

UDC 621.791.042

Author: BOLDYREV Alexander Mikhaylovich, Doctor of Engineering, Corresponding Member of Russia Academy of Architecture and Science, Professor of Department of Metal Structures and Weld in Building Construction, Voronezh State Technical University (VSTU); Moskovsky prospect, 14, Voronezh, Russia, 394006, boldyreff@inbox.ru;

Author: ORLOV Alexander Semenovich, Doctor of Engineering, Professor of Department of Metal Structures and Weld in Building Construction, Voronezh State Technical University (VSTU); Moskovsky prospect, 14, Voronezh, Russia, 394006, alex@mk.vrn.ru;

Author: GUSCHIN Dmitry Alexandrovich, Research Fellow of Department of Public Company TSNIIS NITS MOSTY Scientific and Research Institute of Transport Construction (Public Company TSNIITS); Volgogradskaya str., 39b, Voronezh, Russia, 394028, dag55@mail.ru;

Author: RUBTSOVA Elena Grigorievna, PhD in Engineering, Associate Professor of Metal Structures and Weld in Building Construction, Voronezh State Technical University (VSTU); Moskovsky prospect, 14, Voronezh, Russia, 394006, u00568@vgasu.vrn.ru;

Author: SANNIKOV Vladimir Gennadievich, Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor of the Chair «General Physics», Voronezh State Technical University (VSTU); Moskovsky prospect, 14, Voronezh, Russia, 394006, v_sannikov@mail.ru

INFLUENCE OF NONMETALLIC INCLUSIONS ON THE RESISTANCE OF METAL WELD TO BRITTLE FRACTURES

EXTENDED ABSTRACT:

According to statistics, up to 80% of all fixed metal structure accidents are associated with welded joints. However, most of the emergency destructions, usually caused by non-metallic inclusions in the weld metal, are fragile. The probability of brittle fracture decreases with increasing plasticity. And plasticity, that depends on the mobility of dislocations to a great degree, decreases with temperature decrease and increase in the strain rate. The plasticity of the metal is a structurally sensitive property and depends on the type of crystal lattice that determines the number of densely packed directions and slip planes. Low-alloy steels, mainly used in welded steel structures, have a volume-centered cubic lattice with a relatively small number of planes and sliding direction. These steels are ductile at relatively high temperatures and become brittle at negative temperatures.

The only way to improve the ductility of the metal without significantly reducing its strength is to grind grain. One of the effective ways to obtain fine-grained structure of the weld metal is to introduce modifiers into the weld pool.



The modifiers should be in the form of refractory compounds (oxides, carbides, nitrides), which in the crystallization zone of the weld pool are crystallization centers and increase the number of grains per unit volume. Studies of the modification of the crystallizing metal in the conditions of casting and fusion welding have shown that the melt overheating reduces the effect of modification. In electric arc welding with an arc temperature of more than 6000K, the danger of deactivation of the modifier is high. One way to reduce overheating and improve the efficiency of modifiers in welding is the introduction of modifying particles in the weld pool in combination with more massive granules in the form of chopped wire, serving as micro-refrigerators. This method, called welding with a metalchemical additive (MCA), is successfully used in bridge construction.

Modification of the weld pool with refractory particles, along with the positive effect of grinding grain in the weld there is also a negative moment: modifying particles that remain in the weld in the form of non-metallic inclusions are stress concentrators and can become centers of cracking.

The present work analyzes the ways to minimize the harmful effects of non-metallic inclusions on embrittlement of metal weld from the standpoint of fracture mechanics. To illustrate this the automatic welding of 10XSND steel with a modifying metal chemical additive is used as an example. The basic requirements to parameters and physical and chemical properties of non-metallic inclusions that provide high resistance of weld metal against embrittlement are formulated.

Key words: welding, fragile destruction, modification of nanoparticles, non-metallic inclusions.

DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-3-142-161

MACHINE-READABLE INFORMATION ON CC-LICENSES (HTML-CODE) IN METADATA OF THE PAPER

```
<a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/"></a><br /><span xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" property="dct:title">Influence of nonmetallic inclusions on the resistance of metal weld to brittle fractures</span>
<a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International License</a>
<a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International License</a>
<br />Based on a work at <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-3-2018/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-3-2018/</a>
<br />Permissions beyond the scope of this license may be available at <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="mailto:dag55@mail.ru" rel="cc:morePermissions">dag55@mail.ru</a>
```



References:

1. *Paton B.E.* Sovremennye napravleniya issledovaniy i razrabotok v oblasti svarki i prochnosti konstrukcij. [Modern research and development in the field of welding and structural strength]. *Avtomaticheskaya svarka. [Automatic welding]* 2003. № 10/11. P. 7–13. (In Russian).
2. *Holl V.* Hrupkie razrusheniya svarnyh konstrukcij [Brittle fracture of welded structures] N'yu-Jork. [New York] 1967. Per. s angl. M.: «Mashinostroenie» [Mechanical] 1974. 320 p. (In Russian).
3. *Petch N.* Metallograficheskie aspekty razrusheniya. [Metallographic aspects of fracture] *Razrushenie : v 6 tomah. Tom 1. Mikroskopicheskie i makroskopicheskie osnovy mekhaniki razrusheniya. [Destruction: in 6 volumes. Volume 1. Microscopic and macroscopic fundamentals of fracture mechanics]* Moscow: Mir. 1973. 616 p. (In Russian).
4. *Boldyrev A.M., Grigorash V.V.* Problems of micro- and nano-modification of welding seams of metal construction. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction.* 2011, Vol. 3, no. 3, pp. 42–52. URL: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_3_2011_RUS.pdf (Date of access: 20.05.2018). (In Russian).
5. *Alov A.A., Vinogradov V.S.* Vliyanie vibracii ehlektroda na process dugovoj svarki i svojstva shvov [Influence of electrode vibration on the process of arc welding and characteristics of joints]. *Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production]*. 1958. № 9. P. 19–22. (In Russian).
6. *Sutyryn G.V.* Issledovanie mekhanizma vozdejstviya nizkochastotnoj vibracii na kristallizaciyu svarочноj ванны. [Research of the mechanism of influence of low-frequency vibration on crystallization of a welding bath] *Avtomaticheskaya svarka. [Automatic welding]* 1975. № 5. P. 7–10. (In Russian).
7. *Erohin A.A., Kitajgorodskij U.I., Silin L.L.* O vozdejstvii kolebanij ul'trazvukovoj chastoty na haraktere kristallizacii svarочноj ванны. [On the effect of ultrasonic frequency oscillations on the nature of crystallization of the weld pool]. *Izvestiya AN SSSR [News of the USSR Academy of Sciences]*. OTN. 1958. № 1. (In Russian).
8. *Boldyrev A.M., Dorofeev E.B., Tolokonnikov N.P.* Vozdejstvie prinuditel'nyh teplovyh kolebanij na fronte kristallizacii na strukturu i svojstva metalla svarnyh shvov [The impact forced the thermal vibrations on the crystallization front on the structure and properties of weld metal] «Issledovaniya zharoprochnyh splavov». mezhvuzovskij sbornik. [«Studies of high-temperature alloys», interuniversity collection] Voronezh VPI. 1974. P. 165–171. (In Russian).
9. *Kolmogorov A.N.* K statisticheskoj teorii kristallizacii metallov. [The statistical theory of crystallization of metals]. *Izvestiya AN SSSR [News of USSR Academy of Sciences]*, Seriya matematicheskaya. [Mathematical Series] 1957. № 3. (In Russian).
10. *Lee Eun U.* Thermal stress and strain in a metal matrix composite with a spherical reinforcement particle. *Met. Nrans. A.* 1992. 23 № 8. P. 2205–2210.



