

УДК 669.18

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.230321.7.729

## ДЕФЕКТИ ЗМІЦНЕНОГО ШАРУ ЗА ЛАЗЕРНОЇ ДІЇ

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

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства, 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

<sup>2</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>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: [termet@ukr.net](mailto:termet@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-9879-6179

**Анотація. Постановка проблеми.** Дослідження впливу неметалевих включень на утворення дефектів за лазерної обробки бачаться актуальними. Мета роботи – вивчення дефектів зміцненого шару сталей за лазерного впливу, пов'язаних із наявністю неметалевих включень. **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 такі методи: петрографія, мікрорентгеноспектральний (MS-46 Cameca) і оптична мікроскопія (Неофот-21) для дослідження дефектів та ідентифікації включень. **Результати.** Встановлено, що за лазерного впливу на поверхні і в поверхневому шарі сталі виникають різного роду дефекти, не пов'язані і пов'язані з неметалевими включеннями. Показано, що неметалеві включення є причиною появи різного роду дефектів зміцненого шару сталевих виробів за лазерної обробки (тріщини, порожнини, порушення геометрії зміцненого шару). Обговорюються причини появи дефектів, пов'язаних з присутністю включень різних типів. **Наукова новизна.** Наведено класифікацію дефектів зміцненого шару. Встановлено природу й особливості утворення дефектів, які пов'язані з появою швидкісних термічних напружень, структурною неоднорідністю, а також із плавленням, тепловим руйнуванням і випаровуванням включень, що виходять на поверхню і містяться в межах зміцненого шару. Зазначено, що виявлені дефекти – це готові осередки руйнування сталевих виробів або деталей в умовах дії статичних і динамічних навантажень, а також контактних напружень. **Практична значимість.** Показано, що незадовільна якість зміцненого шару, пов'язана з наявністю різного роду дефектів поблизу неметалевих включень, спричинює зниження механічних і експлуатаційних характеристик сталевих виробів або деталей. Отримані результати допоможуть розробити технологію лазерної обробки сталей з регламентованими параметрами якості зміцненого шару, що дозволить попередити утворення різного роду дефектів.

**Ключові слова:** *сталь; лазерна обробка; дефекти; тріщини; зміцнений шар; неметалеві включення*

## DEFECTS OF THE HARDENED LAYER AT LASER EXPOSURE

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

<sup>1\*</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina 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

<sup>2</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Sq. Ac. Starodubov, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>3</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Sq. Ac. Starodubov, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [termet@ukr.net](mailto:termet@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-9879-6179

**Abstract. Purpose.** It is necessary to investigate the influence of non-metallic inclusions on the formation of defects during laser processing. The aim of the work was to study the defects of the hardened layer of steels under laser action, associated with the presence of non-metallic inclusions. **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 QUANTUM-16. The research methods were applied - petrography, X-ray microscopy (MS-46 Cameca) and optical microscopy (Neophot-21) to study defects and identify of inclusions. **Results.** It has been established that various types of defects appear on the surface and in the surface layer of steel under laser action, which are not connected and are associated with non-metallic inclusions. It is shown that non-metallic inclusions are the reason for the appearance of various kinds of defects in the

hardened layer of steel products during laser processing (cracks, cavities, violation of the geometry of the hardened layer). The reasons for the appearance of defects associated with the presence of inclusions of various types are discussed. **Scientific novelty.** A classification of defects in the hardened layer is presented. The nature and features of the formation of defects, associated with the appearance of high-speed thermal stresses, structural inhomogeneity, as well as melting, thermal destruction and evaporation of inclusions emerging to the surface and located within the hardened layer, have been established. It is noted that the detected defects are ready-made centers of destruction of a steel product or part under conditions of static and dynamic loads, as well as contact stresses. **Practical significance.** It is shown that the unsatisfactory quality of the hardened layer associated with the presence of various kinds of defects near nonmetallic inclusions contributes to a decrease in the mechanical and operational characteristics of a steel product. The use of the obtained results will make it possible to develop technologies for laser processing of steels with regulated quality parameters of the hardened layer, which will prevent the formation of various kinds of defects.

