

УДК 669.18

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.281221.22.811

ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ГЕТЕРОФАЗНИХ ВКЛЮЧЕНЬ ТИПУ «ТУГОПЛАВКА ФАЗА, ЩО ОТОЧЕНА ЛЕГКОПЛАВКОЮ ОБОЛОНКОЮ» ПРИ ДЕФОРМАЦІЇ СТАЛЕЙ

ГУБЕНКО С. І., *докт. техн. наук, проф.*

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49107, Україна; кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (067) 630-01-65, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

Анотація. *Мета.* Вивчення особливостей зародження тріщин в гетерофазних включеннях типу «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» при деформації сталей. *Методика.* Руйнування гетерофазних включень різних типів досліджували при деформації зразків зі сталей 08Т, 08Ю, 12ГС, 08кп, 09Г2С, НБ-57, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 20...1 200 °С. Зразки сталей піддавали розтягуванню, стиску та згину у вакуумі при температурах 20...1 200 °С на установках Инстрон-1195 и ИМАШ-5С зі спеціальними захватами, швидкість переміщення яких становила 20 мм/хв. Застосовували методи дослідження – петрографія та оптична мікроскопія (Неофот-21). *Результати.* Встановлено, що в процесі деформації сталей за різними температурними режимами мікротріщини, що зароджуються поблизу гетерофазних включень типу «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» можуть бути крихкими та в'язкими. При цьому велика роль рівня пластичності фаз, що становлять включення, яка залежить від температури деформації. Показано особливості зародження мікротріщин для різних поєднань пластичних та недеформованих фаз включень. Проаналізовано взаємодію гетерофазних включень та сталеві матриці при деформації. Встановлено, що зародження та поширення мікротріщин у межах включень типу «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою» відбувається як у фазах, так і вздовж внутрішніх міжфазних границь. *Наукова новизна.* Встановлено особливості зародження мікротріщин, пов'язаних з гетерофазними включеннями типу «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою», які мають різне поєднання крихких та пластичних фаз при деформації сталей. Показано, що критичні ступені деформації зразків, при досягненні яких виникали помітні мікротріщини вздовж внутрішніх міжфазних границь, залежать від температури та природи фаз включень. *Практична значимість.* Використання отриманих результатів дозволить розробити технології отримання сталей з регламентованими видами гетерофазних неметалевих включень, що дозволить суттєво підвищити їх технологічні та експлуатаційні характеристики, а також запобігти утворенню різноманітних дефектів при обробці сталей тиском та експлуатації виробів.

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

THE PECULIARITIES OF THE FRACTURE OF HETEROPHASE INCLUSIONS OF THE TYPE "HIGH- MELTING PHASE SURROUNDED BY A LIGHT-MELTING SHELL" IN THE DEFORMATION OF STEELS

GUBENKO S.I., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

Iron and Steel Institute named Z.I. Nekrasov of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Acad. Starodubov's Sq., Dnipro, 49107, Ukraine; Department of Materials Science and Treatment of Metals, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (067) 630-01-65, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

Abstract. *Purpose.* The aim of the work was to study of the peculiarities of crack initiation in heterophase inclusions of the "high-melting phase surrounded by a low-melting shell" type during deformation of steels. *Methods.* The destruction of heterophase inclusions of various types was investigated during deformation of specimens from steels 08T, 08Yu, 12GS, 08kp, 09G2S, NB-57, 08GSYuTF in the temperature range 20...1 200 °C [1; 5]. Samples of steels were subjected to tension, compression and bending in vacuum at temperatures of 20...1 200 °C on Instron-1195 and IMASH-5C with special grippers, the movement speed of which was 20 mm / min. Methods of investigation – petrography and optical microscopy (Neophot-21) were used. *Results.* It was found that in the process of deformation of the steels in different temperature regimes, microcracks originating near heterophase inclusions of the "high-melting

