

12. Mirkin L.I. *Spravochnik po rentgenostrukturnomu analizu polikristallov* [Reference Book on X-Ray Diffraction Analysis of Polycrystals]. Moscow : GSFML, 1961, 862 p. (in Russian).

13. Hots V.I. *Betony i budivelni rozchyny* [Concretes and Mortars] : navch. posib. Kyiv : TOV UVPK ExOb, KNUBA, 2003, 472 p. (in Ukrainian).

14. Ratinov V.B. and Rozenberg T.I. *Dobavki v beton* [Concrete Admixtures] : monografiya. Moscow : Stroyizdat Publ., 1979, 256 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 23.08.20.

УДК 669.18

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.290920.28.666

## ОКИСЛЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ И СТАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

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

Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

**Аннотация. Постановка проблемы.** Необходимы исследования процессов окисления сталей при их взаимодействии с атмосферой в момент лазерной обработки. **Цель работы** – изучение процессов окисления сталей при лазерном воздействии. **Методика.** Материалами для исследований служили промышленные стали, содержащие различные неметаллические включения. Образцы различных сталей с предварительно полированной поверхностью подвергали лазерному нагреву на установках ГОС-30М и КВАНТ-16. Применяли методы исследования: петрографию и оптическую микроскопию (Неофот-21). **Результаты.** Установлено, что в момент лазерного воздействия вследствие взаимодействия поверхности стали с воздушной атмосферой происходит окисление стали. При этом велика роль неметаллических включений, в которых происходят фазовые превращения. Продукты окисления имеют различную морфологию и химический состав, зависящие от химического состава стали, а также от смачиваемости в системе сталь – жидкий оксид. Показаны особенности структуры оксидных пленок. Проанализировано взаимодействие стали с воздушной атмосферой в процессе лазерной обработки. **Научная новизна.** Установлены особенности окисления поверхности сталей в процессе взаимодействия с воздушной атмосферой в условиях лазерного воздействия. Определены особенности фазовых превращений в неметаллических включениях и локальных зонах стальной матрицы вблизи включений. Показано влияние включений на окислительные процессы. Установлены особенности морфологии и химического состава оксидных пленок в разных сталях. **Практическая значимость.** Использование полученных результатов поможет разработать технологии лазерной обработки сталей с регламентированными параметрами качества поверхности, что позволит предупредить образование различного рода дефектов. Предложен способ удаления оксидных пленок с поверхности изделий.

**Ключевые слова:** сталь; лазерная обработка; воздушная атмосфера; окисление; неметаллические включения

## ОКИСНЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ТА СТАЛЕВОЇ МАТРИЦІ ПІД ЧАС ЛАЗЕРНОЇ ДІЇ

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

Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

**Анотация. Постановка проблемы.** Необходимы дослідження процесів окиснення сталей за їх взаємодії з атмосферою в момент лазерної обробки. **Мета роботи** – вивчення процесів окиснення сталей за лазерного впливу. **Методика.** Матеріалами для досліджень були промислові сталі, які містять різні неметалеві включення. Зразки різних сталей з попередньо полірованою поверхнею піддавали лазерному нагріву на установках ГОС-30М і КВАНТ-16. Застосовували методи дослідження: петрографію й оптичну мікроскопію (Неофот-21). **Результати.** Встановлено, що в момент лазерного впливу внаслідок взаємодії поверхні з

повітряною атмосферою відбувається окиснення сталі. При цьому велика роль неметалевих включень, в яких відбуваються фазові перетворення. Продукти окиснення мають різні морфологію та хімічний склад, що залежать від хімічного складу сталі, а також від змочуваності в системі сталь – рідкий оксид. Показано особливості структури оксидних плівок. Проаналізовано взаємодію сталі з повітряною атмосферою в процесі лазерної обробки. **Наукова новизна.** Встановлено особливості окиснення поверхні сталей у процесі взаємодії з повітряною атмосферою в умовах лазерного впливу. Показано особливості фазових перетворень у неметалевих включеннях і локальних зонах сталеві матриці поблизу включень, вплив включень на окиснювальні процеси, а також особливості морфології та хімічного складу оксидних плівок у різних сталях. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволить розробити технології лазерної обробки сталей з регламентованими параметрами якості поверхні, що допоможе попередити утворення різного роду дефектів. Запропоновано спосіб видалення оксидних плівок із поверхні виробів.

