

УДК 669.018.294:620.19

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.070720.40.639

## ПОВЕДЕНИЕ ГЕТЕРОФАЗНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ «ТУГОПЛАВКАЯ ФАЗА, ОКРУЖЕННАЯ ЛЕГКОПЛАВКОЙ ОБОЛОЧКОЙ» ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ ДАВЛЕНИЕМ

ГУБЕНКО С. И., *докт. техн. наук, проф.*

Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

**Аннотация. Постановка проблемы.** Необходимы исследования влияния гетерофазных включений на технологическую пластичность сталей различного назначения. **Цель работы** – изучение уровня пластичности гетерофазных включений «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» при обработке сталей давлением. **Методика.** Применяли комплексные методы исследования гетерофазных неметаллических включений (металлографический, петрографический, микрорентгеноспектральный анализ). **Результаты.** Установлено, что гетерофазные включения «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» имеют различные структуру и фазовый состав. Показаны особенности пластического поведения различных фаз в таких включениях при различном сочетании фаз. Проанализировано взаимодействие фаз во включениях в процессе обработки стали давлением. **Научная новизна.** Установлены особенности пластического поведения гетерофазных включений «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» при обработке сталей давлением. Показаны особенности развития процессов межфазного трения на границах включение – матрица и на внутренних границах во включениях; взаимное влияние фаз включений на их совместную деформацию, а также возможность трансформации включений «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» в процессе горячей и холодной деформации при обработке сталей давлением. **Практическая значимость.** Использование полученных результатов позволит разработать технологии получения сталей с регламентированным содержанием и видами гетерофазных неметаллических включений, что позволит существенно повысить их технологическую пластичность, а также предупредить образование различного рода дефектов при обработке сталей давлением.

**Ключевые слова:** сталь; гетерофазные неметаллические включения «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой»; обработка давлением

## ПОВЕДІНКА ГЕТЕРОФАЗНИХ ВКЛЮЧЕНЬ «ТУГОПЛАВКА ФАЗА, ОТОЧЕНА ЛЕГКОПЛАВКОЮ ОБОЛОНКОЮ» ПІД ЧАС ОБРОБКИ СТАЛЕЙ ТИСКОМ

ГУБЕНКО С. І., *докт. техн. наук, проф.*

Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

**Анотация. Постановка проблемы.** Необходимы дослідження гетерофазних включень на технологічну пластичність сталей різного призначення. **Мета роботи** – вивчення рівня пластичності гетерофазних включень «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою» під час обробки сталей тиском. **Методика.** Застосовували комплексні методи дослідження гетерофазних неметалевих включень (металографічний, петрографічний, микрорентгеноспектральний аналіз). **Результати.** Встановлено, що гетерофазні включення «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою» мають різні структуру і фазовий склад. Показано особливості пластичної поведінки різних фаз у таких включеннях за різного сполучення фаз. Проаналізовано взаємодію фаз у включеннях у процесі обробки сталі тиском. **Наукова новизна.** Встановлено особливості пластичної поведінки гетерофазних включень «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою» під час обробки сталей тиском. Показано особливості розвитку процесів міжфазного тертя на межах включення – матриця і на внутрішніх межах у включеннях; взаємний вплив фаз включень на їх спільну деформацію, а також можливість трансформації включень «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою» в процесі гарячої і холодної деформації під час обробки сталей тиском. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволить розробити технології отримання сталей з регламентованими вмістом і видами

гетерофазних неметалевих включень, що дозволить істотно підвищити їх технологічну пластичність, а також попередити утворення різного роду дефектів під час обробки сталей тиском.

**Ключові слова:** *сталь; гетерофазні неметалеві включення «тугоплавка фаза, оточена легкоплавкою оболонкою»; обробка тиском*

## THE BEHAVIOUR OF HETEROPHASE INCLUSIONS “HIGH-MELTING PHASE SURROUNDING WITH LOW-MELTING COVER” UNDER STEELS PRESSURE FORMING

