

УДК 669.15.018.295

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.010721.19.778

РІВЕНЬ ПЛАСТИЧНОСТІ ФАЗ У НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕННЯХ, ЩО МАЮТЬ СКЛАДНУ СТРУКТУРУ

ГУБЕНКО С. І., *докт. техн. наук, проф.*Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

Анотація. *Постановка проблеми.* Необхідні дослідження впливу гетерофазних включень на технологічну пластичність сталей різного призначення. *Мета роботи* – вивчення природи і рівня пластичності мультифазних включень у сталях за гарячої і холодної деформації. *Методика.* Застосовували комплексні методи дослідження гетерофазних неметалевих включень (металографічний, петрографічний, мікрорентгеноспектральний аналіз). *Результати.* Досліджено пластичні фази в мультифазних включеннях різних типів в умовах гарячої і холодної деформації сталей. Показано, що кожен тип мультифазних включень, що являють собою мікрокомпонентні формування у сталях, характеризується своїми закономірностями розвитку деформаційних процесів, які визначаються їх хімічним і фазовим складом, структурою, деформаційною здатністю фаз включень. *Наукова новизна.* Встановлено особливості пластичної поведінки мультифазних включень різних типів. Вивчено гальмівний вплив фаз включень, що не деформуються, на деформівність пластичних фаз у широкому інтервалі температур деформації сталей. Обговорюються особливості природи пластичності мультифазних включень, що мають різні склади і структуру. *Практична значимість.* Використання отриманих результатів дозволить розробити технології отримання сталей з регламентованими змістом і видами мультифазних неметалевих включень, що дозволить істотно підвищити їх технологічну пластичність, а також попередити утворення різного роду дефектів під час обробки сталей тиском.

Ключові слова: *сталь; мультифазні неметалеві включення; пластичність; деформівність; структура*

THE LEVEL OF PLASTICITY OF THE PHASES IN NON-METALLIC INCLUSIONS WITH A COMPLEX STRUCTURE

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, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

Abstract. Purpose. It is necessary to study of the effect of heterophase inclusions on the technological ductility of steels for various purposes. The goal of the work was to study of the nature and level of plasticity of multiphase inclusions in steels under conditions of hot and cold deformation. **Methods.** Comprehensive methods for the study of heterophase non-metallic inclusions (metallographic, petrographic, X-ray microanalysis methods) were used. **Results.** Plastic phases in multiphase inclusions of different types under conditions of hot and cold deformation of steels were investigated. It is shown that each type of multiphase inclusions, which are microcomposite formations in steels, is characterized by its laws of development of deformation processes, which are determined by their chemical and phase composition, structure, deformation ability of the phases of inclusions. **Scientific novelty.** Peculiarities of plastic behavior of multiphase inclusions of different types are established. The inhibitory effect of non-deformable phases of inclusions on the deformability of plastic phases in a wide range of steel deformation temperatures is established. Peculiarities of the nature of plasticity of multiphase inclusions having different compositions and structure are discussed. **Practical significance.** Using the results obtained will allow developing technologies for producing steels with regulated content and types of multiphase non-metallic inclusions, which will significantly increase their technological plasticity, as well as prevent the formation of various kinds of defects during the processing of steels by pressure.

Keywords: *steel; multiphase non-metallic inclusions; ductility; deformability; structure*

Вступ. Відомо, що неметалеві включення, які завжди присутні у сталях, являють собою концентратори напружень і суттєво впливають на механічні та експлуатаційні властивості сталей, сталевих виробів, конструкцій [1–3]. У сталях, крім однофазних включень оксидів, нітридів, сульфідів, силікатів і т. ін., присутні мультифазні включення [1; 4–9]. Необхідні дослідження основних типів їх структур, а також поведінки таких включень за різними деформаційно-тепловими впливами, в тому числі під час обробки сталей тиском, оскільки неметалеві включення часто визначають рівень їх технологічної пластичності [7; 10; 11].

Метою роботи – вивчення природи і рівня пластичності мультифазних включень у сталях в умовах гарячої і холодної деформації.

Матеріали і методики. Досліджували неметалеві включення в литих сталях 08кп, 08, 08Х, НБ-57, 08ГСЮТФ, ШХ15 металографічним, петрографічним методом, а також шляхом мікрорентгено-спектрального аналізу (МС-46 «Самеса»). Вивчали поведінку включень за розтягнення і прокатки зразків сталей 08кп, 08Ю, 08Т, 45, Р7 за температур 25...100 °С. Параметри деформації включень визначали за методиками, описаними у парцях [1; 4].

