



ШИПИЛОВ
Александр Валентинович
инженер
(ДОО «Центрэнергогаз»
ОАО «Газпром»)



КОНОВАЛОВ
Алексей Викторович
доктор технических наук,
профессор кафедры
«Технологии сварки
и диагностики»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



БРОВКО
Виктор Васильевич
кандидат технических
наук, ФГУ НУЦ
«Сварка и контроль»



ПОЛОСКОВ
Сергей Иосифович
доктор технических наук,
начальник отдела
ФГУ НУЦ
«Сварка и контроль»

Управление структурой сварных соединений при орбитальной TIG-сварке технологических трубопроводов компрессорных станций

**А.В. Шипилов, А.В. Коновалов,
В.В. Бровко, С.И. Полосков**

Показана возможность и необходимость управления структурой сварных соединений технологических трубопроводов компрессорных станций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, выполняемых автоматической орбитальной сваркой неплавящимся электродом.

В качестве металлургического метода получения мелкодисперсной структуры металла сварного шва на низкоуглеродистой стали при сварке неплавящимся электродом предложено использовать проволоку Sv-08Г2С.

В качестве эффективного и доступного технологического приема улучшения структуры сварных швов низкоуглеродистых и низколегированных сталей рекомендовано использование импульсной или шаго-импульсной технологии при многопроходной сварке.

Ключевые слова: автоматическая орбитальная сварка, структура сварных соединений, низкоуглеродистые и низколегированные стали

The possibility and necessity of structure management in welded joints of compressor plants technological pipelines made of low carbon and low alloy steels, performed by automatic orbital welding with non-consumable electrode is presented.

It is suggested to use Sv-08G2S wire as a metallurgical method of obtaining fine structure of low carbon welded joint by welding with non-consumable electrode.

It is recommended to use the impulse or step-impulse technology for multi-pass welding as an effective and attainable technological method to improve the structure of welded joints of low carbon and low alloy steels.

Keywords: automatic orbital welding, welded joints structure, low carbon and low alloy steels.

Актуальность применения автоматических способов орбитальной сварки для технологических трубопроводов компрессорных станций (КС) обусловлена необходимостью получения стабильной формы и свойств сварных соединений [1]. В настоящее время наиболее глубоко проработаны вопросы сварки трубопроводов основного назначения, предназначенных для транспортировки товарного про-

дукта (газа, газового конденсата или сжиженных углеводородов) и реализации необходимых технологических операций при этом (очистки, осушки, редуцирования, компримирования и перекачки). Поскольку их размеры во многом совпадают с магистральными газопроводами, то сварка осуществляется плавящимся электродом. Трубопроводы вспомогательного назначения обеспечивают основной технологический процесс или эксплуатацию основного оборудования. Диаметр большинства трубопроводов вспомогательного назначения не превышает 220 мм, а толщина их стенок менее 8 мм. Основная проблема при сварке подобных трубопроводов — минимизация вероятности попадания шлака, грата или брызг во внутреннюю полость трубы, что может привести к выходу из строя запорной арматуры и к сбоям в работе КС. По этой причине, а также ввиду высокой стесненности пучков труб, для технологических трубопроводов обвязки относительно малых диаметров (менее 220 мм) рекомендуется применять автоматическую орбитальную сварку неплавящимся электродом в инертных газах (TIG-сварку) [2]. Современные сварочные источники расширяют возможности управления структурой сварных соединений путем регулирования тепловложения, а свойства новых расходных материалов позволяют управлять химическим составом сварных соединений.

Цель работы — выбор методов управления структурой сварных соединений низкоуглеродистой и низколегированной стали при сварке неплавящимся электродом трубопроводов компрессорных станций.

Проведенный анализ литературных источников показал, что вопрос управления структурой металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) при сварке неплавящимся электродом технологических трубопроводов КС изучен недостаточно. При этом отсутствие систематизированных данных о возможности обеспечения оптимальной структуры шва, состава присадочной проволоки, необходимого термического цикла сварки могут приводить к дефектам не только при выполнении сварочных работ, но и при эксплуатации трубопроводов (рис. 1). Это обусловлено тем, что трубопроводы КС работают в условиях вибрации и знакопеременных нагрузок, создающих условия усталостного разрушения, поэтому обеспечение оптимальной структуры сварных соединений независимо от исходного состояния материала является актуальной задачей.