**Ключові слова:** сталь; лазерна обробка; повітряна атмосфера; окиснення; неметалеві включення

## OXIDATION OF NON-METAL INCLUSIONS AND STEEL MATRIX WITH LASER ACTION

GUBENKO S.I., DR. SC. (TECH.), PROF.

Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Naharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

**Abstract. Purpose.** It is necessary to study the processes of oxidation of steels during their interaction with the atmosphere at the time of laser treatment. The aim of the work was to study the processes of steel oxidation under laser action. **Methods.** The materials for investigation were commercial steels containing different non-metallic inclusions. The specimens of different steels with preliminary polished surface were exposed to laser beaming on the installations GOS-30M and GUANTUM-16. Methods of investigation – petrography and optical microscopy (Neophot-21) – were used. **Results.** It was found that at the time of laser exposure due to the interaction of the steel surface with the air atmosphere, steel oxidizes. At the same time, the role of nonmetallic inclusions in which phase transformations occur is of great importance. The oxidation products have different morphology and chemical composition, depending on the chemical composition of steel, as well as on the wettability in the steel-liquid oxide system. The structural features of oxide films are shown. The interaction of steel with the air atmosphere during laser processing is analyzed. **Scientific novelty.** The features of the oxidation of the surface of steels in the process of interaction with the air atmosphere under conditions of laser exposure are established. The features of phase transformations in nonmetallic inclusions and local zones of a steel matrix near inclusions are shown. The effect of inclusions on oxidative processes is shown. The features of the morphology and chemical composition of oxide films in different steels are shown. **Practical significance.** The use of the results obtained will allow us to develop laser processing technologies for steels with regulated surface quality parameters, which will prevent the formation of various kinds of defects. A method for removing oxide films from the surface of products is proposed.

**Keywords:** steel; laser treatment; air atmosphere; oxidation; non-metallic inclusions

**Введение.** Лазерная обработка является одним из распространенных способов локального поверхностного упрочнения деталей машин и механизмов. Вследствие неравномерного износа поверхности катания железнодорожных колес [1–9] возможно лазерное упрочнение зоны выкружки. При лазерной обработке деталей машин и механизмов на воздухе, когда поверхности разогреваются до либо выше температуры плавления стали [10], возможно взаимодействие обрабатываемых поверхностей с окружающей атмосферой, что вызывает окислительные процессы [11].

Появление оксидов на поверхности приводит к концентрации напряжений и деформаций и может вызывать появление трещин в процессе эксплуатации [12–26].

**Цель работы** – изучение процессов окисления сталей при лазерном воздействии.

**Материалы и методики.** Для изучения взаимодействия с атмосферой при лазерной обработке образцы сталей R7, НБ-57, 08кп, 08Х, 08Т, ЭЗ, 08Ю, ШХ15, 60Г, 12Х25Н16Г7АР, 08Х18Н10Т подвергали лазерному облучению на установках ГОС-30М и КВАНТ-16. Параметры

лазерного воздействия приведены в работах [10; 11]. Металлографические исследования проводили при высоких температурах, а также с помощью микроскопа Неофот-21. Применяли петрографический метод идентификации включений, а также микрорентгеноспектральный анализ (MS-46 Cameca).

**Результаты.** Следует отметить, что к превращениям окислительного характера во включениях и в стальной матрице вблизи включений при лазерной обработке, связанных с взаимодействием облучаемой поверхности с окружающей атмосферой, следует отнести окисление включений и стальной матрицы вблизи включений, высокотемпературное разрушение и избирательное испарение включений, образование оксидных пленок на поверхности [27]. При лазерном воздействии в самих включениях структурные и фазовые превращения протекают с очень высокой скоростью, что обусловлено специфическими признаками этой обработки, а именно: большие энергии лазерного излучения, высокие температуры нагрева, большие скорости нагрева и охлаждения [10; 11].

Включения имеют большую поглощательную способность, чем стальная матрица [19; 11] и разогреваются сильнее, а после прекращения действия лазера в них сохраняется определенное количество тепла. Это способствует их взаимодействию с окружающей воздушной атмосферой. Поскольку скорость охлаждения довольно высока, в очень редких случаях на поверхности включений наблюдали тончайшие (толщиной 5...7 мкм) оксидные пленки (рис. 1 а), которые являются высшими оксидами по сравнению с основным включением.

