

УДК 621.774.35

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240422.24.839

## ЗАРОДЖЕННЯ ТРІЩИН УЗДОВЖ МІЖФАЗНИХ ГРАНИЦЬ ГЕТЕРОФАЗНИХ ВКЛЮЧЕНЬ ТИПУ «ФАЗИ ПОРУЧ»

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

<sup>1\*</sup> 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](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

<sup>2\*</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 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 НАН 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 НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: [ferrosplav@ukr.net](mailto:ferrosplav@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

**Анотація.** *Мета дослідження* – вивчення особливостей зародження тріщин в гетерофазних включеннях типу «фази поруч» при деформації сталей. *Методика.* Руйнування гетерофазних включень різних типів досліджували за деформацією зразків зі сталей 08Т, 08Ю, 12ГС, 08кп, 09Г2С, НБ-57, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 20...1 200 °С. Зразки сталей 08Т і 08Ю піддавали розтягу, стиску та згину, сталі НБ-57 – розтягу та стиску, сталей 08кп, 08Х, АЦ45Х, АЦ18ХГТ, ШХ15 – розтягу у вакуумі за температур 20...1 200 °С на установках Інстрон-1195 та ИМАШ-5С зі спеціальними захватами, швидкість переміщення яких становила 20 мм/хв. Застосовували такі методи дослідження: петрографія, мікрорентгеноспектральний аналіз та оптична мікроскопія (Неофот-21). *Результати.* З'ясовано, що різноманітність фаз, що становлять гетерофазні включення типу «фази поруч», викликає їх різну поведінку під час пластичної деформації, проте зародження мікротріщин відбувається уздовж внутрішніх міжфазних границь. Показано, що залежно від рівня пластичності фаз, які становлять включення, ці тріщини можуть бути крихкими або в'язкими, що також пов'язано із впливом температури деформації. Проаналізовано особливості зародження мікротріщин для різних поєднань пластичних і недеформованих фаз гетерофазних включень типу «фази поруч». Обговорюється взаємодія гетерофазних включень типу «фази поруч» та сталеві матриці під час деформації. *Наукова новизна.* Встановлено особливості зародження мікротріщин, пов'язаних із гетерофазними включеннями типу «фази поруч», що мають різне поєднання крихких та пластичних фаз за деформації сталей у широкому інтервалі температур. З'ясовано, що зародження та поширення мікротріщин у границях включень типу «фази поруч» відбувається як у фазах, так і уздовж внутрішніх міжфазних границь. Показано, що критичні ступені деформації зразків, за досягнення яких виникали помітні мікротріщини уздовж внутрішніх міжфазних границь, залежать від температури та природи фаз включень. Критичні ступені деформації зразків, за досягнення яких виникали помітні мікротріщини уздовж внутрішніх міжфазних границь, залежать від температури та природи фаз включень «фази поруч». Показники критичних ступенів деформації визначають рівень когезивної міцності внутрішніх міжфазних границь гетерофазних включень «фази поруч». *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*

## CRACK INITIATION ALONG THE INTERPHASE BOUNDARIES OF THE “PHASE SIDE BY SIDE” TYPE HETEROPHASE INCLUSIONS

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

<sup>1\*</sup> Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences Ukraine, 1, Ak. Starodubova K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (067) 630-01-65, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

<sup>2\*</sup> Prydniprovsk State Academia of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho 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 named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K.F. Sq., 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 named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: [ferrosplav@ukr.net](mailto:ferrosplav@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

