

УДК 621.791

**Е.А. Кривоносова, Т.В. Лодягина**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет**СПОСОБЫ ВЛИЯНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКСИДОВ  
И СУЛЬФИДОВ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ  
НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ**

Проведен обзор оксидных и сульфидных неметаллических включений, встречающихся в спокойных низколегированных сталях (типа 16Г2АФ, 10Г2ФБ и др.). Рассмотрены способы влияния на характеристики указанных неметаллических включений в сварном соединении.

**Ключевые слова:** неметаллические включения, оксиды, сульфиды, сварной шов, зона термического влияния, ударная вязкость.

**E.A. Krivonosova, T.V. Lodyagina**

Perm National Research Polytechnic University

**METHODS OF INFLUENCE  
ON OXIDE'S AND SULPHIDE'S CHARACTERISTICS  
IN WELD JOINTS OF LOW-ALLOYED STEEL**

Review of oxide and sulphide nonmetallics in the killed steels (16G2AF, 10G2FB, etc.) is carried out. Methods of influence on the nonmetallic characteristics in weld joint is considered.

**Keywords:** nonmetallics, oxides, sulphides, weld seam, heat-affected zone, impact strength.

Свойства сварного соединения определяются такими параметрами структурообразования, как структурные составляющие и характеристики неметаллических включений. Присутствие оксидных и сульфидных неметаллических включений негативно влияет на пластичность, ударную вязкость и усталостную прочность металла сварного шва и зоны термического влияния [1–5].

Включения описывают, используя следующие характеристики: химический состав, форма, размер и распределение.

В сталях могут встречаться неметаллические включения следующих классов в зависимости от химического состава [1, 2]:

- 1) кислородные (простые и сложные окислы, силикаты, алюмосиликаты);
- 2) сульфидные (сульфиды железа и марганца);
- 3) нитридные (нитриды легирующих элементов);
- 4) карбидные (карбиды легирующих элементов).

Зачастую карбиды и нитриды присутствуют в сталях не случайно, а обеспечивают необходимый уровень эксплуатационных свойств. Так, в стали 16Г2АФ вследствие наличия карбонитридов ванадия возникает упрочнение, приводящее к сочетанию таких свойств, как высокая прочность, низкий порог хладноломкости и хорошая свариваемость [6].

При этом следует иметь в виду, что в структуре сталей часто встречаются сложные включения, состоящие из включений нескольких классов (например, окисульфидные, карбонитридные).

По форме неметаллические включения могут быть [7]:

- округлые (глобулярные);
- полигональные, червеобразные (с острыми гранями);
- пленочные (межкристаллитные прослойки).

В направлении от округлой формы до пленочной формы включения повышается его влияние на свойства, понижается эффективная поверхностная энергия образования трещин и повышается опасность зарождения трещины именно от неметаллического включения. Полигональные неметаллические включения выполняют роль локального надреза, что повышает опасность зарождения усталостных трещин и способствует изменению траектории движения. Наибольшую опасность представляют пленочные включения, нарушающие сплошность металлической матрицы. Так, в частности, пленочные сульфидные включения ускоряют распространение усталостной трещины при малоцикловых испытаниях [5].

Размер и распределение неметаллических включений в сварном шве будет зависеть от его химического состава и, соответственно, от условий его образования: включение может образовываться в результате ликвации примесей (гомогенное зарождение) или на поверхности тугоплавкого включения, выполняющего функцию зародыша (гетерогенное образование) [8]. В зависимости от размера неметаллические включения могут всплывать на поверхность сварочной ванны или оставаться в металле в виде взвесей или растворов [3]. На возможность удаления оксидов при всплывании оказывает скорость кристаллизации сварочной ванны: при более жестких условиях кристаллизации, высо-

кой скорости сварки, низкой погонной энергии оксиды не успевают всплыть на ее поверхность [7]. Распределение неметаллических включений определяется количеством тугоплавких оксидов (зародышей) и условиями кристаллизации сварного шва.

Размер и распределение неметаллических включений в зоне термического влияния будет зависеть от исходного состояния основного металла и параметров термического цикла сварки (скорости нагрева, скорости охлаждения).

Целью данной работы являлось подробное рассмотрение кислородных и сульфидных неметаллических включений, встречающихся в спокойных низколегированных сталях, и условий их образования с целью выявления способов влияния на их характеристики. Перечень неметаллических включений, предположительно встречающихся в рассматриваемых сталях, и их описание представлены в таблице [1, 2, 8].

