

УДК 669.18

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.280323.14.940

ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ПРОСКОВЗУВАННЯ УЗДОВЖ ГРАНИЦЬ ГЕТЕРОФАЗНЕ ВКЛЮЧЕННЯ «ТУГОПЛАВКА ФАЗА, ОТОЧЕНА ЛЕГКОПЛАВКОЮ ОБОЛОНКОЮ» – МАТРИЦЯ СТАЛІ

ГУБЕНКО С. І.^{1,2*}, *докт. техн. наук, проф.*,ПАРУСОВ Е. В.³, *докт. техн. наук, с. н. с.*,ЧУЙКО І. М.⁴, *канд. техн. наук*

^{1*} Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 630-01-65, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

^{2*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

³ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

⁴ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: ferrosplav@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

Анотація. *Мета дослідження* – вивчення особливостей просковзування на міжфазних границях гетерофазне включення «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою» – матриця сталі в інтервалі температур гарячої деформації. *Методика.* Зразки сталей 08Т, 08Ю, 12ГС, 08кп, 09Г2С, НБ-57, 08ГСЮТФ піддавали розтягуванню за температур 20...1 200 °С у вакуумі на пристрої ІМАШ-5С зі спеціальними захватами, швидкість переміщення яких становила 20 мм/хв. Застосовували методи дослідження: петрографія, мікрорентгеноспектральний аналіз («Camesa MS-46, Nanolab-7», оптична мікроскопія (Neophot-21)). *Результати.* Встановлено, що різноманітність фаз, які становлять гетерофазні включення типу «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою», викликає їх різну поведінку за пластичної деформації. Показано, що за умов високотемпературної деформації міжфазні границі включення – матриця, що є границями між фазою-оболонкою включень та сталеву матрицею, проявляють пластичність у результаті просковзування. Встановлено, що залежно від рівня пластичності фаз, які становлять включення, просковзування відбувається з різною інтенсивністю. Проаналізовано особливості процесу просковзування для гетерофазних включень типу «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою». *Наукова новизна.* Обговорюється механізм просковзування для включень типу «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою», які містять фази з різним рівнем пластичності, пов'язаний з рухом власних міжфазних дислокацій на ділянках границь включення – матриця (власне просковзування) або внесених дислокацій, а також із контактним тертям і внутрішнім тертям, що виникає в границях за рухом дислокацій. Показано, що активізація просковзування може відбуватися завдяки перебудовам дефектів, які знаходяться на міжфазних границях включення – матриця сталі. Встановлено, що відмінність природи фаз-оболонки, а також вплив другої фази включень «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою» сприяють розрізненню пластичності границь включення – матриця сталі за високотемпературної деформації. *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 під час обробки сталей тиском та експлуатації виробів.

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

FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF SLIPPING ALONG THE BOUNDARIES HETEROPHASE INCLUSION “HIGH-MELTING PHASE SURROUNDED BY A LOW-MELTING SHELL” – STEEL MATRIX

GUBENKO S.I.^{1,2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,PARUSOV E.V.³, *Dr. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,CHUIKO I.M.⁴, *Ph. D.*

^{1*} Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Sq. Acad. Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (067) 630-01-65, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

^{2*} Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

³ Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Sq. Acad. Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

⁴ Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Sq. Acad. Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: ferrosplav@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

Abstract. Purpose. To study features of slippage at the interphase boundaries, heterophase inclusion “refractory phase surrounded by a low-melting shell” – steel matrix in the temperature range of hot deformation. **Methods.** Samples of steels were subjected to stretching at temperatures of 20...1 200 °C in a vacuum on the IMASH-5S device with special grippers, the speed of which was 20 mm/min. Research methods were used: petrography, micro-X-ray spectral analysis (“Cameca MS-46, Nanolab-7”, optical microscopy (Neophot-21)). **Results.** It was found that the diversity of phases composing the heterophase inclusions of the “high-melting phase surrounded by a low-melting shell” type leads to their different behavior under plastic deformation. It was shown that during the high-temperature deformation the inclusion – matrix interphase boundaries, which are the boundaries between the inclusion-shell phase and the steel matrix, exhibit plasticity as a result of slipping. It was found that depending on the plasticity level of the phases composing the inclusion, the slipping occurs with different intensity. The features of the slipping process for heterophase inclusions of the “high-melting phase surrounded by a light-melting shell” type were analyzed. **Scientific novelty.** It is discussed the slipping mechanism for inclusions of the “high-melting phase surrounded by a low-melting shell” type containing phases with different plasticity levels, which is associated with the movement of interface dislocations at the inclusion – matrix boundaries (intrinsic slipping) or inserted dislocations as well as with contact friction and internal friction occurring at the boundaries due to the dislocation movement. It is shown that the activation of the slipping can occur due to the rearrangements of defects located at the interphase boundaries of the inclusion – matrix of steel. It was established that the difference in the nature of the phases-shells, as well as the influence of the second phase of inclusions “high-melting phase surrounded by a low-melting shell” contribute to difference in plasticity of inclusion-matrix boundaries of steel under high-temperature deformation. **Practical value.** The use of the obtained results will make it possible to develop technologies for producing steels with regulated types of heterophase non-metallic inclusions, which will significantly increase their technological and operational characteristics, as well as prevent the formation of various defects during the processing of steels by pressure and the operation of products.

