

УДК 621.774.35

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.270922.13.900

## ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ ТРІЩИН У ГЕТЕРОФАЗНИХ ВКЛЮЧЕННЯХ ТИПУ «ДИСПЕРСНІ ФАЗИ В НЕМЕТАЛЕВІЙ МАТРИЦІ»

ГУБЕНКО С. І.<sup>1,2\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,ПАРУСОВ Е. В.<sup>3</sup>, *докт. техн. наук, с. н. с.*,ЧУЙКО І. М.<sup>4</sup>, *канд. техн. наук*

<sup>1\*</sup> 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](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

<sup>2\*</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

<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: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>4</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: [ferroslav@ukr.net](mailto:ferroslav@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

**Анотація. Мета.** Вивчення особливостей зародження тріщин у гетерофазних включеннях типу «дисперсні фази в неметалевій матриці» за умов пластичної деформації сталей. **Методика.** Дослідження проводили після деформації зразків зі сталей 08Т, 08Ю, 12ГС, 08кп, 09Г2С, НБ-57, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 20...1 200 °С на установках Инстрон-1195 и ИМАШ-5С зі спеціальними захватами, зі швидкістю переміщення захватів 1 680 мм/хв. Застосовували методи дослідження: петрографія, мікрорентгеноспектральний аналіз (Сamesa MS-4, Nanolab-7), оптична мікроскопія (Neophot-21). **Результати.** Показано, що різноманітність фаз, які становлять гетерофазні включення «дисперсні фази в неметалевій матриці», викликають їх різну поведінку за умов пластичної деформації. У той же час, зародження крихких або в'язких мікротріщин відбувається уздовж внутрішніх міжфазних границь між «неметалевою» матрицею та дисперсними частинками другої фази. Виявлено характер тріщин поблизу включень, який визначається рівнем пластичності «матричної» та дисперсної фаз включень, а також температурою деформації. Визначено критичні ступені деформації зразків, за досягнення яких виникали помітні мікротріщини уздовж внутрішніх міжфазних границь, залежать від температури та природи фаз включень «дисперсні фази в неметалевій матриці». **Наукова новизна.** Встановлено особливості зародження мікротріщин, пов'язаних із гетерофазними включеннями типу «дисперсні фази в неметалевій матриці», які мають різне поєднання крихких та пластичних фаз при деформації сталей. Встановлені типи мікротріщин, що виникають у включеннях типу «дисперсні фази в неметалевій матриці», та місця їх утворення. Показано, що значення критичних ступенів деформації визначають рівень когезивної міцності внутрішніх міжфазних границь у гетерофазних включеннях «дисперсні фази в неметалевій матриці» за різних температур 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 у процесі обробки сталей тиском та експлуатації виробів.

**Ключові слова:** сталь; неметалеві включення; тріщини; фази; міжфазні границі

## FEATURES OF THE CRACKS' FORMATION IN HETEROPHASE INCLUSIONS OF THE "DISPERSED PHASES IN A NON-METALLIC MATRIX" TYPE

GUBENKO S.I.<sup>1,2\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,PARUSOV E.V.<sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher*,CHUIKO I.M.<sup>4</sup>, *Ph. D.*

<sup>1\*</sup> 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](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

<sup>2\*</sup> Department of Metal Science and Treatment of Metals, Prydniprovsk State Academia of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (067) 630-01-65, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

<sup>3</sup> 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](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>4</sup> Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Sq. Ac. Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: [ferroslav@ukr.net](mailto:ferroslav@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