Например, у включения MnO была пленка состава  $Mn_2O_3$ , у шпинелей  $Me_1O(Me_2)_2O_3$  могут окисляться низшие оксиды MeO и получаются твердые растворы типа  $(Me_1, Me_2)_2O_3$  (пленка  $(Fe, Al)_2O_3$  на включении  $FeO \cdot Al_2O_3$ ). На поверхности силикатных включений, также

принадлежащих к оксидной группе FeO –  $SiO_2$ , MnO –  $SiO_2$ ,  $2FeOSiO_2$ ,  $2MnO \cdot SiO_2$ , выявлены тонкие пленки высших оксидов, что свидетельствует об окислительных процессах, прошедших в низших оксидах, которые входят в их состав (FeO, MnO) (рис. 1 б).

Сульфиды, находящиеся вблизи поверхности образцов, также претерпевали изменения, связанные с их окислением (рис. 1 в).

При термической активации в условиях скоростного лазерного нагрева происходит активное взаимодействие атомов кислорода, находящихся в атмосфере, с элементами включения. Таким образом, в процессе лазерного воздействия происходила трансформация сульфидов, находящихся вблизи поверхности образцов, в окисульфидные включения. В некоторых включениях карбонитрида титана TiCN после лазерной обработки наблюдали локальные участки оксидов титана (рис. 1 г). Очевидно, окисление произошло в момент оплавления включений при взаимодействии с окружающей атмосферой в результате скоростного замещения атомов углерода и (или) азота атомами кислорода.

Взаимодействие включений с воздушной атмосферой может быть и чисто механическим. При плавлении сульфидов и силикатов в момент лазерного воздействия включения под действием ударной волны разбрызгиваются, растекаются по поверхности и захватывают воздушные пузырьки, которые при быстрой кристаллизации не успевают всплыть и остаются во включениях (рис. 1 д).

Взаимодействие включений с воздушной атмосферой происходит при высокотемпературном избирательном испарении атомов с поверхности включения и уходе их в окружающее пространство (рис. 1 е, ж). Разная упругость паров различных элементов, входящих в их состав, приводит к избирательному испарению. На поверхности включений появляются кратеры. Продукты разрушения содержат сильно нагретый пар и частицы конденсата.

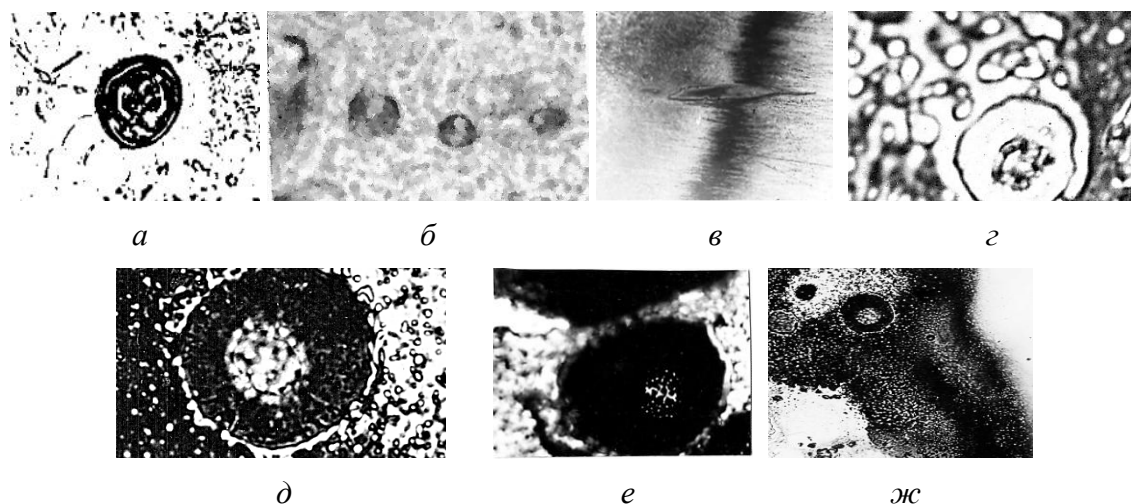


Рис. 1. Окисление (а–д), тепловое разрушение и высокотемпературное испарение (е, ж) включений в условиях лазерного воздействия; а–в –  $\times 500$ , г, д –  $\times 1\,000$ , е, ж –  $\times 500$

Вблизи включений возможно появление зон локального окисления стальной матрицы (рис. 2 а, б), что свидетельствует о скоростном проникании атомов кислорода из воздушной среды, активируемом не только высокой температурой нагрева, но и оплавлением стальной матрицы.