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

Вступ

Основні види гетерофазних неметалевих включень в сталях, розглянуті у працях [1–10], свідчать про велику різноманітність міжфазних границь включення – матриця. Нерідко одна з фаз на різних ділянках має різні границі (міжфазна границя з іншою фазою включення, міжфазна границя зі сталеву матрицею). Оскільки фази в гетерофазних включеннях мають різний рівень пластичності і міцності за будь-яких температур деформації, в процесі навантаження на міжфазних границях включення – матриця неминуче виникають напруження, які можуть зумовити їх пластичну поведінку (просковзування) або руйнування [8; 11–14].

Мета роботи – вивчення особливостей просковзування на міжфазних границях гетерофазне включення «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою» –

матриця сталі в інтервалі температур гарячої деформації.

Матеріали та методики

Зразки сталей 08Т, 08Ю, 12ГС, 08кп, 09Г2С, НБ-57, 08ГСЮТФ піддавали розтягуванню за температур 20...1 200 °C у вакуумі на пристрої ІМАШ-5С зі спеціальними захватами, швидкість переміщення яких становила 20 мм/хв. Застосовували методи дослідження: петрографія [7; 15–18], мікрорентгено-спектральний аналіз («Cameca MS-46, Nanolab-7», оптична мікроскопія (Neophot-21).

Результати

Гетерофазні включення типу «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою» складаються з фази-оболонки ф-01 та внутрішньої фази ф2. Тому тільки фаза-оболонка ф-01 контактує зі сталеву матрицею та утворює з нею міжфазну границю включення – матриця ф-01↔м.

В інтервалі температур 25...600 °С поблизу включень спостерігали локалізацію деформації сталеві матриці. За температур 700...900 °С з'явилися ознаки просковзування на границях зерен сталеві матриці. Просковзування на границях включення – матриця ф-о1↔м спостерігається за температур 1 000...1 200 °С. Воно проявляється у розширенні міжфазних границь (рис. 1, а), появи рельєфу деформації та підтверджується фактом розриву рисок поблизу включень (рис. 1, б). Поблизу включень, як і за нижчих температур, спостерігалася локалізація деформації, причому з обох боків від міжфазної границі включення – матриця у

разі пластичних силікатних чи сульфідних фаз ф-о1.

Деформація з обох боків від границі ф-о1↔м була несиметричною, що пов'язано з різним рівнем пластичності сталеві матриці та фази-оболонки включення ф-о1.

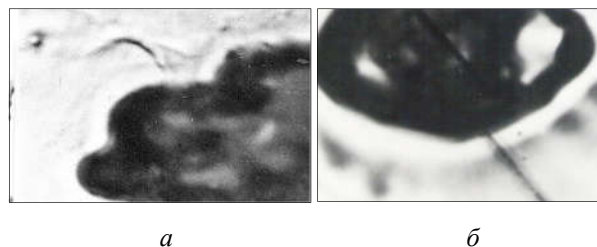


Рис. 1. Просковзування на границях включення – матриця ф-о1↔м за температур 1 000 (а, MnO·SiO₂ + Al₂O₃, 08Ю) і 1 100 °С (б, (Fe, Mn)S + MnO·SiO₂, 08Ю); ×1 000

Таблиця 1

Величина зміщення рисок Δ, мкм, для включень «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою»

t, °С	Включення ф-о1 + ф2, сталь		
	MnO·SiO ₂ + Al ₂ O ₃ , 08Ю	(Fe, Mn)S + MnO·SiO ₂ , 08Ю	(Fe, Mn)S + TiCN, 08Т
1 000	9	15	12
1 100	18	24	20
1 200	оплавлено	оплавлено	оплавлено

