УДК [691.714:620.18:669.018.58-122-418]:621.77.016.3

© В. Е. Гордиенко, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: val-gor@yandex.ru

© И. А. Иванов, д-р техн. наук, профессор
(Петербургский государственный университет путей
сообщения императора Александра I)

E-mail: ivanov_1_7@mail.ru

© А. А. Абросимова, канд. техн. наук, доцент

© А. П. Щербakov, ассистент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: anzhelicka.abrosimova@yandex.ru,

shurbakov.aleksandr@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-150-155

© V. E. Gordienko, Dr. Tech. Sci., Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: val-gor@yandex.ru

© I. A. Ivanov, Dr. Tech. Sci., Professor
(Emperor Alexander I

St. Petersburg State Transport University)

E-mail: ivanov_1_7@mail.ru

© А. А. Abrosimova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© А. P. Scherbakov, assistant

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: anzhelicka.abrosimova@yandex.ru,

shurbakov.aleksandr@yandex.ru

К ВОПРОСУ ВЛИЯНИЯ ИСХОДНОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ ЗАГОТОВОК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

ABOUT THE INFLUENCE OF THE WELDING BILLETS' INITIAL CONDITION ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS

Рассмотрены основные факторы, влияющие на микроструктуру и механические свойства сварных соединений: исходное состояние сварных заготовок, химический состав конструкционных сталей, структурные и фазовые превращения металла в процессе плавления и кристаллизации. Показано, что наиболее сильное влияние на формирование сварного шва и зону сплавления с участком перегрева оказывают различные условия проводимой сварки и исходное структурное состояние свариваемой стали. С целью оценки влияния исходной микроструктуры сварных заготовок выбраны конструкционные стали Ст3, 08пс, 10, 20, 30, 09Г2С и 10ХСНД, прошедшие предварительную термическую и термоциклическую обработки. Изготовлены сварные образцы для последующих структурных, механических и коррозионных испытаний.

Ключевые слова: конструкционные стали, металлические конструкции, сварные соединения, термическая и термоциклическая обработка.

The article considers the main factors affecting the micro-structure and mechanical properties of welded joints, the initial condition of welding billets, the chemical composition of structural steels, the structural and phase transformations of metal in the melting and crystallization process. It is shown that the strongest influence on formation of the welded joint and the welding zone adjacent with the overheating zone is imposed by various welding conditions and the initial structural condition of the welded steel. To evaluate the influence of the initial structure of welded billets, there were selected structural steels 08ps, 10, 20, St3, 09G2S and 10XCHD, which had undergone preliminary thermal and thermal-cycling processing. Welded samples for subsequent structural, mechanical and corrosion tests have been manufactured.

Keywords: structural steels, metal constructions, welded joints, thermal and thermal-cycling processing.

В настоящее время около 90 % всех металлических конструкций являются сварными, в связи с чем их безопасная и надежная длительная эксплуатация в большей степени определяется состоянием сварных соединений, которые обладают существенной структурной и механиче-

ской неоднородностью [1–11]. В соответствии с ГОСТ 2601–84 сварное соединение — неразъемное соединение, выполненное сваркой, которое включает в себя сварной шов, зону термического влияния и основной металл, не претерпевший никаких изменений. Формирование сварно-

го шва осуществляется за счет кристаллизации расплавленного металла, тогда как в других зонах металл находится в твердом состоянии, но в то же время его структура и механические свойства изменяются при нагреве и охлаждении, вследствие чего появляется неоднородность фазового и структурного состава сталей, приводящая к неоднородности механических свойств [2].

Микроструктура и свойства различных зон и участков сварных соединений в значительной степени отличны от основного металла, имеющего состояние заводской поставки (горячекатаное, холоднокатаное, после термической обработки), а также зависят от химического состава сталей, фазовых и структурных превращений при изменении температурного процесса плавления и последующей кристаллизации металла, возникновения различного рода несплошностей и других дефектов, приводящих к изменению механических свойств сварных соединений.