Поверхностное окисление сталей при лазерной обработке имеет большое значение, поскольку в процессе образования и роста оксидных пленок происходит изменение оптических свойств объекта облучения, приводящее к увеличению эффективной поглотительной способности и изменению температуры поверхности.

Структура оксидных пленок свидетельствует об их образовании, в основном, когда сталь находится в жидком состоянии. Толщина пленок составляла 10...30 мкм. Механизм окисления стали состоит в диффузии кислорода из газового потока к поверхности стали, адсорбции его на этой поверхности, диффузии в глубь стали и реакций с компонентами стали. Легирующие элементы и примеси в стали окисляются вместе с железом, что приводит к образованию многокомпонентных оксидов.

Особенностью окисления стали при лазерном воздействии является то, что оно сопровождается ударной волной и происходит за очень короткое время при значительной энергии импульса, вызывающей ионизацию воздуха. Эти

условия значительно ускоряют диффузионные процессы, облегчают взаимодействие ионов кислорода с компонентами стали. В зонах оплавления жидкая сталь взаимодействует с ионами кислорода и образуются жидкие оксиды, которые растекаются по поверхности образца и кристаллизуются с высокой скоростью (рис. 2 в). Иногда жидкий оксид не успевает растекаться и застывает в виде капель (рис. 2 г).

Морфология оксидных пленок зависит также от характера смачиваемости твердой стали жидким оксидом. Следует отметить, что возможно окисление поверхности и без оплавления стали. На рисунке 2 д видны два вида оксидной пленки, образовавшейся с оплавлением и без него, что можно объяснить неоднородностью температурного поля в зоне лазерного воздействия. Состав оксидных пленок зависит от химического состава сталей. Качественный анализ показал, что в них находятся окиселобразующие компоненты стали, прореагировавшие с ионами кислорода. В сталях Р6М5, 08ГСЮТФ, Э3, 08Х18Н10Н, 08кп, 08Х, 08Т, НБ-57, ШХ15 это соответственно Fe, Cr, W, V, Mo, Mn, Si; Fe, Mn, Si, V, Ti, Al; Fe, Si, Mn; Fe, Mn, Si, Cr, Ti; Fe, Mn, Si; Fe, Mn, Al, Si, Fe, Mn, Si, Cr, Al; Fe, Ti, Mn, Si, Al; Fe, Mn, Si; Fe, Cr, Mn, Si, Mg, Al.

О сложном составе оксидов свидетельствует и тот факт, что при

петрографическом анализе получены значения показателей светопреломления, не соответствующие значениям последних для оксидов определенного, стехиометрического состава [11]. Количественный спектральный анализ позволил определить состав оксидных пленок, в которых основная доля принадлежит железу и кислороду, а остальные элементы присутствуют в незначительных

количествах, однако достаточных для влияния на состав и структуру оксидов.

В большинстве случаев образовавшиеся оксиды представляют собой твердые растворы сложного состава, однородные или имеющие зоны ликвации элементов (рис. 2 *е, ж*). Однако во включениях иногда встречаются частицы второй фазы, отличающиеся по составу.