phase surrounded by low-melting shell" type can be brittle and ductile. In this case, the role of the level of plasticity of the phases making up the inclusion, which depends on the deformation temperature, is important. The features of microcrack initiation are shown for different combinations of plastic and non-deformable phases of inclusions. The interaction of heterophase inclusions and a steel matrix during deformation is analyzed. It has been established that the nucleation and growth of microcracks within inclusions of the "high-melting phase surrounded by a low-melting shell" type occurs both in the phases and along the internal interphase boundaries. **Scientific novelty.** Specific features of the initiation of microcracks associated with heterophase inclusions of the "high-melting phase surrounded by a low-melting shell" type, which have a different combination of brittle and plastic phases during deformation of steels, have been established. It is shown that the critical degrees of deformation of the samples, upon reaching which noticeable microcracks appeared along the internal interphase boundaries, depend on the temperature and the nature of the phases of the inclusions. **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; non-metallic inclusions; cracks; phases; interphase boundaries

Вступ. Відомо, що неметалеві включення негативно впливають на технологічні, механічні та експлуатаційні властивості сталей [1–16]. Частинки включень є концентраторами напружень і деформацій в сталях, що сприяє утворенню та розвитку тріщин [1; 5; 17–19]. Вплив неметалевих включень (оксидів, сульфідів, силікатів, нітридів та ін.) на зазначені процеси вивчався в роботах [1–16; 20; 21]. У той самий час відомо, що частка гетерофазних включень в сталях може становити у середньому 10...30 % від загальної їх кількості залежно від технології виробництв. Їх прийнято розділяти за типами [22–27]. Вирішення проблеми гетерофазних включень потребує обов'язкового розвитку теоретичних основ їхнього впливу на процеси руйнування сталі.

Метою роботи є вивчення особливостей зародження тріщин в гетерофазних включеннях типу «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» при деформації сталей.

Матеріали та методики. Руйнування гетерофазних включень різних типів досліджували при деформації зразків зі сталей 08Т, 08Ю, 12ГС, 08кп, 09Г2С, НБ-57, 08ГСЮТФ розтягуванням, стиском, згином в інтервалі температур 20...1 200 °С у вакуумі на установках Інстрон-1195 та ІМАШ-5С зі спеціальними захватами, швидкість переміщення яких становила 20 мм/хв [1; 5]. Застосовували методи

дослідження – петрографія та оптична мікроскопія (Неофот-21).

Результати. Відомо, що механізми зародження тріщин в неметалевих включеннях носять дислокаційний характер, фактично всі відомі дислокаційні моделі зародження тріщин (Зінера-Стро, Коттрелла, Гілмана, Орована-Стро та інших) можуть бути застосовані для включень. Виникненню тріщин передують локальна пластична деформація, що призводить до концентрації напружень. Площиною сколу багатьох фаз гетерофазних включень є площина (100), що характеризується мінімальною поверхневою енергією. Мікротріщини сколу у фазах включень можуть виникати і на границях зерен та внутрішніх міжфазних границях. Поширення тріщин у включеннях проходить у дві стадії: докритичну та закритичну. Довжина рівноважної тріщини при розтягуванні та згинанні в тугоплавких фазах включень набагато менше, ніж у металах [28].

Оскільки фази в гетерофазних неметалевих включеннях мають різний рівень пластичності і міцності при будь-яких температурах деформації [25], в процесі навантаження на міжфазних границях неминуче виникають напруження, які можуть призвести до руйнування цих границь. Схильність окремих фаз включень до утворення мікроруйнувань така сама, як у відповідних однофазних неметалевих включеннях оксидів, сульфідів, силікатів, нітридів та ін. [1; 5], однак спільне

деформування фаз, що становлять одне включення, має вносити певні особливості в їх поведінку. Очевидно когезивна міцність внутрішніх міжфазних границь в неметалевих включеннях залежить від характеру сполучення решіток фаз, міцності та пластичних характеристик цих фаз, умов навантаження і т. ін. [22; 29; 31–32]. Необхідно пам'ятати, що внутрішні міжфазні границі у включеннях, як правило, послаблюють неметалеві включення і в першу чергу є місцями зародження тріщин усередині включень [33], які можуть бути крихкими або в'язкими залежно від ступеня пластичності фаз включення та умов навантаження.