**Abstract.** *The purpose of the article* - to study of crack nucleation features in heterophase inclusions of the “dispersed phases in a non-metallic matrix” type under the conditions of steels’ plastic deformation. **Methods.** The research was conducted after deformation for a number of different grades steel samples in the temperature range of 20...1 200 °C on Instron-1195 and IMASH-5C with special grippers, with a gripper movement speed of 1 680 mm/min. Research methods were used: petrography, micro-X-ray spectral analysis (Cameca MS-4, Nanolab-7), optical microscopy (Neophot-21). **Results.** It is shown that the variety of phases composing the heterophase inclusions “dispersed phases in non-metallic matrix” leads to their different behaviour under plastic deformation conditions. At the same time, the nucleation of brittle or viscous microcracks occurs along the internal interphase boundaries between the “non-metallic” matrix and the dispersed particles of the second phase. The cracks’ character near the inclusions determined by the plasticity level of “matri” and dispersed phases of inclusions and the deformation temperature are revealed. The determined critical degrees of samples’ deformation, upon reaching which appreciable microcracks along the internal interphase boundaries occurred, were depend on temperature and the nature of the “dispersed phases in a non-metallic matrix” inclusions. **Scientific novelty.** The features of microcracks nucleation associated with heterophase inclusions of the “dispersed phases in non-metallic matrix” type with different combination of brittle and plastic phases during steels’ deformation are determined. The types of microcracks occurring in inclusions of the “dispersed phases in the non-metallic matrix” type and the locations of their formation have been determined. It is shown that the values of the deformation critical degrees determine the level of cohesive strength for internal interphase boundaries in heterophase inclusions “dispersed phases in a non-metallic matrix” at different deformation temperatures. **Practical value.** The use of the obtained results will make it possible to develop technologies for producing steels with regulated types of non-metallic heterophase inclusions that will allow to increase significantly their technological and operational characteristics, and also to prevent the formation of various defects in the steels' treatment by pressure and the operation of products.

**Keywords:** *steel; non-metallic inclusions; cracks; phases; interphase boundaries*

### Вступ

Відомо, що сталі містять різні типи гетерофазних включень, частка яких може становити до 10...30 % від загального вмісту неметалевих включень [1–6]. Ці включення містять фази, що мають різну пластичність [4; 7–9], вони мають неоднорідну будову міжфазних границь зі сталеву матрицею [10–12]. Все це створює неоднорідності та концентрації напружень в структурі сталей та сприяє зародженню руйнування поблизу включень [13–19], суттєво знижує механічні, технологічні та експлуатаційні властивості сталей та виробів із них [20–24].

Вплив неметалевих включень, у тому числі гетерофазних, на руйнування сталей вивчали у працях [4; 6; 10; 19], де показано вплив типу включення на зазначені процеси.

### Мета роботи

Вивчення особливостей зародження тріщин у гетерофазних включеннях типу

«дисперсні фази в неметалевій матриці» за умов пластичної деформації сталей.

### Матеріали та методики

Дослідження проводили після деформації зразків зі сталей 08Т, 08Ю, 12ГС, 08кп, 09Г2С, НБ-57, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 20...1 200 °C на установках Инстрон-1195 и ИМАШ-5С зі спеціальними захватами, зі швидкістю переміщення захватів 1 680 мм/хв [6; 19]. Застосовували методи дослідження: петрографія [4; 6; 19], мікрорентгено-спектральний аналіз (Cameca MS-4, Nanolab-7), оптична мікроскопія (Neophot-21).

### Результати

Для включень «дисперсні фази в неметалевій матриці» характерна наявність дисперсних частинок надлишкової другої фази (оксидної, нітридної, карбонітридної,

силікатної і т. д.)  $d_2$ , які присутні в «неметалевій» матриці (сульфідній, оксидній, силікатній і т. д.)  $f-m_1$ . Такі включення – це своєрідні мікрокомпозитні формування в сталі (за типом дисперсного композиту), в них є розвинена мережа замкнутих міжфазних границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$ , які можуть бути когерентними або некогерентними залежно від умов утворення та зростання фази  $d_2$ , а також від характеру сполучення кристалічних решіток «неметалевої» матриці  $f-m_1$  та дисперсної фази  $d_2$ .

Як правило, частинки фази  $d_2$  недеформівні, проте зустрічаються також слабо пластичні ( $FeO$ ,  $FeO \cdot TiO_2$ ), або пластичні за різних температур частинки ( $FeS$ ,  $(Mn, Fe)S$ ,  $MnO \cdot SiO_2$ ). Що стосується «неметалевої» матриці включення  $f-m_1$ , частіше вона виявляє пластичну поведінку за різних і особливо високих температур (сульфідна, силікатна), проте це може бути і фаза, що не деформується (оксидна, карбонітридна).