**Keywords:** steel; laser treatment; defects; cracks; hardened layer; non-metallic inclusions

**Вступ.** Застосування лазерної обробки для зміцнення сталевих виробів зумовлене її багатьма перевагами, які пов'язані з унікальними властивостями лазерного випромінювання: висока енергонасиченість, вузька спрямованість, монохроматичність і когерентність [1; 2]. Досліджено поведінку неметалевих включень різних типів у сталях за лазерного впливу [3–12], що дозволило визначити їх роль у багатофакторному розвитку зміцнення поверхневого шару сталей і вплив на рівень зміцнення сталеві матриці. У той же час, мало вивчено їх вплив на утворення різних дефектів зміцненого шару під час лазерної обробки.

**Мета роботи** – дослідження дефектів зміцненого шару сталей за лазерного впливу, пов'язаних із наявністю неметалевих включень.

**Матеріали і методики.** Для вивчення дефектів, що виникають у зміцненому шарі за лазерної обробки, зразки сталей R7, НБ-57, 08кп, 08Х, 08Т, ЕЗ, 08Ю, ШХ15, 60Г, 12Х25Н16Г7АР, 08Х18Н10Т піддавали лазерному опроміненню на установках ГОС-30М і КВАНТ-16. Параметри лазерного впливу наведені у працях [1–3]. Металографічні дослідження проводили за допомогою мікроскопа Неофот-21. Застосовували петрографічний, а також мікрорентгеноспектральний (MS-46 Cameca) методи ідентифікації включень.

**Результати.** Дослідження показали, що в зоні лазерного зміцнення можлива поява різного роду дефектів, які можна поділити на дві групи: не пов'язані і пов'язані з неметалевими включеннями. Причини появи дефектів, які не пов'язані з неметалевими включеннями, можуть бути різними залежно від способу і режиму лазерної обробки, структури і хімічного

складу сталі [1; 2]. Ці дефекти, як правило, являють собою порушення геометрії зміцненого шару, різного роду тріщини, структурну неоднорідність (рис. 1, а–в). Крім того, за лазерної обробки сталей на повітрі можливе поверхневе окиснення (рис. 1, з) [13; 14], що викликає зміни оптичних властивостей об'єкта опромінення, збільшення ефективної поглинальної здатності і зміни температури поверхні.

За наявності поблизу поверхні і в поверхневому шарі виробу неметалевих включень виникає безліч різних мікродефектів (рис. 1, д, е), які мають різну природу. Неоднорідність температурного поля за лазерного впливу зумовлює різну поведінку включень одного типу в зоні опромінення сталі [3–12].

Неметалеві включення викликають хімічну і структурну неоднорідність сталей, сприяють неоднорідному розвитку зміцнення (рис. 2, а,  $Al_2O_3$ ) [3–6], що саме по собі є дефектом обробки. Під час різкого нагрівання до високих температур в ударних хвилях розвиваються високі тиски, що створюють поблизу включень концентрацію термічних і деформаційних напружень, для релаксації яких існує вкрай малий час ударного стиснення.

Описані умови провокують лавинну релаксацію напружень поблизу включень (рис. 2, б). Поблизу включень можуть виникати мікроруйнування різних типів (тріщини, порожнини, кратери) [3]. В умовах лазерного впливу відбувається руйнування включень внаслідок появи в них тендітних тріщин (рис. 2, в,  $2MnO \cdot SiO_2 + Al_2O_3$ ), що зумовлено дією ударної хвилі і розвитком при цьому високих тисків, а також різким охолодженням і різним

стиском при цьому матеріалу включення і сталевій матриці [3; 15–19].