Результати досліджень та їх обговорення. Раніше проведеними

дослідженнями встановлено, що мультифазні (або гетерофазні) неметалеві включення у сталях можна поділити на п'ять груп [1; 4; 5]: включення першого типу «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою»; другого – «фази поруч»; третього – «евтектики»; четвертого – «дисперсні фази в неметалевій матриці»; включення п'ятого типу «евтектика включення – матриця».

Мультифазні включення першого типу «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою» складаються з легкоплавкої фази-оболонки «ф-о1» (частіше – сульфід або силікат), всередині якої міститься тугоплавка фаза включення – «ф2» (оксид, шпінель, нітрид, карбонітрид, рис. 1 а). Мультифазні включення другого типу – це включення «фази поруч» «ф1» і «ф2» (рис. 1 б).

Найчастіше зустрічаються поєднання однотипних простих включень оксидів, нітридів і т. ін. Мультифазні включення третього типу «евтектики» утворюються в результаті одночасної кристалізації фаз за евтектичного перетворення. Такі включення мають евтектичну структуру і являють собою колонії фаз евтектики «e1» і «e2» – це сульфідні, оксисульфідні, оксидні, силікатні, нітридні, сульфосилікатні, оксисилікатні композитні формування різного виду залежно від складу і природи фаз (рис. 1 в), хоча можливі і конгломерати фаз евтектики.

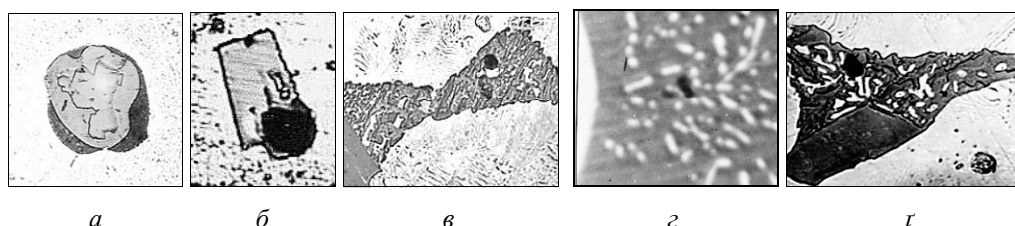


Рис. 1. Мультифазні включення в литих сталях; $\times 600$

Існують мультифазні включення четвертого типу, де в «неметалевій» матриці (сульфідній, оксидній, силікатній і т. ін.) «ф-м1» присутні дисперсні частинки надлишкової другої фази (оксиди, нітриди, карбонітриди, силікати і т. ін.) «д2», яка виділилася з пересиченого рідкого або твердого розчину («неметалевої» матриці)

(рис. 1 г). Такі включення являють собою дисперсні композитні формування.

Мультифазні включення п'ятого типу – це формування «евтектика включення – матриця», в яких одну із фаз становить матриця сталі «м» у вигляді вкраплень або як фаза евтектики сульфід-матриця, силікат-матриця, оксид-матриця, фосфід-матриця (рис. 1 ґ).

Мультифазні включення являють собою мікрокомполімерні формування. Більшість фаз мультифазних включень (оксидні, боридні, гідридні, нітридні) тугоплавкі, для них характерна крихкість як у низькотемпературній, так і в високотемпературній області. Вона забезпечується спрямованістю зв'язків фаз упродовження у гратці і високим значенням сил Пайерлса–Набарро для дислокацій [12]. Більшість таких включень за температур гарячої обробки тиском не виявляють помітної пластичності і руйнуються крихко, оскільки для них температура холодноламкості вища температур гарячої деформації сталі [1; 11; 13–15].

У сульфідних фаз температури плавлення нижчі, ніж у тугоплавких фаз включень, а пластичність вища [1; 9; 11; 13; 14]. Пластична поведінка мультифазних включень в умовах обробки тиском, наприклад, гарячої або холодної прокатки залежить від рівня пластичності складових фаз і умов деформації (рис. 2).

Ускладненість розвитку пластичної деформації в тугоплавких фазах включень

зумовлена декількома причинами: розташуванням атомів неметалу в проміжках між шарами атомів металу, що перешкоджає легкому ковзанню; схильністю атомів неметалу розташовуватися на дислокаціях та межах зерен і субзерен; відхиленнями від стехіометрії, що породжують різні спотворення у гратці; можливістю утворення спрямованого характеру міжатомних зв'язків [1; 4; 12].

