

УДК 669.018.294:620.19

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260319.30.297

**ВИДЫ И СТРУКТУРА ГЕТЕРОФАЗНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛЯХ**

ГУБЕНКО С. И.<sup>1\*</sup>, *д. т. н., проф.*,  
 БЕСПАЛЬКО В. Н.<sup>2</sup>, *к. т. н., доц.*

<sup>1\*</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID: 0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID: 0000-0003-2184-8230

**Аннотация.** *Цель.* Проблема влияния гетерофазных неметаллических включений на свойства сталей является актуальной. Целью работы было изучение основных типов и структур гетерофазных неметаллических включений в сталях. *Методика.* Применяли комплексные методы исследования гетерофазных неметаллических включений (металлографический, петрографический, микрорентгеноспектральный анализ). *Результаты.* Установлено, что гетерофазные включения имеют различную структуру и фазовый состав. Показаны особенности различных сочетаний фаз в микрокомпозитных включениях. Установлены основные виды гетерофазных включений в сталях. *Научная новизна.* Установлены особенности строения гетерофазных включений в сталях. Предложена классификация микрокомпозитных гетерофазных включений: включения первого типа «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой»; включения второго типа «фазы рядом»; включения третьего типа «эвтектики»; включения четвертого типа «дисперсные фазы в неметаллической матрице»; включения пятого типа «эвтектика включение – матрица». *Практическая значимость.* Использование полученных результатов позволит разработать технологии получения сталей с регламентированным содержанием и видами гетерофазных неметаллических включений, что существенно повысит их технологические, механические и эксплуатационные свойства.

*Ключевые слова:* сталь; гетерофазные неметаллические включения; микрокомпозитные включения; структура; фазовый состав

**ВИДИ ТА СТРУКТУРА ГЕТЕРОФАЗНИХ ВКЛЮЧЕНЬ В СТАЛЯХ**

ГУБЕНКО С. І.<sup>1\*</sup>, *д. т. н., проф.*,  
 БЕСПАЛЬКО В. М.<sup>2</sup>, *к. т. н., доц.*

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID: 0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID: 0000-0003-2184-8230

**Анотація.** *Мета.* Проблема впливу гетерофазних неметалевих включень на властивості сталей є актуальною. Метою роботи було вивчення основних типів і структур гетерофазних неметалевих включень в сталях. *Методика.* Застосовували комплексні методи дослідження гетерофазних неметалевих включень (металографічний, петрографічний, микрорентгеноспектральний аналіз). *Результати.* Встановлено, що гетерофазні включення мають різну структуру і фазовий склад. Показано особливості різних сполучень фаз в мікрокомпозитних включеннях. Встановлено основні види гетерофазних включень в сталях. *Наукова новизна.* Встановлено особливості будови гетерофазних включень в сталях. Запропоновано класифікацію мікрокомпозитних гетерофазних включень: включення першого типу «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою»; включення другого типу «фазы поруч»; включення третього типу «эвтектики»; включення четвертого типу «дисперсні фази в неметалевій матриці»; включення п'ятого типу «эвтектика включення – матрица». *Практична значимість.* Використання отриманих результатів дозволить розробити технології отримання сталей з регламентованим змістом і видами гетерофазних неметалевих включень, що істотно підвищить їх технологічні, механічні та експлуатаційні властивості.

*Ключові слова:* сталь, гетерофазні неметалеві включення; мікрокомпозитні включення; структура; фазовий склад

**TYPES AND STRUCTURE OF HETEROPHASE INCLUSIONS IN STEELS**

GUBENKO S.I.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
 BESPALCO V.N.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

<sup>1\*</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID: 0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID: 0000-0003-2184-8230