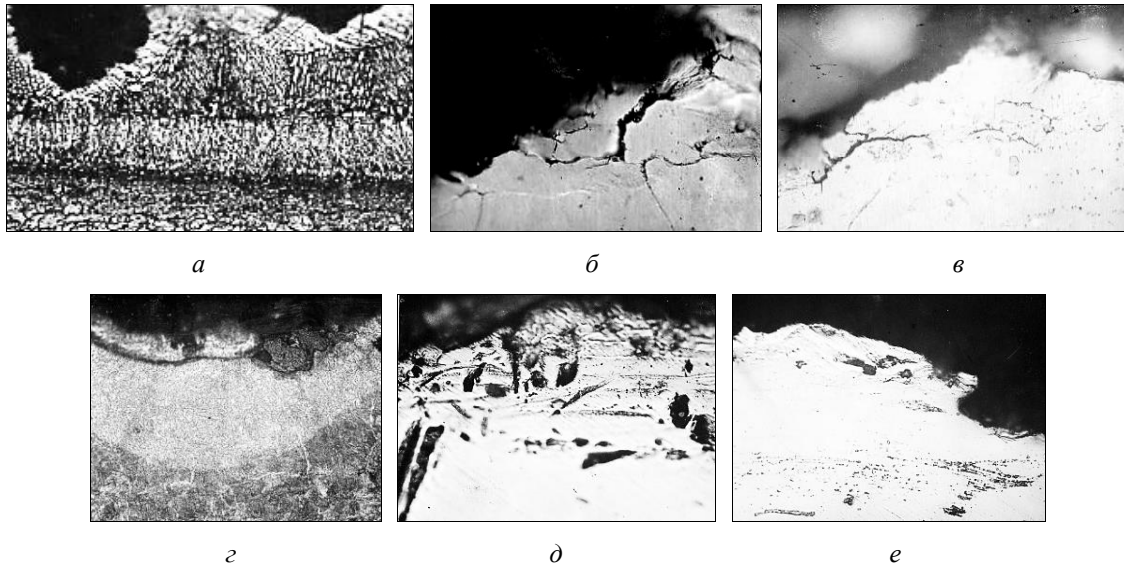


Рис. 1. Дефекти зміцненого шару, не пов'язані (а–г) і пов'язані (д, е) з неметалевими включеннями;  $\times 200$

У включеннях силікатів і сульфідів, що розплавилася і швидко закристалізувалися, також видно безліч дрібних тріщин, розвиток яких загальмований межами включення – матриця (рис. 2, г,  $(\text{Fe}, \text{Mn}) \text{S}$ ). Якщо включення перетинають межу розділу плями опромінення, тобто перебувають у зоні термічного впливу або розташовані поблизу цієї зони на неопромінених ділянках сталі, у включеннях і уздовж міжфазних меж включення–матриця, які містять підвищену кількість дефектів кристалічної будови [20–23], виникають мікротріщини, що зумовлено різким перепадом температур у цих зонах (рис. 2, д,  $2\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ ). Крім того, можливе теплове руйнування і високотемпературне випаровування включень (рис. 2, е-з,  $\text{MnO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Fe}, \text{Mn}) \text{S}$ ,  $\text{TiCN}$ ). Різна пружність парів різних елементів спричинює вибіркоче випаровування. На поверхні включень з'являються кратери. Продукти руйнування містять сильно нагрітий пар і частинки конденсату [3].

Внаслідок різного розширення під час нагрівання і стиснення при охолодженні на границях розділу включень із матрицею виникають розшарування, що викликають утворення порожнин (рис. 2, і,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), від яких у матрицю поширюються тріщини (рис. 2, д,  $\text{MnO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Тріщини від включень у матрицю можуть поширюватися

і без утворення порожнин (рис. 2, л,  $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Сульфідні і силікатні включення, які є легкоплавкими і перебувають у момент лазерної дії в рідкому стані, ударною хвилею вибиваються зі свого русла, розтікаються по поверхні зразка, залишаючи русло порожнім (рис. 2, м,  $(\text{Fe}, \text{Mn}) \text{S}$ ) і викликаючи появу тріщин на поверхні. Внаслідок виникнення високих тисків у зоні лазерного опромінення виникають значні напруження, що викликають появу нових тріщин, які з'єднують вільні русла (рис. 2, м).

Розмір включень визначає величину порожнин і тріщин, які в них виникають [3; 15–19]. Довжина тріщин у сталевій матриці не залежить від розміру включення, яке відіграє роль центра зародження тріщини, а швидкість її зростання визначають тип сталі і режим обробки [3; 15–19]. Форма мікроруйнувань залежить від форми включень.