Відомо, що пластичність сульфідної та силікатної фази-оболонки ф-о1 залежить від температури деформації [7; 12; 14; 15]. Сульфідні фази ф-о1 легкоплавкі. Вони деформуються спільно з матрицею і фазою включення ф2 до температури 1 050...1 120 °С, за досягнення якої відбувається їх плавлення, що спричинює різку зміну характеру міжфазних границь ф-о1↔м. За більш високих температур з'являються порожнини, заповнені розплавом. Силікати MnO·SiO₂ пластичні за температур вище 900 °С, коли, власне, і спостерігається явище, яке вивчається. За більш низьких температур силікати пластично не деформуються [7; 12; 14; 15].

Очевидно, на границях ф-о1↔м мають спостерігатися «сплески» пластичної деформації, які можна виявити спеціальними дослідженнями [7; 15–19]. Застосовуючи метод нанесення реперних ліній поблизу включень, вивчали розподіл локальної мікронеоднорідної деформації уздовж ліній, які є дотичні до включення.

Розподіл величин інтенсивності деформації η_i та коефіцієнта концентрації деформації K_ε за відсутності просковзування на міжфазній границі ф-о1↔м залежав від температури деформації та типу сталі.

За підвищення температури деформації просковзування на границях ф-о1↔м розвивалося з різною інтенсивністю, що залежить від рівня пластичності фази-оболонки включення ф-о1, однак в усіх випадках на реперній лінії спостерігали «сплески» інтенсивності деформації (табл. 2). Відмінність природи фаз-оболонки включення ф-о1 відбилася на величині параметрів інтенсивності η_i та коефіцієнта концентрації деформації K_ε. Максимально «сплески» інтенсивності деформації виявляються за підвищення температури для кожного виду гетерофазного включення досліджуваного типу.

Механізм просковзування уздовж міжфазних границь включення – матриця ф-о1↔м пов'язаний з рухом власних

граничних дислокацій або внесених на границі дислокацій зі сталеві матриці, причому останні можуть генеруватися джерелом у самій границі $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$ або бути внутрішньозеренними дислокаціями, що продисоціювали на граничні дислокації [8; 20]. Дислокації в міжфазних границях за підвищених температур стають нестійкими та делокалізуються, створюючи пластичні несумісності, що викликають рух дислокацій уздовж цих границь. За делокалізації ядер дислокацій та їх руху атомна структура границь включення –

матриця $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$ безперервно перебудовується і виявляється у структурно-нестійкому стані, що спричинює зниження опору граничному зсуву [8; 19; 20].

Активізація просковзування може відбуватися завдяки наявності некомпенсованих потоків вакансій та домішок на границях включення – матриця $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$. Швидкість просковзування лімітується неконсервативним рухом міжфазних дислокацій у границях, що вивчаються. Як правило, просковзування відбувається уздовж усієї границі $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$.

Таблиця 2

Значення інтенсивності η_i та коефіцієнта концентрації деформації K_ϵ в сталевій матриці поблизу гетерофазних включень «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою» за розвитку просковзування на границях за різних температур та середніх ступенів деформації

Включення $\phi\text{-}01 + \phi_2$, сталь	t, °C	ϵ , %	η_i	K_ϵ
MnO·SiO ₂ + Al ₂ O ₃ , 08Ю	950	10	1,8...2,6	2,8...3,6
	1 100		2,3...3,7	3,3...4,7
(Fe, Mn) S + MnO·Al ₂ O ₃ , 08Ю	800	12	2,4...3,9	3,4...4,9
	1 100		3,5...4,3	4,4...5,3
MnO·SiO ₂ + TiCN, 08Т	950	12	2,1...2,5	3,1...3,5
	1 100		2,5...3,8	3,5...4,8

Просковзування на границях включення – матриця $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$ – це динамічна контактна взаємодія фаз-оболонки $\phi\text{-}01$ включень і сталеві матриці в процесі їх спільної деформації. Динамічний контакт цих фаз можна пояснити, застосовуючи модель конфігураційної локалізації валентних електронів [21]. Між фазою-оболонкою включення $\phi\text{-}01$ та сталеві матрицею через міжфазну границю відбувається обмін електронами, оскільки фаза $\phi\text{-}01$ включення є донором електронів, а сталеві матриця – акцептором електронів.

