С. 52–60.
24. Губенко С. И., Иванов И. А., Соболев А. А. Особенности износа поверхности катания цельнокатаных колес. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. СПб. : Изд-во ГУПС, 2013. С. 73–84.
25. Кушнер В. С., Кутько А. А., Воробьев А. А., Губенко С. И., Иванов И. А. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар. Омск : изд-во ОмSTU, 2015. 221 с.

## REFERENCES

1. Zhe Rong, Hongbo Liu , Peng Zhang , Feng Wang , Geoff Wang , Baojun Zhao, Fengqiu Tang and Xiaodong Ma. The Formation Mechanisms and Evolution of Multi-Phase Inclusions in Ti–Ca Deoxidized Offshore Structural Steel. *Metals*. 2022, no. 12, pp. 511. URL: <https://www.mdpi.com/journal/metals>
2. Yan Wang, Li-guang Zhu and Jin-xia Huo. Relationship between crystallographic structure of complex inclusions  $MgAl_2O_4/Ti_2O_3/MnS$  and improved toughness of heat-affected zone in shipbuilding steel. *Journal of Iron and Steel Research International (IF1.263)*.
3. Miao Z., Long H., Cheng G., Qiu W., Zhong S. and Yu D. Agglomeration and Clustering of  $CaO-Al_2O_3-MgO$  Leading to Super Large-Size Line-Shape Inclusions in High Carbon Chromium Bearing Steel. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022, vol. 53, iss. 1, pp. 512–525.
4. Ahmad H., Zhao B., Lyu S. and Huang Z. Formation of Complex Inclusions in Gear Steels for Modification of Manganese Sulphide. *Metals*. 2021, no. 11, pp. 2051.
5. Gubenko S. *Geterofaznyke mikrokompozitnyye vklyucheniya v stalyakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany–Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2019, 330 p. (in Russian).
6. Gubenko S.I. and Oshkadepov S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 2016, 528 p. (in Russian).
7. Gubenko S.I. and Bepalko V.N. *Vidy i struktura geterofaznykh vklyucheniy v stalyakh* [Types and structure of heterophase inclusions in steels]. *Metal Science and Heat Treatment of Metals*. 2019, no. 1 (84), pp. 30–35. (in Russian).
8. 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).
9. Gubenko S.I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020, vol. 50, no. 10, pp. 730–739.
10. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling. *Izvestiya AN SSSR. Metally*. 1983, no. 4, pp. 80–84.

11. Gubenko S.I. *Mezhfaznyye granitsy vklyucheniye-matritsa v stalyakh. Mezhfaznyye granitsy nemetallicheskoye vklyucheniye – matritsa i svoystva staley* [Inclusion – matrix interfaces in steels. Non-metallic inclusion – matrix interface and properties of steels]. Germany–Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2017, 506 p. (in Russian).
12. Gubenko S.I. *Struktura mnogofaznykh nemetallicheskiy vklyucheniy v stalyakh* [The structure of multiphase nonmetallic inclusions in steels]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy]. 1999, no. 1, pp. 22–27. (in Russian).
13. Gubenko S.I. *K voprosu o stroyenii mezhfaznykh granits nemetallicheskoye vklyucheniye – matritsa v stali* [To the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion-matrix in steel]. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgiya* [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 nemetallicheskoye vklyucheniye – 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. *Team dislocation effects or phase transformations in “nonmetallic inclusion – matrix” boundaries in steel*. *Physics of Metals and Metal Science*. 1990, vol. 6, pp. 184–188.
16. Gubenko S.I. *Lokal'nyye piki parametrov i protsessov na granitsakh nemetallicheskoye vklyucheniye – 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).
17. Gubenko S.I., Parusov E.V. and Parusov O.V. *The role of inclusion – matrix boundaries in steels fracture processes*. *Chernye Metally*. 2021, no. 6, pp. 42–47.
18. Gubenko S.I. *Relaxation Processes near Inclusions and at Inclusion/Matrix Interfaces*. *Russian Metallurgy (Metally)*. Vol. 2021, no. 5, pp. 611–620.
19. Gubenko S.I. *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.
20. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskiy vklyucheniy* [Physics of steel fracture near non-metallic inclusions]. Dnipro, NMetAU, Information Technology Systems Technologies, 2014, 301 p. (in Russian).
21. Pinchuk S.I., Gubenko S.I. and Belaya E.V. *The influence of non-metallic inclusions on the corrosion and strength properties of wheel steel*. *Metallurgical & Mining Industry*. 2015, no. 9, pp. 89–95.
22. 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.
23. Gubenko S.I., Ivanov I.A. and Kononov D.P. *Vliyaniye kachestva stali na ustalostnuyu prochnost' tsel'nokatanykh koles* [Influence of the quality of steel on the fatigue strength of solid-rolled wheels]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory Laboratory. Material Diagnostics]. 2018, vol. 84, no. 3, pp. 52–60. (in Russian).
24. Gubenko S.I., Ivanov I.A. and Sobolev A.A. *Osobennosti iznosa poverkhnosti kataniya tsel'nokatanykh koles* [Features of wear of the rolling surface of solid-rolled wheels]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Engineering]. St. Petersburg : Publishing House of State University of Railway Transport, 2013, pp. 73–84. (in Russian).
25. Kushner V.S., Kutko A.A., Vorobyov A.A., Gubenko S.I. and Ivanov I.A. *Vliyaniye struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh staley na iznashivaniye i rezhimy vosstanovleniya profilya kolesnykh par* [The influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on wear and restoration modes of the wheelset profile]. Omsk : OmSTU Publ., 2015, 221 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 24.03.2024.