Структурная неоднородность сварного соединения в большой степени определяется не только исходной структурой свариваемых сталей, но и завершенностью структурных и фазовых превращений, идущих в процессе сварки. Самые большие структурные изменения наблюдаются в конструкционных сталях, склонных к полиморфным превращениям. В то же время даже при отсутствии полиморфных превращений в металлах и сплавах при сварке всегда на-

блюдаются три характерные области (рис. 1, а): в первой области металл находится в жидко- или жидко-твердом состоянии; во второй области термического влияния происходят фазовые превращения и в третьей области они отсутствуют, но сохраняется возможность как пластической, так и упругой деформации металла при наличии остаточных сварочных напряжений. Следует отметить, что наибольшему изменению химического состава конструкционных сталей подлежит металл сварного шва и зоны сплавления с участком перегрева вследствие активности физико-химических процессов, которые проходят в процессе кристаллизации расплавленного металла (рис. 1, б).

При этом металл в сварном шве приобретает характерное дендритное строение, форма, размеры, степень химической однородности и направленность которого обусловлены условиями проводимой сварки и свойствами свариваемой стали.

Независимо от марки сталей, в сварном шве за счет дендритного роста кристаллов происходит формирование столбчатой структуры с определенной ориентацией, при этом кристаллы при их продвижении в расплаве формируются в направлении последующего роста.

Однако, в отличие от кристаллизующихся сварных слитков, оси кристаллов, образующихся в сварных швах, напоминают собой некото-

Рис. 1. Строение стыкового сварного соединения сталей, испытывающих полиморфные превращения: а — нахождение максимальных температур T_{max} поперек сварного шва; б — термические циклы в зоне термического влияния; $T_{пл}$ и $T_{н.и.р}$ — температуры плавления и начала роста зерен; $T_{н.ф.п}$ и $T_{к.ф.п}$ — характеризуют температуры фазовых превращений при нагреве; $T_{от}$ или $T_{н.р.о}$ — характеризует температуры отпуска закаленного металла

рые пространственные кривые (рис. 2, а), что обычно связано с изменением формы жидкой ванны в плоскостях, расположенных параллельно плоскости свариваемых листов, и перемещением всего теплового поля в направлении проводимой сварки (рис. 2, а). При проведении сварки более тонких листов встык (рис. 2, б) тепловой источник будет линейным, поэтому наблюдаемая пространственная схема идущей кристаллизации сварочной ванны может меняться на плоскую, с расположением пространственных осей растущих кристаллов в параллельных плоскостях. При этом вследствие небольшого объема сварочной ванны и большой кривизны оплавленной поверхности образующиеся в сварном шве столбчатые кристаллы становятся более разориентированными, чем в слитках, что и видно на рис. 2.

При этом изменение строения перлита малоуглеродистых сталей вследствие значительных скоростей охлаждения ведет к некоторому снижению пластических свойств и увеличению прочности металла сварного шва (рис. 3).

Таким образом, на формирование в сварном шве литой дендритной столбчатой структуры с разной формой зерен и размерами влияют не только условия сварки, но и структурное состояние свариваемых заготовок (крупнозернистое, мелкозернистое) (см. рис. 3). В связи с этим большой научный и практический интерес представляет изучение воздействия исходной микроструктуры сварных заготовок на структуру и свойства различных зон сварных соединений, полученных из конструкционных сталей.

Рис. 2. Схема роста кристаллов в сварочной ванне при разных видах кристаллизации: а — пространственной; б — плоской

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны широко применяемые в строительстве и других отраслях промышленности малоуглеродистые стали Ст3, 08пс, 10, 20, 30 и низколегированные 09Г2С и 10ХСНД [5]. Их химический состав представлен в табл. 1.

Для получения в сварных заготовках различной исходной структуры исследуемые стали подвергались следующим видам термической и термоциклической обработки (табл. 2):

- состояние заводской поставки;
- термическая (отжиг, нормализация, закалка + отпуск);
- термоциклическая (ТЦО три и шесть циклов после отжига и нормализации, ТЦО на зернистый перлит три и шесть циклов).