**Abstract. Purpose of research.** Investigation into crack initiation features in heterophase inclusions of the “phase side by side” type during steel deformation. **Methods.** Destruction of various types heterophase inclusions is investigated during the deformation of samples from steels 08Ti, 08Al, 12MnSi, 08unk, 09Mn2Si, 08GSiAlTiV in the temperature range 20...1 200 °C. Samples of 08Ti and 08Al steels are subjected to tension, compression and bending, steel HB-57 – to tension and compression, steel 08unk, 08Cr, ATs45X ,ATs18XGT – to tension in vacuum at temperatures of 20...1 200 °C on experimental settings with special grips, which motion speed was 20 mm/min. Methods of investigation – petrography, X-ray microanalysis and optical microscopy were used. **Results.** It has been found that the diversity of phases composing the heterophase inclusions of the “phase side by side” type leads to their different behaviour under plastic deformation. The microcracks initiation occurs along the internal interphase boundaries. Depending on the plasticity level of the phases composing the inclusion, these cracks can be brittle or ductile, which is also related to the effects of the deformation temperature. The features of microcracks initiation for different combinations of heterophase inclusions plastic and non-deformed phases of the “phase side by side” type are analysed. The interaction between heterophase inclusions of the “phase side by side” type and the steel matrix during deformation is discussed. **Scientific novelty.** The features of microcrack initiation related to heterophase inclusions of “phase side by side” type with different combination of brittle and plastic phases during steels deformation in a wide temperature range is determined. It was found that the microcracks initiation and spreading within inclusions “phase side by side” type occurs both in phases and along internal interphase boundaries. It is shown that the critical degrees of samples deformation, at which significant microcracks along the internal interphase boundaries occur, depend on the temperature and the inclusion phase. The critical degrees of samples deformation, upon reaching which significant microcracks occurred along the internal interphase boundaries, depended on the temperature and the nature of the “phase side by side” inclusions. The values of the critical degrees of deformation determine the level of cohesive strength of the internal interphase boundaries of the heterophase inclusions “phase side by side”. **Practical significance.** The use of obtained results will make it possible to develop technologies for producing steels with regulated types of heterophase non-metallic inclusions. This will substantially improve their technological and performance characteristics and prevent the various defects formation in the steel pressure treatment and the products operation.

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

## Вступ

Одна з важливих проблем, що стоять перед дослідниками, які займаються отриманням якісних сталевих виробів, – це неметалеві включення, які негативно впливають на технологічні, механічні та експлуатаційні властивості сталей [1–14]. Цей вплив пов'язаний з тим, що включення (оксиди, сульфід, силікати, нітриди та ін.) являють собою концентратори напружень та деформацій у сталях і спричинюють утворення та розвиток мікротріщин [1; 4; 15; 16]. Роль неметалевих включень у руйнуванні сталей вивчалась у працях різних авторів [1–14; 17].

Однак слід враховувати, що, крім однофазних, у сталях є гетерофазні включення, частка яких може становити до 10...30 % від їх загальної кількості.

Існують п'ять типів таких включень [18–22], які по-різному деформуються та викликають руйнування сталей. Вирішення проблеми таких включень потребує

розвитку теоретичних основ їх впливу на процеси руйнування сталей.

**Мета роботи** – вивчення особливостей зародження тріщин в гетерофазних включеннях типу «фази поруч» під час деформації сталей.

## Матеріали та методики

Руйнування гетерофазних включень досліджували під час деформації зразків зі сталей 08Т, 08Ю, 12ГС, 08кп, 09Г2С, НБ-57, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 20...1 200 °C [1; 4]. Зразки сталей 08Т і 08Ю піддавали розтягу, стиску та вигину, сталі НБ-57 – розтягу та стиску, сталей 08кп, 08Х, АЦ45Х, АЦ18ХГТ, ШХ15 – розтягу у вакуумі за температур 20...1 200 °C 5С зі спеціальними захватами, швидкість переміщення яких становила 20 мм/хв. Застосовували такі методи дослідження: петрографія [1; 4], мікрорентгеноспектральний аналіз («Cameca MS-46, Nanolab-7»), оптична мікроскопія (Neophot-21)).

