



Вышемирский Е.М., ОАО «Газпром»,

Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Капустин О.Е., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина

Особенности структурообразования в сварных соединениях труб из высокопрочной стали X80, выполненных автоматической дуговой сваркой в условиях отрицательных температур

Ключевые слова: структура кольцевых стыков, высокопрочная сталь, моделирование, термические циклы сварки.

Key words: structure of girth welds, high-strength steel, simulation, welding thermal cycles.

**Вышемирский Е.М., Gazprom
Ефименко Л.А., Елагина О.Ю.,
Капустин О.Е., Gubkin
Russian State University
of Oil and Gas**

Structuring of Welded Joints' Texture Pattern in High-Strength X80 Steel Pipes Performed by Automatic Arc Welding in Sub-Zero Conditions

The article addresses the features of structural-phase composition of welded pipe joints in high-strength K65 (X80) steel in the course of circumferential girth welding in sub-zero environment. The authors investigate how the environmental temperature influences the parameters of welding thermal cycles and heat-affected zone structure in circumferential girth welds made by means of automatic gas-shielded arc welding with upward manual arc welding of root runs.

Особенности строительства магистральных трубопроводов в условиях Крайнего Севера связаны с необходимостью проведения сварочных работ при отрицательных температурах окружающей среды. В связи с этим актуальным является вопрос оценки их влияния на параметры термических циклов сварки (ТЦС), структуру и свойства сварных соединений.

Исследования проводились на кольцевых стыках фрагментов труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки 27,6 мм из стали класса прочности K65, выполненных автоматической дуговой сваркой в защитных газах (АДСЗГ) порошковой проволокой сварочными головками «Протеус» с подваркой корня шва ручной дуговой сваркой на подъем. Сварка проводилась в климатической камере* при температуре окружающего воздуха $-25...-35$ °С. Рассматривались варианты сварки с предварительным подогревом до температур 100^{+30} °С и без него. Для сравнения также приведены значения параметров термических циклов аналогичных процессов сварки, выполненных в условиях полигона при температуре окружающего воздуха $+8...+12$ °С.

Исследована сталь следующего химического состава: 0,06 % С, 0,08 % Si, 1,98 % Mn, 0,51 % Cu, 0,66 % Ni, 0,26 % Cr, 0,01 % Mo, 0,027 % Nb, 0,015 % Ti, 0,003 % V. Значения эквивалентного углерода $C_{эkv}$ и P_{cm} равны 0,52 и 0,21 соответственно.

Структура металла исследованной стали состоит из высокодисперсной смеси бейнита с 20–25 % феррита. Ее твердость составляет 210–230 HV.

Регистрация термических циклов в процессе сварки осуществлялась хромель-алюмеливыми термопарами, установленными с внутренней поверхности трубы в отверстиях, засверленных на заданную глубину, подсоединенных к двум шестиканальным регистраторам PMT-69L.

Анализ макро- и микроструктуры позволил оценить влияние технологии сварки при отрицательных температурах окружающей среды на структурно-фазовый состав сварных соединений и возможность появления холодных трещин.

* Работы в климатической камере и на полигоне проводились совместно с сотрудниками ООО «ВНИИСТ» и ООО «ВНИИГАЗ».



Значения ПТЦ при рассмотренных технологических вариантах сварки приведены в табл. 1.

Как видно из данных табл. 1, скорости охлаждения металла высокотемпературного участка ЗТВ при РДС без подогрева в 1,5 раза выше, чем металла аналогичного участка при РДС с подогревом. При этом при близких фактических значениях температуры металла перед сваркой в условиях аналогичных процессов (РДС с подогревом) скорости охлаждения w_{8-5} металла участков с близкой максимальной температурой нагрева приблизительно одинаковы независимо от температуры окружающей среды.

Это свидетельствует о том, что фактическая температура металла достаточно массивных изделий оказывает большее влияние на скорость охлаждения корневого прохода, чем температура окружающей среды.

Следует учитывать возможное понижение температуры металла труб в условиях Крайнего Севера. Это будет способствовать возрастанию w_{8-5} вплоть до критических значений, что особенно опасно при сварке металла с повышенными значениями $C_{экр}$. Следовательно, РДС корневого прохода целесообразно выполнять с подогревом. В этом случае скорость охлаждения металла ЗТВ при выполнении корневого прохода будет находиться в диапазоне скоростей ожидаемого формирования бейнитной структуры. При отсутствии подогрева w_{8-5} будет приближаться к критическим значениям.

При сварке заполняющих и особенно облицовочных проходов в большей степени начинает проявляться влияние температуры окружающей среды, обуславливающей интенсивность теплоотвода. В част-

Вышемирский Евгений Мстиславович — начальник Отдела главного сварщика, Управление по транспортировке газа и газового конденсата, Департамент по транспортировке, подземному хранению и использованию газа ОАО «Газпром».