**Abstract. Purpose.** The problem of the influence of heterophase nonmetallic inclusions on the properties of steels is actual. The goal of the work was to study the main types and structures of heterophase nonmetallic inclusions in steels. **Methods.** Comprehensive methods for the study of heterophase non-metallic inclusions (metallographic, petrographic, X-ray microanalysis methods) were used. **Results.** It has been established that heterophase inclusions have different structure and phase composition. The features of various combinations of phases in microcomposite inclusions are shown. The main types of hetero-phase inclusions in steels are established. **Scientific novelty.** The structural features of heterophase inclusions in steels are established. A classification of microcomposite heterophasic inclusions is proposed: inclusions of the first type "high-melting phase surrounding with low-melting cover"; the inclusion of the second type of "phases are beside"; the inclusion of the third type of "eutectics"; Inclusions of the fourth type "dispersed phases in a non-metallic matrix"; inclusions of the fifth type "eutectics inclusion-matrix". **Practical significance.** The use of the obtained results will make it possible to develop technologies for the production of steels with regulated content and types of heterophase non-metallic inclusions, which will significantly improve their technological, mechanical and operational properties.

**Keywords:** steel; heterophase nonmetallic inclusions; microcomposite inclusions; structure; phase composition

### Введение

Практика показывается, что неметаллические включения часто играют определяющую роль при зарождении разрушения деталей и конструкций [1–6]. Следует отметить, что доля гетерофазных включений в сталях может составлять в среднем 10...30 % от их общего количества в зависимости от условий производства сталей [7]. Поэтому необходимы специальные исследования гетерофазных включений с целью определения их типов и структуры, что приведет к необходимости изучить их влияние на технологические, механические и эксплуатационные свойства сталей.

### Цель

Целью работы было изучение основных типов и структур гетерофазных неметаллических включений в сталях.

### Материалы и методики

Исследовали неметаллические включения в литых сталях 08кп, 08, 08Х, НБ–57, 08ГСЮТФ, ШХ15. Фазовый состав включений определяли металлографическим (Neophot–21) и петрографическим методом [8], а также путем микрорентгеноспектрального анализа на установке МС–46 «Сатеса».

### Результаты исследования и их обсуждение

Комплексные исследования показали, что по природе и структуре гетерофазные

неметаллические включения можно разделить на несколько групп.

Гетерофазные включения первого типа «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» состоят из легкоплавкой фазы-оболочки  $\phi-01$ , внутри которой находится тугоплавкая фаза включения –  $\phi2$  (рис. 1). Соответственно межфазную границу включение-матрица можно обозначить  $\phi-01 \leftrightarrow м$ . Фаза подложка  $\phi2$  представляет собой оксиды, шпинели, нитриды, карбинитриды, имеющие кубическую, неправильную, дендритную, игольчатую форму. Фаза-оболочка (матрица)  $\phi-01$  – это сульфиды и силикаты простого и сложного состава, в том числе силикатные стекла.

Гетерофазные включения второго типа, где фазы как бы существуют рядом – это включения «фазы рядом»  $\phi1$  и  $\phi2$  (рис. 2); соответственно межфазные границы включение-матрица можно обозначить  $\phi1 \leftrightarrow м$  и  $\phi2 \leftrightarrow м$ . Вторым тип гетерофазных включений в общем тоже связан с появлением одной из фаз первой  $\phi1$ , служащей подложкой для кристаллизации второй фазы  $\phi2$ , однако здесь фаза  $\phi2$  не является оболочкой или матрицей, а существует рядом с фазой  $\phi1$ . Здесь не обязательно наличие большой разницы в температурах плавления фаз, они могут быть и вполне сопоставимы. Часто встречаются такие варианты, как, например,  $Al_2O_3 + MnO \cdot Al_2O_3$ ,  $TiN + TiCN$ ,  $TiCN + FeO \cdot TiO_2$ ,  $FeO \cdot Al_2O_3 + MnO \cdot Al_2O_3$ ,  $MgS + MnS$  и другие.