## Результати

У включеннях типу «фази поруч» обидві фази  $\phi_1$  і  $\phi_2$  контактують із металевою матрицею та розділені між собою міжфазними границями  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  [18; 21]. Варіанти поєднання фаз  $\phi_1$  і  $\phi_2$  можуть бути різними: недеформовані фази  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiN} + \text{TiCN}$ ,  $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ; одна з фаз слабопластична або пластична за певних температур  $\text{FeO} + \text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiCN} + \text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + (\text{Fe}, \text{Mn})\text{S}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ; обидві фази виявляють пластичні властивості, але за різних температур  $\text{FeS} + (\text{Fe}, \text{Mn})\text{S}$ ,  $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2 + (\text{Fe}, \text{Mn})\text{S}$  [1; 4; 18; 22]. Для гетерофазних включень типу «фази поруч» характерне утворення тріщин по міжфазних границях  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ , оскільки фази  $\phi_1$  і  $\phi_2$  або зовсім не пластичні, або виявляють різну пластичність, що сприяє концентрації напружень поблизу цих границь та в самих границях.

Слід зазначити, що у включеннях досліджуваного типу внутрішні міжфазні границі  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  виходять на міжфазні границі включення – матриця і утворюють з ними потрійні стики міжфазних границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ ,  $\phi_1 \leftrightarrow \text{м}$  та  $\phi_2 \leftrightarrow \text{м}$ , які сприяють локалізації деформації в сталевій матриці, а також викликають значні концентрації міжфазних напружень. За різних температур деформації вплив таких стиків на утворення тріщин уздовж границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  має особливості. Концентрація міжфазних напружень у стиках може спровокувати їх релаксацію уздовж границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  у включенні за будь-якої температури деформації.

У той же час пластична поведінка сталевій матриці за різних температур, а також просковзування уздовж границь включення – матриця за високих температур деформації викликає часткову релаксацію напружень поблизу включення та уздовж границь  $\phi_1 \leftrightarrow \text{м}$  і  $\phi_2 \leftrightarrow \text{м}$ . У випадках недеформованих фаз включення  $\phi_1$  і  $\phi_2$  у границях  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  виникають значні напруження, які є розклинювальними, що спричинює їх крихке руйнування.

За наявності однієї або двох пластичних фаз зсувні напруження поблизу границі  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  сприяють відокремленню фаз включення в результаті виходу дислокацій із пластичної фази (пластичних фаз) на міжфазну границю, утворення дислокацій орієнтаційної невідповідності та зародження мікротріщин.

Очевидно, величина критичного розміру мікротріщини залежить від когезивної міцності міжфазної границі  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  за кожної температури деформації. Розкриття тріщини в міжфазній границі  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  має супроводжуватися релаксаційними процесами, пов'язаними з трансформацією самої тріщини у процесі її розвитку.

За температур деформації 25...1 200 °С у включеннях із фазами  $\phi_1$  і  $\phi_2$ , що не деформуються, спостерігали виникнення крихких тріщин на міжфазних границях  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  (рис. а, б). У місцях виходу цих тріщин на границю включення – матриця виникали зони локалізованої деформації сталевій матриці поблизу включень (рис. б). Слід зазначити, що локалізація деформації в матриці поблизу включення і особливо поблизу потрійного стику міжфазних границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ ,  $\phi_1 \leftrightarrow \text{м}$  та  $\phi_2 \leftrightarrow \text{м}$  (рис. в) може спровокувати релаксацію напружень уздовж границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  у включенні. Спостерігали також крихкі тріщини у фазах включення, що беруть початок від границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ .

У включеннях, де одна із фаз пластична, за температур деформації 25...800 °С спостерігали утворення крихких та іноді в'язких тріщин уздовж міжфазних границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ , поява яких зумовлена різною пластичною поведінкою фаз  $\phi_1$  і  $\phi_2$  і концентрацією напружень поблизу цих границь (рис. з). За температур 850...1 100 °С, коли уздовж границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  відбувається просковзування у включеннях із сульфідною фазою  $\phi_2$  [1; 4; 19], виникали в'язкі тріщини внаслідок розшарування міжфазних границь (рис. т). У разі оплавлення сульфідної фази  $\phi_2$  за більш високих температур відбувалося плавлення міжфазних границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ .

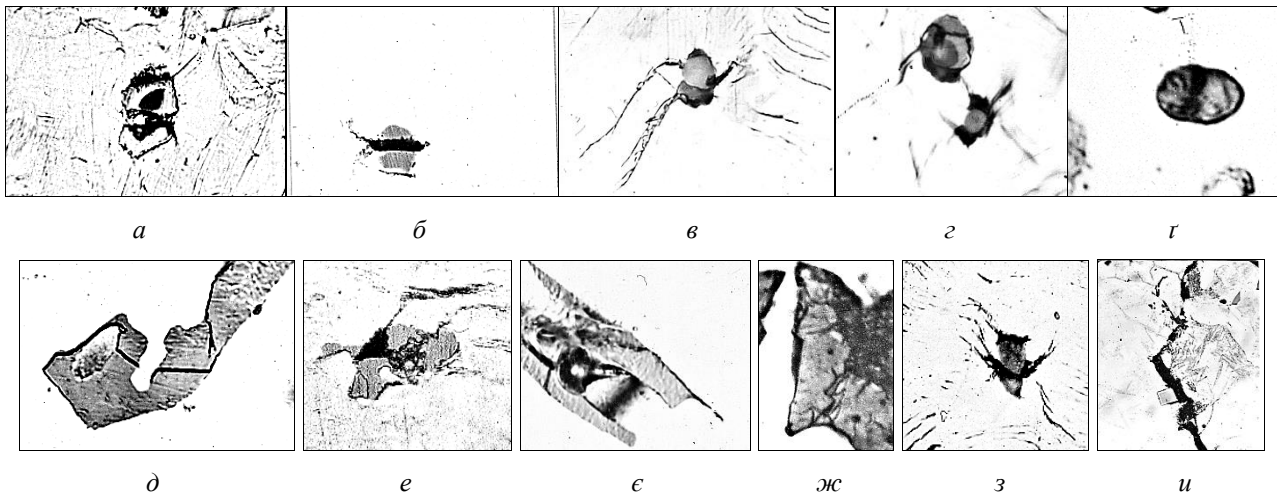


Рис. Тріщини в гетерофазних включеннях типу «фазы поруч» після деформації за температур 25 (а, и), 600 (б, з, д, е), 900 (т, ж), 1 100 °С (в, е, з): а, б – TiN + TiCN; в, и – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MnO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; з, т – MnO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + (Fe, Mn)S; д, е – FeS + (Fe, Mn)S; е, з – MnO·SiO<sub>2</sub> + (Fe, Mn)S; ж – FeO·SiO + MnO·SiO<sub>2</sub>; ×900

Розглянемо випадки руйнування границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  за різного поєднання пластичних сульфідних та силікатних фаз включень типу «фазы поруч». Сульфідні фази  $\phi_1$  і  $\phi_2$  через неоднаковий хімічний склад мають різну пластичність [1; 13], тому уздовж границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  за температур деформації 25...800 °С виникають крихкі тріщини (рис. д) або в'язкі тріщини. Розвиток просковзування уздовж границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  за температур 850...1 100 °С [1; 4; 18] сприяє виникненню в'язких тріщин у результаті розшарування міжфазних границь (рис. е).

За більш високих температур відбувалося плавлення міжфазних границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ . У сульфо-силікатних включеннях пластичність фаз  $\phi_1$  та  $\phi_2$  визначається температурою деформації. За температур нижче 600 °С силікатна фаза  $\phi_1$  не пластична, сульфідна фаза  $\phi_2$  виявляє пластичні властивості, тому в результаті неоднорідної деформації включення на границі  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  виникають крихкі тріщини (рис. е). За температур деформації 600...850 °С обидві фази включення пластичні, однак у різній мірі, і це викликає появу крихких чи в'язких тріщин уздовж границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ .

Розвиток просковзування уздовж границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  з боку сульфідної фази  $\phi_2$  за температур вище 850 °С, а також з боку силікатної фази  $\phi_1$  за температур вище

950 °С спричинює в'язке розшарування міжфазних границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ . У включеннях із двома силікатними фазами  $\phi_1$  і  $\phi_2$ , які за температур нижче 600 °С не пластичні, виникають крихкі тріщини на міжфазних границях (рис. ж).

За температур 600 °С та вище силікатні фази пластичні, відбувається розшарування міжфазних границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  з утворенням крихких тріщин. За температур вище 900 °С силікатні фази виявляють високий рівень пластичності, крім того, за температур 950 °С і вище відбувається просковзування уздовж міжфазних границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ , що сприяє підвищенню рівня пластичності границь, які вивчаються, і в результаті виникають в'язкі тріщини.

Слід зазначити, що процеси, пов'язані з виникненням і перерозподілом напружень на внутрішніх міжфазних границях включень, аналогічні таким, що відбуваються на міжфазних границях включення – матриця сталей, зокрема, й у гетерофазних включень різних типів [19; 23–27].

Таким чином, характер руйнування внутрішніх міжфазних границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  у гетерофазних включеннях типу «фазы поруч» залежить від ступеня пластичності фаз  $\phi_1$  та  $\phi_2$  включення, що визначається температурою деформації, а також від ймовірності пластичної поведінки цих

границь. Крім того, проявляється вплив потрійних стиків міжфазних границь включення – матриця  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ , що створюють складний напружений стан у цих ділянках, характер якого залежить від рівня пластичної поведінки цих границь. У досліджуваних включеннях за різних температур спостерігали як зародження крихких тріщин уздовж міжфазних границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ , так і в'язких тріщин за пластичної поведінки однієї або обох фаз, а також у разі реалізації просковзування уздовж границь, що вивчаються, за високих температур. Очевидно, характер руйнування міжфазних

границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  визначається рівнем їх когезивної міцності.

Визначали критичні ступені деформації зразків розтягу  $\epsilon_{кр}$ , у разі досягнення яких виникали помітні мікротріщини уздовж внутрішніх міжфазних границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ . Величина  $\epsilon_{кр}$  істотно залежить від температури деформації, що визначає рівень пластичності фаз включення  $\phi_1$  і  $\phi_2$  та внутрішніх границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ , пов'язаний з можливістю просковзування (табл.). Що вища температура деформації, то більша величина  $\epsilon_{кр}$  для вивчених включень.

Таблиця

**Вплив температури на критичний ступінь деформації ( $\epsilon_{кр}$ , %), у разі досягнення якої руйнуються міжфазні границі в гетерофазних включеннях**

Включення, сталь	Температура деформації, °С				
	25	600	900	1 100	1 200
TiN + TiCN, 08Г	3,2	3,9	5,7	6,8	7,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MnO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 08Ю	4,3	4,6	6,4	6,9	7,9
MnO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + (Fe, Mn)S, 08Ю	7,4	11,7	18,6	20,3	оплавлення
FeS + (Fe, Mn)S, 08кп	11,8	16,2	24,6	27,3	оплавлення
MnO·SiO <sub>2</sub> + (Fe, Mn)S, 08Ю	10,3	16,1	22,6	29,4	оплавлення
FeO·SiO <sub>2</sub> + MnO·SiO <sub>2</sub> , 08кп	4,4	8,6	15,4	20,3	26,5

Розвиток мікроруйнувань, що виникають у гетерофазних включеннях типу «фази поруч» під час пластичної деформації, здійснюється в три стадії. Перша стадія включає локалізацію деформації та зародження крихких або в'язких тріщин шляхом розшарування уздовж внутрішніх міжфазних границь  $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$  або поблизу цих границь. На другій стадії відбувається зростання тріщин у границях включень. На третій відбувається поширення мікроруйнувань у металеву матрицю (рис. 3, и).

### Висновки

Результати досліджень показали, що різноманітність фаз, які становлять гетерофазні включення типу «фази поруч»,

викликає їх різну поведінку під час пластичної деформації, проте зародження мікротріщин відбувається уздовж внутрішніх міжфазних границь.

