

УДК УДК 669.15.018.295

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.040723.39.982

ПРО КОНКУРУЮЧІ ПРОЦЕСИ НА ГРАНИЦЯХ ВКЛЮЧЕННЯ – МАТРИЦЯ ЗА ПРОКАТКИ СТАЛЕЙ

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

^{1*} Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук 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 Національної академії наук 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

Анотація. *Ціль дослідження* – вивчення процесів, що визначають взаємодію неметалевих включень та сталевих матриць під час прокатки сталей. *Методика.* Поведінку включень вивчали за гарячої прокатки сталей 08Ю, 08Т, 08кп, НБ-57, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 1 200...900 °С та холодної прокатки зі ступенями деформації 35...75 %. Дослідження гарячого просковзування уздовж границь включення – матриця спостерігали за високотемпературної (900...1 200 °С) деформації розтягуванням у вакуумі на установці ІМАШ-5С зі швидкістю переміщення захватів 1 680 мм/хв. За дослідженням холодного просковзування зразки сталей розтягували у вакуумі за температур 25...900 °С на установці ІМАШ-5С зі швидкістю переміщення захватів 2 000 мм/хв. На поверхні зразків за допомогою приладу ПМТ-3 наносили реперні точки поблизу полюсів включення 0° та 90° по обидва боки від границі включення – матриця. Методики досліджень наведено у роботах [10; 11]. Ідентифікацію включень проводили металографічним (Neophot-31), петрографічним та мікрорентгеноспектральним (МС-46 Cameca) методами. *Результати.* Показано, що за пластичної деформації відбувається взаємодія неметалевих включень і сталевих матриць, яка визначає їх спільну пластичну формозміну і пов'язана з розвитком конкуруючих процесів у міжфазних границях включення – матриця: міжфазне тертя та просковзування (гаряче або холодне в залежності від температури деформації). Визначені механізми цих процесів в залежності від умов деформації та рівня пластичності неметалевих включень і сталевих матриць. *Наукова новизна.* Встановлено особливості міжфазного тертя та гарячого і холодного просковзування уздовж міжфазних границь включення – матриця сталі за різних умов пластичної деформації. Показано, що механізми кожного із зазначених процесів залежать від температурного режиму деформації, рівня пластичності включень та сталевих матриць, а також від будови границь включення – матриця, що визначає можливості руху та взаємодії міжфазних дефектів. Показано, що зазначені процеси визначають рівень пластичності границь включення – матриця і істотно впливають на характер формозміни включень та їх перерозподілу в сталевій матриці в процесі прокатки сталі, що неминує впливає на технологічну пластичність сталей. *Практична значимість.* Використання отриманих результатів дозволить розробити технології отримання сталей з регламентованими видами неметалевих включень, що дозволить суттєво підвищити їх технологічні характеристики, а також запобігти утворенню різноманітних дефектів при обробці сталей тиском.

Ключові слова: *сталь; неметалеві включення; міжфазні границі; міжфазне тертя; просковзування; деформація*

ON COMPETING PROCESSES AT THE INCLUSION – MATRIX BOUNDARIES DURING STEEL ROLLING

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

^{1*} Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Sq. Ac. 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, tel. +38 (067) 630-01-65, 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. Ac. Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

