

УДК 669.018.294:620.19

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260222.36.630

ПОВЕДЕНИЕ ГЕТЕРОФАЗНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ «ФАЗЫ РЯДОМ» ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ ДАВЛЕНИЕМ

ГУБЕНКО С. И.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,
БЕСПАЛЬКО В. Н.², *канд. техн. наук, доц.*

^{1*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

² Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2184-8230

Аннотация. Технологическая пластичность сталей во многом определяется поведением неметаллических включений при разных температурах деформации. **Цель работы** – изучение формоизменения гетерофазных включений «фазы рядом» при разных условиях обработки сталей давлением. **Методика.** Идентификацию включений «фазы рядом» до и после деформации по разным режимам проводили несколькими методами: металлографический, петрографический, микрорентгеноспектральный анализ. **Результаты.** Установлено, что фазово-минералогический состав гетерофазных включений «фазы рядом» определяет процессы их формоизменения при горячей и холодной деформации. Уровень пластичности фаз включений определяет характер их взаимодействия между собой и стальной матрицей при их совместной деформации. Различное сочетание фаз во включениях «фазы рядом» предполагает разное формоизменение включения как целого при горячей или холодной прокатке сталей. **Научная новизна.** Установлены особенности формоизменения гетерофазных включений «фазы рядом» при горячей и холодной деформации. Показана важная роль процессов межфазного трения, которое развивается на участках границ включения – матрица (с разными фазами включения) и на внутренних границах во включениях, фазы которых имеют различную пластичность. Показано, что характер формоизменения включений «фазы рядом» определяется взаимным влиянием фаз включений на их совместную деформацию. Показана возможность трансформации включений «фазы рядом» в процессе горячей и холодной деформации при обработке сталей давлением. **Практическая значимость.** Полученные результаты исследования особенностей формоизменения гетерофазных включений «фазы рядом» могут быть использованы при разработке технологий получения сталей с регламентированным содержанием гетерофазных неметаллических включений, в том числе типа «фазы рядом». Эти результаты вносят вклад в решение важных проблем, связанных с повышением технологической пластичности сталей различного назначения, а также с предупреждением образования дефектов при обработке сталей давлением.

Ключевые слова: сталь; гетерофазные неметаллические включения «фазы рядом»; обработка давлением

ПОВЕДІНКА ГЕТЕРОФАЗНИХ ВКЛЮЧЕНЬ «ФАЗИ ПОРУЧ» ПІД ЧАС ОБРОБКИ СТАЛЕЙ ТИСКОМ

ГУБЕНКО С. І.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,
БЕСПАЛЬКО В. М.², *канд. техн. наук, доц.*

^{1*} Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

² Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2184-8230

Анотація. Технологічна пластичність сталей багато в чому визначається поведінкою неметалевих включень за різних температур деформації. **Мета роботи** – вивчення формозміни гетерофазних включень «фазы поруч» у різних умовах обробки сталей тиском. **Методика.** Ідентифікацію включень «фазы поруч» до і після деформації за різними режимами проводили декількома методами: металографічний, петрографічний, микрорентгеноспектральний аналіз. **Результати.** Встановлено, що фазово-мінералогічний склад гетерофазних включень «фазы поруч» визначає процеси їх формозміни під час гарячої і холодної деформації. Рівень пластичності фаз включень визначає характер їх взаємодії між собою і сталеву матрицю при їх спільній деформації. Різні поєднання фаз у включеннях «фазы поруч» передбачає різну формозміну включення як цілого

під час гарячої або холодної прокатки сталей. **Наукова новизна.** Встановлено особливості формозміни гетерофазних включень «фазы поруч» під час гарячої та холодної деформації. Показано важливу роль процесів міжфазного тертя, яке розвивається на ділянках включення – матриця (з різними фазами включення) і на внутрішніх межах у включеннях, фази яких мають різну пластичність. Показано, що характер формозміни включень «фазы поруч» визначається взаємним впливом фаз включень на їх спільну деформацію. Показано можливість трансформації включень «фазы поруч» у процесі гарячої і холодної деформації під час обробки сталей тиском. **Практична значимість.** Отримані результати дослідження особливостей формозміни гетерофазних включень «фазы поруч» можуть бути використані для розроблення технологій отримання сталей з регламентованими умістом гетерофазних неметалевих включень, в тому числі типу «фазы поруч». Ці результати допомагають у вирішенні важливих проблем, пов'язаних із підвищенням технологічної пластичності сталей різного призначення, а також попередженням утворення дефектів під час обробки сталей тиском.