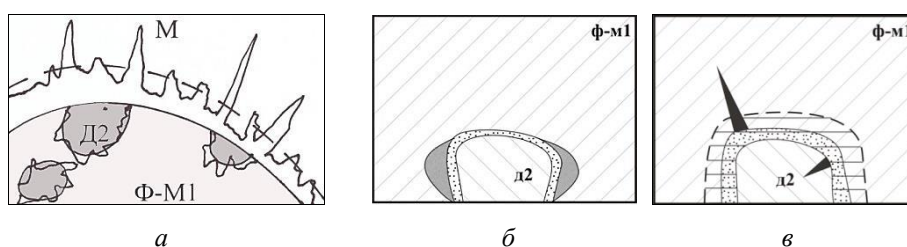


Рис. 1. Схеми утворення напружень (а) і тріщин (б – в'язкі тріщини, в – крихкі тріщини) у включеннях «дисперсні фази в неметалевій матриці»

Таким чином, незалежно від рівня пластичності матричної фази  $f-m_1$  частинки фази  $d_2$  сприяють формуванню полів напружень у включеннях (рис. 1, а). Вплив цих напружень на утворення тріщин уздовж міжфазних границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$  визначається рівнем когезивної міцності цих границь, а також температурою деформації. У випадках недеформованих фаз включення  $f-m_1$  і  $d_2$ , у границях  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$  виникають значні напруження, які є розклинювальними, що спричинює їх крихке руйнування.

За наявності пластичної матричної фази  $f-m_1$  або пластичної поведінки обох фаз зсувні напруження поблизу границі  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$  сприяють відокремленню фаз

Як правило, у включеннях спостерігали утворення тріщин уздовж міжфазних границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$ , при цьому їх тип та умови зародження залежали від природи фаз включення. Досліджувані включення – це системи, котрим властивий розвиток дисперсійного зміцнення в процесі деформації, що зумовлено гальмуванням дислокацій частинками фази  $d_2$  і виникненням поблизу частинок полів напружень у разі пластичної поведінки матричної фази  $f-m_1$ .

Якщо матрична фаза  $f-m_1$  непластична чи слабо пластична, поблизу частинок  $d_2$  з'являються значні концентрації напружень. За наявності пластичної фази  $d_2$  через різну пластичність фаз включення також виникають значні концентрації напружень поблизу дисперсних частинок  $d_2$ . Очевидно, форма частинок  $d_2$  також впливає на рівень напружень у досліджуваних включеннях: більш небезпечні є пластинчасті та гострокутні частинки  $d_2$ .

включення, утворенню дислокацій орієнтаційної невідповідності та зародженню мікротріщин. Очевидно, пластична поведінка матричної фази  $f-m_1$  за різних температур, а також просковзування уздовж границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$  за високих температур деформації [6; 8] викликає часткову релаксацію напружень поблизу частинок фази  $d_2$  і уздовж границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$ .

Наявність мережі замкнутих границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$  має сприяти стисненості просковзування внаслідок його розвитку «по колу» в умовах динамічної контактної взаємодії фаз включення за їх спільної деформації, а також виникненню моментних напружень, що здатні викликати поворот

дисперсних частинок  $d_2$  у «матричній» фазі. Очевидно, моментні напруження, особливо за наявності гострокутних частинок  $d_2$ , спричинюють утворення тріщин. Величина критичного розміру мікротріщини залежить від когезивної міцності міжфазної границі  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$ , а розкриття тріщини в міжфазній границі має супроводжуватися релаксаційними процесами, що пов'язані з її трансформацією в процесі розвитку деформації.

У включеннях із матричною фазою  $f-m_1$ , що не деформується, за температур деформації 25...1 200 °С спостерігали появу крихких мікротріщин на границях  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$ , а також поблизу частинок фази  $d_2$  (рис. 2, а, б). Зі збільшенням ступеня деформації мікротріщини зростали у довжину та ширину, об'єднувалися в магістральну для включення тріщину, оскільки вона виходила на границю включення–матриця. У разі слабо пластичної матричної фази  $f-m_1$  та недеформованої фази  $d_2$  за температур 25...900 °С на границях  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$ , а також поблизу частинок фази  $d_2$  виникали крихкі тріщини (рис. 2, в). За більш високих температур пластичність матричної фази  $f-m_1$  зростала і спостерігали формування

в'язких тріщин на границях  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$  (рис. 2, з).