Зміна форми сульфідних включень від компактної в сталях НБ-57 і 08кп до змішаної і, нарешті, до плівкової спричинює зміни дефектності структури зміцненого поверхневого шару після лазерної дії, оскільки протяжність тріщин, що проходять через включення, істотно збільшується від першого до останнього випадку. Поблизу компактних включень порожнини і тріщини мають меншу сумарну протяжність, ніж у

разі їх поширення уздовж плівкових включень. Крім того, у процесі вибивання розплавлених включень ударною хвилею

русла, що звільнилися, спричинює збільшення ступеня дефектності зміцненого шару.

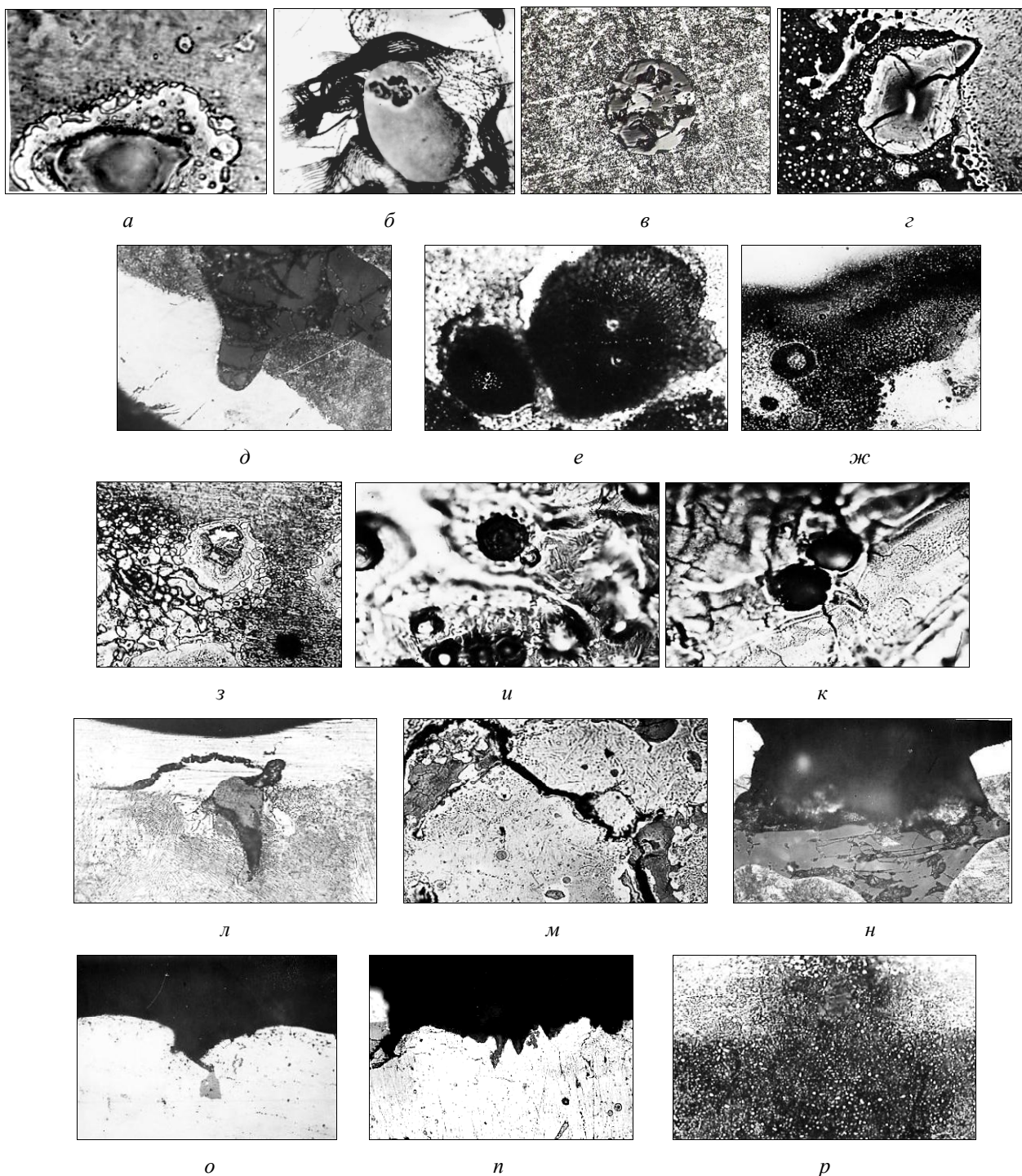


Рис. 2. Структура (а) і дефекти поблизу неметалевих включень в зоні лазерної обробки;  $\times 500$ ,  $\times 800$

Включення, які виходять на поверхню, а також такі, що містяться у зміцненому шарі на деякій глибині, викликають руйнування сталей з поверхні, оскільки мають більшу поглинальну здатність, ніж матриця сталі [2; 3], а також різну теплопровідність, що зумовлює в локальних ділянках значні

градієнти температур. На поверхні сталі поблизу включень з'являється рельєф, іноді досить значний. Великі включення, розміри яких порівняні із шириною зміцненого шару, можуть порушити його суцільність у разі виходу включень на поверхню (рис. 2,

*n-p*, оксиди, силікати, сульфідів) або спотворити геометрію білого шару.

Включення всіх типів, перебуваючи в зоні зміцненого шару, впливають на формування його структури, викликаючи структурну неоднорідність. Наприклад, у сталі ШХ15 навколо частинок корунду і шпінелей залишаються ділянки зі структурою, яка характерна для зони термічного впливу. Можливо, в таких локальних ділянках відбувається самовідпуск сталі (рис. 2, *p*,  $MgO \cdot Al_2O_3$ ). Практично в усіх сталях, незалежно від їх структури, у зміцненому шарі навколо включень проявляється тенденція до подрібнення мікроструктури.

**Висновки.** Неметалеві включення становлять причину появи різного роду дефектів зміцненого шару сталевих виробів

за лазерної обробки (тріщини, порожнини, порушення геометрії зміцненого шару). Природа цих дефектів різна і пов'язана з появою швидкісних термічних напружень, структурної неоднорідності, а також з плавленням, тепловим руйнуванням і випаровуванням неметалевих включень, що виходять на поверхню і перебувають у межах зміцненого шару.

Виявлені дефекти – це готові центри руйнування сталевих виробів або деталей в умовах дії статичних і динамічних навантажень, а також контактних напружень. Незадовільна якість зміцненого шару, яка пов'язана з наявністю різного роду дефектів поблизу неметалевих включень, спричинює зниження механічних і експлуатаційних характеристик сталевих виробів або деталей.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Леонтьев П. А., Чеканов Н. Т., Хан М. Г. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов : монография. Москва : Металлургия, 1986. 142 с.