Abstract. Purpose of the work – to study of the processes that determine the interaction of non-metallic inclusions and the steel matrix during steel rolling. **Methods.** The behavior of inclusions was studied during hot rolling of steels 08Yu, 08T, 08kp, NB-57, 08GSYUTF in the temperature range of 1 200...900 °C and cold rolling with degrees of deformation of 35...75 %. The study of hot slipping along the boundaries of the inclusion – matrix was observed during high-temperature (900...1 200 °C) deformation by stretching in a vacuum on the IMASH-5S installation with a gripper movement speed of 1 680 mm/min. According to the study of slipping, steel samples were stretched in a vacuum at temperatures of 25...900 °C on the IMASH-5S installation with a gripper movement speed of 2 000 mm/min. On the surface of the samples, using the PMT-3 device, reference points were applied near the 0° and 90° inclusion poles on both sides of the inclusion – matrix boundary. Research methods are given in works [10; 11]. Identification of inclusions was carried out by metallographic (Neophot-31), petrographic and micro-X-ray spectral (MS-46 Cameca) methods. **Results.** It is shown that during plastic deformation, there is an interaction between non-metallic inclusions and the steel matrix, which determines their joint plastic shape change and is associated with the development of competing processes at the inclusion – matrix interphase boundaries: interphase friction and slipping (hot or cold depending on the deformation temperature). The mechanisms of these processes are determined depending on the deformation conditions and the level of plasticity of non-metallic inclusions and the steel matrix. **Scientific novelty.** The peculiarities of interphase friction and hot and cold slipping along the inclusion – matrix interphase boundaries of steel under different conditions of plastic deformation have been established. It is shown that the mechanisms of each of these processes depend on the temperature regime of deformation, the level of plasticity of the inclusions and the steel matrix, as well as on the structure of the inclusion – matrix boundaries, which determines the possibilities of movement and interaction of interfacial defects. It is shown that the specified processes determine the level of plasticity of the inclusion – matrix boundaries and significantly affect the nature of the change in shape of the inclusions and their redistribution in the steel matrix during steel rolling, which inevitably affects the technological plasticity of steels. **Practical significance.** The use of the results obtained will make it possible to develop technologies for producing steels with regulated types of nonmetallic inclusions, which will significantly increase their technological characteristics, as well as prevent the formation of various kinds of defects during the processing of steels by pressure of products.

Keywords: *steel; non-metallic inclusions; interphase boundaries; interphase friction; interphase slipping; deformation*

Вступ. Неметалеві включення є частинками оксидних, сульфідних, силікатних, нітридних, карбонітридних і т. п. фаз, що утворюються під час виплавки, розливання сталі та кристалізації зливка. Технологічні властивості сталі визначаються, в першу чергу, технологічною пластичністю, тому цікавить вивчення впливу неметалевих включень на зазначені характеристики [1–7]. Аналіз чинників, що визначають вплив включень на технологічну пластичність сталей проведено роботах [8; 9], які багато в чому визначили подальші дослідження цієї проблеми [10]. Одним із важливих факторів, що визначають поведінку включень при прокатці сталей, є характер їх взаємодії з металевою матрицею, що відбувається уздовж міжфазних границь включення-матриця.

Мета. Метою даної роботи було вивчення процесів, що визначають взаємодію неметалевих включень та сталеві матриці під час прокатки сталей.

Матеріали та методики. Поведінку включень вивчали за гарячої прокатки сталей 08Ю, 08Т, 08кп, НБ-57, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 1 200...900 °C та холодної прокатки зі ступенями деформації 35...75 %. Дослідження гарячого просковзування уздовж границь включення – матриця спостерігали за високотемпературної (900...1200 °C) деформації розтягуванням у вакуумі на установці ІМАШ-5С зі швидкістю переміщення захватів 1680 мм/хв., коли відбувається вакуумне травлення, що виявляє рельєф деформації і величину зміщення рисок. За дослідженням холодного просковзування зразки сталей розтягували у вакуумі за температур 25...900 °C на установці ІМАШ-5С зі швидкістю переміщення захватів 2 000 мм/хв. На поверхні зразків за допомогою приладу ПМТ-3 наносили реперні точки поблизу полюсів включення 0° та 90° по обидва боки від границі включення – матриця. Методики досліджень наведено у роботах [10; 11]. Ідентифікацію включень проводили металографічним

(Neophot-31), петрографічним та мікрорентгеноспектральним (МС-46 Cameca) методами.

Результати дослідження та їх обговорення. Механізм деформації включень за обробки тиском має велике значення для їх пластичної поведінки. На включення за обробки тиском діють нормальні стискаючі напруження від тиску деформуючого інструменту, що передаються через металеву матрицю, поздовжні зсувні напруження, що виникають в матриці за її деформації, а також напруження тертя на поверхні розділу включення – матриця [10; 11]. Залежно від способу деформації, змінюється схема напруженого стану поблизу включення. Насамперед це пов'язано із загальними схемами головних деформацій та головних напружень [12]. Пластичність та опір деформації включень залежать від схеми головних деформацій, які визначають характер перерозподілу недеформованих включень у пластичній матриці та зміни форми пластичних включень у процесі деформування (рис. 1, а–в). За прокатки сталі включення перебувають у складно-напруженому стані, постійно змінюється у

процесі деформування [13]. Основними положеннями є наступні: включення є концентраторами напружень і деформацій, також є джерелами дислокацій, гальмують рух дислокацій, сприяють локалізації структурних змін у сталевій матриці [10; 11; 14]. Головним чином включення перерозподіляються з утворенням смуг у напрямку позитивних деформацій.