Силікатна матрична фаза  $f-m_1$  за температур 25...600 °С непластична, тому у включеннях спостерігали крихкі тріщини на міжфазних границях  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$  (рис. 2, г), а також поблизу частинок  $d_2$ , що не деформуються. За температур вище 600 °С силікатна матриця включень пластична, проте у зв'язку зі стисненням деформації уздовж границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$  і поблизу цих границь з'являються крихкі тріщини (рис. 2, д). Завдяки просковзуванню уздовж границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$ , що починається за температури 950 °С, уздовж цих границь виникали в'язкі тріщини (рис. 2, е).

У включеннях із сульфідною матричною фазою  $f-m_1$  і фазою  $d_2$ , що не деформується, за температур 25...500 °С спостерігали появу крихких тріщин уздовж міжфазних границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$  і поблизу частинок  $d_2$  (рис. 2, є). Слід зазначити, що сульфідна фаза має досить високий рівень пластичності за усіх температур деформації і при зародженні тріщин поблизу частинок  $d_2$  слід очікувати появи в'язких тріщин. Але, очевидно, наявність дисперсних частинок  $d_2$  вплинула на сульфідну фазу, що викликало утрудненість її пластичної деформації.

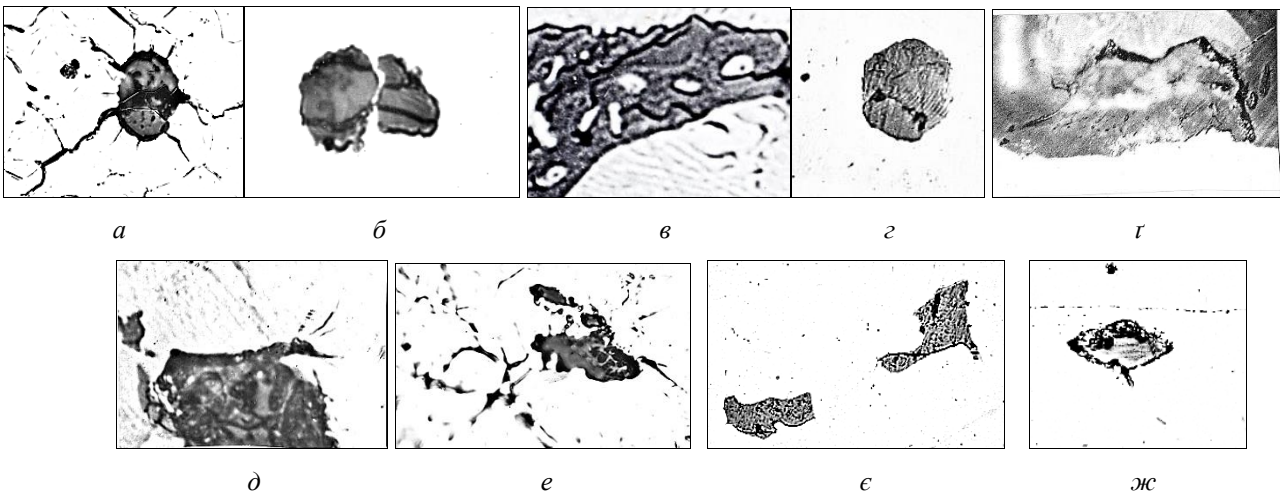


Рис. 2. Тріщини у гетерофазних включеннях «дисперсні фази в неметалевій матриці» після деформації за температур 25 (г, є), 600 (в, д), 900 (а), 1 200 °С (б, з, е, ж): а –  $(Mn, Mg)O \cdot Al_2O_3 + Al_2O_3$ , б –  $TiCN + TiN$ , в, з –  $FeO \cdot TiO_2 + TiCN$ , г – е –  $FeO \cdot SiO_2 + FeO \cdot Al_2O_3$ , є –  $(Mn, Fe)S + (Mn, Mg)O \cdot Al_2O_3$ , ж –  $(Mn, Fe)S + FeS$ ;  $\times 900$