Округлую форму имеют включения, затвердевающие на ранней стадии кристаллизации [1]. Это могут быть включения с температурой плавления выше температуры затвердевания металла шва (например, алюмосиликаты или сульфид марганца) или тугоплавкие включения, на поверхности которых образуются оболочки стекол (шпинели) или нарастают сульфиды (окисульфиды). Например, силикаты, карбиды титана и ванадия являются центрами зародышеобразования для сульфидных включений на начальной стадии кристаллизации [7].

Пленочные включения зачастую образуются на поздних стадиях кристаллизации сварочной ванны на других включения в междоусных участках (пленочные стекла), на поверхности дендритов или на границах кристаллов (сульфиды железа) [1].

Наибольшую опасность представляют пленочные неметаллические включения. Рассмотрим механизм их образования [7]:

1. «Кристаллизационный» механизм образования: включения образуются из первичных глобулярных включений под давлением растущих дендритов кристаллизующегося металла, вследствие чего они деформируются и принимают форму пленок.

2. «Физико-химический» механизм: при понижении температуры сварочной ванны происходит выделение из перенасыщенного примесями раствора монооксидов (например, SiO), которые в сочетании с окислами и ликвирующими атомами кислорода образуют вокруг растущих кристаллов тончайший аморфный слой – стекловидную пленку. Этот механизм наблюдается при избытке в жидком металле кремния [1].

Неметаллические включения  
в спокойных низколегированных сталях

| Название<br>(температура<br>плавления, °С)                              | Пространствен-<br>ная форма  | Расположение  | Оптические свойства<br>включений   |   |
|---|--|---|--|---|
|   |  |   | в светлом поле   | в темном поле   |
| Оксид алюминия<br>(корунд)<br>$Al_2O_3$ (2035)                          | Кристаллы не-<br>правильной<br>формы (не де-<br>формируются)   | Скопления,<br>строчки   | Темно-серые  | Прозрачные,<br>бледно-<br>желтого цвета                 |
| Железная шпинель<br>(герценит)<br>$FeO \cdot Al_2O_3$ (1780)            | Кристаллы пра-<br>вильной кубиче-<br>ской формы (не<br>деформируются)  | –   | Темно-серые  | –   |
| Феррованадиевая<br>шпинель<br>$FeO \cdot V_2O_3$                        | Прямоугольники<br>или угловатые<br>кристаллы (не<br>деформируются)   | Скопления   | Светло-серые,<br>с розовым от-<br>тенком   | Непрозрач-<br>ные, с тонкой<br>светящейся<br>окантовкой |
| Алюмосиликат<br>(муллит)<br>$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ (1535)              | В виде призм<br>или игл (не де-<br>формируются)  | Отдельные вы-<br>деления  | Темно-серые  | –   |
| Стекла алюмоси-<br>ликатные<br>$nAl_2O_3 \cdot mSiO_2 \cdot pFeO$       | В виде глобулей<br>(не деформиру-<br>ются)   | Отдельные вы-<br>деления  | Темно-серые  | Прозрачные,<br>цвет светло-<br>желтый                   |
| Сложные силикаты<br>железа и марганца<br>$nFeO \cdot mMnO \cdot pSiO_2$ | В виде глобулей<br>из смеси $FeO -$<br>$MnO - SiO_2$ (чем<br>меньше $SiO_2$ , тем<br>легче деформи-<br>руются) | Отдельные вы-<br>деления  | Серые, с ко-<br>ричневым от-<br>тенком (чем<br>больше $SiO_2$ ,<br>тем темнее)               | Прозрачные,<br>цвет от ярко-<br>красного до<br>темного  |
| Сульфид марганца<br>$MnS$ (1575)  | Кубические или<br>округлые кри-<br>сталлы (слабо<br>деформируются)   | Отдельные час-<br>тицы или скоп-<br>ления                       | Серо-голубые   | Прозрачные,<br>с зеленым<br>оттенком                    |
| Сульфид железа<br>и марганца<br>$FeS - MnS$                             | Кристаллы ок-<br>руглой или угло-<br>ватой формы<br>(легко деформи-<br>руются)                                 | Отдельные час-<br>тицы или скоп-<br>ления вдоль<br>границ зерен | Цвет от серо-<br>голубого до<br>светло-желтого<br>(в зависимости<br>от содержания<br>$MnS$ ) | Непрозрачные  |
| Сульфид железа<br>$FeS$ (1195)  | Частицы округ-<br>лой формы (легко<br>деформируются)   | Скопления<br>в виде сетки на<br>границах зерен                  | Светло-желтые  | Непрозрачные  |