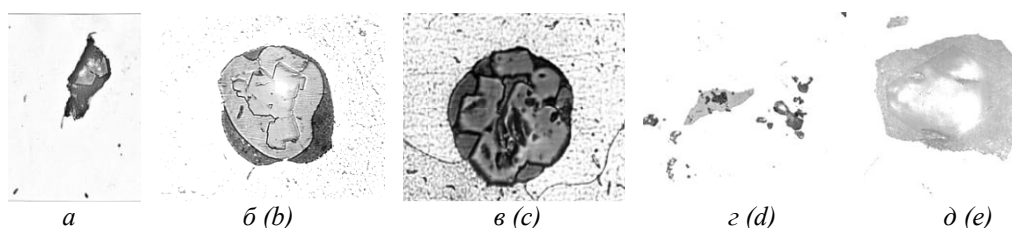


Рис. 1. Гетерофазные включения первого типа «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой»,  $\times 600$  / Fig. 1. Heterophase inclusions of the first type "refractory phase surrounded by a low-melting shell",  $\times 600$

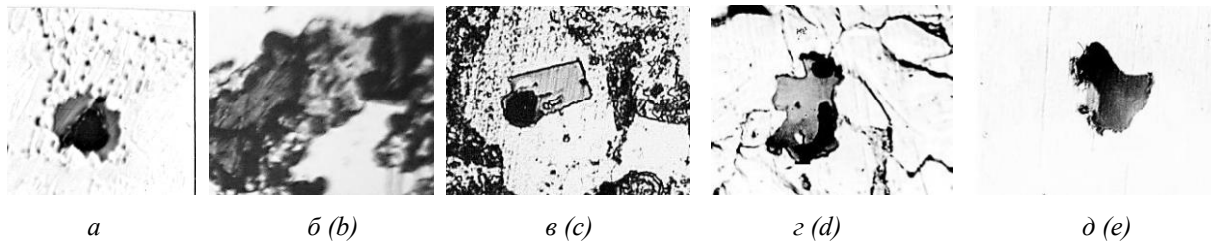
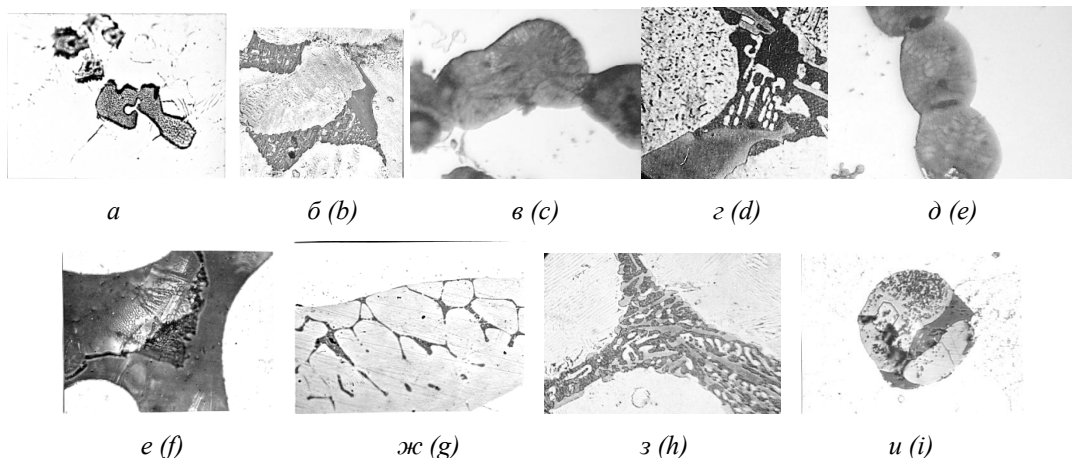


Рис. 2. Гетерофазные включения второго типа «фазы рядом»,  $\times 600$  /  
 Fig. 2. Heterophase inclusions of the second type "near phases",  $\times 600$