У разі підвищення температури деформації до 600 °С і вище пластичність сульфідної матриці включень зростала, за

температури 850 °С і вище розвивалося просковзування уздовж границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$ , що зумовило появу уздовж цих границь, а

також поблизу частинок  $d_2$  в'язких тріщин. Присутність пластичної фази  $d_2$  в сульфідній матриці  $f-m_1$  включень викликала формування в'язких тріщин уздовж міжфазних границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$  за різних температур деформації (рис. 2, ж), що пов'язано з різним рівнем пластичності сульфідних фаз цих включень. За досягнення температури плавлення сульфідних або силікатних матричних фаз  $f-m_1$  включень з'являються порожнини, заповнені розплавом, в яких переміщуються більш тугоплавкі частинки  $d_2$ . Вплив цих процесів на руйнування сталей розглянуто у працях [6; 9].

Таким чином, характер руйнування міжфазних границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$  у включеннях «дисперсні фази в неметалевій матриці» залежить від ступеня пластичності матричної фази  $f-m_1$ , яка визначається температурою деформації, а також від ймовірності пластичної поведінки цих границь. Крім того, має проявлятися вплив форми, розмірів, ступеня пластичності дисперсної фази  $d_2$ , що визначають характер полів напружень у досліджуваних включеннях та стримують пластичну деформацію матричної фази.

Важливими факторами є також тип і будова міжфазних границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$ , які визначаються умовами їх формування в момент виділення надлишкових фаз  $d_2$  [10; 12]. У досліджуваних включеннях за різних температур спостерігали зародження як крихких тріщин уздовж міжфазних

границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$ , так і в'язких тріщин при пластичній поведінці матричної фази або обох фаз  $f-m_1$  і  $d_2$ , а також у разі реалізації просковзування уздовж цих границь, що вивчається за високих температур.

Очевидно, характер руйнування міжфазних границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$  визначається рівнем їх пластичності та когезивної міцності. Прояв кількох механізмів зародження мікроруйнувань, пов'язаних із міжфазними границями  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$ , зумовлений різним поєднанням фаз, що становлять включення досліджуваного типу і мають різний рівень пластичності, а також із наявністю мережі замкнутих міжфазних границь, характер будови яких визначається умовами їх формування при виділенні надлишкових фаз у включеннях (рис. 1, б, в).

Визначали критичні ступені деформації зразків розтягуванням  $\epsilon_{кр}$ , за досягнення яких виникали помітні мікротріщини уздовж міжфазних границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$ . Очевидно, величина  $\epsilon_{кр}$  істотно залежить від температури деформації, що визначає рівень пластичності, у першу чергу, матричної фази включення  $f-m_1$ , а також дисперсної фази  $d_2$  і границь  $f-m_1 \leftrightarrow d_2$ , пов'язаний з можливістю просковзування (табл.). Що вища температура деформації і ступінь пластичності матричної фази  $f-m_1$ , то більше величина  $\epsilon_{кр}$  для усіх вивчених включень.

Таблиця

**Вплив температури на критичний ступінь деформації ( $\epsilon_{кр}$ , %), за досягнення якого руйнуються міжфазні границі у включеннях**

Включення, сталь	Температура деформації, °C					
	25	600	900	1 100	1 200	1 250
$(Mn, Mg)O \cdot Al_2O_3 + Al_2O_3$ , 08Ю	3,6	4,2	5,7	6,2	8,2	10,2
TiCN + TiN, 08Т	3,9	4,1	5,5	5,9	7,6	9,9
$FeO \cdot TiO_2 + TiCN$ , 08Т	8,4	9,3	13,2	14,8	16,4	18,6
$FeO \cdot SiO_2 + FeO \cdot Al_2O_3$ , 08Ю	4,3	8,2	15,2	17,3	21,1	оплав
$(Mn, Fe)S + (Mn, Mg)O \cdot Al_2O_3$ , 08ГСЮТФ	10,3	12,4	19,5	25,4	оплав	оплав
$(Mn, Fe)S + FeS$ , 08кп	14,2	16,3	21,6	28,7	оплав	оплав