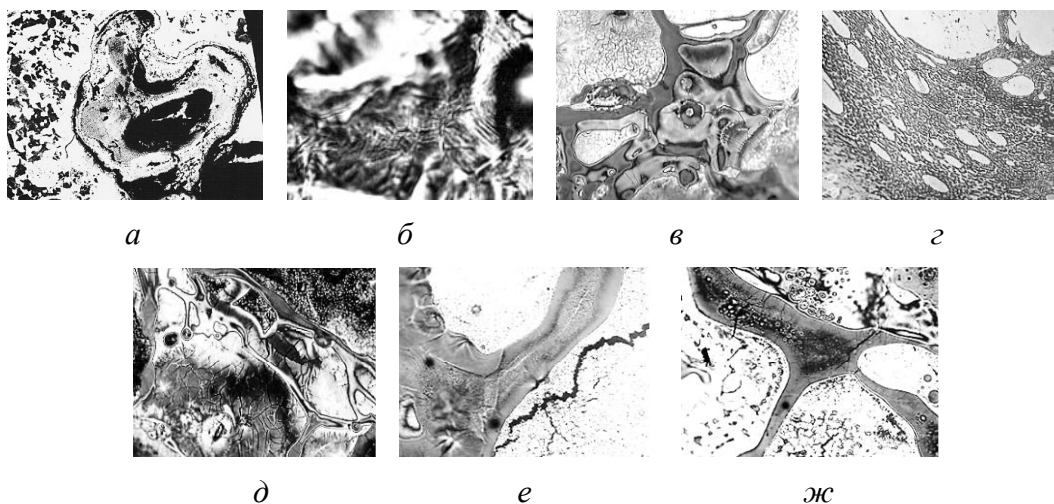


Рис. 2. Локальное окисление стальной матрицы вблизи включений (*а, б*) и оксидные пленки на поверхности образцов сталей 08X18H10T (*в, д*), ЭЗ (*г*) и P6M5 (*е, ж*); после лазерного воздействия; *а, б* –  $\times 700$ , *в–ж* –  $\times 500$

Для удаления окисных пленок необходимо травление. Оптимальным оказался следующий режим: 20 % раствор  $H_2SO_4$  с добавкой отходов коксохимического производства 40 г/л раствора, температура раствора 70...80 °С, время травления 10...20 с.

**Выводы.** Исследованы окислительные процессы, происходящие при лазерной обработке сталей. Показана роль неметаллических включений и локальных зон стальной матрицы в образовании оксидных пленок.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Воробьев А. А., Губенко С. И., Иванов И. А. и др. Ресурс и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог : монография. Москва : ИНФРА-М, 2011. 264 с.
2. Таран Ю. Н., Есаулов В. П., Губенко С. И. Повышение износостойкости железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. № 2. С. 42–44.
3. 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 : сб. науч. тр. Санкт-Петербург : ПГУПС, 2009. С. 15–23.
4. Sladkowski A., Gubenko S., Pogorelov D., Iwnicki S., Licciardello R. V. Rail vehicle dynamics and associated problems : monograph. Gliwice : Silesian University of Technology, 2005. 187 p.
5. Таран Ю. Н., Есаулов В. П., Губенко С. И. Структурные изменения в ободьях железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1989. № 9. С. 101–105.
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 сталеи на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар : монография. Омск : OmSTU, 2015. 221 с.
8. Губенко С. И. Некоторые структурные аспекты колесной стали, определяющие качество железнодорожных колес. Современные технологии производства транспортного металла. Нижний Тагил : НМТК, 2008. 394 с. С. 88–113.
9. Sladkovsky A., Yessaulov V., Shmurygin N., Taran Yu., Gubenko S. An Analysis of Stress and Strain in Freight Car Wheels. *Transactions on Modelling and Simulation*. 1997. № 16. Pp. 15–24.
10. Gubenko S. I. Melting And Crystallization of Non-metallic Inclusions And Steel Matrix Under Laser Treatment. *Physcal-Chemical Mechanics of Materials*. 2010. № 3. Pp.73–79.
11. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали : монография. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.
12. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Микронеоднородная деформация стали, содержащей неметаллические включения. *Известия АН СССР. Металлы*. 1981. № 4. С. 94–97.
13. Gubenko S., Proidak Yu., Kozlovsky A., Shramko A., Iskov M. Influence of Nonmetallic Inclusions on Microbreaks Formation in Wheel Steel and Railway Wheels. *Telematics, Logistics and Transport Safety (TLTS'08) : mater. of VIII scient. conf. (October 16–18)*. Poland : Katowice-Cieszyn, 2008.
14. Губенко С. И. Неметаллические включения и прочность сталеи : монография. Саарбрюкен : LAP LAMBERT – Palmarium Academic Publishing, 2015. 476 с.
15. Губенко С. И. Физика разрушения сталеи вблизи неметаллических включений. Днепропетровск : НметАУ, ИЦ Системные технологии, 2014. 301 с.
16. Губенко С. И. Межфазные границы включение – матрица в сталях : монография. Germany–Mauritius, Beau Bassin, Palmarium Academic Publishing, 2017. 506 с.
17. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталеи. Физические основы пластичности сталеи. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium Academic Publishing, 2016. 549 с.
18. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Деформация неметаллических включений при прокатке стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1983. № 4. С. 80–84.
19. Gubenko S. I., Pinchuk S. I., Belaya E. V. The influence of the structural state of wheel steel on the development of corrosion. *Metallurgical and Mining Industry*. 2009. № 2. Pp. 69–73.
20. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпозитные включения в сталях. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium Academic Publishing, 2019. 330 с.
21. Gubenko S. I. Features of wear of railway wheels tread. *MTM : Machines, Technologies, Materials*. 2019. Vol. XIII, iss. 7. Pp. 324–327.
22. Губенко С. И. Влияние неметаллических включений и продуктов коррозии на износостойкость железнодорожных колес. *Сталь*. 2019. № 6. С. 51–55.
23. Губенко С. И. Особенности износа поверхности катания железнодорожных колес. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 9* : матер. міжнар. наук. конф. (18–19.12. 2019 р.). Київ : КПІ ім. Сікорського, 2019. С. 83–86.
24. Губенко С. И., Беспалько В. Н. Механические свойства колесной стали в активных средах. *Perspectives of world science and education : the 7<sup>th</sup> Intern. scient. and pract. conf. (March 25–27, 2020)*. Osaka, Japan : CPN Publishing Group, 2020. 719 p. Pp. 265–273.
25. Губенко Светлана. Физическая природа пластичности и упрочнения металлов при деформации. Germany – Mauritius, Beau Bassin : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. 341 с.
26. Губенко С. И. Превращения в неметаллических включениях. *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід* : III міжнар. конф. (12–14.11.19 р.). Амстердам : Університет Амстердама, 2019.
27. Губенко С. И., Никульченко И. А. Особенности образования трещин вблизи неметаллических включений при разных режимах деформационной и предварительной лазерной обработок. *Advances of Science. procedings of the intern. scient. conf. (27.07.2019)*. Czech Republic, Karlovy Vary – Ukraine, Kyiv : Scleneny Mustek, 2019. Pp. 28–39.