Ефименко Любовь Айзиковна — профессор кафедры «Сварка и мониторинг НГС», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, доктор технических наук.

Таблица 1. Значения параметров ТЦС сварки кольцевого стыка

Технология	Температура металла в момент сварки, °С	Средняя скорость охлаждения (w_{8-5}), °С/с
Корневой проход		
Без подогрева при температуре окружающей среды –25 °С	5–7	44
С подогревом +100 °С при температуре окружающей среды –35 °С	70–78	29
С подогревом при температуре окружающей среды +8 ... +12 °С	76–82	23
Заполняющие проходы		
Без подогрева при температуре окружающей среды –31 °С	41–50	42
С подогревом при отрицательных температурах –26 °С	88	25
Без подогрева при температуре окружающей среды +8 ... +12 °С	71	35
Облицовочные проходы		
С подогревом при температуре окружающей среды –35 °С	77	60–90
Без подогрева при температуре окружающей среды +8 ... +12 °С	85	60
Без подогрева при температуре окружающей среды +8 ... +12 °С	85	60



Елагина Оксана

Юрьевна

профессор кафедры «Износостойкость машин и оборудования и технология конструкционных материалов», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, доктор технических наук.

Капустин Олег

Евгеньевич

заведующий кафедрой «Сварка и мониторинг НГС», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, доктор технических наук.

ности, в процессе сварки в условиях отрицательных температур $w_{8,5}$ ЗТВ облицовочных слоев приблизительно в 3–4 раза выше, чем в ЗТВ заполняющих проходов. При этом ее абсолютные значения превышают допустимый диапазон, и следует ожидать формирование мартенситной фазы.

Особенность формирования структуры, а следовательно, и свойств сварных соединений при многослойной сварке заключается в том, что металл предыдущих слоев претерпевает многократное тепловое воздействие от наложения последующих валиков. Это может вызвать его перекристаллизацию, закалку, высокий и низкий отпуск.

Температура окружающей среды будет оказывать значительное влияние на эффект термоциклирования.

Так, при выполнении сварки в условиях отрицательных температур значительно снижается эффект термоциклирования, имеющий место при сварке в условиях положительных температур (рис. 1).

Например, для участка ЗТВ с максимальной температурой нагрева 1286 °С при сварке в условиях отрицательных температур окружающей среды максимальная температура следующего цикла не превышает

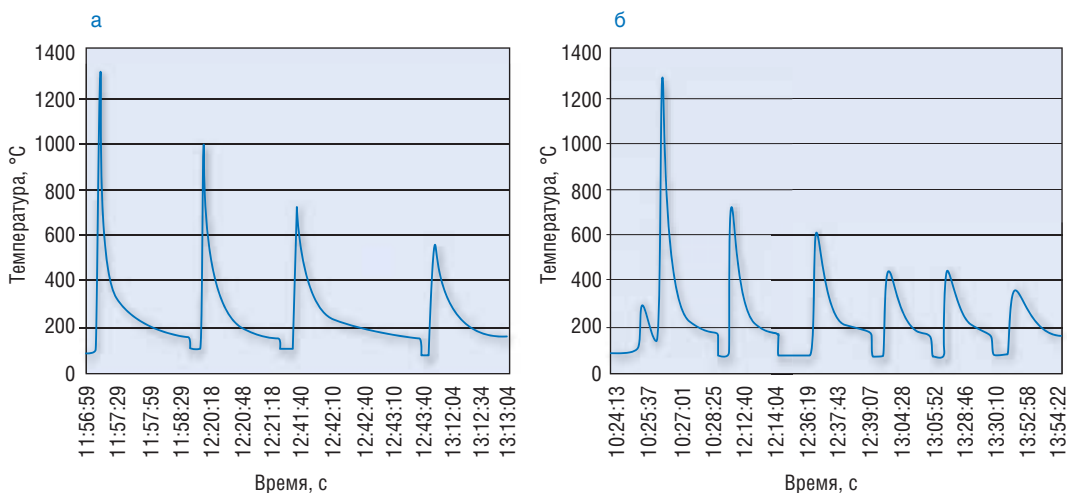


Рис. 1. Термические циклы корневого прохода при многопроходной РДС на подъем в условиях положительных (а) и отрицательных температур (б)

630 °С, в то время как при положительных температурах и прочих равных условиях металл этого участка претерпевает дополнительное воздействие двух циклов с максимальными температурами выше температуры нормализации.

На рис. 2 представлены фотографии микроструктур сварных соединений, выполненных по рассматриваемым вариантам сварки.

Анализ микроструктур включал оценку структурно-фазового состава и возможность наличия холодных трещин.

Как видно из представленных данных, структура металла швов корневого, заполняющих и облицовочных проходов преимущественно бейнитная с выделением полигонального феррита в количестве до 30 %. Твердость металла шва изменяется в пределах 210–260 НВ.