2. Коваленко В. С., Головкин Л. Ф., Меркулов Г. В., Стрижак А. И. Упрочнение деталей лучом лазера : монография. Киев : Техника, 1981. 131 с.
3. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали : монография. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.
4. Губенко С. И. Структурные эффекты вблизи неметаллических включений при лазерной обработке сталей. *Физико-химическая механика материалов*. 1999. № 6. С. 57–66.
5. Губенко С. И. Плавление и кристаллизация неметаллических включений и стальной матрицы при лазерной обработке. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2010. Вип. 46, № 3. С. 73–79.
6. Губенко С. И. Особенности строения градиентных и композитных зон контактного взаимодействия в стальной матрице вблизи включений, возникших при лазерном воздействии. *Высокоэнергетические системы, процессы и их модели*. Днепропетровск : Акцент ПП, 2013. 288 с. С. 12–19.
7. Губенко С. И., Никульченко И. А. Градиентные и композитные зоны контактного взаимодействия включений и стальной матрицы после лазерного воздействия. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2015. Вып. 80. С. 118–122.
8. Gubenko S. I. Transformation of non-metallic inclusions “eutectics” in steels under laser action. *Material science. Nonequilibrium phase transformations*. 2019. Vol. V, iss. 4. Pp. 130–134.
9. Gubenko S. I., Varavka V. N. Behaviour of Sulphide Inclusions in Laser Thermal Hardening of Steel. *Technical Translations*. Cambridge (United Kingdom), 1986. 234 p.
10. Губенко С. И. Поведение силикатных включений при лазерной обработке стали. *Поверхность. Физика, химия, механика*. 1985. Т. 7. С. 87–92.
11. Губенко С. И., Варавка В. Н. Поведение сульфидных включений при лазерном термоупрочнении стали. *Физика и химия обработки материалов*. 1985. № 6. С. 23–27.
12. Губенко С. И., Демидова О. А., Варавка В. Н. Влияние включений оксидов на упрочнение стали при лазерном воздействии. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1986. № 11. С. 110–114.
13. Бункин Ф. В., Кириченко Н. А., Краснов И. В. и др. Лазерное управление термомеханическими процессами и оптимальный лазерный нагрев металлов в окислительной среде. *Доклады АН СССР*. 1981. Т. 256, № 4. С. 848–852.
14. Губенко С. И. Окисление неметаллических включений и стальной матрицы при лазерном воздействии. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 3 (90). С. 26–33.
15. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений. Днепропетровск : НМетАУ; ИЦ Системные технологии, 2014. 301 с.
16. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016. 549 с.
17. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Деформация неметаллических включений при прокатке стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1983. № 4. С. 80–84.