Залежно від рівня пластичності фаз, що становлять включення, ці тріщини можуть бути крихкими або в'язкими. Критичні ступені деформації зразків, у разі досягнення яких виникали помітні мікротріщини уздовж внутрішніх міжфазних границь, залежать від температури та природи фаз включень «фази поруч». Показники критичних ступенів деформації визначають рівень когезивної міцності внутрішніх міжфазних границь в гетерофазних включеннях «фази поруч».

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали. Київ : Наукова думка, 2016. 528 с.
2. André Luiz Vasconcellos daCosta e Silva. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 8. 2019. Pp. 2408–2422.
3. Belchenko G. I., Gubenko S. I. Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling. *Izvestiya AN SSSR. Metall.* 1983. № 4. Pp. 80–84.

4. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений. Днепропетровск : НМетАУ, ИЦ Системные технологии, 2014. 301 с.
5. Губенко С. И., Иванов И. А., Соболев А. А. Особенности износа поверхности катания цельнокатаных колес. Известия Петербургского университета путей сообщения. Санкт-Петербург : изд-во ПГУПС, 2013. С. 73–84.
6. Кушнер В. С., Кутько А. А., Воробьев А. А., Губенко С. И., Иванов И. А. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар. Омск : изд-во ОмSTU, 2015. 221 с.
7. Губенко С. И. Влияние неметаллических включений и продуктов коррозии на износостойкость железнодорожных колес. *Сталь*. 2019. № 6. С. 51–55.
8. Губенко С. И., Пинчук С. И., Белая Е. В. Влияние структурного состояния колесной стали на развитие коррозии. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 2. С. 69–73.
9. Pinchuk S. I., Gubenko S. I., Belaya E. V. The influence of non-metallic inclusions on the corrosion and strength properties of wheel steel. *Metallurgical & Mining Industry*. 2015. № 9. Pp. 89–95.
10. 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.
11. Губенко С. И. Некоторые структурные аспекты колесной стали, определяющие качество железнодорожных колес. *Современные технологии производства транспортного металла*. Нижний Тагил : изд-во НМТК, 2008. 394 с. С. 88–113.
12. 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.
13. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016. 549 с.
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. Gubenko S. I. Relaxation Processes near Inclusions and at Inclusion. Matrix Interfaces. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021. № 5. Pp. 611–620.
16. 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.
17. Gubenko S. I., Ivanov I. A., Kononov D. P. Features of Corrosive Destruction in Different Elements of Railway Wheels. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51, № 6. Pp. 400–415.
18. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпозитные включения в сталях. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2019. 330 с.
19. Губенко С. И. Границьфазные границы включение – матрица в сталях. Границьфазные границы неметаллическое включение – матрица и свойства сталей. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2017. 506 с.
20. Губенко С. И., Беспалько В.Н. Виды и структура гетерофазных включений в сталях. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. №1 (84). С. 30–35.
21. Губенко С. И. Структура многофазных неметаллических включений в сталях. *Теория и практика металлургии*. 1999. № 1. С. 22–27.
22. Gubenko S. I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50, № 10. Pp. 730–739.
23. Губенко С. И. К вопросу о строении границьфазных границ неметаллическое включение – матрица в стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1994. № 6. С. 105–112.
24. Губенко С. И., Иськов М. В. Структура и сопротивление разрушению границьфазных границ неметаллическое включение – матрица стали. *Теория и практика металлургии*. 2004. № 5. С. 30–38.
25. 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.
26. Губенко С. И. Локальные пики параметров и процессов на границах неметаллическое включение – матрица стали. *Сталь*. 1999. № 8. С. 64–67.
27. Губенко С. И. Влияние границьфазных границ «неметаллическое включение – матрица» на когезионную прочность стали. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. № 1. С. 11–17.

## REFERENCES

1. Gubenko S.I. and Oshkadepov S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Kyiv : Naukova Dumka, 2016, 528 p. (in Russian).
2. André Luiz Vasconcellos daCosta e Silva. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 8, 2019, pp. 2408–2422.