Обработка на зернистый перлит включала нормализацию стали 30 и последующую ТЦО при 780 °С в количестве три и шесть циклов с последующим охлаждением на воздухе до 630 °С и затем в воде. После третьего и шестого цикла охлаждения проводилось только на воздухе.

Проведенная предварительная обработка конструкционных сталей по выбранным оптимальным режимам позволила получить крупнозернистую и мелкозернистую структуры, при этом проведение ТЦО позволяет получать очень мелкозернистые структуры, несвойственные обычным видам термической обработки [13, 14].

Проведение обработки на зернистый перлит с использованием ТЦО позволяет не только измельчить структуру, но и сфероидизировать включения цементита [13].

Рис. 3. Зависимость между механическими свойствами металла сварного шва и скоростью его охлаждения

Таблица 1

Химический состав сталей, выбранных для эксперимента

Марка стали	Химический состав, %							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
Ст3	0,14–0,22	0,15–0,30	0,40–0,65	0,050–0,045	0,040–0,035	≤0,30	≤0,30	≤0,30
08пс	0,05–0,12	0,17–0,37	0,35–0,65	≤0,040	≤0,035	≤0,10	≤0,30	≤0,30
10	0,08	0,09	0,45	0,02	0,014	0,03	0,02	0,04
20	0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	≤0,040	≤0,030	≤0,25	≤0,30	≤0,30
30	0,27–0,35	0,17–0,37	0,50–0,80	≤0,040	≤0,035	≤0,25	≤0,30	≤0,30
09Г2С	0,11	0,68	1,33	0,008	0,015	0,03	0,02	0,03
10ХСНД	0,10	0,64	0,56	0,006	0,013	0,65	0,53	0,44

Таблица 2

Виды термической обработки исследуемых сталей

Марка стали	Отжиг, °С	Нормализация, °С	Закалка + отпуск, °С	Отжиг + ТЦО, °С		Нормализация + ТЦО, °С		Обработка на зернистый перлит (нормализация + ТЦО), °С	
				3 цикла	6 циклов	3 цикла	6 циклов	3 цикла	6 циклов
Ст3	900	900	—	780	780	780	780	—	—
08пс	900	900	—	780	780	780	780	—	—
10	920	920	—	780	780	780	780	—	—
20	900	900	880 + 600	780	780	780	780	—	—
30	880	880	880 + 600	780	780	780	780	Нормализация + 780 °С, охлаждение до 630 °С на воздухе + вода	
09Г2С	900	900	—	780	780	780	780	—	—
10ХСНД	900	900	—	780	780	780	780	—	—

Так, проведенная сфероидизация сталей 30, 40, 45 и 60 при ТЦО по сравнению с нормализацией значительно повышала механические свойства: предел текучести на 6...15 %, пластичность на 10...25 % и ударную вязкость на 70...110 %.

Значительное влияние на прочностные свойства углеродистых и легированных конструкционных сталей оказывает проведение ТЦО. Отличие легированных сталей от углеродистых заключается в более низкой активности углерода. Однако если суммарное количество легированных элементов не превышает 5 %, то способы термоциклической обработки углеродистых сталей могут быть применены к легированным без существенного изменения технологии.

Значительное повышение механических свойств легированной стали отметили авторы [13]. Так, по сравнению с изотермической об-

работкой у низколегированной стали 20Х после ТЦО механические свойства повышались на 20...35 %, а ударная вязкость — в два раза.

Значительное повышение прочностных свойств конструкционных сталей при ТЦО позволяет рекомендовать ее для усиления металла при ремонте сварных соединений и элементов сварных металлоконструкций в опасных зонах концентрации напряжений.