Уявлення про пластичну формозміну включень необхідно розглядати з позицій фізичної мезомеханіки гетерофазних сплавів [15]. При розгляді пластичної поведінки неметалевих включень у пластичній сталевій матриці принципове значення мають міжфазні границі включення-матриця, які мають різну структуру і багато в чому визначають характер взаємодії включень та сталеві матриці в процесі їхньої спільної пластичної формозміни за обробки тиском [16–19]. Необхідно виділити такі процеси, що відбуваються на міжфазних границях включення – матриця за прокатки сталей, які є конкуруючими з точки зору їх впливу на пластичну формозміну системи включення – матриця: міжфазне тертя та просковзування (гаряче або холодне).

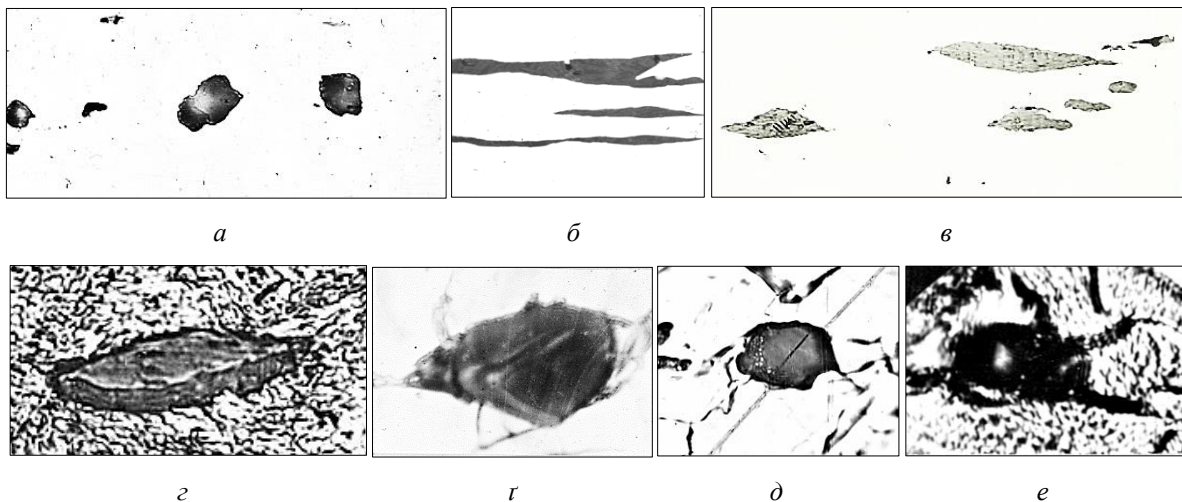


Рис. 1. Неметалеві включення Al_2O_3 , $MnO-Al_2O_3$ (а, д, е), $MnO-SiO_2$ (б, г), $(Fe, Mn)S$ (в, з) у деформованих сталях 08Ю, 08Т, НБ-57. 08кп за температур 25 (е), 1 200...990 (а–в), 900 (з), 100 (г), 1 100 °С (д)

В умовах високих тисків (і температур) взаємодія контактуючих поверхонь включення та сталеві матриці відбувається шляхом встановлення механічного контакту та розвитку дифузійних процесів. Між включенням і матрицею розвивається

контактне тертя, яке з результатом взаємодії їх поверхонь, що перешкоджає їх відносному переміщенню. Розглянуте тертя є кінематичним сухим тертям ковзання. Відповідно до закону Амонтона, сила F тертя ковзання прямо пропорційна силі N

нормального тиску між поверхнями тіл, що труться. Сили тертя на поверхні включення – матриця при обробці сталі тиском мають також складові, які зумовлені типом і будовою міжфазних границь та пов'язані з певною поверхневою енергією, а також з тертям, що виникає при переміщенні (ковзанні) міжфазних дислокацій та дисклінацій [10; 11; 20].