Ключові слова: сталь; гетерофазні неметалеві включення «фазы поруч»; обробка тиском

THE BEHAVIOUR OF HETEROPHASE INCLUSIONS “PHASES ARE BESIDE” UNDER STEEL PRESSURE FORMING

GUBENKO S.I.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BESPALKO V.M.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

² Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2184-8230

Abstract. Purpose. The technological ductility of steels is largely determined by the behavior of non-metallic inclusions at different deformation temperatures. The aim of the work was to study the shape change of heterophase inclusions of the “phases are beside” under different conditions of steel processing by pressure. **Methods.** Identification of inclusions of the “phases are beside” before and after deformation according to different modes was carried out by several methods: metallographic, petrographic, X-ray spectral analysis. **Results.** It has been established that the phase-mineralogical composition of the heterophase inclusions of the “phases are beside” determines the processes of their change under hot and cold deformation. The level of plasticity of the phases of inclusions determines the nature of their interaction between themselves and the steel matrix during their joint deformation. A different combination of phases in the inclusions of the “phases are beside” implies a different shape change of the inclusion as a whole during hot or cold rolling of steels. **Scientific novelty.** The shape-changing features of heterophase inclusions of the “phases are beside” during hot and cold deformation were established. The important role of interfacial friction processes was shown, which develops on sections of the inclusion-matrix boundaries (with different inclusion phases) and on the internal boundaries in inclusions whose phases have different plasticity. It was shown that the character of the shape change of the “phases are beside” inclusions is determined by the mutual influence of inclusions phases on their joint deformation. The possibility of transforming the inclusion of “phases are beside” in the process of hot and cold deformation when machining steel with a vice is shown. **Practical significance.** The obtained results of the study dedicated to features formation of heterophasic inclusions of the “phases are beside” can be used in the development of technologies for producing steels with the regulated content of heterophase non-metallic inclusions, including the type of “phases are beside”. These results contribute to solving important problems associated with improving the technological ductility of steels for various purposes, as well as preventing the formation of defects during the processing of steels by pressure.

Keywords: steel; heterophase nonmetallic inclusions “phases are beside”; pressure forming

Введение. Неметаллические включения нередко вызывают образование дефектов и разрушение стальных слитков и заготовок в процессе производства металло-продукции при обработке давлением [1–5]. Известно, что доля гетерофазных включений в сталях может составлять до 10...30 % от их общего количества [6–8]. Необходимы исследо-

вания влияния гетерофазных включений на технологическую пластичность сталей.

Цель работы – изучение формоизменения гетерофазных включений «фазы рядом» при разных условиях обработки сталей давлением.

Материалы и методики. Поведение гетерофазных включений «фазы рядом» изучали при горячей прокатке или ковке

(1 200...800 °С) сталей типа 08, колесной, рельсовой и подшипниковой сталей, а также при холодной прокатке ($\varepsilon = 35...75\%$). Фазовый состав включений определяли металлографическим (Neophot-21) и петрографическим методом, а также путем микрорентгено-спектрального анализа на установке МС-46 «Самеса».

Результаты исследования и их обсуждение. Уровень пластичности и хрупкости гетерофазных неметаллических включений при обработке стали давлением определяют многие факторы (температура плавления или размягчения фаз включений, способ, температура и степень деформации, соотношение физико-механических свойств фаз включений и стальной матрицы) [1–5]. Поскольку фазы в гетерофазных включениях обладают различным уровнем пластичности и прочности, в процессе нагружения на границах включение – матрица возникают межфазные напряжения. Следует отметить, что склонность к пластическому формоизменению отдельных фаз гетерофазных включений такая же, как и у однофазных включений соответствующего типа и состава. В то же время совместное деформирование фаз, отделенных внутренними межфазными границами, и стальной матрицы должно вносить определенные особенности в поведение гетерофазных включений при пластической деформации.