11. *Golovko, V.V., Pohodnya I.K.* Vliyanie nemetallicheskih vklyuchenij na formirovanie struktury metalla svarnyh shvov vysokoprochnyh nizkole-girovannyh stalej. [Influence of non-metallic inclusions on the formation of the structure of metal welds of high-strength low-alloy steels] *Avtomaticheskaya svarka. [Automatic welding]* 2013. № 6. P. 3–11. (In Russian).
12. *Nott Dzh. F.* Osnovy mekhaniki razrusheniya. [Fundamentals of fracture mechanics]. [Translated from English by D. V. Lapteva, ed. by V. G. Kudryashov]. Moscow: Metallurgiya [Metallurgy]. 1978. 256 p. (In Russian).
13. *Boldyrev A.M., Grebenchuk V.G., Guschin D.A.* Vliyanie dioksida titana v sostave metallohimicheskoy pri-sadki na mekhanicheskie svoystva metalla shva stali 10HSND. [Influence of titanium dioxide in the composition metallogenically additives on the mechanical properties of the weld metal of steel 10KHSND]. *Svarka i Diagnostika. [Welding and Diagnostics]* Moscow: 2014. №3. P. 39–42. (In Russian).
14. *Boldyrev A.M., Guschin D.A.* Povyshenie udarnoj vyazkosti metalla shva svarnyh konstruk-cij stal'nyh mostov/ [The increase in toughness of the weld metal of welded structures steel bridges] *Vestnik central'nogo regional'nogo otdeleniya Rossijskoj Akademii Arhitektury i Stroitel'nyh Nauk: Vypusk 13: Materialy Akademicheskikh nauchnyh chtenij «Nauchnye i inzhenernye problemy stroitel'no-tehnologicheskoy utilizacii tekhnogennyh othodov».* [Bulletin of the Central regional branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences: Issue 13: Proceedings of the Academic of the scientific conference «Scientific and engineering problems of the construction technology of recycling of industrial waste»]. Belgorod: RAASN, BGTU im. V.G. Shuhova, 2014. P. 34–41. (In Russian).
15. *Boldyrev A.M., Orlovv A.S., Guschin D.A.* New technology for production of granular adding material with nanomodifying additives for steel arc welding. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction.* 2016, Vol. 8, no. 6, pp. 124–143. URL: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-6-2016/124-143.pdf (Date of access: 20.05.2018). (In Russian).
16. *Boldyrev A.M. Grigorash V.V., Guschin D.A., Grebenchuk V.G.* The study of particles adhesive strength in modifying agent for bridge structure welding. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction.* 2012, Vol. 4, no. 2, pp. 56–69. URL: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_2_2012_RUS.pdf. (Date of access: 20.05.2018). (In Russian).
17. *Boldyrev A.M., Grebenchuk V.G., Guschin D.A., Tkachev A.G., Blinov S.V.* Production of metal chemical welding additive with nanodispersed particles of titanium dioxide. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction.* 2013. Vol 5, no. 6, pp. 53–66. URL: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_6_2013_RUS.pdf. (Date of access: 20.05.2018). (In Russian).
18. *Boldyrev A.M., Guschin D.A.* Ocenka prochnosti scepheniya himicheskoy dobavki s provo-lochnoj kroshekoy v metallohimicheskoy svarochnoj prisadke. [Evaluation of the adhesion strength of the chemical additives with the wire babe metallogenically welding additives] *Vestnik central'nogo regional'nogo otdeleniya Rossijskoj Akademii Arhi-*



- tektury i Stroitel'nyh nauk. Tambov - Voronezh: Vypusk 11 (k 20-letiyu RAASN). Materialy Akademicheskikh nauchnyh chtenij «Problemy arhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'stva v social'no-ehkonomicheskom razvitii regionov», [Bulletin of the Central regional branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. Tambov-Voronezh: Issue 11 (to the 20th anniversary of RAASN). Materials of Academic scientific readings «Problems of architecture, urban planning and construction in the socio-economic development of the regions»]. Tambov. 2012. P. 176–181. (In Russian).
19. *Boldyrev A.M., Guschin D.A.* Vliyanie tekhnologii izgotovleniya metallohimicheskoy prisadki (MHP) na mekhanicheskie svoystva svarnyh soedinenij mostovyh metallokonstrukcij. [Influence of technology of production of metal chemical additives (MCP) on the mechanical properties of welded joints of bridge metal structures] Tekhnologii uprochneniya nanoseniya pokrytij i remonta: teoriya i praktika. ch. 1. Izd-vo Politekhnikeskogo universiteta. [Technologies of hardening of coating and repair: theory and practice, part 1] SPb, Publishing House of the Polytechnic University. 2013. P. 36–42. (In Russian).
 20. *Golovko V.V., Boldyrev A.M., Guschin D.A., Kuznecov V.D., Fomichev S.K., Smirnov I.V.* Osobennosti raspredeleniya i rol' nemetallicheskih vklyuchenij v metalle shva pri vvedenii v svarochnuyu vannu nano oksidov. [Peculiarities of distribution and the role of non-metallic inclusions in the weld metal when introduced into the weld pool of nano oxides] Svarka i Diagnostika. [Welding and Diagnostics] Moscow: 2015. № 6. P. 25–28. (In Russian).
 21. *Boldyrev A.M.* Povyshenie vyazkosti metalla shva v svarnyh soedineniyah stal'nyh mostovyh konstrukcij. [Increasing the viscosity of the weld metal in welded joints of steel bridge structures] Sbornik «Fundamental'nye poiskovye i prikladnye issledovaniya po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noj otrasli RF [Proceedings Fundamental research and applied research on scientific support for the development of architecture, urban planning and construction industry of the Russian Federation]. «Nauchnye trudy RAASN. [Scientific works of the Russian Academy of architecture and building Sciences]. Moscow. 2016. P. 445–449. (In Russian).