3. 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.
4. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskih vklyucheniy* [Physics of steel fracture near non-metallic inclusions]. Dnipropetrovsk : NMetAU, Information Technology Systems Technologies, 2014, 301 p. (in Russian).
5. Gubenko S.I., Ivanov I.A. and Sobolev A.A. *Osobennosti iznosa poverkhnosti kataniya tsel'nokatanykh koles*. [Features of wear of the rolling surface of solid-rolled wheels]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Engineering]. Saint-Petersburg : Publishing House of State University of Railway Transport, 2013, pp. 73–84. (in Russian).
6. Kushner V.S., Kutko A.A., Vorobyov A.A., Gubenko S.I. and Ivanov I.A. *Vliyaniye struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh staley na iznashivaniye i rezhimy vosstanovleniya profilya kolesnykh par* [The influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on wear and restoration modes of the wheelset profile]. Omsk : OmSTU Publ., 2015, 221 p. (in Russian).
7. Gubenko S.I. *Vliyaniye nemetallicheskih vklyucheniy i produktov korrozii na iznosostoykost' zhelezodorozhnykh koles* [Influence of nonmetallic inclusions and corrosion products on wear resistance of railway wheels]. *Stal'* [Steel]. 2019, no. 6, pp. 51–55. (in Russian).
8. Gubenko S.I., Pinchuk S.I. and Belaya E.V. *Vliyaniye strukturnogo sostoyaniya kolesnoy stali na razvitiye korrozii* [Influence of the structural state of wheel steel on the development of corrosion]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2009, no. 2, pp. 69–73. (in Russian).
9. Pinchuk S.I., Gubenko S.I. and Belaya E.V. The influence of non-metallic inclusions on the corrosion and strength properties of wheel steel. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2015, no. 9, pp. 89–95.
10. 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.
11. Gubenko S.I. *Nekotoryye strukturnyye aspekty kolesnoy stali, opredelyayushchiye kachestvo zhelezodorozhnykh koles* [Some structural aspects of wheel steel that determine the quality of railway wheels]. *Sovremennyye tekhnologii proizvodstva transportnogo metalla* [Modern Technologies for the Production of Transport Metal]. Nizhny Tagil : NMTK Publ., 2008, 394 p., pp. 88–113. (in Russian).
12. 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 laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory Laboratory. Material Diagnostics]. 2018, vol. 84, no. 3, pp. 52–60. (in Russian).
13. 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).
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. Relaxation Processes near Inclusions and at Inclusion / Matrix Interfaces. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021, no. 5, pp. 611–620.
16. 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.
17. Gubenko S.I., Ivanov I.A. and Kononov D.P. Features of Corrosive Destruction in Different Elements of Railway Wheels. *Steel in Translation*. 2021, vol. 51, no. 6, pp. 400–415.
18. Gubenko S. *Geterofaznyke mikrokompozitnyye vklyucheniya v stalyakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2019, 330 p. (in Russian).
19. Gubenko S.I. *Mezhfaznyye granitsy vklyuchenije-matritsa v stalyakh. Mezhfaznyye granitsy nemetallicheskiye vklyuchenije-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).
20. 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).
21. Gubenko S.I. *Struktura mnogofaznykh nemetallicheskih 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).
22. Gubenko S.I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020, vol. 50, no. 10, pp. 730–739.
23. Gubenko S.I. *K voprosu o stroyenii mezhfaznykh granits nemetallicheskiye vklyuchenije – 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).

24. 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).

25. 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.

26. 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).

27. Gubenko S.I. *Vliyaniye mezhfaznykh granits “nemetallicheskiye vklyucheniye – matritsa” na kogeziyuyu prochnost' stali* [Influence of interphase boundaries “non-metallic inclusion – matrix” on the cohesive strength of steel]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2006, no. 1, pp. 11–17. (in Russian).

Надійшла до редакції: 15.01.2022.