18. Губенко С. И., Беспалько В. Н., Жиленкова Е. В. Влияние температуры и степени деформации на характер изменения эвтектических боридов в высокохромистой стали с бором. *Теория и практика металлургии*. 2006. № 4–5. С. 158–160.
19. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпозитные включения в сталях. Germany-Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2019. 330 с.
20. 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.
21. Губенко С. И. К вопросу о строении межфазных границ неметаллическое включение – матрица в стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1994. № 6. С. 105–112.
22. 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.
23. Губенко С. И. Коллективные дислокационные эффекты, или фазовые переходы в границах неметаллическое включение – матрица стали. *Физика металлов и металловедение*. 1990. Т. 6. С. 184–188.

## REFERENCES

1. Leontjev P.A., Chekanov N.T. and Han M.G. *Lazernaja poverhnostnaja obrabotka metallov i splavov* [Laser surface treatment of metals and alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1986, 142 p. (in Russian).
2. Kovalenko V.S., Golovko L.F., Merkulov G.V. and Strizhak A.I. *Uprochnenie detalij luchom lazera* [Strengthening of parts with laser beam]. Kyiv : Technics Publ., 1981, 131 p. (in Russian).
3. 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).
4. Gubenko S.I. *Strukturnyye efekty vblizi nemetallicheskih vklucheniy pri lazernoy obrabotke staley* [Structural effects near non-metallic inclusions during laser processing of steels]. Physical and Chemical Mechanics of Materials. 1999, no. 6, pp. 57–66 (in Russian).
5. Gubenko S.I. *Plavleniye i kristallizatsiya nemetallicheskih vklucheniy i stal'noy matritsy pri lazernoy obrabotke* [Melting and crystallization of non-metallic inclusions and steel matrix during laser processing]. Physical and Chemical Mechanics of Materials. 2010. V ol. 46, no. 3, pp. 73–79. (in Russian).
6. Gubenko S.I. *Osobennosti stroyeniya gradiyentnykh i kompozitnykh zon kontaktного vzaimodeystviya v stal'noy matritse vblizi vklucheniy, vznikshikh pri lazernom vozdeystvii* [Features of the structure of gradient and composite zones of contact interaction in a steel matrix near inclusions that have arisen under laser action]. High-energy Systems, processes and their models. Dnipropetrovsk : Accent PP Publ., 2013, 288 p., pp. 12–19. (in Russian).
7. Gubenko S.I., Nikulchenko I.A. *Gradiyentnyye i kompozitnyye zony kontaktного vzaimodeystviya vklucheniy i stal'noy matritsy posle lazernogo vozdeystviya* [Gradient and composite zones of contact interaction of inclusions and steel matrix after laser exposure]. Construction, Material Science, Mechanical Engineering. 2015, no. 80, 2015, pp. 118–122. (in Russian).
8. Gubenko S.I. Transformation of non-metallic inclusions “eutectics” in steels under laser action. Material science. Nonequilibrium Phase Transformations. 2019, vol. V, iss. 4, pp. 130–134.
9. Gubenko S.I., Varavka V.N. Behaviour of Sulphide Inclusions in Laser Thermal Hardening of Steel. Technical Translations, Cambridge (United Kingdom), 1986, 234 p.
10. Gubenko S.I. *Povedeniye silikatnykh vklucheniy pri lazernoy obrabotke stali* [Behavior of silicate inclusions during laser processing of steel]. Surface. Physics, Chemistry, Mechanics. 1985, vol. 7, pp. 87–92. (in Russian).