DEAR COLLEAGUES!

THE REFERENCE TO THIS PAPER HAS THE FOLLOWING CITATION FORMAT:

Boldyrev A.M., Orlov A.S., Guschin D.A., Rubtsova E.G., Sannikov V.G. Influence of nonmetallic inclusions on the resistance of metal weld to brittle fractures. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018, Vol. 10, no. 3, pp. 142–161. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-3-142-161](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-3-142-161). (In Russian).



УДК 621.791.042

Автор: БОЛДЫРЕВ Александр Михайлович, д-р техн. наук, чл.-кор. РААСН, проф. каф. «Металлические конструкции и сварка в строительстве», Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); Московский проспект, д. 14, г. Воронеж, Воронежская область, Россия, 394026, boldyreff@inbox.ru;

Автор: ОРЛОВ Александр Семёнович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Металлические конструкции и сварка в строительстве», Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); Московский проспект, д. 14, г. Воронеж, Воронежская область, Россия, 394026, alex@mk.vrn.ru;

Автор: ГУЩИН Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, научн. сотрудник филиала Научно-исследовательского института транспортного строительства (АО ЦНИИС) «Научно-исследовательского центра «Мосты» («НИЦ «Мосты»); ул. Волгоградская д.396, г. Воронеж, Россия, 394028, dag55@mail.ru;

Автор: РУБЦОВА Елена Григорьевна, канд. техн. наук, доц. каф. «Металлические конструкции и сварка в строительстве», Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); Московский проспект, д. 14, г. Воронеж, Воронежская область, Россия, 394026, u00568@vgasu.vrn.ru;

Автор: САННИКОВ Владимир Геннадьевич, канд. физ.-мат. наук, доц. каф. «Общей физики», Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); Московский проспект, д. 14, г. Воронеж, Воронежская область, Россия, 394026, v_sannikov@mail.ru

ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ШВОВ ХРУПКИМ РАЗРУШЕНИЯМ

АННОТАЦИЯ К СТАТЬЕ (АВТОРСКОЕ РЕЗЮМЕ, РЕФЕРАТ):

Согласно статистике, до 80% всех фиксируемых аварий металлоконструкций связаны со сварными соединениями. При этом большинство аварийных разрушений, как правило, инициируемых неметаллическими включениями в металле шва, носит хрупкий характер. Вероятность хрупкого разрушения уменьшается с повышением его пластичности. А пластичность, в значительной степени зависящая от подвижности дислокаций, уменьшается при снижении температуры и увеличении скорости деформации. Пластичность металла является структурно чувствительным свойством и зависит от типа кристаллической решетки, определяющего количество плотноупакованных направлений и плоскостей скольжения. Низколегированные стали, в основном, используемые в сварных металлоконструкциях, имеют объемно-центрированную кубическую решетку со сравнительно небольшим количеством плоскостей и направлений скольжения. Эти стали пластичны при относительно высоких температурах и становятся хрупкими при отрицательных.



Единственным средством повышения пластичности металла без существенного уменьшения его прочности является измельчение зерна. Одним из эффективных способов получения мелкозернистой структуры металла шва является введение в сварочную ванну модификаторов в виде тугоплавких соединений (оксиды, карбиды, нитриды), которые в зоне кристаллизации сварочной ванны являются центрами кристаллизации и увеличивают число зерен в единице объёма. Исследования модифицирования кристаллизующегося металла в условиях литья и сварки плавлением показали, что перегрев расплава снижает эффект модифицирования. При электродуговой сварке с температурой дуги более 6000 К опасность дезактивации модификатора велика. Одним из способов уменьшения перегрева и повышения эффективности модификаторов при сварке является введение модифицирующих частиц в сварочную ванну в комплексе с более массивными гранулами в виде рубленой проволоки, служащими микрохолодильниками. Этот способ, получивший название «сварка с металлохимической присадкой (МХП)», успешно применяется в мостостроении.

Модифицирование сварочной ванны тугоплавкими частицами наряду с положительным эффектом измельчения зерна в сварном шве содержит и отрицательный момент: остающиеся в шве модифицирующие частицы в виде неметаллических включений являются концентраторами напряжений и могут стать очагами зарождения трещин.

В работе с позиций механики разрушения дан анализ путей минимизации вредного воздействия неметаллических включений на охрупчивание металла шва на примере автоматической сварки стали 10ХСНД с модифицирующей металлохимической присадкой. Сформулированы основные требования к параметрам и физико-химическим свойствам неметаллических включений, обеспечивающие высокую стойкость металла шва против охрупчивания.

Ключевые слова: сварка, хрупкое разрушение, наномодифицирование, неметаллические включения.

DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-3-142-161

Машиночитаемая информация о СС-лицензии в метаданных статьи (HTML-код):

```
<a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/"></a><br />Произведение «<span xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://purl.org/dc/dcmitype/Text" property="dct:title" rel="dct:type"> Влияние неметаллических включений на сопротивляемость металла сварных швов хрупким разрушениям </span>» созданное автором по имени <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">лицензии Creative Commons С указанием авторства 4.0 Всемирная</a>. <br />Основано на произведении с <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/ru_RU/nanobuild-3-2018/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/ru_RU/nanobuild-3-2018/</a>. <br />Разрешения, выходящие за рамки данной лицензии, могут быть доступны на странице <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>.
```



Введение

Основным технологическим процессом соединения отдельных элементов узлов при изготовлении и монтаже строительных металлических конструкций является электродуговая сварка (ручная, с покрытыми электродами, механизированная и автоматическая, в защитных газах и под флюсом). Вместе с тем, согласно статистике, до 80% всех фиксируемых аварий металлических конструкций связаны со сварными соединениями [1]. Исследования этих случаев показали, что большинство разрушений зарождалось в металле шва, как правило, в зоне неметаллических включений, и носило хрупкий характер, т.е. происходило внезапно, при напряжениях, меньших предела текучести, и без заметных предшествующих деформаций [2]. При этом вязкость металла шва, т.е. его способность пластически деформироваться и поглощать энергию до и в процессе разрушения, оказалась ниже вязкости свариваемого металла.