Слід зазначити, що деформація включень за високих температур може характеризуватися в'язкістю, а точніше, різницею цього показника між включенням і сталеву матрицею [15]: більш низька в'язкість включень сприяє кращій їх деформованості. Модуль Юнга включень можна використовувати для характеристики деформації включень за низьких температур [15]: як правило, деформація включень зростає зі зменшенням модуля Юнга. Причина різних показників пластичності фаз мультифазних неметалевих включень – явище переходу їх від пластичності до крихкості у разі зміни температури.

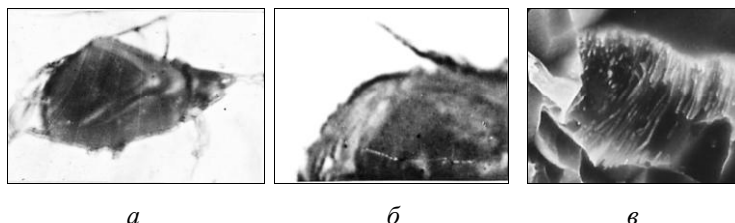


Рис. 2. Мультифазні включення зі слідами пластичної деформації, $\times 900$

За наявності пластичних фаз у включеннях різного типу визначали вплив температури деформації розтягнення на помітну пластичність, коли відбувається множинне ковзання (табл. 1–5). Для всіх пластичних фаз чим вища температура, тим вищий ступінь деформації ε , %, за якої починалося множинне ковзання. Слід зазначити, що для мультифазних включень усіх типів величина ε дещо менша, ніж в однофазних включень відповідного хімічного складу, що пов'язано з гальмівним впливом другої фази [1; 4; 5].

Навантаження гетерофазного матеріалу під час обробки тиском (сталь із мультифазними включеннями)

характеризується різко неоднорідним розподілом напружень і деформацій [1; 4; 11]. Слід зазначити, що в мультифазних включеннях, порівняно з однофазними, неоднорідність деформації посилюється у зв'язку з наявністю фаз, що мають різний рівень пластичності, а також внутрішні міжфазні межі.

Вочевидь, це спричинює утворення на зазначених межах джерел деформаційних дефектів, що випускаються в сусідні фази включень. Мікропластичні зрушення в пластичних фазах таких включень здатні частково перерозподіляти поле концентратора напружень. У розгляді пластичної поведінки мультифазних

включень у пластичній сталевій матриці принципове значення мають міжфазні межі включення–матриця, а також внутрішні міжфазні межі у включеннях [1; 4; 16–20].

Очевидно, поблизу зазначених меж під час навантаження виникають далекодійні моментні й асиметричні напруження. З точки зору мезомеханіки поряд із локалізацією пластичної течії в зонах обмеженої деформації у включеннях за низьких температур 25...600 °С

проявляється ковзання уздовж меж включення – матриця, яке супроводжується виникненням у фазах включень періодичних акомодційних зрушень (холодне просковзування) [11].

В умовах високотемпературної деформації відбувається просковзування уздовж меж включення – матриця і внутрішніх міжфазних меж у включеннях, пов'язане з рухом міжфазних дислокацій [1; 4; 11; 21–25].

Таблиця 1

Величина ϵ , %, за якою починалося множинне ковзання у включеннях першого типу «стугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою»

Включення « ϕ -01 + ϕ 2», сталь	Температура деформації, °С				
	25	600	900	1 000	1 100
(Mn,Fe)S + MnO·Al ₂ O ₃ , 08Ю	6	10	16	22	29
MnO·SiO ₂ + MnO·Al ₂ O ₃ , 08Ю	–	4	9	16	20
FeO·TiO ₂ + TiCN, 08Т	–	–	–	4	8

Таблиця 2

Величина ϵ , %, за якою починалося множинне ковзання у включеннях другого типу «фази поруч» (чисельник – для фази « ϕ 1», знаменник – для « ϕ 2»)

Включення « ϕ 1 + ϕ 2», сталь	Температура деформації, °С				
	25	600	900	1 000	1 100
(Mn,Fe)S + FeS, 08кп	8/11	11/14	19/22	25/29	27/32
MnO·SiO ₂ + FeO·SiO ₂ , 08кп	–	6/11	11/14	18/22	21/25
MnO·SiO ₂ + (Mn,Fe)S, 08кп	–/7	8/13	12/18	20/25	23/28
(Mn,Fe)S + MnO·Al ₂ O ₃ , 08Ю	7/–	9/–	15/–	20/–	23/–
FeO·TiO ₂ + TiCN, 08Т	–/–	–/–	–/–	5/–	8/–

Таблиця 3

Величина ϵ , %, за якою починалося множинне ковзання у включеннях третього типу «евтектики» (чисельник – для фази « e 1», знаменник – для « e 2»)