У включеннях типу «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою», які складаються частіше з легкоплавкої фази-оболонки ф-о1 (сульфідної, силікатної), всередині якої знаходиться більш тугоплавка фаза включення – ф2 (недеформовані фази Al_2O_3 , $MnO \cdot Al_2O_3$, $TiCN$, Cr_2O_3 та ін, слабо пластичні фази FeO , $FeO \cdot TiO_2$, фази зі змінною пластичністю при різних температурах $MnO \cdot SiO_2$), як правило, обидві фази мають різко

різні міцнісні і пластичні властивості. Для гетерофазних включень цього типу характерно утворення тріщин по міжфазним границям ф-о1↔ф2, оскільки ці границі сприяють локалізації деформації у включенні незалежно від механізму її розвитку, гальмуючи рух дислокацій у пластичній фазі ф-о1 або в обох фазах ф-о1 та ф2 (якщо фаза ф2 також пластична). Зсувні напруження поблизу границі ф-о1↔ф2 сприяють розподілу фаз включення в результаті виходу дислокацій з пластичної фази ф-о1 на міжфазну границю, утворення дислокацій орієнтаційної невідповідності та зародження мікротріщин. Вочевидь, величина критичного розміру мікротріщини залежить від когезивної міцності межфазної границі ф-о1↔ф2 за кожної температури деформації. Розкриття тріщини в межфазній границі ф-о1↔ф2 має супроводжуватися релаксаційними процесами, пов'язаними з трансформацією самої тріщини в процесі її розвитку. У разі недеформованих фаз включення ф-о1 і ф2 на міжфазних границях ф-о1↔ф2 виникають значні напруження, що розклинюють, і відбувається їх руйнування.

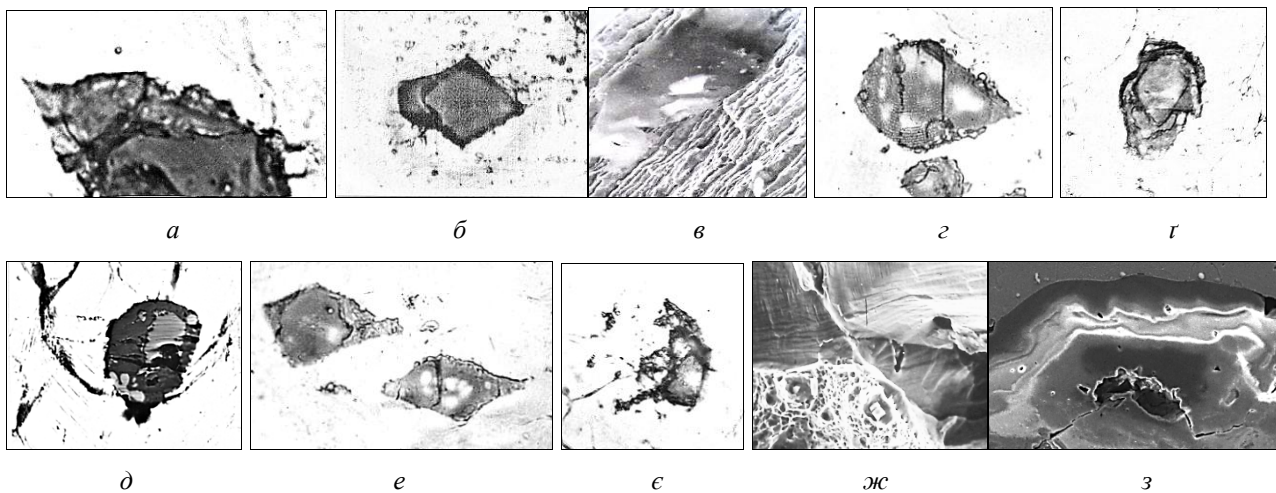


Рис. 1. Тріщини в гетерофазних включеннях «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» після деформації за 25 (г), 600 (а, г), 900 (б, д, е), 1 200 °С (в): а, в, е – $Al_2O_3 + (Fe, Mn) S$; б – $TiCN + (Fe, Mn) S$; г, і, е – $Al_2O_3 + MnO \cdot SiO_2$; д – $(Fe, Mn) S + MnO \cdot SiO_2$; ×900; в – ×2000 і включення в структурі ламів (ж, з); ×2000