Анализ механики разрушения показал, что вероятность хрупкого разрушения металла уменьшается с увеличением его пластичности. А пластичность металла, обусловленная подвижностью дислокаций, уменьшается при низких температурах и при увеличении скорости деформации.

Пластичность является структурно чувствительным свойством и зависит от типа кристаллической решетки, определяющей количество плотноупакованных направлений и плоскостей скольжения. Металлы с объемно-центрированной кубической (Fe, W, Mo) и гексагональной плотноупакованной решетками (Zn, Be) пластичны при относительно высоких температурах, но становятся хрупкими при отрицательных. А металлы с гранецентрированной кубической решеткой (Al, Cu, Ni, аустенитные стали) пластичны даже при температурах, приближающихся к абсолютному нулю.

Большинство строительных металлоконструкций изготавливают из низколегированных сталей, содержащих более 95% железа, имею-



щего объемно-центрированную кубическую решетку, и, следовательно, склонных к хрупкому разрушению, особенно при отрицательных температурах. Поэтому проблема повышения стойкости стальных металлоконструкций против хрупкого разрушения находится в центре постоянного внимания исследователей.

На основании металлографических исследований Н. Петч [3] пришел к выводу, что единственным средством повышения пластичности металла без существенного снижения его прочности является измельчение зерна, увеличивающее число полос скольжения при деформации. Специфические условия кристаллизации сварочной ванны при дуговой сварке приводят к формированию неблагоприятной крупнозернистой структуры металла шва с пониженными механическими свойствами [4]. Поэтому получению мелкозернистой структуры сварного шва уделяется много внимания [6–9].

Под зерном в металловедении подразумевается кристалл, выросший из одного зародыша и имеющий одну кристаллографическую решетку. А.Н. Колмогоров [5] показал, что максимальный размер зерна d в кристаллизующемся металле определяется (1) скоростью зарождения центров кристаллизации n и линейной скоростью их роста $V_{кр}$:

$$d = k (V_{кр} / n)^{1/4}, \quad (1)$$

где $V_{кр}$ – мм/с; n – 1/мм³·с; k – коэффициент, зависящий от формы кристалла (сферическая, кубическая, гексагональная).

Из формулы (1) следует, что зерно тем мельче, чем больше в единицу времени в расплаве образуется кристаллических зародышей и чем меньше скорость их роста. Уменьшить скорость роста кристаллов, которая пропорциональна скорости сварки и скорости охлаждения [$V_{кр} = f(V_{св}, V_{охл})$], можно, снизив скорость сварки или используя подогрев свариваемых элементов. Однако возможности этого пути измельчения зерна в металле шва ограничены из-за снижения производительности процесса сварки, дополнительных энергозатрат и увеличения зоны термического влияния, имеющей пониженные пластические и прочностные свойства. Поэтому исследователи основное внимание сосредоточили на изыскании путей интенсификации зародышеобразования твердой фазы в сварочной ванне.

К настоящему времени исследовано много способов увеличения параметра « n » путем термического или механического воздействия на сва-



рочную ванну: вибрация свариваемого изделия, пульсирующая подача защитного газа или электродной проволоки, введение в сварочную ванну низкочастотных или ультразвуковых колебаний, импульсный ввод тепла, электромагнитное перемешивание расплава и др. [6–9]. Наиболее эффективным способом измельчения зерна в металле шва оказалось введение в сварочную ванну тугоплавких дисперсных частиц – модификаторов (оксиды, нитриды, карбиды и др.), служащих центрами гетерогенной кристаллизации [4]. Модифицирование сварочной ванны тугоплавкими частицами наряду с положительным эффектом измельчения зерна содержит и отрицательный момент: остающиеся в шве модифицирующие частицы в виде неметаллических включений являются концентраторами напряжений и могут стать очагами зарождения трещин.

До недавнего времени все неметаллические включения в металле рассматривались как вредные, уменьшающие его пластичность и увеличивающие вероятность хрупкого разрушения. Широкое применение модификаторов привело к убеждению, подтвержденному многочисленными исследованиями, что модификаторы в сталях не только обеспечивают образование первичной мелкозернистой структуры, но и способствуют формированию вторичных структур с благоприятным сочетанием прочности и высокой вязкости [11, 12].

Большинство неметаллических включений в сталях является продуктами окислительно-восстановительных химических реакций. В связи с этим использование неметаллических включений для формирования благоприятной структуры сталей, по предложению японских ученых, выделилось в отдельное направление – «оксидную металлургию» [11].

В настоящей работе с позиций механики разрушения дан анализ путей минимизации вредного воздействия неметаллических включений на охрупчивание металла шва на примере сварки под флюсом низколегированной стали 10ХСНД с модифицирующей металлохимической присадкой (МХП) при изготовлении и монтаже мостовых конструкций.

Механика разрушения металлического тела при наличии неметаллических включений

Разрушение металлического тела представляет собой двухстадийный процесс: зарождение и развитие трещины вплоть до разделения сплошности тела [3, 10].



Зарождение трещины. Неметаллические включения являются концентраторами напряжений, величина которых зависит от их размеров и формы. Для неметаллического включения эллиптической формы с большой осью $2a$ и радиусом закругления его концов r (трещина Гриффитса – рис. 1) максимальные напряжения вблизи вершины трещины равны [10]:

$$\sigma_{\max} = \sigma (1 + 2\sqrt{a/r}), \quad (2)$$

где σ – напряжения вдали от эллипса, $2\sqrt{a/r}$ – приращение напряжений из-за наличия дефекта.