Сили тертя стримують течію сталеві матриці навколо включення і розподілені на границі розділу нерівномірно; вони збільшуються зі зниженням температури, збільшенням обтиснень та розміру включення [10; 11]. Вплив температури виражається через коефіцієнт тертя, значення якого різні для різних температур. Вплив розміру та форми включення проявляються через площу контакту S (міжфазної границі), причому для різних типів включень ця величина у процесі деформації змінюється по-різному. У пластичних включень, що змінюють форму від рівноосної (компактної) до еліпсоїдної, стрижневої або хвилеподібної, величина S в процесі деформації зростає, що тягне за собою збільшення сил тертя. У недеформованих включень в процесі деформації величина S не змінюється; якщо включення руйнується, то величина S зростає, проте її вплив на сили тертя врівноважується зменшенням розмірів включень [10; 11]. Вплив ступеня деформації проявляється через збільшення щільності міжфазних дефектів.

Контактне тертя посилює неоднорідність деформації, оскільки в кожній точці поверхні контакту збуджуються елементарні дотичні сили тертя, що викликає появу додаткових дотичних напружень на міжфазній границі, спрямованих протилежно напрямку ковзання сталеві матриці щодо включення. Це може вплинути не тільки на рівень напруження, що діє на включення, але і на схему локального напруженого стану. У процесі прокатки можливе обертання включень, що обумовлено великими силами

тертя на міжфазних границях. Обертання частинок викликає моментні напруження, що сприяє локальним пластичним поворотам у сталевій матриці і має супроводжуватися вихоровою течією матриці в контакт з включенням.

Очевидно, розглядаючи особливості розвитку пластичної деформації системи включення – матриця слід враховувати також взаємодію їх поверхонь в умовах контактного тертя, що призводить до згладжування шорсткості на міжфазних границях та сприяє прироблюваності пари тертя, що розглядається. Очевидно, для пластичних включень цей процес виражений сильніше, ніж у випадках включень, що не деформуються.

Відомо, що за високих температур (вище $900\text{ }^{\circ}\text{C}$) відбувається просковзування уздовж міжфазних границь включення – матриця (рис. 1, z , t). Цей вид деформації уздовж міжфазних границь полягає у зміщенні включення та сталеві матриці один щодо одного уздовж їх поверхні розділу за рахунок здійснення деформації зсувом уздовж самої границі [16; 21–25]. Інтенсивне просковзування уздовж границь включення – матриця спостерігається за температур $1000\text{...}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Воно проявляється у розширенні міжфазних границь, появі рел'єфу деформації (рис. 1, d) і підтверджується фактом розриву рисок поблизу включень. Просковзування уздовж границь включення – матриця спостерігали як поблизу недеформованих включень корунду, шпінелей, нітриду і карбонітриду титану, так і у разі пластичних сульфідів та силікатів. Визначено величини зміщення рисок для різних типів включень і температур (табл. 1). Встановлено також, що за температур $1000\text{...}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ просковзування спостерігається в інтервалі ступенів деформації відповідно до $25\text{...}45\%$ і ці ступеня деформації виявляються критичними, оскільки при їх досягненні вичерпується запас пластичності міжфазних границь включення – матриця і з'являються порожнини та тріщини поблизу включень.

Таблиця 1

Величина зміщення рисок Δ , мкм для різних типів включень і сталей

Включення (сталь); t, °C	Al ₂ O ₃ (08Ю)	TiCN (08Т)	(Fe, Mn) S (НБ-57)	MnO·SiO ₂ (НБ-57)
1 000	8	7	12	8
1 100	10	9	18	17
1 200	15	14	–	–