Включення « e 1 – e 2», сталь	Температура деформації, °С				
	25	600	900	1 000	1 100
FeS – (Mn, Fe)S, 08Ю	8/5	13/8	19/15	29/25	34/29
2FeO·SiO ₂ – MnO·SiO ₂ , 08кп	–	8/4	10/8	16/12	22/19
FeS – FeO·SiO ₂ , 08кп	4/–	9/5	13/9	20/17	24/22
MnO – (Mn, Fe)S, 08Ю	–/4	–/6	–/11	–/21	–/24

Таблиця 4

Величина ϵ , %, за якою починалося множинне ковзання у включеннях четвертого типу «дисперсні фази в неметалевій матриці»

Включення « ϕ -m1 + d2», сталь	Температура деформації, °С				
	25	600	900	1 000	1 100
(Mn,Fe)S+ (Mn,Mg)O·Al ₂ O ₃ , 08Ю	4	7	12	18	25
FeO·SiO ₂ + FeO·Al ₂ O ₃ , 08Ю	–	4	9	16	20
(Mn,Fe)S+ (FeO·SiO ₂)	5	8	12	19	26
FeO·TiO ₂ + (TiCN, TiCN), 08Т	–	–	–	4	8

Величина ε , %, за якою починалося множинне ковзання у включеннях п'ятого типу «евтектика включення – матриця» (чисельник – для фази «нв», знаменник – для фази «м»)

Включення «нв – м», сталь	Температура деформації, °С				
	25	600	900	1 000	1 100
(Mn,Fe)S–м, 08ГСЮТФ	9/4	15/7	23/19	34/29	39/31
FeO·SiO ₂ –м, 08кп	–	9/6	13/11	20/15	28/23
MnO–м, 08кп	4/9	7/14	12/21	20/26	23/29

Висновки. Кожен тип мультифазних включень, які являють собою мікрокомполітні формування в сталях, характеризується своїми закономірностями розвитку деформаційних процесів, що визначаються їх хімічним і фазовим складом, структурою, деформаційною здатністю фаз включень.

Мультифазні включення повинні задовольняти основній вимозі – це

можливість довільної формозміни в будь-якому мікрооб'ємі включення зі збереженням безперервності напружень або безперервності деформацій. Отримані дані можуть бути використані для розроблення нових способів керування деформацією неметалевих включень шляхом регулювання температури і швидкості деформації під час обробки сталей тиском.

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*. Vol. 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*. Basel, Switzerland, 2020. 03 Jun., vol. 13(11).
4. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомполітні включення в сталях. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2019. 330 с.
5. Губенко С. И., Беспалько В. Н. Виды и структура гетерофазных включений в сталях. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 1 (84). С. 30–35.
6. Губенко С. И. Структура многофазных неметаллических включений в сталях. Теория и практика металлургии. 1999. № 1. С. 22–27.
7. Gubenko S. I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50, no. 10. Pp. 730–739.
8. Губенко С. И. Поведение гетерофазных включений «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» при обработке сталей давлением. *Вестник ПГАСА*. 2020. № 3 (264–265). С. 40–45.
9. Губенко С. И., Беспалько В. Н. Поведение гетерофазных включений «фазы рядом» при обработке сталей давлением. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 1 (88). С. 36–41.
10. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Деформация неметаллических включений при прокатке стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1983. № 4. С. 80–84.
11. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016. 549 с.
12. Андриевский Р. А., Ланин А. Г., Рымашевский Г. А. Прочность тугоплавких соединений. Москва : Металлургия, 1974. 232 с.
13. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений. Днепропетровск : НМетАУ, ИЦ Системные технологии, 2014. 301 с.
14. Губенко С. И., Парусов Э. В. Пластичность сплавов с различной структурой : учеб. пособ. по физическим основам пластичности. Germany – Mauritius, Beau Bassin: Palmarium academic publishing, 2017. 185 с.
15. Yang W., Zhang L., Ren Q. Deformation and Fracture of Non-metallic Inclusions in Steel at Different Temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020 (In Press, Journal Pre-proof. Available: online 28 October, 2020).