11. Gubenko S.I. and Varavka V.N. *Povedeniye sulfidnykh vklucheniy pri lazernom termouprochnenii stali* [Behavior of sulfide inclusions during laser thermal hardening of steel]. Physics and Chemistry of Material Processing. 1985, no. 6, pp. 23–27. (in Russian).
12. Gubenko S.I., Demidova O.A. and Varavka V.N. *Vliyanie vklucheniy oksidov na uprochneniye stali pri lazernom vozdeystvii* [Influence of oxide inclusions on steel hardening under laser action]. *Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy*. 1986, no. 11, pp. 110–114. (in Russian).
13. Bunkin F.V., Kirichenko N.A. and Krasnov I.V. *Lazernoye upravleniye termomekhanicheskimi protsessami i optimal'nyy lazernyy nagrev metallov v okislitel'noy srede* [Laser control of thermomechanical processes and optimal laser heating of metals in an oxidizing medium]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences]. 1981, vol. 256, no. 4, pp. 848–852. (in Russian).
14. Gubenko S.I. *Okisleniye nemetallicheskih vklucheniy i stal'noy matritsy pri lazernom vozdeystvii* [Oxidation of non-metallic inclusions and steel matrix by laser exposure]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2020, no. 3 (90), pp. 26–33. (in Russian).
15. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskih vklucheniy* [Physics of steel fracture near non-metallic inclusions]. Dnipropetrovsk : NmetAU Publ.; Information Technology Systems Technologies, 2014, 301 p. (in Russian).
16. Gubenko S.I. *Nemetallicheskiye vklucheniya 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).

17. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Deformatsiya nemetallicheskih vklyucheniy pri prokatke stali* [Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling]. *Doklady Akademiy nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1983, no. 4, pp. 80–84. (in Russian).
18. Gubenko S.I., Bepalko V.N. and Zhilenkova E.V. *Vliyaniye temperatury i stepeni deformatsii na kharakter izmeneniya evtekticheskikh boridov v vysokokhromistoy stali s borom* [Influence of temperature and degree of deformation on the nature of changes in eutectic borides in high-chromium steel with boron]. [Theory and Practice of Metallurgy]. 2006, no 4–5, pp. 158–160. (in Russian).
19. Gubenko S. *Geterofaznyke mikrokompozitnyye vklyucheniya v stalyakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany-Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2019, 330 p. (in Russian).
20. Gubenko S.I. *Mezhfaznyye granitsy vklyucheniye-matritsa v stalyakh. Mezhfaznyye granitsy nemetallicheskiye 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).
21. Gubenko S.I. *K voprosu o stroenii mezhfaznykh granits nemetallicheskiye vklyucheniye-matritsa v stali* [To the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion-matrix in steel]. *Doklady Akademiy nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1994, no. 6, pp. 105–112. (in Russian).
22. Gubenko S.I. and Iskov M.V. *K voprosu o stroenii 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).
23. Gubenko S.I. *Kollektivnyye dislokatsionnyye efekty, ili fazovyye perekhody v granitsakh nemetallicheskiye vklyucheniye-matritsa stali* [Collective dislocation effects, or phase transitions within the boundaries of a nonmetallic inclusion-matrix of steel]. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metal Science]. 1990, vol. 6, pp. 184–188. (in Russian).

Надійшла до редакції: 05.02.2021.