За температур деформації 25...800 °С у включеннях з сульфідною оболонкою ф-о1 спостерігали утворення тендітних або в'язких тріщин вздовж міжфазних границь

ф-о1↔ф2 в залежності від рівня пластичності сульфідної фази (рис. 1, а). При температурах 850...1 100 °С, коли вздовж границь ф-о1↔ф2 відбувається

просковзування [1; 5], частіше виникали в'язкі порожнини в результаті розшарування міжфазних границь у включеннях (рис. 1, б). У разі оплавлення сульфідної фази $\phi\text{-}01$ при більш високих температурах відбувалося плавлення міжфазних границь $\phi\text{-}01\leftrightarrow\phi2$ (рис. 1, в). У включеннях із силікатною фазою $\phi\text{-}01$, яка при температурах нижче $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ не є пластичною, крихкі тріщини виникають на міжфазних границях з оксидною фазою $\phi2$ (рис. 1, з). При температурах $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вище силікатна фаза пластична, в ній видно сліди просковзування і мікротріщини, поява яких обумовлена стисненням деформації цієї фази, затиснутої між сталеву матрицею і фазою включення $\phi2$, що є недеформівною (рис. 1, і). Розшарування міжфазних границь $\phi\text{-}01\leftrightarrow\phi2$ відбувається при температурах пластичної поведінки силікатної фази-оболонки $\phi\text{-}01$, причому з підвищенням температури деформації зростає ймовірність в'язкого розшарування цих границь.

У випадках, коли включення складається із силікатної фази $\phi\text{-}01$ та сульфідної фази $\phi2$, поведінка цих фаз визначається температурою деформації. При температурах нижче $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ силікатна фаза-оболонка не пластична, що утруднює деформацію пластичної фази $\phi2$ і в обох фазах, також уздовж міжфазних границь $\phi\text{-}01\leftrightarrow\phi2$ виникають мікротріщини. При температурах пластичної поведінки обох фаз відбувається просковзування уздовж міжфазних границь $\phi\text{-}01\leftrightarrow\phi2$ (рис. 1, д) спочатку з боку сульфідної фази $\phi2$ (при досягненні температури $850\text{ }^{\circ}\text{C}$), а потім за участю обох фаз (при досягненні температури $950\text{ }^{\circ}\text{C}$). Цей процес сприяє підвищенню рівня пластичності міжфазних границь $\phi\text{-}01\leftrightarrow\phi2$, тому тріщини на цих границях виникають рідко, хоча можливий їх в'язкий розподіл. У включеннях обидві фази можуть бути не пластичні або мало пластичні. У цих випадках при всіх температурах деформації насамперед поблизу або уздовж міжфазних границь $\phi\text{-}01\leftrightarrow\phi2$ виникають крихкі тріщини, які нерідко поширюються на фази включення (рис. 1, е).

Таким чином, характер руйнування міжфазних границь $\phi\text{-}01\leftrightarrow\phi2$ в гетерофазних включеннях типу «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» залежить від ступеня пластичності фази-оболонки $\phi\text{-}01$ включення (або обох фаз), яка визначається температурою деформації, а також від ймовірності пластичної поведінки цих границь. Найчастіше в досліджуваних включеннях при різних температурах спостерігали зародження крихких тріщин уздовж міжфазних границь $\phi\text{-}01\leftrightarrow\phi2$, проте при пластичній поведінці однієї або обох фаз, а також у разі реалізації просковзування уздовж внутрішніх границь, що вивчаються, при високих температурах проходило їх в'язке розшарування. Очевидно, напруження, що виникають у границях $\phi\text{-}01\leftrightarrow\phi2$ сприяють розшаруванню цих границь з утворенням крихких і в'язких тріщин залежно від співвідношення швидкостей зміцнення та динамічного знеміцнення цих границь, а також рівня їхньої когезивної міцності.