Во включениях типа «фазы рядом» обе фазы ϕ_1 и ϕ_2 контактируют со стальной матрицей и образуют с ней межфазную границу включения – матрица, которая состоит из двух участков: $\phi_1 \leftrightarrow м$ и $\phi_2 \leftrightarrow м$. Пластическое поведение таких включений зависит от уровня пластичности каждой из фаз включения ϕ_1 и ϕ_2 , а также от температуры деформации. Гетерофазные включения, состоящие из фаз ϕ_1 и ϕ_2 с разным уровнем пластичности, проявляют неоднородную деформируемость при горячей деформации.

Включения, состоящие из недеформируемых фаз оксидов, шпинелей, нитридов и оксидов титана ϕ_1 и ϕ_2 , пластически не деформируются (рис. 1 а, з). Если одна из фаз слабо пластична, например фаза $FeO \cdot TiO_2$ во включении $TiCN + FeO \cdot TiO_2$, либо пластична, как $(Fe, Mn)S$ во включении $TiCN + (Fe, Mn)S$, она вытягивается в направлении течения стали (рис. 1 е). При деформации двух силикатных либо сульфидных фаз ϕ_1 и ϕ_2 , а также сульфидной и силикатной фаз они удлиняются в направлении течения стальной матрицы (рис. 1 б, в, д). При этом пластичность деформирующихся фаз ϕ_1 и ϕ_2 различна, что обусловлено различием их химического состава и кристаллического строения [1–3].

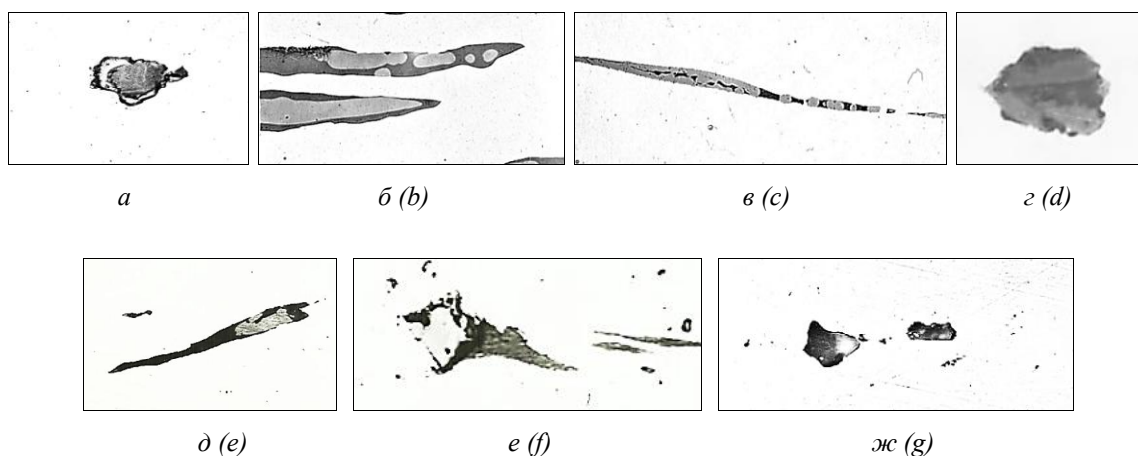


Рис. 1. Гетерофазные включения «фазы рядом» после горячей прокатки: а, з – $TiN + TiCN$, б – $MnO \cdot SiO_2 + FeO \cdot SiO_2$, в, д – $MnO \cdot SiO_2 + (Fe, Mn)S$, е – $TiCN + (Fe, Mn)S$, ж – $TiO + TiO_2$; $\times 500$ /
 Fig. 1. Heterophase inclusions of “phases are beside” after hot rolling: а, d – $TiN + TiCN$, б – $MnO \cdot SiO_2 + FeO \cdot SiO_2$, в, д – $MnO \cdot SiO_2 + (Fe, Mn)S$, е – $TiCN + (Fe, Mn)S$, ж – $TiO + TiO_2$; $\times 500$