Механізмом міжфазного просковзування є рух власних дислокацій границь включення – матриця – це власне просковзування, та внесених дислокацій, причому останні можуть генеруватися джерелом у самій границі або бути внутрішньозеренними дислокаціями, які були захоплені границею та продисоціювали на граничні дислокації – це наведене просковзування [16; 23]. Просковзування уздовж границь включення – матриця – це динамічна контактна взаємодія неметалевих включень і сталеві матриці в процесі їх спільної деформації. Динамічний контакт цих фаз можна пояснити, використовуючи модель конфігураційної локалізації валентних електронів, запропоновану у роботах [16; 26]. Відповідно до цієї теорії, на міжфазній границі зосереджені атоми включення та матриці з найбільш порушеними електронними конфігураціями та зниженою статистичною вагою атомних стабільних конфігурацій. Міжфазні

дислокації, дефекти упаковки (розщеплені дислокації), які присутні в структурі границі включення – матриця [16–18], розсіюють електрони, що рухаються через границю, за рахунок пружних та електростатичних спотворень і це впливає на електронну зонну структуру границі включення-матриця.

Взаємодія міжфазних границь включення – матриця із зазначеними процесами за температур деформації 25...900 °C сприяє, так званому, холодному просковзуванню (рис. 1, e) [10]. Про цей процес свідчить зміщення реперних точок, величина кута обертання (зміщення) залежить від ступеня пластичності включення, а також від температури та ступеня деформації (табл. 2). Чим вище температура, тим він менше, причому цей показник зростає у всіх типів включень зі збільшенням ступеня деформації.

Таблиця 2

Величина кута обертання (град) реперних точок за різних температур і ступенів (ϵ) деформації

Включення, сталь	ϵ , %	Температура деформації, °C		
		25	600	900
TiCN, 08Т	5	12	8	4
	25	21	15	9
MnO·Al ₂ O ₃ , 08Ю	5	2	3	5
	15	19	14	11
(Fe, Mn) S, 08кп	25	25	17	14
	5	12	10	7
MnO·SiO ₂ , 08Ю	15	16	15	10

Зміщення реперних точок свідчить про взаємне зміщення неметалевого включення та сталеві матриці. У той же час на границях включення – матриця немає ознак традиційного високотемпературного

ковзання (просковзування). Процес холодного просковзування уздовж міжфазних границь включення – матриця, очевидно, відбувається в результаті пластичного повороту або обертання

включення в сталевій матриці, що деформується. Пластична деформація сталевій матриці розвивається нерівномірно [10; 11; 27; 28], що сприяє появі зон локалізованої деформації та виникненню градієнтів напружень, а також моментних напружень за будь-якої температури та швидкості деформації. Таким чином, неметалеві включення є центрами формування моментних напружень в сталевій матриці. Ці напруження і викликають пластичний поворот або обертання (прокручування) включення, але в тих випадках, коли через певні умови деформації не встигає проходити їх пластична релаксація поблизу включення. Очевидно, у границях включення-матриця підвищується щільність надлишкових міжфазних дефектів (внесених дислокацій та нерівноважних вакансій), що призводить до збільшення вільного об'єму цих границь [16]. Наявність ділянок ротаційної локалізації поблизу включень сприяє тому, що деформаційні мікровихори «замітають» решіткові дефекти у границі включення – матриця. В результаті у цих границях локалізується енергія деформації,

відбувається зростання спотворень та напружень, що призводить до релаксаційної перебудови їх структури та холодного просковзування.