За аналогією з границями включення-матриця [1; 22], визначали критичні ступені деформації $\epsilon_{\text{кр}}$ зразків розтягуванням, при досягненні яких виникали помітні мікротріщини уздовж міжфазних границь $\phi\text{-}01\leftrightarrow\phi2$. Аналіз даних, наведених в таблиці, показав, що величина $\epsilon_{\text{кр}}$ істотно залежить від температури деформації, що визначає рівень пластичності фаз включення (насамперед фази-оболонки $\phi\text{-}01$) і границь $\phi\text{-}01\leftrightarrow\phi2$ (пов'язаний з можливістю просковзування). Чим вище температура деформації, тим більше величина $\epsilon_{\text{кр}}$ для усіх вивчених включень цього типу.

Розвиток мікроруйнувань, що виникли в гетерофазних включеннях типу «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» під час пластичної деформації, здійснюється в три стадії. Перша стадія включає локалізацію деформації та зародження крихких або в'язких тріщин шляхом розшарування уздовж міжфазних границь $\phi\text{-}01\leftrightarrow\phi2$, або поблизу цих границь. На другій стадії відбувається зростання тріщин у локальних межах. На третій стадії відбувається поширення мікроруйнувань у

включеннях і далі у металеву матрицю (рис. 1, е).

Аналіз структури зламів різних сталей показав, що гетерофазні включення типу «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» з силікатною фазою-оболонкою ф-01 руйнувалося шляхом сколу без

утворення порожнини на границі зі сталеву матрицею (рис. 1, ж). Включення з сульфідною фазою-оболонкою ф-01 також руйнувалося без утворення порожнини на границі зі сталеву матрицею (рис. 1, з), проте сліди деформації свідчать про в'язке руйнування цієї фази.

Таблиця

Вплив температури на критичний ступінь деформації ($\epsilon_{кр}$, %), при досягненні якої руйнуються внутрішні міжфазні границі у включеннях

Включення, сталь	Температура деформації, °С				
	25	600	900	1 100	1 200
TiCN + (Fe, Mn) S, 08Т	8,4	13,7	24,5	32,2	оплав
Al ₂ O ₃ + MnO·SiO ₂ , 08Ю	4,2	8,2	17,6	22,5	27,4
(Fe, Mn) S + MnO·SiO ₂ , 08Ю	12,7	17,4	21,7	32,6	37,4
TiCN + TiO ₂ , 08Т	3,5	5,2	6,5	6,9	7,4

Висновки. Результати досліджень показали, що різноманітність фаз, що становлять гетерофазні включення типу «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою», призводить до їх різної поведінки в умовах навантаження. Рівень пластичності та міцності окремих фаз, характер будови та рівень когезивної міцності внутрішніх міжфазних границь у

включеннях є факторами, що забезпечують міцнісні властивості гетерофазних включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою». Критичні ступені деформації зразків, при досягненні яких виникали помітні мікротріщини вздовж внутрішніх міжфазних границь, залежать від температури та природи фаз включень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали. Киев: Наукова думка, 2016. 528 с.
2. André Luiz Vasconcellos daCosta e Silva. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications. *Journal of Materials Research and Technology*. № 8. 2019. Pp. 2408–2422.
3. Sága M., Blatnická M., Blatnický M., Dižo J., Gerlici J. Research of the Fatigue Life of Welded Joints of High Strength Steel S960 QL Created Using Laser and Electron Beams. *Materials*. Vol. 13 (11). Basel, Switzerland, 2020. Pp. 25–39. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13112539>.
4. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Деформация неметаллических включений при прокатке стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1983. № 4. С. 80–84.
5. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений. Днепропетровск: НМетАУ, ИЦ Системные технологии, 2014. 301 с.
6. Губенко С. И., Иванов И. А., Соболев А. А. Особенности износа поверхности катания цельнокатаных колес. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. Санкт-Петербург: изд-во ПГУПС, 2013. С. 73–84.
7. 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.
8. Губенко С. И. Влияние неметаллических включений и продуктов коррозии на износостойкость железнодорожных колес. *Сталь*. 2019. № 6. С. 51–55.
9. Губенко С. И., Пинчук С. И., Белая Е. В. Влияние структурного состояния колесной стали на развитие коррозии. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 2. С. 69–73.
10. Губенко С. И., Пинчук С. И., Белая Е. В. Исследование влияния неметаллических включений на коррозионное поведение колесной стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011. № 7. С. 70–74.
11. Губенко С. И. Некоторые структурные аспекты колесной стали, определяющие качество железнодорожных колес. Современные технологии производства транспортного металла. Нижний Тагил: изд-во НМТК, 2008. 394 с. С. 88–113.