Иногда включения разрушались по границе раздела фаз, что чаще наблюдали в случаях недеформированных фаз ϕ_1 и ϕ_2 (рис. 1 *г, ж*), когда под действием сил трения со стороны матрицы благодаря различному поведению фаз включения ϕ_1 и ϕ_2 происходит разделение вдоль поверхности их раздела; фазы разобщаются и существуют самостоятельно. Это приводит к изменению типа включений в процессе деформации: вместо сложных гетерофазных включений второго типа в стали существуют два разных по составу, структуре и свойствам вида однофазных включений.

В процессе трансформации включений между фазами включения ϕ_1 и ϕ_2 и стальной матрицей развивается контактное трение, что обусловлено взаимодействием их поверхностей, препятствующим их относительному перемещению. Характер контактного трения на участках границы включения – матрица $\phi_1 \leftrightarrow \text{м}$ и $\phi_2 \leftrightarrow \text{м}$ различен, что создает дополнительную неоднородность в распределении сил трения вдоль межфазной границы с матрицей (наряду с факторами, изложенными в работах [8–13]). Кроме того, в стыках участков межфазных границ с матрицей $\phi_1 \leftrightarrow \text{м}$, $\phi_2 \leftrightarrow \text{м}$ и межфазной границы во включении $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ должны возникать концентрации контактных напряжений, что может вызвать образование микротрещин в матрице вблизи включений и вдоль указанных межфазных границ. Рассматриваемое контактное трение является кинематическим сухим трением скольжения. Силы трения на участках поверхности включения (ϕ_1 и ϕ_2)-матрица при обработке давлением имеют также составляющие, обусловленные различными типом и строением участков межфазных границ ($\phi_1 \leftrightarrow \text{м}$, $\phi_2 \leftrightarrow \text{м}$) и связанные с определенной поверхностной энергией, а также с трением, возникающим при перемещении (скольжении) межфазных дефектов кристаллического строения [8–13]. Силы трения сдерживают течение матрицы вокруг включения типа «фазы ядр» и распределены на разных участках

межфазной границы включение-матрица $\phi_1 \leftrightarrow \text{м}$ и $\phi_2 \leftrightarrow \text{м}$ неравномерно, что связано с неравномерным распределением нормальных напряжений, действующих на включение.

Следует отметить, что наличие внутренней межфазной границы $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ во включении предполагает взаимодействие между поверхностями фаз включения и возникновение на этих границах контактного трения, способствующего сдерживанию пластического течения фаз включения ϕ_1 и ϕ_2 (если одна из них либо обе пластичны). Силы трения на границе $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ определяются температурой и степенью деформации, а также уровнем пластичности фаз включения первого типа [8–13].

Максимальная величина касательного напряжения на межфазной границе $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ по условию пластичности ограничивается величиной пределов текучести фаз включения ϕ_1 и ϕ_2 , поэтому контактное трение может возбудить на межфазной границе касательное напряжение, величина которого ограничена.

Очевидно, рассматривая особенности развития пластической деформации системы фаз в гетерофазном включении типа «фазы рядом», следует учитывать не только взаимодействие участков поверхностей фаз ϕ_1 и ϕ_2 включения и стальной матрицы, но также взаимодействие поверхностей фаз ϕ_1 и ϕ_2 в условиях контактного трения, приводящее к сглаживанию шероховатостей на межфазных границах $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$, что способствует прирабатываемости рассматриваемых пар трения ϕ_1 – ϕ_2 , ϕ_1 –стальная матрица и ϕ_2 –стальная матрица. Очевидно, для пластичных фаз включений этот процесс выражен сильнее, чем в случаях недеформируемых фаз включений.