На міжфазній границі $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$ зосереджені атоми фази $\phi\text{-}01$ включення та матриці з найбільш порушеними електронними конфігураціями та зниженою статистичною вагою атомних стабільних конфігурацій. Міжфазні дислокації, дефекти упаковки (розщеплені дислокації), присутні у структурі границі включення – матриця $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$ [8–10; 20], розсіюють електрони, що рухаються через границю, за рахунок пружних та електростатичних спотворень, і це впливає на електронну зонну структуру

цих границь. Електростатичні спотворення пов'язані з тим, що міжфазні дислокації, вакансії, домішкові атоми є електронними дефектами, оскільки поля їх напружень створюють локальні порушення розподілу зарядів, викликаючи неоднорідності у розподілі електронної щільності [22].

Відомо, що дислокації мають електричний заряд, який впливає на взаємодію між ними. В міжфазній границі утворюються угруповання дефектів, що створюють різні за знаком і величиною електричні поля, і це сприяє перерозподілу самих дефектів. Таким чином, рух міжфазних дислокацій у границях включення – матриця $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$ в процесі просковзування має також внутрішню електростимульовану природу.

Рух міжфазних дислокацій у процесі просковзування відбувається у складному середовищі електростатичної взаємодії фаз (включення та матриці) та міжфазних дефектів, що містяться у границях включення – матриця $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$. Безперервні зміни зарядової щільності електронів у

границях, які вивчаються, мабуть, служать стимулювальним фактором просковзування, оскільки порушують локальні рівноваги в системі міжфазної границі включення – матриця $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$ і є стимулом для переміщення міжфазних дислокацій у межах цієї границі. Таким чином, просковзування на границях включення – матриця $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$ – електростимульований динамічний дислокаційний процес.

Розглядаючи механізм просковзування на міжфазних границях $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$, слід враховувати, що між фазою-оболонкою $\phi\text{-}01$ включення і сталеву матрицею розвивається контактне тертя, зумовлене взаємодією їх поверхонь [7; 14; 15]. Контактне тертя проявляється на мікроструктурному рівні і перешкоджає відносному переміщенню фази включення $\phi\text{-}01$ і сталевій матриці, тому воно гальмує вплив на просковзування уздовж міжфазної границі $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$. Розглянуте тертя – це кінематичне сухе тертя ковзання, що описується законом Амонтона [7; 14; 15]. На більш тонкому рівні на міжфазних границях $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$ проявляється внутрішнє тертя, пов'язане з рухом міжфазних та внесених дислокацій уздовж зазначених границь [8; 23].

Дислокації (решіткові, зернограничні, міжфазні) в металі, які становлять одне з головних джерел внутрішнього тертя, створюють релаксаційний спектр за різних температур [23]. За високо-температурної деформації відбувається взаємодія релаксаційних процесів у міжфазних границях $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$, що є складовою механізму просковзування уздовж зазначених границь. Розсіювання енергії релаксаційних коливань пов'язане з опором зазначених границь пробігу міжфазних та внесених дислокацій [23].

Очевидно, в процесі просковзування на границях включення – матриця $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$ виникають напруження, пов'язані з гальмуванням руху дислокацій. Якщо відбувається перебудова дислокаційної структури, можливе динамічне розщеплення цих границь, результатом якого є формування нових зерен та рух нових

границь у зерно [8; 15–19]. У ході просковзування та випромінювання акомодативних решіткових дислокацій поблизу включення може з'явитися дефектний шар із підвищеною щільністю дислокацій. Це повинно викликати зниження швидкості просковзування на границі $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$, оскільки далекодійні поля напружень дефектного шару будуть перешкоджати випромінюванню акомодативних дислокацій.

За високих швидкостей деформації границя включення – матриця може не встигати «засвоювати» дислокації, що потрапляють на неї, в результаті поблизу включення також виникає дефектний шар, що сприяє зменшенню швидкості просковзування, а в системі міжфазних дислокацій відбуваються складні динамічні процеси перебудов.

Просковзування уздовж границь $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$ супроводжується безперервними перебудовами в системі міжфазних дислокацій. Це диктується як процесами електростатичної взаємодії дефектів, також і геометричними умовами, коли дислокації прагнуть перерозподілитися в такий спосіб, щоб області з напруженнями різних знаків розподілилися впорядковано.

Такі динамічні перебудови дефектної структури границі включення – матриця $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$ пов'язані з кооперативним механізмом групових атомних переходів, результатом яких є динамічне розщеплення границь включення – матриця [8; 15–19]. Очевидно, проявляється стимулювальна дія просковзування, що полегшує перерозподіл дислокацій у міжфазних границях $\phi\text{-}01\leftrightarrow\text{м}$ як процесу самоорганізації в системі міжфазних дефектів за умов їх внутрішньої електростимульованої динамічної взаємодії.