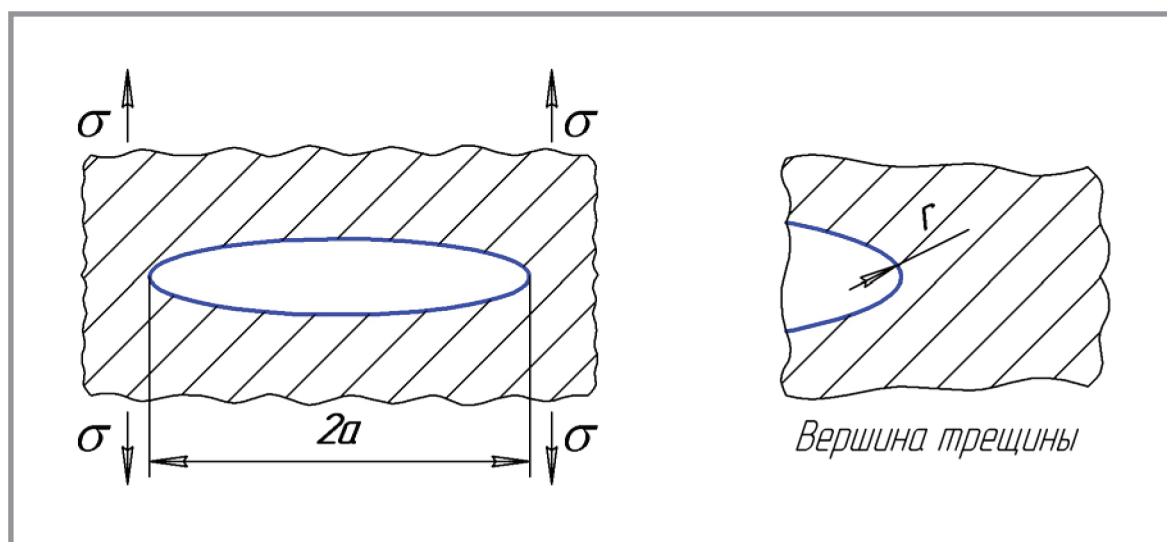


Рис. 1. Трещина Гриффитса

Отсюда (2) следует, что чем меньше длина дефекта и чем больше радиус закругления его концов, тем меньше концентрация напряжений в вершине эллипса ($2\sqrt{a/r}$) и тем меньше вероятность зарождения трещины.

Зарождение трещины начинается с образования микропустот, как правило, в окрестностях включений. При нагружении из-за различия химических и упругопластических свойств матрицы и включения происходит разрыв связей между ними и образование зародышевых микротрещин в виде пустот (рис. 2). Микротрещины могут также зарождаться путем разрушения хрупких интерметаллических соединений.

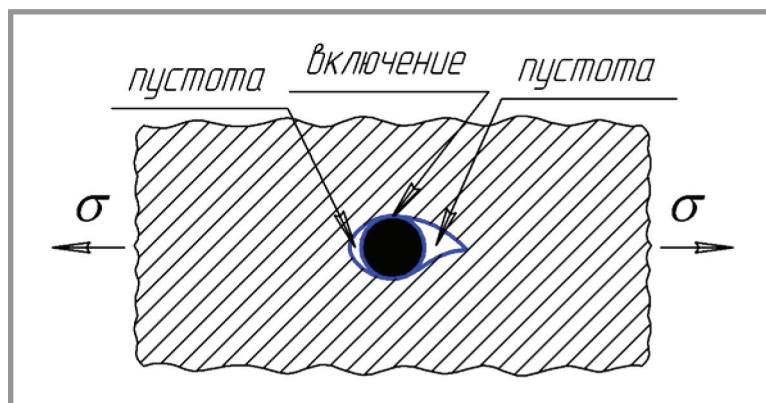


Рис. 2. Образование зародышевых микротрещин около включений

Образование микропустот около неметаллических частиц зависит от прочности связей частицы с металлом матрицы. Прочность связей на межфазной границе определяется, в первую очередь, степенью структурного и размерного соответствия взаимодействующих фаз, т.е. типом и параметрами их кристаллических решеток. Поэтому при сварке сталей в качестве модификаторов в сварочную ванну желательно вводить элементы, образующие тугоплавкие центры кристаллизации с родственной объемно-центрированной, как у α -железа, кубической решеткой.

Развитие трещины. Под действием растягивающих напряжений микропустоты вокруг включений разрастаются до встречи с соседними микропустотами. При этом происходит последовательный разрыв шеек между порами и слияние (коалесценция) пор до полного разрушения металлического тела (рис. 3).

Очевидно, чем меньше расстояние между инородными включениями, тем меньше требуется энергии для слияния пор. И с этой точки зрения особенно опасно неравномерное распределение включений в металле шва.

Рост трещины в таких пластичных материалах, как металлы, может происходить одновременно путем разрыва сплошного материала, образования и коалесценции пор перед движущейся вершиной трещины. Зародившаяся трещина может расти ограниченно, в пределах одного зерна, или тормозиться в зоне скопления дислокаций [3].

Остаточные термические напряжения на межфазной границе матрицы – включение. В процессе кристаллизации и последующего охлаждения металла в матрице возникают напряжения из-за разности



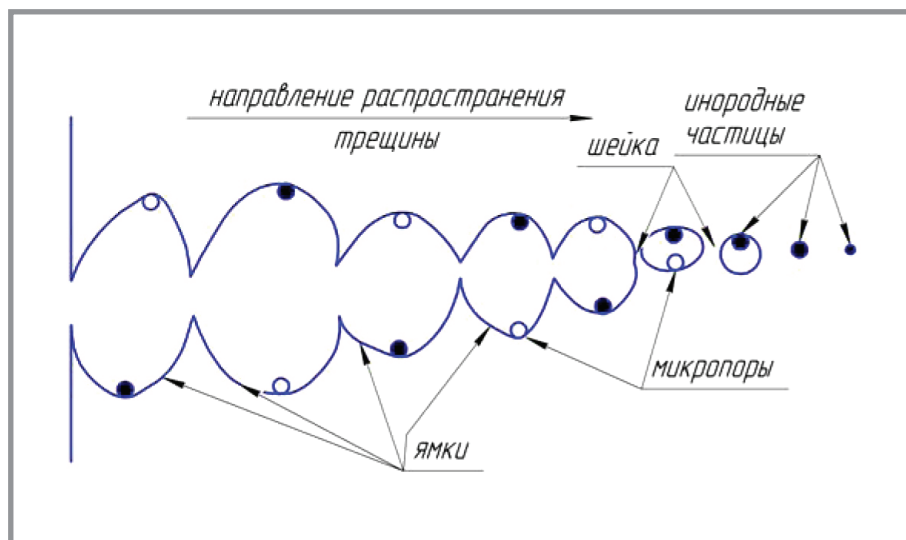


Рис. 3. Схема зарождения, роста и коалесценции пор при наличии неметаллических частиц в металле

коэффициентов термической усадки или термического расширения. При высокой температуре до температуры упругого перехода временные напряжения вследствие высокой пластичности матрицы релаксируют. При дальнейшем охлаждении, когда пластичность матрицы понижается, появляется упругая составляющая, и в матрице возникают остаточные термические напряжения. Направление и величину этих напряжений в температурном интервале $\Delta T = T_{нл} - T$ можно оценить коэффициентом несоответствия [11]:

$$\sigma = \frac{1 - \alpha_{вкл} \Delta T}{1 - \alpha_m \Delta T}, \quad (3)$$

где $\alpha_{вкл}$ и α_m – коэффициенты термического расширения включения и матрицы соответственно; $\Delta T = T_{нл} - T$ (T и $T_{нл}$) – текущая температура и температура, ниже которой происходят упругие деформации соответственно.