GUBENKO S.I., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

**Abstract. Purpose.** It is necessary to study of the effect of heterophase inclusions on the technological ductility of steels for various purposes. The goal of the work was to study the plasticity level of heterophase inclusions “high-melting phase surrounded with low-melting cover” during the processing of steels by pressure. **Methods.** Comprehensive methods for the study of heterophase non-metallic inclusions (metallographic, petrographic, X-ray microanalysis methods) were used. **Results.** It was found that heterophase inclusions “high-melting phase surrounded with low-melting cover” have different structures and phase compositions. The features of the plastic behavior of various phases in inclusions “high-melting phase surrounded with low-melting cover” with various combinations of phases were shown. The interaction of phases in the inclusions during the processing of steel by pressure was analyzed. **Scientific novelty.** The special features of the plastic behavior of heterophasic ones were identified, including the “high-melting phase, surrounded with low-melting cover” with steel sampling with a vice. It was shown that the process development of interphase rubbing at the boundaries of the included-matrix and at the internal boundaries of the inclusions was shown. The inverse phase inclusion at the third stage of deformation was presented. The possibility of transforming the inclusion of a “high-melting phase, surrounded with low-melting cover” in the process of hot and cold deformation when machining steel with a vice is shown. **Practical significance.** The results obtained will allow developing technologies for producing steels with regulated content and types of heterophase non-metallic inclusions, which will significantly increase their technological plasticity, as well as prevent the formation of various kinds of defects during the processing of steels by pressure.

**Keywords:** *steel; heterophase nonmetallic inclusions “high-melting phase surrounding with low-melting cover”; pressure forming*

**Введение.** Как правило, зоны стальных слитков и заготовок, содержащие повышенное количество неметаллических включений, являются местами зарождения разрушения в процессе производства металлических изделий при обработке сталей давлением [1–5]. Доля гетерофазных включений в сталях может составлять в среднем 10...30 % от их общего количества [6–8]. Необходимы исследования влияния гетерофазных включений на технологическую пластичность сталей различного назначения.

**Цель работы** – изучение уровня пластичности гетерофазных включений «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» при обработке сталей давлением.

**Материалы и методики.** Поведение гетерофазных включений при обработке стали давлением изучали при горячей прокатке или ковке сталей 08Ю, 08Т, 08кп, 08Х18Н10Т, 12ГС, Р7, 08Х, НБ–57, 08ГСЮТФ, ШХ15 в интервале температур 1200...800 °С и холодной прокатке со степенями деформации 35...75 %. Фазовый состав включений определяли металлографическим (Neophot-21) и петрографическим методом, а также путем микрорентгеноспектрального анализа на установке МС-46 «Самеса».

**Результаты исследования и их обсуждение.** Поведение гетерофазных включений при обработке стали давлением, в частности, их деформируемость, определяется многими факторами, такими как температура их плавления или

размягчения фаз включений, способ деформации стали, температура и степень деформации, соотношение физико-механических свойств фаз включений и стальной матрицы и т. д. [1–5]. Поскольку фазы в гетерофазных включениях обладают различным уровнем пластичности и прочностью, в процессе нагружения на межфазных границах включение – матрица возникают напряжения, которые могут привести к их пластическому поведению или разрушению.

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, составляющих одно включение и отделенных внутренними межфазными границами, должно вносить определенные особенности в поведение гетерофазных включений при обработке сталей давлением.

В случае включений типа «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» одна из фаз – фаза-оболочка ф-о1 контактирует со стальной матрицей и образует с ней межфазную границу включение – матрица. Включения, состоящие из силикатной оболочки ф-о1 и оксида, шпинели, нитрида титана ф2 проявляют неоднородную деформируемость при горячей деформации.

Силикатная фаза хорошо деформируется, вытягиваясь в направлении

деформации (рис. 1 а, е), а корунд или шпинель, находясь в силикатной матрице, не деформируется, но и не разрушается, как было в случае однофазных включений [1–3]. Иногда возможно разрушение силикатной фазы на последних стадиях прокатки (рис. 1 б). Часто включения разрушались по границе раздела фаз. Встречаются двухфазные включения сульфид – оксид с различной деформируемостью сульфидной фазы, которая либо образует «хвосты», подобно силикатным, либо не деформируется в зависимости от ее химического состава.

Включения, представляющие собой частицы недеформируемой фазы ф2 (оксида, нитрида), заключенной в пластичную сульфидную матрицу ф-о1, также проявляют неоднородную деформируемость. Пластичная сульфидная фаза легко деформируется совместно с матрицей, а находящееся внутри включение твердой фазы не изменяет своей формы (рис. 1 в).

Под действием сил трения со стороны матрицы благодаря различному поведению фаз включения происходит разделение вдоль поверхности их раздела; фазы разобщаются и существуют самостоятельно. Это приводит к изменению типа включений в процессе деформации. При наличии сульфидной и силикатной фаз, обладающих разным уровнем пластичности, происходит их совместная деформация (рис. 1 з).