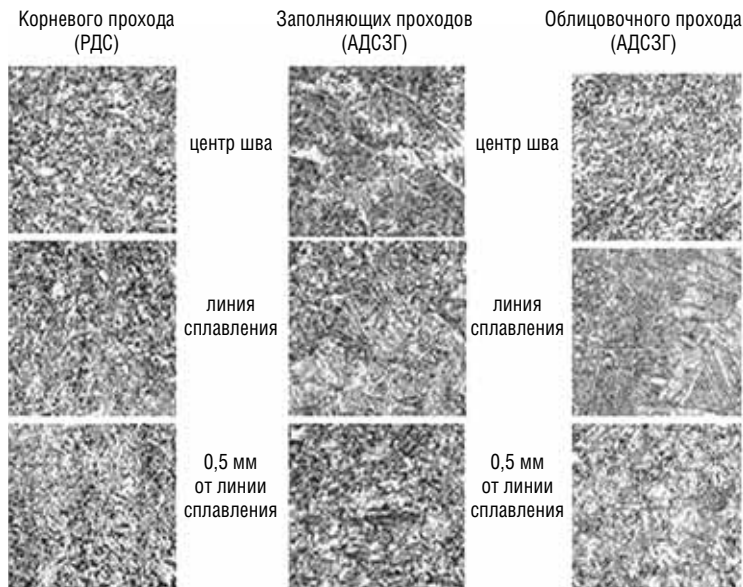


Рис. 2. Микроструктура различных участков сварных соединений, выполненных по рассматриваемым вариантам сварки

Структура металла линии сплавления, а также участка ЗТВ, расположенного на расстоянии 0,5 мм, высокодисперсная, бейнитная с несколько более крупными выделениями ферритной фазы. Твердость металла вдоль ЗТВ изменяется незначительно – и для обоих вариантов сварки ее значение составляет от 210 до 260 НВ.

По линии сплавления заполняющих проходов, в случае когда $w_{8.5} \approx 40\text{--}42\text{ }^\circ\text{C}$, наблюдается выделение мартенситной фазы, которая частично сохраняется и на участке перегрева. Металл ЗТВ на расстоянии 1 мм от линии сплавления и далее характеризуется бейнитной структурой. Как в металле шва, так и в ЗТВ при обоих вариантах сварки изменение твердости не существенно. Ее значения в области выделения мартенситной фазы не превышают 260 НВ.

По линии сплавления и в ОШУ ЗТВ облицовочных проходов (на расстоянии 0,5 мм от линии сплавления, включительно) формируется мартенситная фаза, количество которой составляет 50–55 % и убывает с удалением от линии сплавления, и на расстоянии 1,0 мм структура ЗТВ становится преимущественно бейнитная.

Таким образом, на основании выполненных исследований можно констатировать, что если в процессе сварки кольцевых стыков труб из высокопрочной стали X80 обеспечивается допустимый интервал скоростей охлаждения ($15\text{--}40\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$), то в металле сварных швов и ЗТВ формируется ферритно-бейнитная или ферритно-бейнитно-мартенситная структуры. Содержание мартенситной фазы увеличивается до 50–55 % с возрастанием значений $w_{8.5}$. При этом из-за низкого содержания углерода в стали формируется малоуглеродистый мартенсит, имеющий невысокую твердость и достаточную пластичность, что обеспечивает стойкость к образованию холодных трещин. ■

Список литературы

1. Теория сварочных процессов / Под ред. В.М. Неровного. – М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 749 с.
2. Толстолистовой прокат для газопроводных труб категории прочност X80 // А.И. Белый, Ю.И. Матросов, И.В. Ганюшенко и др. – Сталь, 2006. – № 5. – С. 106–110.
3. ТТ ОАО «Газпром». Технические требования к трубам для магистральных газопроводов Бованенково–Ухта (Утверждены ОАО «Газпром» 23.05.2007 г.)
4. Хулка К., Александров С. Перспективные трубные стали для газопроводов. – Metallurg, № 3. – 2006. – С. 52–55.

Следует отметить, что, несмотря на формирование в ЗТВ мартенситной фазы, твердость металла в ОШУ ЗТВ не превышает 260 НВ. Это, очевидно, объясняется низким содержанием углерода в стали и формированием малоуглеродистого мартенсита. При этом как в металле сварных швов, так и в ЗТВ холодные трещины отсутствуют. А результаты механических испытаний сварных соединений показывают, что в рассматриваемых вариантах сварки обеспечиваются значения временного сопротивления разрыву около 680–690 МПа, угол загиба $180\text{ }^\circ\text{C}$. Ударная вязкость на образцах Шарпи при температуре $-40\text{ }^\circ\text{C}$ по линии сплавления составляет $163\text{--}356\text{ Дж}/\text{см}^2$.

* Данные ООО «ВНИИГАЗ».