## REFERENCES

1. Vorobiov A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A. and etc. *Resurs I remontoprigradnost kolesnih par podvixhnogo sostava zheleznih dorog* [Resource and maintainability of wheel sets of rolling stock of railways]. Moscow : INFRA-M, 2011, 264 p. (in Russian).
2. Taran Yu.N., Esaulov V.P. and Gubenko S.I. *Povishenie iznosostojkosti zheleznodorozhnikh koles s raznim profilem poverhnosti kataniy* [Increasing the wear resistance of railway wheels with a different tread profile]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2000, no. 2, pp. 42–44. (in Russian).
3. Bogdanov A.F., Gubenko S.I., Zhukov D.A. and Ivanov I.A. *Poverkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnyye svoystva oboda tsel'nokatanogo koleasa* [The surface layer and the operational properties of the rim of a seamless-rolled wheel].

*Konstrukcionno-tehnologicheskoe obespechenie nadezhnosti koles rel'sovyh `ekipazhej : sb. nauch.tr.* [Structural and technological support for the reliability of the wheels of rail crews : coll. scient. works]. Saint-Petersburg : PGUPS Publ., 2009, pp. 15–23. (in Russian).

4. Sladkowski A., Gubenko S., Pogorelov D., Iwnicki S. and Licciardello R.V. Rail vehicle dynamics and associated problems: monograph. Gliwice : Silesian University of Technology, 2005, 187 p.

5. Taran Yu.N., Esaulov V.P. and Gubenko S.I. *Strukturnie izmeneniya v obodiah zheleznodorozhnykh koles s raznim profitem poverhnosti kataniya* [Structural changes in the rims of railway wheels with a different tread d profile]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Universities. Ferrous Metallurgy]. 1989, no. 9, pp. 101–105. (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 putej soobshcheniya* [Proceedings of the Saint-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. 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).

8. Gubenko S.I. *Nekotoryye strukturnyye aspekty kolesnoy stali, opredelyayushchiye kachestvo zheleznodorozhnykh koles. Sovremennyye tehnologii proizvodstva transportnogo metalla* [Some structural aspects of wheel steel that determine the quality of railway wheels. Modern technologies for the production of transport metal]. Nizhny Tagil : NMTK Publ., 2008, 394 p, pp. 88–113. (in Russian).

9. Sladkovsky A., Yessaulov V., Shmurygin N., Taran Yu. and Gubenko S. An Analysis of Stress and Strain in Freight Car Wheels. Transactions on Modelling and Simulation. 1997, no. 16, pp. 15–24.