Висновки

За високотемпературної деформації сталей проявляється пластична поведінка міжфазних границь включення – матриця для гетерофазних включень типу «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою», пов'язана з розвитком просковзування. Механізм просковзування для включень типу «тугоплавка фаза,

оточена легкоплавкою оболонкою», які містять фази з різним рівнем пластичності, пов'язаний з рухом власних міжфазних дислокацій на ділянках границь включення – матриця (власне просковзування) або внесених дислокацій, а також із контактним тертям і внутрішнім тертям, що виникає в границях за рухом дислокацій.

Активізація просковзування може

відбуватися завдяки перебудовам дефектів, що містяться на міжфазних границях включення – матриця сталі. Відмінність природи фаз-оболонки, а також вплив другої фази включень «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою», сприяють розрізненню пластичності границь включення – матриця сталі за високотемпературної деформації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Miao Z., Long H., Cheng G., Qiu W., Zhong S., Yu D. Agglomeration and Clustering of CaO–Al₂O₃–MgO Leading to Super Large-Size Line-Shape Inclusions in High Carbon Chromium Bearing Steel. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022. Vol. 53, iss. 1. Pp. 512–525.
2. Zhe Rong, Hongbo Liu, Peng Zhang, Feng Wang, Geoff Wang, Baojun Zhao, Fengqiu Tang, Xiaodong Ma. The Formation Mechanisms and Evolution of Multi-Phase Inclusions in Ti–Ca Deoxidized Offshore Structural Steel. *Metals*. 2022. № 12. Pp. 511. URL: <https://doi.org/10.3390/met12030511>; URL: <https://www.mdpi.com/journal/metals>
3. Ahmad H., Zhao B., Lyu S., Huang Z. Formation of Complex Inclusions in Gear Steels for Modification of Manganese Sulphide. *Metals*. 2021. № 11. Pp. 2051. URL: <https://doi.org/10.3390/met11122051>
4. Yan Wang, Li-guang Zhu, Jin-xia Huo. Relationship between crystallographic structure of complex inclusions MgAl₂O₄/Ti₂O₃/MnS and improved toughness of heat-affected zone in shipbuilding steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. (IF1.263). DOI: 10.1007/s42243-021-00725-9
5. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпонитные включения в сталях. Germany-Mauritius, Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2019. 330 с.
6. Губенко С. И., Беспалько В. Н. Виды и структура гетерофазных включений в сталях. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 1 (84). С. 30–35.
7. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.
8. 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.
9. Gubenko S. I. To the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion-matrix of steel. *Metals*. 1994. № 6. Pp.105–112.
10. Губенко С. И. Структура многофазных неметаллических включений в сталях. *Теория и практика металлургии*. 1999. № 1. С. 22–27.
11. Губенко С. И., Исков М. В. Структура и сопротивление разрушению межфазных границ неметаллическое включение – матрица стали. *Теория и практика металлургии*. 2004. № 5. С. 30–38.
12. Gubenko S. I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50, № 10. Pp. 730–739.
13. 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.
14. Belchenko G. I., Gubenko S. I. Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling. *Metals*. 1983. № 4. Pp. 80–84.
15. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium Academic Publishing, 2016. 549 с.
16. Gubenko S. I. Local peaks of parameters and processes at interfaces of non-metallic inclusion – steel matrix. *Steel*. 1999. № 8. Pp. 64–67.
17. Губенко С. И. Природа всплесков микронеоднородной деформации в стали с неметаллическими включениями. *Физико-химическая механика материалов*. 1999. № 2. С. 53–59.
18. Gubenko S. I. 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. *Physics of Metals and Metal Science*. 1996. Vol.82, № 3. Pp.167–175.
19. Губенко С. И. Возможности трансформации неметаллических включений и межфазных границ включение – матрица при высокоэнергетических обработках. *Металлофизика, новейшие технологии*. 2014. Т. 36, № 3. С. 287–315.
20. Gubenko S. I. Team dislocation effects or phase transformations in “nonmetallic inclusion – matrix” boundaries in steel. *Physics of Metals and Metal Science*. 1990. Vol 6. Pp. 184–188.