12. 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.
13. Богданов А. Ф., Губенко С. И., Жуков Д. А., Иванов И. А. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства обода цельнокатаного колеса. Конструкционно-технологическое обеспечение надежности колес рельсовых экипажей. Санкт-Петербург: ПГУПС, 2009. С. 15–23.
14. Губенко С. И., Галкин А. М. К вопросу о природе краснеломкости стали. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1984. № 10. С. 11–15.
15. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей. Saarbrücken: LAP LAMBERT, Palmarium academic publishing, 2016. 549 с.
16. Губенко С. И., Парусов Э. В., Парусов О. В. Роль границ включение-матрица в процессах разрушения сталей. *Черные металлы*. 2021. № 6 (1074). С. 42–47.
17. Губенко С. И. Релаксационные процессы вблизи включений и на межфазных границах включение-матрица стали. *Металлы*. 2021. № 3. С. 49–60.
18. Губенко С. И. Роль межфазных границ включение-матрица стали в развитии релаксационных процессов вблизи неметаллических включений. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 5. С. 3–10.
19. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Микронеоднородная деформация стали, содержащей неметаллические включения. *Известия АН СССР. Металлы*. 1981. № 4. С. 94–97.
20. Gubenko S. I., Ivanov I. A., Kononov D. P. Features of Corrosive Destruction in Different Elements of Railway Wheels. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51, № 6. Pp. 400–415.
21. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпозитные включения в сталях. Germany-Mauritius, Beau Bassin: Palmarium academic publishing, 2019. 330 с.
22. 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.
23. Губенко С. И., Беспалько В. Н. Виды и структура гетерофазных включений в сталях. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 1 (84). С. 30–35.
24. Губенко С. И. Структура многофазных неметаллических включений в сталях. *Теория и практика металлургии*. 1999. № 1. С. 22–27.
25. Gubenko S. I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50, № 10. Pp. 730–739.
26. Губенко С. И. Поведение гетерофазных включений «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» при обработке сталей давлением. *Вісник ПДАБА*. 2020. № 3 (264–265). С. 40–45.
27. Губенко С. И. Рівень пластичності фаз в неметалевих включеннях, що мають складну структуру. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2021. № 3 (94). С. 19–25.
28. Андриевский Р. А., Ланин А. Г., Рымашевский Г. А. Прочность тугоплавких соединений. Москва: Металлургия, 1974. 232 с.
29. Губенко С. И. К вопросу о строении межфазных границ неметаллическое включение – матрица в стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1994. № 6. С. 105–112.
30. 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.
31. Губенко С. И. Коллективные дислокационные эффекты, или фазовые переходы в границах неметаллическое включение – матрица стали. *Физика металлов и металлостроение*. 1990. Т. 6. С. 184–188.
32. Губенко С. И. Локальные пики параметров и процессов на границах неметаллическое включение – матрица стали. *Сталь*. 1999. № 8. С. 64–67.
33. Губенко С. И. Влияние межфазных границ «неметаллическое включение – матрица» на когезионную прочность стали. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2006. № 1. С. 11–17.