10. Gubenko S.I. Melting And Crystallization of Non-metallic Inclusions And Steel Matrix Under Laser Treatment. Phisycal-Chemical Mechanics of Materials. 2010, no. 3, pp. 73–79.

11. 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).

12. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Mikroneodnorodnaya deformatsiya stali, sodержashchey nemetallicheskiye vklucheniya* [Microinhomogeneous deformation of steel containing nonmetallic inclusions]. *Izvestiya AN SSSR. Metals* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1981, no. 4, pp. 94–97. (in Russian).

13. Gubenko S., Proidak Yu., Kozlovsky A., Shramko A. and Iskov M. Influence of Nonmetallic Inclusions on Microbreaks Formation in Wheel Steel and Railway Wheels. Telematics, Logistics and Transport Safety – TLTS'08 : mater. of the VIII scient. conf. (October 16–18 2008). Poland, Katowice – Cieszyn, 2008.

14. 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).

15. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskikh vklyucheniy* [Physics of steel fracture near non-metallic inclusions]. Dnipropetrovsk : NMetAU, Information Cenyer “System Technologies”, 2014, 301 p. (in Russian).

16. Gubenko S.I. *Mezhpfaznie granitsi vkluchenie-matritsa I svoisrva staley* [Interphase boundaries inclusion-matrix and properties of steels]. Germany – Mauritius : Palmarium Academic Publishing, 2017, 506 p. (in Russian).

17. 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).

18. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Deformatsiya nemetallicheskikh vklyucheniy pri prokatke stali* [Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling]. *Izvestiya vuzov. Mmetally* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1983, no. 4, pp. 80–84. (in Russian).

19. Gubenko S.I., Pinchuk S.I. and Belaya E.V. The influence of the structural state of wheel steel on the development of corrosion. Metallurgical and Mining Industry. 2009, no. 2, pp. 69–73. (in Russian).

20. Gubenko S. *Geterofaznyke mikrokompozitnyye vklyucheniya v stalyakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium Academic Publishing, 2019, 330 p. (in Russian).

21. Gubenko S.I. Features of wear of railway wheels tread. MTM : Machines, Technologies, Materials. 2019, vol. XIII, iss. 7, pp. 324–327.

22. Gubenko S.I. *Vliyaniye nemetallicheskikh 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).

23. Gubenko S.I. *Osobennosti iznosa poverkhnosti kataniya zheleznodorozhnykh koles* [Features of wear of the rolling surface of railway wheels]. *Materiali dlya roboti v ekstremal'nih umovah – 9 : mater. mizhnar. nauk. konf.* [Materials for Robots in Extreme Minds – 9 : mater. Intern. scient. conf.]. (18–19.12. 2019). Kyiv : KPI named after Sikorskyi, 2019, pp. 83–86. (in Russian).

24. Gubenko S.I. and Bespalko V.N. *Mekhanicheskiye svoystva kolesnoy stali v aktivnykh sredakh* [Mechanical properties of wheel steel in active media]. Perspectives of world science and education : the 7th Intern. scient. and pract. conf.]. March 25–27, Osaka, Japan : CPN Publishing Group, 2020, 719 p., pp. 265–273. (in Russian).

25. 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).

26. Gubenko S.I. *Prevrashcheniya v nemetallicheskih vklyucheniyyakh* [Transformations in nonmetallic inclusions]. *Innovacijni tehnologii v nauci ta osviti. Evropejs'kij dosvid : III mizhnar. konf.* [Innovation technologies in science and education. European Dosvid : III Intern. conf.]. 12–14.11.19. Amsterdam : University of Amsterdam, 2019. (in Russian).

27. Gubenko S.I., Nikulchenko I.A. *Osobennosti obrazovaniya treshchin vblizi nemetallicheskih vklyucheniy pri raznykh rezhimakh deformatsionnoy i predvaritel'noy lazernoy obrabotok* [Features of the formation of cracks near non-metallic inclusions in different modes of deformation and preliminary laser treatment]. *Advances of Science : Proceedings of the Intern. scient. conf. (27.07.2019)*. Czech Republic, Karlovy Vary – Ukraine, Kyiv Scieneny Mustek, 2019, pp. 28–39.

Поступила в редакцію: 15.08.2020.