Получение мелкозернистой структуры с разной степенью дисперсности в сварных заготовках до проведения сварки позволит получить более благоприятную литую структуру в сварном шве за счет первичного формирования на кромках заготовок более мелких кристаллитов, и за счет этого снизить структурную неоднородность и повысить равнопрочность зон сварных соединений.

Для получения сварных образцов в одинаковых условиях использовалось специально спроектированное и изготовленное приспособление.

Проведенные сварочные работы на конструкционных сталях с различной исходной структурой позволили получить идентичные сварные образцы для последующих исследований структуры, механических свойств и коррозионной стойкости.

Выводы

1. Рассмотрены основные факторы, влияющие на структуру и свойства сварных соединений: структурное состояние металла заводской поставки (горячекатаное, холоднокатаное, после термической обработки), химический состав конструкционных сталей, полностью законченные фазовые и структурные превращения металла в процессе сварки, появление разного рода несплошностей.

2. Показано, что условия проводимой сварки и свойства свариваемой стали определяют форму, размеры, степень химической однородности и направленность дендритного строения сварного шва.

3. Высокая скорость охлаждения металла формирующегося сварного шва малоуглеродистых сталей ведет к изменению строения перлита, понижению пластических и повышению прочностных свойств металла.

4. С целью оценки влияния исходной микроструктуры сварных заготовок на структуру и свойства сварного шва и зоны сплавления выбраны малоуглеродистые стали Ст3, 08пс, 10, 20, 30 и низколегированные 09Г2С и 10ХСНД, прошедшие предварительную термическую и термоциклическую отработку.

5. Подготовлены сварные образцы для последующих структурных, механических и коррозионных испытаний.

Библиографический список

1. Куркин С. А., Николаев Г. А. Сварные конструкции. Технология изготовления, механизация, автоматизация и контроль качества в сварочном производстве. М.: Высшая школа, 1991. 398 с.
2. Хромченко Ф. А. Сварочные технологии при ремонтных работах. М.: Интермет Инжиниринг, 2005. 368 с.

3. Гордиенко В. Е. Техническое диагностирование конструкций. Методы контроля качества. СПб.: СПбГАСУ, 2004. 144 с.

4. Гордиенко В. Е. Ресурс и надежность строительных металлических конструкций в условиях воздействия коррозионных сред. СПб.: СПбГАСУ, 2006. 91 с.

5. Гордиенко В. Е. Магнитный контроль и расчет МК с учетом структурной неоднородности сварных соединений и коррозионных повреждений. СПб.: СПбГАСУ, 2008. 114 с.

6. Гордиенко В. Е. Мониторинг. Пути повышения надежности и прогнозирования остаточного ресурса металлических конструкций зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2005. № 12. С. 42–43.

7. Гордиенко В. Е., Кузьмин О. В. Контроль и восстановление несущей способности элементов металлоконструкций строительных машин. СПб.: СПбГАСУ, 2011. 96 с.

8. Гордиенко В. Е., Гордиенко Е. Г., Кузьмин О. В., Ибрагимова Е. С., Дюкова Е. Л., Кашина В. Ю., Разумов К. А. Магнитный контроль несущей способности сварных металлоконструкций строительных машин // Контроль. Диагностика. 2012. № 2 (164). С. 20–25.

9. Гордиенко В. Е. Сварные конструкции промышленных зданий, сооружений и строительных машин. СПб.: СПбГАСУ, 2012. 315 с.

10. Гордиенко В. Е., Березина А. А. Техническое диагностирование сварных металлоконструкций промышленных зданий, сооружений и строительных машин. СПб.: СПбГАСУ, 2015. 244 с.

11. Гордиенко В. Е., Трунова Е. В., Абросимова А. А., Шананина Н. В. Пассивный феррозондовый контроль длительно эксплуатируемых сварных металлоконструкций с коррозионными повреждениями // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 193–197.

12. Гордиенко В. Е., Абросимова А. А., Трунова Е. В., Щербаков А. П. К выбору конструкционных сталей для изготовления сварных металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 233–238.

13. Федюкин В. К., Смагоринский М. Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.