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. André Luiz Vasconcellos daCosta e Silva. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications. *Journal of Materials Research and Technology*. No. 8, 2019, pp. 2408–2422.
3. Sága M., Blatnická M., Blatnický M., Dižo J. and Gerlici J. Research of the Fatigue Life of Welded Joints of High Strength Steel S960 QL Created Using Laser and Electron Beams. *Materials*. Basel, Switzerland, 2020, vol. 13 (11), pp. 25–39. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13112539>.
4. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Deformatsiya nemetallicheskih vklyucheniy pri prokatke stal*. [Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling]. *Izvestiya AN SSSR. Metally* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1983, no. 4, pp. 80–84 (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., 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]. Saint-Petersburg: Publishing House of State University of Railway Transport, 2013, pp. 73–84 (in Russian).
7. Kushner V.S., Kutko A.A., Vorobyov A.A., Gubenko S.I., 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).
8. Gubenko S.I. *Vliyaniye nemetallicheskih vklyucheniy i produktov korrozii na iznosostoykost' zheleznodorozhnykh koles* [Influence of nonmetallic inclusions and corrosion products on wear resistance of railway wheels]. *Stal'* [Steel]. 2019, no. 6, pp. 51–55 (in Russian).
9. Gubenko S.I., Pinchuk S.I. and Belaya E.V. *Vliyaniye strukturnogo sostoyaniya kolesnoy stali na razvitiye korrozii* [Influence of the structural state of wheel steel on the development of corrosion]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2009, no. 2, pp. 69–73 (in Russian).
10. Gubenko S.I., Pinchuk S.I. and Belaya E.V. *Issledovaniye vliyaniya nemetallicheskih vklyucheniy na korroziionnoye povedeniye kolesnoy stali* [Investigation of the influence of non-metallic inclusions on the corrosion behavior of wheel steel]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2011, no. 7, pp. 70–74 (in Russian).
11. Gubenko S.I. *Nekotoryye strukturnyye aspekty kolesnoy stali, opredelyayushchiye kachestvo zheleznodorozhnykh koles. Sovremennyye tekhnologii proizvodstva transportnogo metalla* [Some structural aspects of wheel steel that determine the quality of railway wheels. Modern technologies for the production of transport metal]. Nizhnyi Tahlil: NMTK Publ., 2008, 394 p., pp. 88–113 (in Russian).
12. Gubenko S.I., Ivanov I.A. and Kononov D.P. *Vliyaniye kachestva stali na ustalostmiyu prochnost' tsel'nokatanykh koles* [Influence of the quality of steel on the fatigue strength of solid-rolled wheels]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Diagnostics of Materials]. 2018, vol. 84, no. 3, pp. 52–60 (in Russian).
13. Bogdanov A.F., Gubenko S.I., Zhukov D.A. and Ivanov I.A. *Poverkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnyye svoystva oboda tsel'nokatanogo kolesa. Konstruktsionno-tekhnologicheskoye obespecheniye nadezhnosti koles rel'sovykh ekipazhey* [The surface layer and the operational properties of the rim of a seamless-rolled wheel. Structural and technological support for the reliability of the wheels of rail crews]. Saint-Petersburg: PGUPS Publ., 2009, pp. 15–23 (in Russian).
14. Gubenko S.I. and Galkin A.M. *K voprosu o prirode krasnolomkosti stali* [On the nature of steel brittleness]. *Metallovedenie I termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 1984, no. 10, pp. 11–15 (in Russian).
15. 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).
16. Gubenko S.I., Parusov E.V. and Parusov O.V. *Rol' granits vklyucheniyematrixa v protsessakh razrusheniya staley* [The role of inclusion-matrix boundaries in the processes of destruction of steels]. *Chernyye metally* [Ferrous Metals]. 2021, no. 6 (1074), pp. 42–47 (in Russian).
17. Gubenko S.I. *Relaksatsionnyye protsessy vblizi vklyucheniy i na mezhfaznykh granitsakh vklyucheniyematrixa stali* [Relaxation processes near inclusions and at the interphase boundaries between the inclusion-matrix of steel]. *Metally* [Metals]. 2021, no. 3, pp. 49–60 (in Russian).
18. Gubenko S.I. *Rol' mezhfaznykh granits vklyucheniyematrixa stali v razvitii relaksatsionnykh protsessov vblizi nemetallicheskih vklyucheniy* [The role of interphase boundaries inclusion-matrix of steel in the development of relaxation processes near non-metallic inclusions]. 2020, no. 5, pp. 3–10 (in Russian).
19. Belchenko G.I., Gubenko S.I. *Mikroneodnorodnaya deformatsiya stali, soderzhashchey nemetallicheskiye vklyucheniya* [Microinhomogeneous deformation of steel containing nonmetallic inclusions]. *Izvestiya AN SSSR. Metally* [Izvestia of the Academy of Sciences of the USSR. Metals]. 1981, no. 4, pp. 94–97 (in Russian).
20. Gubenko S.I., Ivanov I.A. and Kononov D.P. *Features of Corrosive Destruction in Different Elements of Railway Wheels. Steel in Translation*. 2021, vol. 51, no. 6, pp. 400–415.
21. Gubenko S. *Geterofaznye mikrokompozitnyye vklyucheniya v stalyakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2019, 330 p. (in Russian).
22. Gubenko S.I. *Mezhfaznyye granitsy vklyucheniyematrixa v stalyakh. Mezhfaznyye granitsy nemetallicheskiye vklyucheniyematrixa 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).