Висновки

Таким чином, за пластичної деформації взаємодія неметалевих включень і сталевій матриці, що визначає їх спільну пластичну формозміну, пов'язана з розвитком конкуруючих процесів у міжфазних границях включення – матриця: міжфазне тертя та просковзування (гаряче або холодне в залежності від температури деформації). Механізми кожного із зазначених процесів залежать від температурного режиму деформації, рівня пластичності включень та сталевій матриці, а також від будови границь включення – матриця, що визначає можливості руху та взаємодії міжфазних дефектів. Зазначені процеси визначають рівень пластичності границь включення-матриця і істотно впливають на характер формозміни включень та їх перерозподілу в сталевій матриці в процесі прокатки сталі, що неминуче впливає на технологічну пластичність сталей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wang J., Shen Y., Liu Y., Wang F., Jia N. Tailoring Strength and Ductility of a Cr-Containing High Carbon Steel by Cold-Working and Annealing. *Materials*. 2019. № 12. P. 4136.
2. Kusche C. F., Gibson J. S.-L., Wollenweber M. A., Korte-Kerzel S. On the mechanical properties and deformation mechanisms of manganese sulphide inclusions : Mater. Des. 2020. № 193. P. 108801. [CrossRef].
3. Губенко С. И. Природа пластичности гетерофазных включений при обработке сталей давлением. *Сталь*. 2020. № 10. С. 54–63.
4. Gubenko S. I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50, № 10. Pp. 730–739.
5. Новокщенова С. М., Свешникова Г. А., Юнакова И. В., Гулей Г. Г. Влияние неметаллических включений на горячую технологическую пластичность стали и сплавов. В кн.: Сталь и неметаллические включения. Москва : Металлургия, 1978. С. 84–94.
6. Qayyum F., Umar M., Elagin V., Kirschner M., Hoffman F. Influence of Non-Metallic Inclusions on Local Deformation and Damage Behavior of Modified 16MnCrS5 Steel. *Crystals*. 2022. № 12. P. 281. URL: <https://doi.org/10.3390/cryst12020281>
7. Liu N., Cheng G., Zhang L., Yang W. Composition evolution and deformation of different non-metallic inclusions in a bearing steel during hot rolling. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2022. № 4. URL: <https://www.springerprofessional.de>
8. Виноград М. И., Громова Г. П. Включения в легированных сталях и сплавах. Москва : Металлургия, 1972. 216 с.
9. Шпис Х.-И. Поведение неметаллических включений в стали при кристаллизации и деформации. Москва : Металлургия, 1971. 125 с.
10. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016. 549 с.
11. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.
12. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. Москва : Мир, 1972. 408 с.

13. Belchenko G. I., Gubenko S. I. Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgy*. 1983. № 4. Pp. 80–84.
14. André Luiz Vasconcellos da Costa 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*. 2019. № 8. Pp. 2408–2422.
15. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск : Наука, 1985. 229 с.
16. 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.
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. К вопросу о строении межфазных границ неметаллическое включение – матрица в стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1994. № 6. С. 105–112.
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. Природа всплесков микронеоднородной деформации в стали с неметаллическими включениями. *Физико-химическая механика материалов*. 1999. № 2. С. 53–59.
21. Губенко С. И. Роль межфазных границ включение–матрица стали в развитии релаксационных процессов вблизи неметаллических включений. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2020. № 5. С. 3–10.
22. Gubenko S. Role of Inclusion – Matrix Steel Interphase Boundaries in the Development of Relaxation Processes near Nonmetallic Inclusions. *Metal Science and Heat Treatment*. 2020. Vol. 62, № 5. Pp. 299–305.
23. Губенко С. И. Релаксационные процессы вблизи включений и на межфазных границах включение – матрица стали. *Металлы*. 2021. № 3. С. 49–60.
24. Gubenko S. I. Relaxation Processes near Inclusions and at Inclusion/Matrix Interfaces. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021. № 5. Pp. 611–620.
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.
26. Самсонов Г. В., Прядко И. Ф., Прядко Л. Ф. Конфигурационная модель вещества. Київ : Наукова думка, 1971. 230 с.
27. 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.
28. Губенко Светлана. Физическая природа пластичности и упрочнения металлов при деформации. Germany–Mauritius, Beau Bassin : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. 341 с.