Гетерофазные включения третьего типа «эвтектики» образуются в результате одновременной кристаллизации фаз при эвтектическом превращении. Такие включения имеют эвтектическую структуру и представляют собой колонии фаз эвтектики э1 и э2-компонитные формирования разного вида в зависимости от состава и природы этих эвтектических фаз (рис. 3), хотя возможны и конгломераты фаз эвтектики. Одна из фаз включения может образовать прослойки с овальным сечением в базовой фазе, либо пленки по границам зерен базовой фазы. Соответственно можно обозначить межфазные границы включение – матрица э1 $\leftrightarrow$ м и э2 $\leftrightarrow$ м. Включения третьего типа – эвтектики с фазами э1 и э2 (сульфидные FeS–MnS, FeS–(Mn, Fe)S, FeS–Al<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, (Fe, Mn)S–FeS, (Fe, Cr, Mn)S–FeS, (Fe, Cr, Mn)S–(Fe, Mn)S (рис. 3 а, б), оксисульфидные FeS–FeO, MnS–MnO, MnO–FeS, (Fe, Mn)O–(Fe, Mn)S, (Fe, Mn Cr)S–FeO (рис. 3 в, г), оксидные MnO–Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–2MgO·SiO<sub>2</sub>, MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–2MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO, 5CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaF<sub>2</sub> (рис. 3 д), силикатные FeO·SiO<sub>2</sub>–MnO·SiO<sub>2</sub>, 2FeO·SiO<sub>2</sub>–MnO·SiO<sub>2</sub>, 2FeO·SiO<sub>2</sub>–CaO·MgO·SiO<sub>2</sub>, FeO·SiO<sub>2</sub>–CaO·FeO·SiO<sub>2</sub>, 2CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>–CaO·MgO·SiO<sub>2</sub>–CaO·FeO·SiO<sub>2</sub> (рис. 3 е), нитридные TiN–TiCN, сульфосиликатные FeS–FeO·SiO<sub>2</sub> (рис. 3 ж, з), оксисиликатные FeO–FeO·SiO<sub>2</sub> (рис. 3 и–м). В структуре таких включений вследствие совместной кристаллизации фаз наблюдается определенная регулярность в их расположении, свойственная эвтектикам, хотя возможны и конгломераты фаз,

причем вторая фаза может образовать прослойки с овальным сечением, либо пленки по границам зерен первой фазы.

Встречаются также гетерофазные включения четвертого типа, где в «неметаллической» матрице (сульфидной, оксидной, силикатной и т. д.) ф-м1 присутствуют дисперсные частицы избыточной второй фазы (оксиды, нитриды, карбонитриды, силикаты и т. д.) д2, которая выделилась из пересыщенного жидкого либо твердого раствора («неметаллической» матрицы) (рис. 4). Соответственно обозначим границы включение-матрица ф-м1 $\leftrightarrow$ м и, если дисперсная фаза соприкасается со стальной матрицей – д2 $\leftrightarrow$ м. Для включений четвертого типа «дисперсные фазы в неметаллической матрице» характерно наличие частиц фазы д2 (оксидов, силикатов, карбидов, нитридов фосфидов и т. д.), представляющих собой дисперсные вкрапления в «материнской» фазе ф-м1. Таким образом, в этих включениях вторая фаза как правило является избыточной и выделилась из пересыщенного жидкого либо твердого раствора («неметаллической» матрицы) в процессе охлаждения в результате уменьшения растворимости в ней элементов при понижении температуры. Частички второй фазы дисперсны и могут быть поразному распределены в «неметаллической» матрице. Такие включения представляют собой дисперсные композитные формирования. Включения такого типа могут быть не только двух-, но и многофазными, если в них присутствуют дисперсные частицы нескольких видов, имеющие разные форму и размеры.