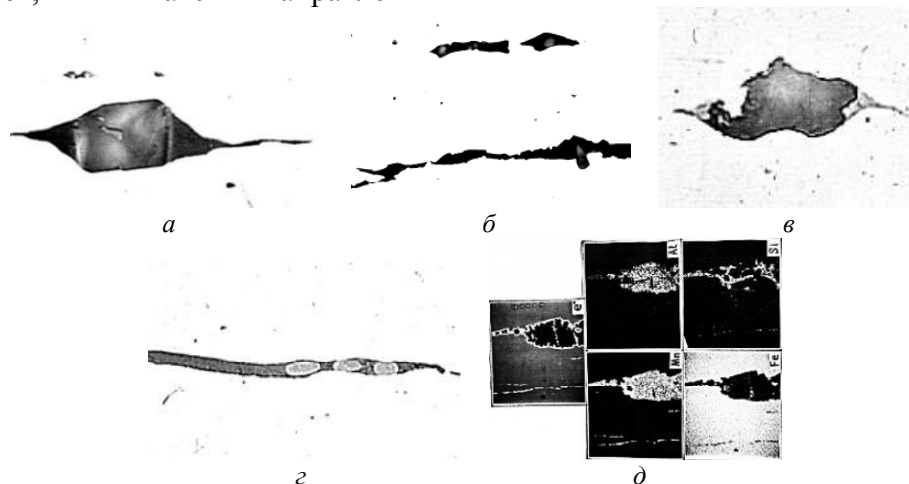


Рис. 1. Включения «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» после горячей прокатки: а, б, д –  $MnO \cdot SiO_2 + Al_2O_3, MgO \cdot SiO_2 + Al_2O_3$ , в –  $(Fe, Mn)S + Al_2O_3$ , з –  $(Fe, Mn)S + MnO \cdot SiO_2$ ;  $\times 500$

В процессе формоизменения включений между фазой-оболочкой включения ф-01 и стальной матрицей развивается контактное трение. Силы трения на поверхности включения (ф-01)-матрица имеют также составляющие, обусловленные типом и строением межфазных границ и связанные с определенной поверхностной энергией, а также с трением, возникающим при перемещении (скольжении) межфазных дислокаций и дисклинаций [8–13]. Наличие внутренней межфазной границы ф-01 ↔ ф2 во включении предполагает взаимодействие между поверхностями фаз включения и возникновение на этих границах контактного трения, способствующего сдерживанию пластического течения фаз включения ф-01 и ф2 (если одна из них либо обе пластичны). Силы трения на границе ф-01 ↔ ф2 определяются температурой и степенью деформации, а также уровнем пластичности фаз включения [8].

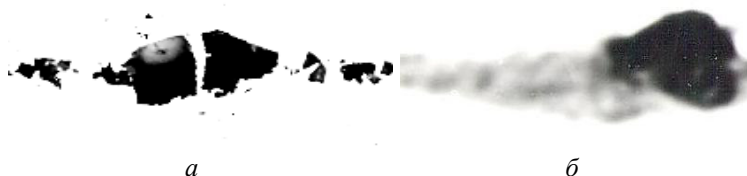
Максимальная величина касательного напряжения на межфазной границе ф-01 ↔ ф2 по условию пластичности ограничивается величиной пределов текучести фаз включения ф-01 и ф2, поэтому контактное трение может возбудить на межфазной границе касательное напряжение, величина которого ограничена. Очевидно, рассматривая особенности развития пластической деформации системы фаз в гетерофазном включении указанного типа, следует учитывать не только взаимодействие поверхностей фазы-оболочки ф-01 включения и стальной матрицы, но также взаимодействие поверхностей фаз ф-01 и ф2 в условиях контактного трения, приводящее к сглаживанию шероховатостей на межфазных границах ф-01 ↔ ф2, что способствует прирабатываемости рассматриваемых пар трения ф-01 – ф и ф-01 – стальная матрица. Очевидно, для

пластичных фаз включений этот процесс выражен сильнее, чем в случаях недеформируемых фаз.

При холодной деформации включения, состоящие из силикатной оболочки ф-01, которая пластически продеформировалась в процессе предварительной горячей деформации, а также оксида, шпинели, нитрида титана ф2 не пластичны. Обе фазы хрупко разрушаются (рис. 2 а). Происходило разрушение также по межфазным границам ф-01 ↔ ф2. Включения, представляющие собой частицы недеформируемой фазы ф2 (оксида, нитрида), заключенной в пластичную сульфидную матрицу ф-01, проявляют неоднородную деформируемость.