23. Gubenko S.I. and Bespalko V.N. *Vidy i struktura geterofaznykh vklyucheniy v stalyakh* [Types and structure of heterophase inclusions in steels]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2019, no. 1 (84), pp. 30–35 (in Russian).
24. Gubenko S.I. *Struktura mnogofaznykh nemetallicheskih 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).
25. Gubenko S. I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020, vol. 50, no. 10, pp. 730–739.
26. Gubenko S.I. *Povedeniye geterofaznykh vklyucheniy "tugoplavkaya faza, okruzhennaya legkoplavkoy obolochkoy" pri obrabotke staley davleniyem* [Behavior of heterophase inclusions "high-melting phase surrounded by low-melting shell" during pressure treatment of steels]. *Visnyk PDABA* [Bulletin of PSASEA]. 2020, no. 3 (264–265), pp. 40–45 (in Russian).
27. Gubenko S.I. *Riven' plastychnosti faz v nemetalevykh vklyuchennykh, shcho mayut' skladnu strukturu* [The level of plasticity of phases in non-metallic inclusions with a complex structure]. *Metallovedenie I termicheskaja obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2021, no. 3 (94), pp. 19–25 (in Russian).
28. Andrievsky R.A., Lanin A.G. and Rymashevsky G.A. *Prochnost' tugoplavkikh soyedineniy* [Strength of refractory compounds]. Moscow: Metallurgy Publ., 1974, 232 p. (in Russian).
29. Gubenko S.I. *K voprosu o stroyenii mezhfaznykh granits nemetallicheskiye vklyucheniye – 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).
30. Gubenko S.I. and Iskov M.V. *K voprosu o stroyenii mezhfaznykh granits nemetallicheskiye 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).
31. Gubenko S.I. *Kollektivnyye dislokatsionnyye efekty, ili fazovyye perekhody v granitsakh nemetallicheskiye vklyucheniye – matritsa stali* [Team dislocation effects or phase transformations in 'nonmetallic inclusion – matrix' boundaries in steel]. *Fizika Metallov i Metallovedenie* [Physics of Metals and Metal Science]. 1990, no. 6, pp. 184–188 (in Russian).
32. Gubenko S.I. *Lokal'nyye piki parametrov i protsessov na granitsakh nemetallicheskiye 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).
33. Gubenko S.I. *Vliyaniye mezhfaznykh granits "nemetallicheskiye vklyucheniye – matritsa" na kogeziyuyu prochnost' stali* [Influence of interphase boundaries "non-metallic inclusion – matrix" on the cohesive strength of steel]. *Metallovedenie I termicheskaja obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2006, no. 1, pp. 11–17 (in Russian).

Надійшла до редакції: 12.11.2021.