Из выражения (3) следует, что при $\alpha_{вкл} > \alpha_m$ на межфазной границе в процессе охлаждения возникают растягивающие напряжения, стремящиеся разорвать связи матрицы с включениями и способствующие образованию зародышевых микротрещин (рис. 4, а).

При $\alpha_m > \alpha_{вкл}$ в процессе охлаждения происходит всестороннее сжатие включения матрицей (рис. 4, б). Таким образом, для уменьшения

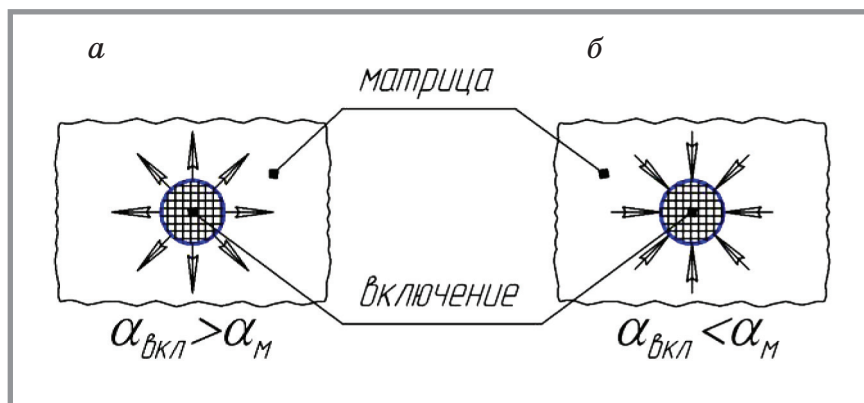


Рис. 4. Направление остаточных напряжений при различном соотношении коэффициентов термического расширения матрицы и включения

вероятности разрыва связей включения с матрицей необходимо, чтобы коэффициент термического расширения у матрицы был больше, чем у включения.

Неметаллические включения в металле шва при сварке стали 10ХСНД по металлической присадке

По нашему мнению, все неметаллические включения в металле шва следует разделить на две группы – случайные и неизбежные (природные). Случайные включения, как правило, являются следствием технологических нарушений (плохая зачистка свариваемых поверхностей и поверхности электродной проволоки, повышенная влажность флюса или электродной обмазки, нарушение защиты сварочной ванны от контакта с воздухом и др.) Неизбежные включения образуются либо в процессе кристаллизации на базе модифицирующих частиц, либо в результате обменных химических реакций жидкого металла электродных капель и сварочной ванны со шлаковой и газовой фазами (рис. 5).

Продуктами этих реакций являются оксиды, нитриды, сульфиды и фосфиды. Вредное влияние сульфидов и фосфидов ограничивают низким содержанием серы и фосфора в свариваемой стали, электродной проволоке и флюсе (S – не более 0,04%, P – не более 0,035%).

Сравнительный анализ модифицирующих способностей тугоплавких Al_2O_3 , TiO_2 , TiN, TiC показал, что оптимальным и наиболее актив-



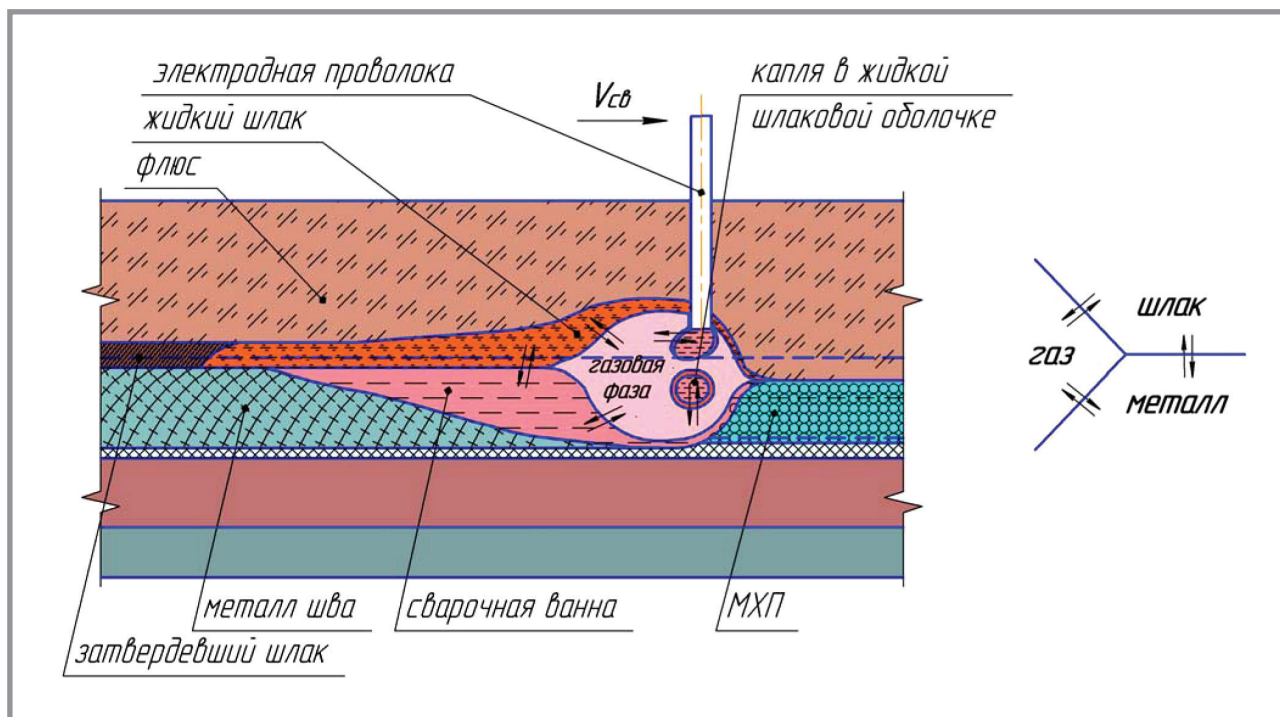


Рис. 5. Схема взаимодействия металла сварочной ванны с газовой и шлаковой фазами при сварке по слою МХП

ным катализатором гетерогенной кристаллизации в низколегированных сталях является диоксид титана (TiO_2) [12], [5].