При холодной деформации изменяются физико-механические свойства фаз включений и стальной матрицы. Включения, состоящие из фаз ϕ_1 и ϕ_2 -оксидов, шпинелей, нитридов и карбонитридов титана, пластически не деформируются (рис. 2 *а, б*). В крупных

включениях заметны трещины, кроме того, происходит разрушение включений вдоль межфазных границ $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$. Силикатные фазы ϕ_1 и ϕ_2 включений пластически не деформируются (рис. 2 в) и хрупко разрушаются. При деформации двух сульфидных фаз ϕ_1 и ϕ_2 они удлиняются в направлении течения стальной матрицы. При этом пластичность сульфидных фаз различна, что обусловлено различием их

химического состава и кристаллического строения [7; 8].

Гетерофазные включения, состоящие из сульфидной и силикатной фаз ϕ_1 и ϕ_2 с разным уровнем пластичности, проявляют неоднородную деформируемость при холодной деформации (рис. 2 з, д). При этом пластичная сульфидная фаза может сдерживать разрушение хрупкой силикатной фазы (рис. 2 з).

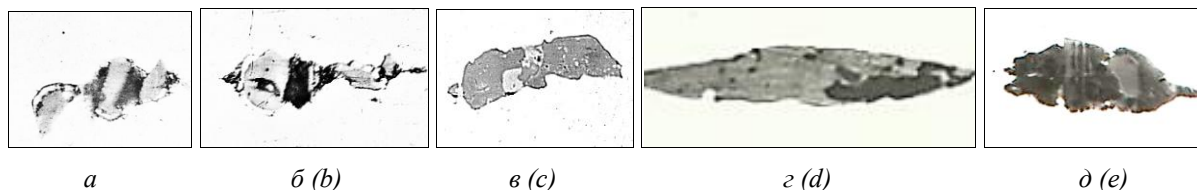


Рис. 2. Гетерофазные включения «фазы рядом» после холодной прокатки: а – $TiN + TiCN$, б – $MnO \cdot Al_2O_3 + Al_2O_3$, в – $MnO \cdot SiO_2 + FeO \cdot SiO_2$, з, д – $MnO \cdot SiO_2 + (Fe, Mn)S$; $\times 500$ / Fig. 2. Heterophase inclusions of “phases are beside” after cold rolling: а – $TiN + TiCN$, б – $MnO \cdot Al_2O_3 + Al_2O_3$, в – $MnO \cdot SiO_2 + FeO \cdot SiO_2$, д, е – $MnO \cdot SiO_2 + (Fe, Mn)S$; $\times 500$

При холодной прокатке в процессе трансформации гетерофазных включений между фазами включения ϕ_1 и ϕ_2 и стальной матрицей развивается контактное трение, препятствующее их относительному перемещению. Силы трения сдерживают течение матрицы вокруг включения и распределены на разных участках межфазной границы включения – матрица $\phi_1 \leftrightarrow m$ и $\phi_2 \leftrightarrow m$ неравномерно, что связано с неравномерным распределением нормальных напряжений, действующих на включение. На внутренней межфазной границе $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ во включении происходит взаимодействие между поверхностями фаз включения и возникновение на этих границах контактного трения, способствующего сдерживанию пластического

течения фаз включения ϕ_1 и ϕ_2 (это актуально при наличии одной либо двух сульфидных фаз). Максимальная величина касательного напряжения на межфазной границе $\phi_1 \leftrightarrow \phi_2$ по условию пластичности ограничивается величиной пределов текучести сульфидных фаз включения ϕ_1 и ϕ_2 .

В холоднокатаной стали с увеличением степени деформации увеличивается дисперсность включений второго типа «фазы рядом» в результате их хрупкого разрушения.

Выводы. Исследовано поведение гетерофазных включений «фазы рядом» в процессе горячей и холодной деформации. Показано взаимное влияние фаз включений на их совместную деформацию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виноград М. И., Громова Г. П. Включения в легированных сталях и сплавах : монография. Москва : Металлургия, 1972. 216 с.
2. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей : монография. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016. 549 с.
3. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Деформация неметаллических включений при прокатке стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1983. № 4. С. 80–84.
4. Губенко С. И., Беспалько В. Н., Жиленкова Е. В. Влияние температуры и степени деформации на характер изменения эвтектических боридов в высокохромистой стали с бором. *Теория и практика металлургии*. 2006. № 4–5. С. 158–160.