Мікроруйнування в гетерофазних включеннях «дисперсні фази в неметалевій матриці» у ході розвитку пластичної

деформації розвиваються за три стадії. Перша стадія включає локалізацію деформації і зародження крихких або

в'язких тріщин шляхом розшарування уздовж міжфазних границь ф-м1↔д2, або поблизу частинок д2. На другій стадії відбувається зростання тріщин уздовж міжфазних границь ф-м1↔д2 та поблизу частинок д2 у межах включень. На третій стадії відбувається поширення мікроруйнувань у сталеву матрицю.

### Висновки

Результати досліджень показали, що різноманітність фаз, які становлять гетерофазні включення «дисперсні фази в неметалевій матриці», зумовлює їх різну поведінку за пластичної деформації. У той же час, зародження крихких або в'язких мікротріщин відбувається уздовж внутрішніх міжфазних границь між

«неметалевою» матрицею та дисперсними частинками другої фази.

Характер тріщин визначається рівнем пластичності «матричної» та дисперсної фаз включень, а також температурою деформації.

Критичні ступені деформації зразків, за досягнення яких виникали помітні мікротріщини уздовж внутрішніх міжфазних границь, залежать від температури та природи фаз включень «дисперсні фази в неметалевій матриці».

Значення критичних ступенів деформації визначають рівень когезивної міцності внутрішніх міжфазних границь в гетерофазних включеннях «дисперсні фази у неметалевій матриці».

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Miao Z., Long H., Cheng G., Qiu W., Zhong S., Yu D. Agglomeration and Clustering of CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO Leading to Super Large-Size Line-Shape Inclusions in High Carbon Chromium Bearing Steel. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022. № 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. 511 p. URL: <https://doi.org/10.3390/met12030511>; <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. 2051 p. URL: <https://doi.org/10.3390/met11122051>
4. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпозиционные включения в сталях. Germany–Mauritius. Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2019. 330 с.
5. Yan Wang, Li-guang Zhu, Jin-xia Huo. Relationship between crystallographic structure of complex inclusions MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MnS and improved toughness of heat-affected zone in shipbuilding steel. *Journal of Iron and Steel Research International* (IF1.263). URL: <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00725-9>
6. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.
7. Gubenko S. I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50, № 10. Pp. 730–739.
8. Belchenko G. I., Gubenko S. I. Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling. *Izvestiya AN SSSR. Metally*. 1983. No. 4. Pp. 80–84.
9. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016. 549 с.
10. 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.
11. Губенко С. И. К вопросу о строении межфазных границ неметаллическое включение-матрица в стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1994. № 6. С. 105–112.
12. Губенко С. И. Структура многофазных неметаллических включений в сталях. *Теория и практика металлургии*. 1999. № 1. С. 22–27.
13. Губенко С. И. Локальные пики параметров и процессов на границах неметаллическое включение-матрица стали. *Сталь*. 1999. № 8. С. 64–67.
14. Gubenko S. I., Parusov E. V., Parusov O. V. The role of inclusion-matrix boundaries in steels fracture processes. *Chernye Metally*. 2021. № 6. Pp. 42–47.
15. 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.
16. Gubenko S. I. Relaxation Processes near Inclusions and at Inclusion/Matrix Interfaces. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021. № 5. Pp. 611–620.