Пластичная сульфидная фаза деформируется совместно с матрицей, а включение фазы ф2 не изменяет своей формы (рис. 2 б). Иногда включения разрушались по границе раздела фаз. Встречаются включения сульфид – оксид с различной деформируемостью сульфидной фазы, зависящей от ее химического состава [7; 8]. Действующие со стороны матрицы напряжения расходуются на деформацию пластичной сульфидной фазы, что уменьшает напряжения, действующие на недеформируемую фазу включения.

Под действием сил контактного трения благодаря различному поведению фаз включения происходит разделение вдоль поверхности их раздела; фазы разобщаются и существуют самостоятельно. При наличии сульфидной ф-01 и силикатной фаз ф2, обладающих разным уровнем пластичности, происходит деформация сульфидной фазы, силикатная фаза хрупко разрушается (рис. 2 в). При наличии оксидной либо нитридной фазы ф2 в оксидной оболочке ф-01 обе фазы включения при холодной прокатке не деформируются (рис. 2 г).



а

б



Рис. 2. Включения «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» после холодной прокатки: а –  $MnO \cdot SiO_2 + Al_2O_3$ , б –  $(Fe, Mn)S + Al_2O_3$ , в –  $(Fe, Mn)S + MnO \cdot SiO_2$ , г –  $MnO \cdot Al_2O_3 + Al_2O_3$ ;  $\times 500$

При холодной деформации в процессе формоизменения включений между фазой – оболочкой включения ф-01 и стальной матрицей развивается контактное трение. Силы трения сдерживают течение матрицы вокруг включения и распределены по границе раздела неравномерно, что связано с неравномерным распределением нормальных напряжений, действующих на включение [2; 3]. Вдоль межфазной границы ф-01 ↔ ф2 во включении также происходит взаимодействие между поверхностями фаз включения, что способствует возникновению на этих границах контактного трения, сдерживающего пластического течения сульфидной фазы включения ф-01. В холоднокатаной стали с увеличением степени деформации увеличивается дисперсность включений «тугоплавкая фаза, окруженная

легкоплавкой оболочкой» в результате их хрупкого разрушения.

**Выводы.** Изучено поведение гетерофазных включений «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» в процессе горячей и холодной деформации при обработке сталей давлением. Показано взаимное влияние фаз включений на их совместную деформацию.

Исследованные в данной работе гетерофазные неметаллические включения присутствуют во многих углеродистых и легированных сталях, поэтому приведенные данные об их поведении представляют широкий практический интерес, что поможет понять роль включений «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» в обеспечении уровня технологической пластичности и образовании различного рода дефектов при обработке сталей давлением.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виноград М. И., Громова Г. П. Включения в легированных сталях и сплавах. Москва : Металлургия, 1972. 216 с.
2. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей. 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 включения – матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение – матрица и свойства сталей. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2017. 506 с.
6. Кислинг Р., Ланге Н. Неметаллические включения в стали. Москва : Металлургия, 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. Germany – Mauritius, Beau Bassin. Palmarium academic publishing, 2019. 330 с.
9. Губенко С. И. Неметаллические включения и прочность сталей. Физические основы прочности сталей : монография. Саарбрюкен (Saarbrücken) : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2015. 476 с.
10. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений. 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. *Vklucheniya v legirovannih staliah I splavah* [Inclusions in alloy steels and alloys]. Moscow : Metallurgy, 1972, 216 p. (in Russian).
2. 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).
3. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Deformatsiya nemetallicheskiikh vklyucheniy pri prokatke stali* [Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling]. *Izvestiya AN SSSR. Metally* [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 E.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 granitsi vklucheniya-matritsa I svoisrva 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. *Nemetallicheskie vkluchenija 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 vklyucheniy v stalyakh* [Types and structure of heterophase inclusions in steels]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2019, no. 1 (84), pp. 30–35. (in Russian).
8. Gubenko S. *Geterofaznye mikrokompozitnyye vklyucheniya v stalyakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany – Mauritius, Beau Bassin. Palmarium academic publishing, 2019, 330 p. (in Russian).
9. Gubenko S.I. *Nemetallicheskie vkluchenija 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 nemetallicheskiikh vklyucheniy* [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 stroyenii mezhfaznykh granits nemetallicheskiye vklyucheniya-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).
12. Gubenko S.I. *K voprosu o stroyenii mezhfaznykh granits nemetallicheskiye vklyucheniya-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).
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: 28.04.2020 г.