5. Губенко С. И. Межфазные границы включение – матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение – матрица и свойства сталей : монография. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2017. 506 с.
6. Кисслинг Р., Ланге Н. Неметаллические включения в стали : монография. Москва : Metallurgia, 1968. 124 с.
7. Губенко С. И., Беспалько В. Н. Виды и структура гетерофазных включений в сталях. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. №1 (84). С. 30–35.
8. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпозитные включения в сталях : монография. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2019. 330 с.
9. Губенко С. И. Неметаллические включения и прочность сталей. Физические основы прочности сталей : монография. Саарбрюккен (Saarbrücken) : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2015. 476 с.
10. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений : монография. Днепропетровск : НМетАУ, ИЦ Системные технологии, 2014. 301 с.
11. Губенко С. И., Исков М. В. Структура и сопротивление разрушению межфазных границ неметаллическое включение – матрица стали. *Теория и практика металлургии*. 2004. № 5. С. 30–38.
12. Губенко С. И. К вопросу о строении межфазных границ неметаллическое включение – матрица в стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1994. № 6. С. 105–112.
13. 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.

REFERENCES

1. Vinograd M.I. and Gromova G.P. *Vkluchenia v legirovannih staliakh I splavah* [Inclusions in alloy steels and alloys]. Moscow : Metallurgy, 1972, 216 p. (in Russian).
2. Gubenko S.I. *Nemetallicheskiye vklucheniya 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).
3. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Deformatsiya nemetallicheskih vklucheniy pri prokatke stali*. [Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling]. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgiya* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1983, no. 4, pp. 80–84. (in Russian).
4. Gubenko S.I., Bepalko V.N. and Zhilenkova Ye.V. *Vliyaniye temperatury i stepeni deformatsii na kharakter izmeneniya evtekticheskikh boridov v vysokokhromistoy stali s borom* [Influence of temperature and degree of deformation on the nature of changes in eutectic borides in high-chromium steel with boron]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and practice of metallurgy]. 2006, no. 4–5, pp. 158–160. (in Russian).
5. Gubenko S.I. *Mezhfaznye granitsy vklucheniya – matritsa I svoystva staley* [Interphase boundaries inclusion-matrix and properties of steels]. Germany – Mauritius : Palmarium academic publishing, 2017, 506 p. (in Russian).
6. Kiessling R. and Lange N. *Nemetallicheskiye vklucheniya v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Moscow : Metallurgy Publ., 1968, 124 p. (in Russian).
7. Gubenko S.I. and Bepalko V.N. *Vidy i struktura geterofaznykh vklucheniy v stalyakh* [Types and structure of heterophase inclusions in steels]. *Metal Science and Heat Treatment of Metals*. 2019, no. 1 (84), pp. 30–35. (in Russian).
8. Gubenko S. *Geterofaznyye mikrokompozitnyye vklucheniya v stalyakh*. [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2019, 330 p. (in Russian).
9. Gubenko S.I. *Nemetallicheskiye vklucheniya i prochnost' stali* [Non-metallic inclusions and strength of steel]. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2015, 476 p. (in Russian).
10. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskih vklucheniy*. [Physics of steel fracture near non-metallic inclusions]. Dnipropetrovsk : NMetAU, Information Technology Systems Technologies, 2014, 301 p. (in Russian).
11. Gubenko S.I. and Iskov M.V. *K voprosu o stroenii mezhfaznykh granits nemetallicheskiye vklucheniya – matritsa v stali* [the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion-matrix in steel]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2004, no. 5, pp. 30–38. (in Russian).
12. Gubenko S.I. *K voprosu o stroenii mezhfaznykh granits nemetallicheskiye vklucheniya – matritsa v stali* [To the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion-matrix in steel]. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgiya* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1994, no. 6, pp. 105–112. (in Russian).
13. Gubenko S.I. and Parusov E.V. *Plastichnost' splavov 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).

Поступила в редакцию : 15.02.2020 г.