Можно сделать следующие выводы:

1. На характеристики неметаллических включений в сварном шве можно влиять следующими способами: введением соответствующи-

щих легирующих элементов в сварочную ванну и регулированием скорости ее кристаллизации. Так, при введении в сварочную ванну марганца происходит два процесса [1, 7]:

– образование сложных включений, состоящих из закиси марганца, закиси железа и железомарганцовистых силикатов, которые имеют низкую температуру плавления и легко удаляются в шлак при уменьшении содержания кислорода в металле;

– образование сульфида марганца вследствие большего сродства марганца к сере, чем у железа; данные включения являются более желательными (по сравнению с сульфидами железа), так как в силу сравнительно высокой температуры плавления имеют глобулярную форму.

Кроме того, введение в металл титана способствует образованию тугоплавких включений, выполняющих функцию центров зародышеобразования на ранних стадиях кристаллизации. Также дисперсные тугоплавкие включения титана влияют на образование желательных структурных составляющих в сварном шве и измельчение первичной структуры [9].

2. Характеристики неметаллических включений в зоне термического влияния определяются временем нахождения основного металла при определенных температурах. Так, например, на участке перегрева может происходить частичное растворение окисульфидных включений и выделение их по границам зерен при охлаждении. Вследствие нагрева в процессе сварки возможна трансформация пленочных сульфидных включений в результате легкой диффузии атомов серы в стальной матрице [6]. При этом может происходить растворение включения в матрице, пересыщение матрицы вблизи включения и выделение дисперсных частиц включений, что приводит к уменьшению размеров включений. Однако при высоких температурах возможно укрупнение включений в результате коалесценции (растворение мелких частиц, диффузия растворенного вещества от мелких частиц к крупным и осаждение атомов на поверхности крупных частиц). Таким образом, на характеристики неметаллических включений в зоне термического влияния можно оказывать воздействие путем регулирования термического цикла сварки (скорости охлаждения) и назначения соответствующей термической обработки.

### Список литературы

1. Виноград М.И. Включения в стали и ее свойства. – М.: Металлургиздат, 1963. – 252 с.
2. Барахтин Б.К., Немец А.М. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. Неметаллические включения: справочник; под ред. Б.К. Барахтина. – СПб., 2006. – 490 с.
3. Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Оженко А.П. Неметаллические включения и свойства стали. – М.: Металлургия, 1980. – 176 с.
4. Влияние неметаллических включений и структурных составляющих на ударную вязкость низколегированной стали / Е.А. Кривоносова, Т.В. Ольшанская, Т.В. Лодягина, О.А. Бурцева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, № 1. – С. 94–100.
5. Лодягина Т.В. Влияние структурных изменений в зоне термического влияния на сопротивление стали с карбонитридным упрочнением малоциклового усталости // Современные техника и технологии: сб. докл. XX Междунар. юбилейн. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., г. Томск, 14–18 апр. 2014 г. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та. – Т. 2. – С. 53–54.
6. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
7. Еремин Е.Н., Шалай В.В., Еремин А.Е. Сварочные материалы для трубопроводного строительства: учеб. пособие. – Омск: Изд-во Омск. гос. техн. ун-та, 2010. – 260 с.
8. Бельченко Г.И., Губенко С.И. Неметаллические включения и качество стали. – Київ: Техніка, 1980. – 168 с.
9. Головки В.В., Походня И.К. Влияние неметаллических включений на формирование структуры металла сварных швов высокопрочных низколегированных сталей // Автоматическая сварка. – 2013. – № 6. – С. 3–11.

Получено 17.07.2014

**Кривоносова Екатерина Александровна** – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермский национальный исследовательский политехнический университет; e-mail: katerinakkkkk@mail.ru

**Лодягина Татьяна Валерьевна** – старший преподаватель кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермский национальный исследовательский политехнический университет; e-mail: talod@rambler.ru

**Krivososova Ekaterina Aleksandrovna** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Welding Production and Technology of Structural Materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: katerinakkkkk@mail.ru

**Lodyagina Tatiana Valerievna** – Senior Lecturer, Department “Welding Production and Technology of Structural Materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: talod@rambler.ru