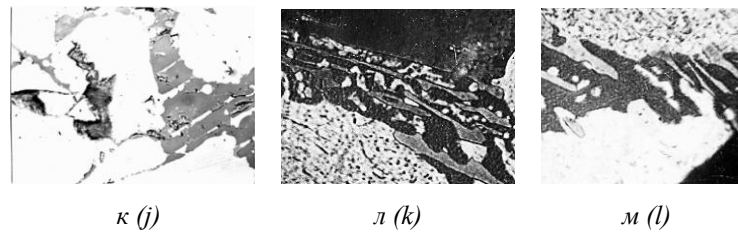


Рис. 3. Гетерофазные включения третьего типа «эвтектики»,  $\times 600$  /  
 Fig. 3. Heterophase inclusions of the third type of "eutectic",  $\times 600$

Существуют гетерофазные включения пятого типа, в которых одной из фаз является матрица стали «м» в виде вкраплений (рис. 5 а) или как фаза эвтектики сульфид – матрица, силикат – матрица, оксид – матрица (рис. 5 б–д), фосфид – матрица (рис. 5 е). Такие гетерофазные включения можно назвать «эвтектика включение – матрица» нв–м, состоящие из фаз нв и м. В отличие от гетерофазных включений первого – четвертого типа, они не имеют внутренних межфазных границ типа включение-включение (кроме случая, представленного на рис. 5 а). Однако в них присутствует разветвленная сеть внутренних межфазных границ нв  $\leftrightarrow$  м. В то же время для них характерно наличие межфазных границ включение-матрица, которые обозначим (нв+м)  $\leftrightarrow$  м; они включают чередующиеся

микроучастки нв  $\leftrightarrow$  м и м  $\leftrightarrow$  м. Таким образом, эти межфазные границы (нв+м)  $\leftrightarrow$  м не являются сплошными (в традиционном понимании межфазной границы), поскольку наличие микроучастков м  $\leftrightarrow$  м, где одна из фаз таких эвтектик (м) имеет непрерывную связь с основной структурой стали без каких-либо границ раздела, позволяет считать их прерывистыми. В этом их отличие от гетерофазных включений первого – четвертого типа, имеющих четко выраженные сплошные межфазные границы включение-матрица. По-существу, включения пятого типа представляют собой микрокомпонитные участки, в которых стальная матрица армирована фазой включения.

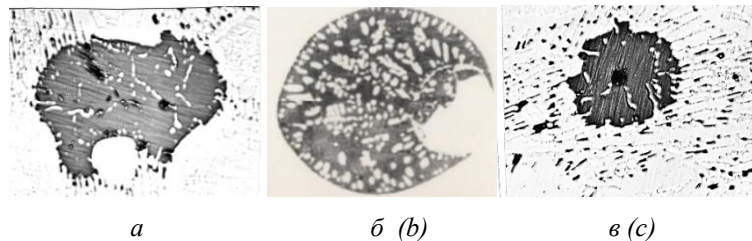


Рис. 4. Гетерофазные включения четвертого типа «дисперсные фазы в неметаллической матрице»,  $\times 600$  /  
 Fig. 4. Heterophase inclusions of the fourth type "dispersed phases in a nonmetallic matrix",  $\times 600$

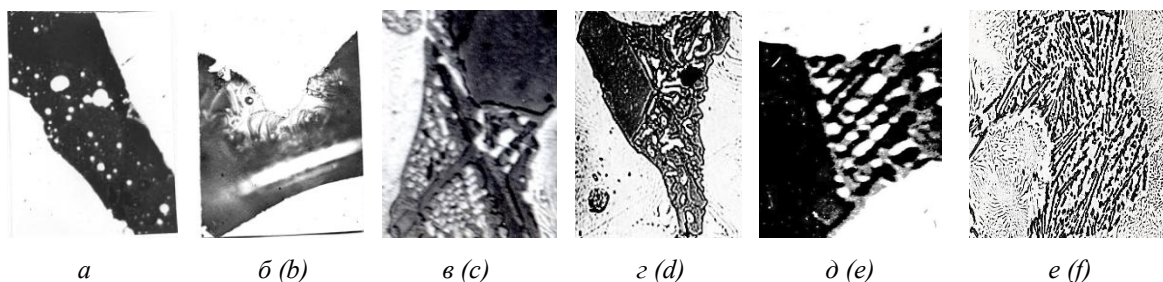


Рис. 5. Гетерофазные включения пятого типа «эвтектика включение – матрица»,  $\times 600$  /  
 Fig. 5. Heterophase inclusions of the fifth type "eutectic inclusion – matrix",  $\times 600$