21. Самсонов Г. В., Прядко И. Ф., Прядко Л. Ф. Конфигурационная модель вещества. Киев : Наукова думка, 1971. 230 с.
22. Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. Москва : Изд-во иностранной литературы, 1962. 584 с.
23. Губенко Светлана. Физическая природа пластичности и упрочнения металлов при деформации. Germany-Mauritius, Beau Bassin : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. 341 с.

REFERENCES

1. Miao Z., Long H., Cheng G., Qiu W., Zhong S. and Yu D. Agglomeration and Clustering of CaO–Al₂O₃–MgO Leading to Super Large-Size Line-Shape Inclusions in High Carbon Chromium Bearing Steel. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022, vol. 53, iss. 1, pp. 512–525.
2. Zhe Rong, Hongbo Liu, Peng Zhang, Feng Wang, Geoff Wang, Baojun Zhao, Fengqiu Tang and Xiaodong Ma. The Formation Mechanisms and Evolution of Multi-Phase Inclusions in Ti–Ca Deoxidized Offshore Structural Steel. *Metals*. 2022, no. 12, pp. 511. URL: <https://doi.org/10.3390/met12030511>; URL: <https://www.mdpi.com/journal/metals>
3. Ahmad H., Zhao B., Lyu S. and Huang Z. Formation of Complex Inclusions in Gear Steels for Modification of Manganese Sulphide. *Metals*. 2021, no. 11, pp. 2051. URL: <https://doi.org/10.3390/met11122051>
4. Yan Wang, Li-guang Zhu and Jin-xia Huo. Relationship between crystallographic structure of complex inclusions MgAl₂O₄/Ti₂O₃/MnS and improved toughness of heat-affected zone in shipbuilding steel. *Journal of Iron and Steel Research International* (IF1.263). DOI: 10.1007/s42243-021-00725-9.
5. Gubenko S. *Geterofaznyke mikrokompozitnyye vklyucheniya v stalyakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany–Mauritius, Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2019, 330 p. (in Russian).
6. Gubenko S.I. and Bepalko 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).
7. 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).
8. 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).
9. 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]. *Metals*. 1994, no. 6, pp. 105–112. (in Russian).
10. Gubenko S.I. *Struktura mnogofaznykh nemetallicheskiy vklyucheniy v stalyakh* [The structure of multiphase nonmetallic inclusions in steels]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy]. 1999, no. 1, pp. 22–27. (in Russian).
11. 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).
12. Gubenko S.I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020, vol. 50, no. 10, pp. 730–739.
13. 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]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2006, no. 4–5, pp. 158–160. (in Russian).
14. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling. *Metals*. 1983, no. 4, pp. 80–84.
15. Gubenko S.I. *Nemetallicheskiye vklyucheniya i plastichnost' staley. Fizicheskiye osnovy plastichnosti 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. *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]. *Steel*. 1999, no. 8, pp. 64–67. (in Russian).
17. Gubenko S.I. *Priroda vspleskov mikroneodnorodnoy deformatsii v stali s nemetallicheskiymi vklyucheniyami* [The nature of bursts of micro-inhomogeneous deformation in steel with non-metallic inclusions]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov* [Physical and Chemical Mechanics of Materials]. 1999, no. 2, pp. 53–59. (in Russian).
18. 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]. *Physics of Metals and Metal Science*. 1996, vol. 82, no. 3, pp. 167–175. (in Russian).

19. Gubenko S.I. *Vozmozhnosti transformatsii nemetallicheskih vkluchenij I mizhphasnih granits vchluchenie-matritsa pri visokoenegheticheskikh obrabotkah* [Possibilities of transformation of non-metallic inclusions and interphase inclusion-matrix boundaries under high-energy treatments]. *Metalliphizika, noveishie tehnologii* [Metal Physics, New Technologies]. 2014, vol. 36, no. 3, pp. 287–315. (in Russian).
20. Gubenko S.I. Team dislocation effects or phase transformations in ‘nonmetallic inclusion – matrix’ boundaries in steel. *Physics of Metals and Metal Science*. 1990, vol. 6, pp. 184–188.
21. Samsonov G.V., Pryadko I.F. and Pryadko L.F. *Konfiguratsionnaya model' veshchestva* [Configuration model of matter]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1971, 230 p. (in Russian).
22. Van Buren. *Defekty v kristallakh* [Defects in crystals]. Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1962, 584 p. (in Russian).
23. Gubenko S.. *Fizicheskaya priroda plastichnosti i uprochneniya metallov pri deformatsii* [Physical nature of the ductility and strengthening of metals during deformation]. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2020, 341 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 12.02.2023.