17. 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.
18. 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, № 5. Pp. 299–305.
19. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений. Днепропетровск : НМетАУ, ИЦ Системные технологии, 2014. 301 с.
20. Gubenko S. I. Influence of Nonmetallic Inclusions and Corrosion Products on the Wear Resistance of Railroad Wheels. *Steel in Translation*. 2019. Vol. 49, № 6. Pp. 427–431.
21. Губенко С. И., Иванов И. А., Кононов Д. П. Влияние качества стали на усталостную прочность цельнокатаных колес. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2018. Т. 84, № 3. С. 52–60.
22. Губенко С. И., Парусов Е. В., Чуйко І. М. Зародження тріщин уздовж міжфазних границь гетерофазних включень типу «фази поруч». *Металознавство та термічна обробка металів*. 2022. № 1 (96). С. 24–31.
23. Иванов И. А., Губенко С. И., Кононов Д. П. Поверхность деталей машин и механизмов. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 156 с.
24. Валинский О. С., Воробьев А. А., Губенко С. И., Иванов И. А. Повышение работоспособности колесных пар подвижного состава. Казань : Изд-во ООО «Бук», 2022. 324 с.

## REFERENCES

1. Miao Z., Long H., Cheng G., Qiu W., Zhong S. and Yu D. Agglomeration and Clustering of CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–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, 511 p. URL: <https://doi.org/10.3390/met12030511>; <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, 2051 p. URL: <https://doi.org/10.3390/met11122051>
4. Gubenko S. *Geterofaznyke mikrokompozitnyye vklyucheniya v stalyakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany–Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2019, 330 p. (in Russian).
5. Yan Wang, Li-guang Zhu and Jin-xia Huo. Relationship between crystallographic structure of complex inclusions MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MnS and improved toughness of heat-affected zone in shipbuilding steel. *Journal of Iron and Steel Research International* (IF1.263). URL: <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00725-9>
6. Gubenko S.I. and Oshkadevov S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 2016, 528 p. (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. 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.
9. 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).
10. 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).
11. 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. Metally* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1994, no. 6, pp. 105–112. (in Russian).
12. 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).
13. 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).
14. Gubenko S.I., Parusov E.V. and Parusov O.V. The role of inclusion-matrix boundaries in steels fracture processes. *Chernye Metally*. 2021, no. 6, pp. 42–47.
15. 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).



16. Gubenko S.I. Relaxation Processes near Inclusions and at Inclusion/Matrix Interfaces. Russian Metallurgy (Metally). 2021, no. 5, pp. 611–620.
17. Gubenko S.I. Team dislocation effects or phase transformations in ‘nonmetallic inclusion–matrix’ boundaries in steel. Physics of Metals and Metal Science. 1990, no. 6, pp. 184–188.
18. 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.
19. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskih vklyucheniye* [Physics of steel fracture near non-metallic inclusions]. Dnipropetrovsk : NMetAU, Information Technology Systems Technologies, 2014, 301 p. (in Russian).
20. Gubenko S.I. Influence of Nonmetallic Inclusions and Corrosion Products on the Wear Resistance of Railroad Wheels. Steel in Translation. 2019, vol. 49, no. 6, pp. 427–431.
21. Gubenko S.I., Ivanov I.A. and Kononov D.P. *Vliyaniye kachestva stali na ustalostnuyu prochnost' tsel'nokatanykh koles* [Influence of the quality of steel on the fatigue strength of solid-rolled wheels]. *Zavodskaya laboratory. Diagnostics of materials* [Factory Laboratory. Material Diagnostics]. 2018, vol. 84, no. 3, pp. 52–60. (in Russian).
22. Gubenko S.I., Parusov E.V. and Chuyko I.M. *Zarodzhennyya trishchyn uzdovzh mizhfaznykh hranyts' heterofaznykh vklyuchen' typu "fazy poruch"* [The nucleation of cracks along the interphase boundaries of heterophase inclusions of the "phases next to each other" type]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2022, no. 1 (96), pp. 24–31 (in Ukrainian).
23. Ivanov I.A., Gubenko S.I. and Kononov D.P. *Poverkhnost' detaley mashin i mekhanizmov* [The surface of machine parts and mechanisms]. Saint-Petersburg : Lan' Publ., 2021, 156 p. (in Russian).
24. Valinsky O.S., Vorobyov A.A., Gubenko S.I. and Ivanov I.A. *Povysheniye rabotosposobnosti kolesnykh par podvizhnogo sostava* [Improving the performance of rolling stock wheelsets ]. Kazan' : Publishing House of Buk LLC, 2022, 324 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 23.07.2022.