К пятому типу гетерофазных включений следует отнести многочисленные карбидные эвтектики, которые образуются в высоколегированных сталях и чугунах [9]. Тугоплавкие неметаллические включения (оксиды, нитриды, карбонитриды и т. д.) нередко являются центрами зарождения базового карбида таких эвтектик.

Экзогенные включения (шлаковые, частицы огнеупоров и т. д.), которые могут присутствовать в сталях, как правило, являются гетерофазными. Для них характерны большие размеры и сложная фазовая структура.

На рисунке 6 представлено гетерофазное включение в литой стали.

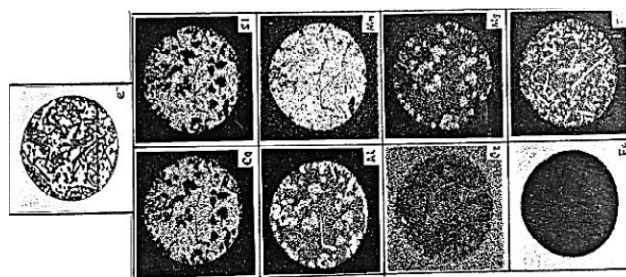


Рис. 6. Распределение элементов в гетерофазном включении /  
Fig. 6. Distribution of elements in heterophase inclusion

Возможно сочетание нескольких структур в сложных гетерофазных включениях. В гетерофазных включениях всегда наблюдается избирательное распределение элементов между минеральными фазами. Однако количественное соотношение фаз и распределение в них химических элементов зависит от типа гетерофазного включения и особенностей его строения. Представляется очевидным, что для включений первого типа «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой», второго типа «фазы рядом» и четвертого типа «дисперсные фазы в неметаллической матрице» характерны случайные количественные соотношения указанных показателей. Для включений третьего типа «эвтектики» и пятого типа «эвтектика включение-матрица» количественные соотношения фаз и распределение в них химических элементов являются строго определенными в связи с регулярностью эвтектических структур и определяются соответствующими диаграммами состояния многочисленных эвтектических систем.

Очевидно, все типы гетерофазных неметаллических включений представляют собой микрокомпозитные формирования, отличающиеся условиями образования, фазовым составом, структурой, морфологией и т. д.

Рассмотренные виды микроструктуры и фазового состава гетерофазных включений свидетельствуют о большом разнообразии межфазных границ включение – матрица, а также внутренних межфазных границ во включения. Нередко одна из фаз на разных участках имеет разные границы (межфазная граница с другой фазой включения, межфазная граница со стальной матрицей).