В отечественном мостостроении при изготовлении и монтаже конструкций из низколегированных сталей 10ХСНД и 15ХСНД применяют металлохимическую присадку, содержащую в качестве модификатора порошкообразный рутил, представляющий модификацию диоксида титана с тетрагональной сингонией (размер частиц 1–3 мкм) [14].

Исследования влияния неметаллических включений на формирование структуры металла шва и его прочностные свойства проводили на стыковых соединениях образцов $1000 \times 300 \times 14$ из стали 10ХСНД, изготовленных по технологии, применяемой при монтажной сварке мостовых конструкций. Сварку производили под флюсом АН-47, содержащим 4–7% TiO_2 и 9–13 Al_2O_3 . В качестве присадочного материала наряду с электродной проволокой Св10НМА применяли металлохимическую присадку (МХП), засыпаемую в 8-миллиметровый зазор стыка (рис. 5). Металлохимическая присадка представляет собой волоочную крошку из сварочной проволоки Св10НМА $\varnothing 2,0 \times 2,0$ мм,



смешанную с диоксидом титана. Проволочный гранулят служит средством доставки модифицирующих частиц TiO_2 в сварочную ванну, минуя высокотемпературный столб дуги, и выполняет роль микрохолодильника, сохраняющего модифицирующую способность диоксида титана [4].

Применяли два вида МХП – изготовленную по существующей технологии (смешивание гранулята с диоксидом титана в низкоэнергетическом смесителе типа «пьяная бочка») и по разработанной авторами (смешивание в высокоэнергетической планетарной мельнице [13]). При смешивании в «пьяной бочке» происходит лишь «опудривание» гранулята частицами TiO_2 . Прочность их связей с поверхностью гранулята невелика, и вследствие потерь концентрация титана в металле шва не превышает 0,007%. Размеры частиц TiO_2 после обработки смеси в «пьяной бочке» не изменяются, остаются на уровне 1–3 мкм [1, 2]. При смешивании в высокоэнергетической планетарной мельнице происходит дробление проволочной крошки и измельчение частиц диоксида титана до 0,5 мкм, образуются прочные связи их с гранулятом, что повышает их модифицирующую способность и концентрацию титана в шве 0,01%. Металлографический анализ структуры металла шва показал, что увеличение числа модифицирующих измельченных частиц в сварочной ванне обеспечивает формирование структуры металла с размером зерна, в 2 раза меньшим, чем при смешивании присадки в низкоэнергетическом смесителе [13, 11, 12].

Анализ неметаллических включений в металле шва производили в соответствии с ГОСТ 17780-70 методом «Л». На длине 3 см поперечного нетравленного шлифа корневого шва на линии, прочерченной в произвольном направлении, подсчитывали число неметаллических включений и определяли их размеры под микроскопом при увеличении $\times 500$ с ценой деления шкалы 1,03 мкм (табл.).

Результаты анализа свидетельствуют о том, что введение в сварочную ванну измельченного в планетарной мельнице порошка TiO_2 обеспечивает более равномерное распределение включений в шве и уменьшение их размеров. Последнее обстоятельство, несомненно, способствует снижению концентрации напряжений в окрестностях включений и уменьшению вероятности зарождения трещин.

Локальный спектральный анализ химического состава включений показал, что ядро включений в основном состоит из тугоплавких интер-



Таблица

**Результаты анализа неметаллических включений
в металле корневого шва**

Размеры включений в делениях окулярной шкалы	Среднее значение размеров включений в делениях шкалы	Средний размер, мм	Количество включений, шт.		
			Сварка по проволочной крошке без TiO_2	Сварка с МХП, изготовленной в смесителе «пьяная бочка»	Сварка с МХП, изготовленной в «планетарной мельнице»
0–2	1	0,00103	188	210	284
2,1–4,0	3	0,00309	10	6	6
4,1–6,0	5	0,00515	2	2	2
6,1–8,0	7	0,00721	2	–	–
Суммарное количество включений, шт			202	218	292

металлидов $TiAl_2O_6$ [14]. Периферийные зоны содержат нитриды титана с объемно-центрированной (как у α -железа) решеткой, что способствует образованию прочных связей между матрицей и включением высокой стойкости металла против зарождения микротрещин.

При охлаждении закристаллизовавшегося металла вследствие более высокого значения коэффициента термической усадки α -железа, чем TiO_2 и Al_2O_3 (в 1,3–1,8 раза), оксидные включения испытывают всесторонне сжатие со стороны матрицы. Это способствует повышению сопротивляемости отрыва матрицы от поверхности включения.

Выводы

1. Неметаллические включения в металле шва являются неизбежными продуктами обменных реакций жидкого металла с газовой и шлаковой фазами, повышают риск зарождения трещин и хрупкого разрушения сварного соединения.



2. Впервые систематизированы требования к геометрическим параметрам и физико-химическим свойствам неметаллических включений в металле сварных швов, обеспечивающих их высокую сопротивляемость хрупкому разрушению. Для обеспечения высокой вязкости металла шва и снижения вредного влияния неметаллических включений необходимо:

- минимизировать размеры включений, желательно до наноразмерных масштабов;
- формировать включения с оболочкой, имеющей кристаллографическое сродство с матрицей;
- применять модифицирующую добавку, образующую включения с термическим коэффициентом усадки, меньшим, чем у матрицы.

3. Металлохимическая присадка, изготовленная в высокоэнергетической планетарной мельнице с измельченным модификатором TiO_2 , обеспечивает формирование включений в металле шва на базе TiO_2 и Al_2O_3 и отвечает указанным требованиям. Применение МХП, обработанной в планетарной мельнице, позволяет повысить ударную вязкость металла шва при $-40^\circ C$ с 84,9 до 112,5 Дж/см² [15].