14. Баранов А. А. Фазовые превращения и термоциклирование металлов. Киев: Наукова думка, 1974. 230 с.

References

1. Kurkin S. A., Nikolaev G. A. *Svarnye konstruksii. Tekhnologiya izgotovleniya, mekhanizatsiya, avtomatizatsiya i kontrol' kachestva v svarochnom*

proizvodstve [Welded designs. Manufacturing techniques, mechanization, automation and quality control in welding production]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991, 398 p.

2. Khromchenko F. A. *Svarochnye tekhnologii pri remontnykh rabotakh* [Welding technologies at repair works]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2005, 368 p.

3. Gordienko V. E. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie konstruktsiy. Metody kontrolya kachestva* [Technical diagnosing of designs. Methods of quality control]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2004, 144 p.

4. Gordienko V. E. *Resurs i nadezhnost' stroitel'nykh metallicheskih konstruktsiy v usloviyakh vozdeystviya korroziionnykh sred* [Resource and reliability of building metal constructions in conditions of corrosion environment influence]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2006, 91 p.

5. Gordienko V. E. *Magnitnyy kontrol' i raschet MK s uchetom strukturnoy neodnorodnosti svarnykh soedineniy i korroziionnykh povrezhdeniy* [Magnetic control and calculation of MK taking into account structural heterogeneity of welded connections and corrosion damages]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2008, 114 p.

6. Gordienko V. E. *Monitoring. Puti povysheniya nadezhnosti i prognozirovaniya ostatochnogo resursa metallicheskih konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy* [Monitoring. Ways of increasing the reliability and forecasting of residual resource of metal structures of buildings and constructions]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil engineering*, 2005, no. 12, pp. 42–43.

7. Gordienko V. E., Kuz'min O. V. *Kontrol' i vosstanovlenie nesushchey sposobnosti ehlementov metallokonstruktsiy stroitel'nykh mashin* [Control and restoration of the bearing ability of metalwork elements of construction machines]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2011, 96 p.

8. Gordienko V. E., et al. *Magnitnyy kontrol' nesushchey sposobnosti svarnykh metallokonstruktsiy stroitel'nykh*

mashin [Magnetic control of the bearing ability of welded metalwork of construction machines]. *Kontrol'. Diagnostika – Control. Diagnostics*, 2012, no. 2 (164), pp. 20–25.

9. Gordienko V. E. *Svarnye konstruksii promyshlennykh zdaniy, sooruzheniy i stroitel'nykh mashin* [Welded structures of industrial buildings, constructions and construction machines]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2012, 315 p.

10. Gordienko V. E., Berezina A. A. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie svarnykh metallokonstruktsiy promyshlennykh zdaniy, sooruzheniy i stroitel'nykh mashin* [Technical diagnosing of welded metalwork of industrial buildings, constructions and construction machines]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2015, 244 p.

11. Gordienko V. E., Trunova E. V., Abrosimova A. A., Shananina N. V. *Passivnyy ferrozondovyy kontrol' dlitel'no ehkspluatiruemykh svarnykh metallokonstruktsiy s korroziionnymi povrezhdeniyami* [Passive ferro-probe testing of the long operated welded metalwork designs with corrosion damage]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 3 (56), pp. 193–197.

12. Gordienko V. E., Abrosimova A. A., Trunova E. V., Shcherbakov A. P. *K vyboru konstruktsionnykh staley dlya izgotovleniya svarnykh metallicheskih konstruktsiy stroitel'nykh mashin* [About selecting of structural steels for the production of welded metal designs of construction machines]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65), pp. 233–238.

13. Fedyukin V. K., Smagorinskiy M. E. *Termotsiklicheskaya obrabotka metallov i detaley mashin* [Thermal-cyclic processing of metals and details of machines]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989, 255 p.

14. Baranov A. A. *Fazovye prevrashcheniya i termotsiklirovaniye metallov* [Phase transformations and thermal cycling of metals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1974, 230 p.