### Выводы

Изучены различные типы и структуры гетерофазных неметаллических включений в сталях. Результаты исследований позволили предложить классификацию гетерофазных включений в сталях: включения первого типа «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой»; включения второго типа «фазы рядом»; включения третьего типа «эвтектики»; включения четвертого типа «дисперсные фазы в неметаллической матрице»; включения пятого типа «эвтектика включение – матрица». Это позволит понять их поведение при пластической деформации в процессе производства металлопродукции и влияние на технологические, механические и эксплуатационные свойства сталей различных типов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Неметаллические включения в стали : монография / [С. И. Губенко, С. П. Ошкадеров]. – Киев : Наукова думка, 2016. – 528 с.
2. Губенко С. И., Галкин А.М. К вопросу о природе красноломкости стали / С. И. Губенко, А. М. Галкин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1984. – № 10. – С. 11–15.
3. Бельченко Г. И. Микронеоднородная деформация стали, содержащей неметаллические включения / Г. И. Бельченко, С. И. Губенко // Известия АН СССР. Металлы. – 1981. – № 4. – С. 94–97.
4. Губенко С. И. Возможности трансформации неметаллических включений и межфазных границ включение-матрица при высокоэнергетических обработках сталей / С. И. Губенко // Металлофизика, новейшие технологии. – 2014. – Т. 36, № 3. – С. 287–315.
5. Gubenko S. Influence of Nonmetallic Inclusions on Microbreaks Formation in Wheel Steel and Railway Wheels / S. Gubenko, Y. Proidak, A. Kozlovsky, A. Shramko, M. Iskov // Telematics, Logistics and Transport Safety : mater. of VIII-th scient. conf. TLTS'08. – Poland, Katowice-Cieszyn. – 2008.
6. Включения в легированных сталях и сплавах : монография / [М. И. Виноград, Г. П. Громова]. – Москва : Металлургия, 1972. – 216 с.
7. Неметаллические включения в стали : монография / [Р. Кислинг, Н. Ланге]. – Москва : Металлургия, 1968. – 124 с.
8. Петрография неметаллических включений : монография / [Т. И. Литвинова, В. П. Пирожкова, А. К. Петров]. – Москва : Металлургия, 1972. – 460 с.
9. Основы металлографии чугуна : монография / [К. П. Бунин, Я. Н. Малиночка, Ю. Н. Таран]. – Москва : Металлургия, 1969. – 415 с.

## REFERENCES

1. Gubenko S.I. and Oshkadev S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Kyiv : Naukova dumka, 2016, 528 p. (in Russian).
2. Gubenko S.I. and Galkin A.M. *K voprosu o prirode krasnolomkosti stali* [On the nature of steel brittleness]. *Metallovedenie I termicheskaja obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 1984, no. 10, pp. 11–15 (in Russian).
3. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Microneodnorodnaja deformatsia stali, sodержashchei nemetallicheskie vkluchenia* [Microheterogeneous deformation of steel containing non-metallic inclusions]. *Izvestija AN SSSR. Metalli* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1981, no. 4, pp. 94–97. (in Russian).
4. Gubenko S.I. *Vozmozhnosti transformatsii nemetallicheskih vkluchenij I mizhphasnih granits vcluchenie-matritsa pri visokoenergicheskikh obrabotkah* [Possibilities of transformation of non-metallic inclusions and interphase inclusion-matrix boundaries under high-energy treatments]. *Metallofizika, noveishie tehnologii* [Metal Physics, New Technologies]. 2014, vol. 36, no. 3, pp. 287–315. (in Russian).
5. Gubenko S., Proidak Y., Kozlovsky A., Shramko A. and Iskov M. Influence of Nonmetallic Inclusions on Microbreaks Formation in Wheel Steel and Railway Wheels. Telematics, Logistics and Transport Safety : Materials of VIII-th Scientific Conference TLTS'08, Poland, Katowice-Cieszyn, 2008.
6. Vinograd M.I. and Gromova G.P. *Vkluchenia v legirovannih staliah I splavah* [Inclusions in alloy steels and alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1972, 216 p. (in Russian).
7. Kiessling R. and Lange N. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Moscow : Metallurgy Publ. 1968, 124 p. (in Russian).
8. Litvinova T.I., Pirozhkova V.P. and Petrov A.K. *Petrographiya nemetallicheskih vklucheniy* [Petrography of non-metallic inclusions]. Moscow : Metallurgy Publ., 1972, 460 p. (in Russian).
9. Bunin K.P., Malinochka Ja.N. and Taran Ju.N. *Csnovi metallographii chuguna* [The Basics of Cast Iron Metallography]. Moscow : Metallurgy Publ., 1969, 415 p. (in Russian).

*Статья рекомендована д-ром техн. наук, проф. В. С. Вахрушевой (Украина); д-ром техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина).*

Поступила в редакцию 11.03.2019.

Принята в печать 17.03.2019.