16. Губенко С. И. К вопросу о строении межфазных границ неметаллическое включение – матрица в стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1994. № 6. С. 105–112.
17. 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.
18. 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.
19. Губенко С. И. Локальные пики параметров и процессов на границах неметаллическое включение – матрица стали. *Сталь*. 1999. № 8. С. 64–67.
20. Губенко С. И. Влияние межфазных границ «неметаллическое включение – матрица» на когезионную прочность стали. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. № 1. С. 11–17.
21. Губенко С. И. Влияние условий деформации на развитие проскальзывания вдоль границ включение – матрица стали. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Вып. 58. 2011. С. 211–215.
22. Губенко С. И. Проскальзывание вдоль границ неметаллическое включение – матрица стали. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1990. № 11. С. 2–5.
23. Губенко С. И. Природа всплесков микронеоднородной деформации в стали с неметаллическими включениями. *Физико-химическая механика материалов*. 1999. № 2. С. 53–59.
24. Губенко Светлана. Физическая природа пластичности и упрочнения металлов при деформации. Germany – Mauritius, Beau Bassin : LAP LAMBERT Academic publishing, 2020. 341 с.
25. Губенко С. И. Влияние проскальзывания вдоль границ неметаллическое включение – матрица на распределение локальной микронеоднородной деформации в армко-железе и стали. *Физика металлов и металловедение*. 1996. Т. 82, вып. 3. С. 167–175.

REFERENCES

1. 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).
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*. Vol. 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, 03 Jun., vol. 13 (11).
4. Gubenko S. *Geterofaznyke mikrokompozitnyye vklucheniya v stalyakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2019, 330 p. (in Russian).
5. Gubenko S.I. and Bepalko V.N. *Vidy i struktura geterofaznykh vklucheniy 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).
6. Gubenko S.I. *Struktura mnogofaznykh nemetallicheskich vklucheniy 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).
7. Gubenko S.I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020, vol. 50, no. 10, pp. 730–739.
8. Gubenko S.I. *Povedeniye geterofaznykh vklucheniy «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]. *Vestnik PGASA* [Bulletin of PSASEA]. 2020, no. 3 (264–265), pp. 40–45 (in Russian).
9. Gubenko S.I. and Bepalko V.N. *Povedeniye heterofaznykh vklucheniy «fazy ryadom» pry obrabotke staley davleniyem* [Behavior of Heterophase Inclusions "Phases Nearby" During Pressure Treatment of Steels]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2020, no. 1 (88), pp. 36–41. (in Russian).
10. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Deformatsiya nemetallicheskich vklucheniy pri prokatke stali* [Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling]. *Izvestiya AN SSSR. Metalliy*. [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1983, no. 4, pp. 80–84. (in Russian).
11. 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).
12. 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).

13. 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).
14. Gubenko S.I. and Parusov E.V. *Plastichnost' splavov s razlichnoy strukturoy : uchebnoye posobiye po fizicheskim osnovam plastichnosti* [Plasticity of alloys with various structures : Study Guide on the Physical Basics of Plasticity]. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium Academic Publishing, 2017, 185 p. (in Russian).
15. Yang W., Zhang L. and Ren Q. Deformation and Fracture of Non-metallic Inclusions in Steel at Different Temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020 (In Press, Journal Pre-proof, Available : online 28 October 2020).
16. 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. Metallurgiya* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1994, no 6, pp. 105–112. (in Russian).
17. 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).
18. 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 [Fizika metallov i metallovedenie]*. 1990, no 6, pp. 184–188. (in Russian).
19. 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).
20. 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]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2006, no 1, pp. 11–17. (in Russian).
21. Gubenko S.I. *Vliyaniye usloviy deformatsii na razvitiye proskal'zyvaniya vdol' granits vklyucheniye – matritsa stali* [Influence of deformation conditions on the development of slippage along the inclusion – matrix boundaries of steel]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Material Science, Mechanical Engineering]. Iss. 58, 2011, pp. 211–215. (in Russian).
22. Gubenko S.I. *Proskal'zyvaniye vdol' granits nemetallicheskiye vklyucheniye-matritsa stali* [Slip along the boundaries of the non-metallic inclusion-matrix of steel]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 1990, no. 11, pp. 2–5 (in Russian).
23. Gubenko S.I. *Priroda vspleskov mikroneodnorodnoy deformatsii v stali s nemetallicheskim vklyucheniyami* [The nature of bursts of micro-inhomogeneous deformation in steel with non-metallic inclusions]. *Fiziko-himicheskaya mehanika materialov* [Physical and Chemical Mechanics of Materials]. 1999, no 2, pp. 53–59. (in Russian).
24. 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).
25. Gubenko S.I. *Vliyaniye proskal'zyvaniya vdol' granits nemetallicheskiye vklyucheniye-matritsa na raspredeleniye lokal'noy mikroneodnorodnoy deformatsii v armko-zheleze i stali* [Influence of slippage along the boundaries of a non-metallic inclusion-matrix on the distribution of local micro-inhomogeneous deformation in armco iron and steel]. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metal Science]. 1996, vol. 82, no 3, pp. 167–175. (in Russian).

Надійшла до редакції : 17.06.2021.