REFERENCES

1. Wang J., Shen Y., Liu Y., Wang F. and Jia N. Tailoring Strength and Ductility of a Cr-Containing High Carbon Steel by Cold-Working and Annealing. *Materials*. 2019, no. 12, p. 4136.
2. Kusche C.F., Gibson J.S.-L., Wollenweber M.A. and Korte-Kerzel S. On the mechanical properties and deformation mechanisms of manganese sulphide inclusions : mater. diss. 2020, no. 193, p. 108801. [CrossRef].
3. Gubenko S.I. *Priroda plastichnosti geterofaznykh vklyucheniy pri obrabotke staley davleniyem* [The nature of plasticity of heterophase inclusions during pressure treatment of steels]. *Steel*. 2020, no. 10, pp. 54–63. (in Russian)
4. Gubenko S.I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020, vol. 50, no. 10, pp. 730–739.
5. Novokshchenova S.M., Sveshnikova G.A., Yunakova I.V. and Guley G.G. *Vliyaniye nemetallicheskih vklyucheniy na goryachuyu tekhnologicheskuyu plastichnost' stali i spлавov* [The influence of non-metallic inclusions on the hot technological plasticity of steel and alloys]. In the book : *Steel and non-metallic inclusions*. Moscow : Metallurgy Publ., 1978, pp. 84–94. (in Russian)
6. Qayyum F., Umar M., Elagin V., Kirschner M. and Hoffman F. Influence of Non-Metallic Inclusions on Local Deformation and Damage Behavior of Modified 16MnCrS5 Steel. *Crystals*. 2022, no. 12, p. 281. URL: <https://doi.org/10.3390/cryst12020281>
7. Liu N., Cheng G., Zhang L. and Yang W. Composition evolution and deformation of different non-metallic inclusions in a bearing steel during hot rolling. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2022, no. 4. URL: <https://www.springerprofessional.de>
8. Vinograd M.I. and Gromova G.P. *Vklyucheniya v legirovannykh stalyakh i spлавakh* [Inclusions in alloy steels and alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1972, 216 p. (in Russian)

9. Spies H.-I. *Povedeniye nemetallicheskih vklyucheniy v stali pri kristallizatsii i deformatsii* [Behavior of nonmetallic inclusions in steel during crystallization and deformation]. Moscow : Metallurgy Publ., 1971, 125 p. (in Russian)
10. 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)
11. Gubenko S.I. and Oshkadev S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Kyiv : Naukova Dumka, 2016, 528 p. (in Russian)
12. Honeycombe R. *Plasticheskaya deformatsiya metallov* [Plastic deformation of metals]. Moscow : Mir Publ., 1972, 408 p. (in Russian)
13. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling. *Izvestiya AN SSSR. Metally*. 1983, no. 4, pp. 80–84.
14. 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*. 2019, no. 8, pp. 2408–2422.
15. Panin V.E., Likhachev V.A. and Grinyaev Yu.V. *Strukturnyye urovni deformatsii tverdykh tel* [Structural levels of deformation of solids]. Novosibirsk : Nauka Publ., 1985, 229 p. (in Russian)
16. 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)
17. 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)
18. 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]. *Izvestiya AN SSSR. Metally* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1994, no. 6, pp. 105–112. (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. *Priroda vspleskov mikroneodnorodnoy deformatsii v stali s nemetallicheskiye 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)
21. Gubenko S.I. *Rol' mezhfaznykh granits vklyucheniye-matritsa stali v razvitii relaksatsionnykh protsessov vblizi nemetallicheskih vklyucheniy* [The role of steel inclusion-matrix interfaces in the development of relaxation processes near non-metallic inclusions]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2020, no. 5, pp. 3–10. (in Russian)
22. Gubenko S.I. Role of Inclusion – Matrix Steel Interphase Boundaries in the Development of Relaxation Processes near Nonmetallic Inclusions. *Metal Science and Heat Treatment*. 2020, vol. 62, no. 5, pp. 299–305.
23. Gubenko S.I. *Relaksatsionnyye protsessy vblizi vklyucheniy i na mezhfaznykh granitsakh vklyucheniye – matritsa stali* [Relaxation processes near inclusions and at inclusion – matrix interfaces of steel]. *Metally* [Metals]. 2021, no. 3, pp. 49–60. (in Russian)
24. Gubenko S.I. Relaxation Processes near Inclusions and at Inclusion/Matrix Interfaces. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021, no. 5, pp. 611–620.
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 metallovedeniye* [Physics of Metals and Metal Science]. 1996, vol. 82, no. 3, pp. 167–175. (in Russian)
26. Samsonov G.V., Pryadko I.F. and Pryadko L.F. *Konfiguratsionnaya model' veshchestva* [Configuration model of matter]. Kyiv : Naukova Dumka, 1971, 230 p. (in Russian)
27. Gubenko S.I. and Parusov E.V. *Plastichnost' spлавov 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)
28. 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)

Надійшла до редакції: 13.04.2023.