Библиографический список:

1. Патон Б.Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // Автоматическая сварка. – 2003. – №10/11. – С. 7–13.
2. Холл В. Хрупкие разрушения сварных конструкций. – Нью-Йорк, 1967 / Пер. с англ. – М.: «Машиностроение», 1974. – 320 с.
3. Петч Н. Металлографические аспекты разрушения // Разрушение: в 6 томах. Том 1. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения. – М.: Мир, 1973. – 616 с.
4. Болдырев А.М., Григораиш В.В. Проблемы микро- и наномодифицирования швов при сварке строительных металлоконструкций // Нанотехнологии в строительстве. – 2011. – Том 3, № 3. – С. 42 – 52. – URL: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_3_2011_RUS.pdf (дата обращения: 22.11.2016).
5. Алов А.А. Влияние вибрации электрода на процесс дуговой сварки и свойства швов / А.А. Алов, В.С. Виноградов // Сварочное производство. – 1958. – № 9. – С. 19–22.



6. *Сутырин Г.В.* Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны // Автоматическая сварка. – 1975. – № 5. – С. 7–10.
7. *Ерохин А.А.* О воздействии колебаний ультразвуковой частоты на характере кристаллизации сварочной ванны / А.А. Ерохин, Ю.И. Китайгородский, Л.Л. Силин // Известия АН СССР, ОТН. – 1958. – № 1.
8. *Болдырев А.М.* Воздействие принудительных тепловых колебаний на фронте кристаллизации на структуру и свойства металла сварных швов / А.М. Болдырев, Э.Б. Дорофеев, Н.П. Толоконников // Межвузовский сборник «Исследования жаропрочных сплавов». – Воронеж: ВПИ, 1974. – С. 165–171.
9. *Колмогоров А.Н.* К статистической теории кристаллизации металлов // Известия АН СССР, Серия математическая. – 1957. – № 3.
10. *Lee Eun U.* Thermal stress and strain in a metal matrix composite with a spherical reinforcement particle // Met. Nrans. A. 1992. 23 № 8. P. 2205–2210.
11. *Головко В.В.* Влияние неметаллических включений на формирование структуры металла сварных швов высокопрочных низколегированных сталей / В.В. Головко, И.К. Походня // Автоматическая сварка. – 2013. – № 6. – С. 3–11.
12. *Нотт Дж. Ф.* Основы механики разрушения // Перевод с англ. Д.В. Лаптева [под ред. В.Г. Кудряшова]. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
13. *Болдырев А.М.* Влияние диоксида титана в составе металлохимической присадки на механические свойства металла шва стали 10ХСНД / А.М. Болдырев, В.Г. Гребенчук, Д.А. Гуцин // Сварка и диагностика. – М. – 2014. – № 3. – С. 39–42.
14. *Болдырев А.М.* Повышение ударной вязкости металла шва сварных конструкций стальных мостов / А.М. Болдырев, Д.А. Гуцин // Вестник центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – Выпуск 13: Материалы Академических научных чтений «Научные и инженерные проблемы строительно-технологической утилизации техногенных отходов». – Белгород: РААСН, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. – С. 34–41.
15. *Болдырев А.М.* Новая технология получения гранулированного присадочно-го материала с наномодифицирующими добавками для дуговой сварки сталей / А.М. Болдырев, А.С. Орлов, Д.А. Гуцин // Нанотехнологии в строительстве. – 2016. – Том 8, № 6. – С. 124–143. – URL: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_6_2016_RUS.pdf.
16. *Болдырев А.М., Григораш В.В., Гуцин Д.А., Гребенчук В.Г.* Исследование прочности сцепления частиц в модифицирующей присадке для сварки мостовых конструкций под флюсом // Нанотехнологии в строительстве. – 2012. – Том 4, № 2. – С. 56–69. – Гос. регистр. №0421000108. URL: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_2_2012_RUS.pdf.
17. *Болдырев А.М., Гребенчук В.Г., Гуцин Д.А., Ткачев А.Г., Блинов С.В.* Получение металлохимической сварочной присадки с нанодисперсными частицами диоксида титана // Нанотехнологии в строительстве. – 2013. – Том 5, № 6. – С. 53–66. – URL: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_6_2013_RUS.pdf.
18. *Болдырев А.М.* Оценка прочности сцепления химической добавки с проволоочной крошкой в металлохимической сварочной присадке / А.М. Болдырев, Д.А. Гуцин // Вестник центрального регионального отделения Российской академии



- архитектуры и строительных наук. – Выпуск 11: Материалы Академических научных чтений «Проблемы архитектуры, градостроительства и строительства в социально-экономическом развитии регионов». – Тамбов. – 2012. – С. 176–181.
19. *Болдырев А.М.* Влияние технологии изготовления металлохимической присадки (МХП) на механические свойства сварных соединений мостовых металлоконструкций / А.М. Болдырев, Д.А. Гуцин // Технологии упрочнения нанесения покрытий и ремонта: теория и практика. Ч. 1. – СПб: Изд-во Политехнического университета, 2013. – С. 36–42.
 20. *Головко В.В.* Особенности распределения и роль неметаллических включений в металле шва при введении в сварочную ванну наноксидов / В.В. Головко, А.М. Болдырев, Д.А. Гуцин, В.Д. Кузнецов, С.К. Фомичев, И.В. Смирнов // Сварка и диагностика. – М. 2015. – № 6. – С. 25–28.
 21. *Болдырев А.М.* Повышение вязкости металла шва в сварных соединениях стальных мостовых конструкций // Сборник «Фундаментальные поисковые и прикладные исследования по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли РФ «Научные труды РААСН». – М. – 2016. – С. 445–449.

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

**ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАТЕРИАЛА ДАННОЙ СТАТЬИ
ПРОСИМ ДЕЛАТЬ БИБЛИОГРАФИЧЕСКУЮ ССЫЛКУ НА НЕЁ:**

Болдырев А.М., Орлов А.С., Гуцин Д.А., Рубцова Е.Г., Санников В.Г. Влияние неметаллических включений на сопротивляемость металла сварных швов хрупким разрушениям // Нанотехнологии в строительстве. – 2018. – Том 10, № 3. – С. 142–161. – DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-3-142-161](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-3-142-161).

DEAR COLLEAGUES!

THE REFERENCE TO THIS PAPER HAS THE FOLLOWING CITATION FORMAT:

Boldyrev A.M., Orlov A.S., Guschin D.A., Rubtsova E.G., Sannikov V.G. Influence of nonmetallic inclusions on the resistance of metal weld to brittle fractures. *Nanotechnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2018, Vol. 10, no. 3, pp. 142–161. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-3-142-161](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-3-142-161). (In Russian).