Материалы, используемые для технологических трубопроводов обвязки КС

В зависимости от назначения трубопроводы обвязки газокompрессорных станций изготавливают из низкоуглеродистых, низколегированных и аустенитных сталей (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав сталей, применяемых в технологических трубопроводах малых диаметров

Марка стали	Содержание элементов в %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Прочие
<i>Низкоуглеродистые стали</i>								
СтЗсп	0,14—0,32	0,12—0,3	0,4—0,65	До 0,3	До 0,3	До 0,05	До 0,04	
Сталь 20	0,17—0,24	0,17—0,37	0,35—0,65	До 0,25	До 0,25	До 0,04	До 0,04	
<i>Низколегированные стали</i>								
09Г2С	До 0,12	0,5—0,8	1,3—1,7	До 0,3	До 0,3	До 0,04	До 0,035	
15ХМ	0,11—0,18	0,17—0,37	0,4—0,7	0,8—1,1	до 0,3	До 0,035	До 0,035	До 0,4—0,55
<i>Стали аустенитного класса</i>								
10Х14Г14Н4Т	До 0,1	До 0,8	13—15	13—15	2,8—4,5	До 0,02	До 0,035	5(C — 0,02)—0,6 Ti, остальное Fe
12Х18Н10Т	До 0,08	До 0,8	До 2	17—19	9—11	До 0,02	До 0,035	Сu до 0,3



Рис. 1. Характерная трещина в ЗТВ при длительной эксплуатации технологического трубопровода

Рассмотрим особенности структуры сварных соединений, сталей представленных в табл. 1, подробнее.

Низкоуглеродистые стали. При общем относительно высоком уровне свойств сварных соединений низкоуглеродистых сталей для них характерна значительная флуктуация, обусловленная особенностью структур таких соединений. Структура металла шва и ЗТВ зависит от химического состава металла и принятой технологии сварки [3–5]. Применительно к любой низкоуглеродистой стали бесспорным является стремление получения мелкодисперсной структуры сварных соединений, чему, в свою очередь, может способствовать примерно равное распределению фаз между ферритной и ферритокарбидной структурами. В ферритокарбидной фазе бейнит по сравнению с перлитом обеспечивает лучшие механические свойства сварных соединений [6].

Низколегированные стали. Практически в широкой области технологических режимов дуговой сварки неплавящимся электродом низкоуглеродистых и низколегированных сталей в структуре сварных швов, выполненных без подогрева, в той или иной мере присутствуют фазы феррита, остаточного аустенита, бейнита, карбидной смеси и игольчатого феррита. Задача управления структурой при сварке этих сталей сводится к получению в структуре швов максимального содержания смеси игольчатого

феррита и бейнита, так как известно, что именно эта структурная составляющая обеспечивает наибольшую сопротивляемость хрупкому разрушению.

Стали аустенитного класса. Особенностью структуры сварных соединений аустенитных сталей является ярко выраженная мелкодисперсная столбчатая структура литого металла шва, состоящая из разориентированных кристаллитов. Для ЗТВ аустенитной стали критичным может явиться рост зерна, обусловленный перегревом металла. Для сварных соединений этих сталей в целом характерна высокая вязкость и пластичность, что в итоге обеспечивает высокую стойкость против хрупкого разрушения при циклических и знакопеременных нагрузках. Поэтому задача управления структурой соединений этих сталей для технологических трубопроводов не стоит так остро, как для низкоуглеродистых и низколегированных сталях, на которых остановимся более подробно.

В последние годы на КС наметилась тенденция расширения применения разнородных сварных соединений, обусловленная использованием высоконадежной запорной арматуры из аустенитной стали. Однако в связи с небольшим пока еще объемом использования таких соединений, вопрос управления структурой таких соединений стоит не так актуально.

Поскольку под оптимальной структурой литого металла шва следует подразумевать структуру бейнита, а в ЗТВ равновесную мелкодисперсную структуру, не содержащую мартенситоподобных компонентов, то управление структурой сварного шва возможно двумя группами методов, которые можно назвать металлургическими и технологическими.

Металлургические методы управления структурой шва

В процессе сварки неплавящимся электродом наиболее просто металлургическое воздействие на металл шва можно осуществить путем легирования с помощью присадочной проволоки соответствующего состава. Рассмотрим поэтапно влияние каждого элемента на структуру сварных швов. Марганец при содержании около 1,7% способствует увеличению количества игольчатого феррита в сварных швах и тем

самым является крайне полезным элементом для оптимизации структуры сварных швов. Присутствие марганца в составе неметаллических включений способствует перераспределению структуры, содержащей полигональный феррит, в сторону большего содержания в сварном шве игольчатого феррита. Это является достоинством использования марганца как элемента-раскислителя, а также улучшает структуру швов. Известно, что введение никеля в состав стали способствует измельчению структуры стали и в целом улучшает механические свойства сварных швов. При его содержании в количестве нескольких процентов происходит не только измельчение структуры и более равномерное распределение карбидной смеси, но и увеличение количества остаточного аустенита в структуре сварных швов. Кремний используется, в первую очередь, как раскислитель, способствуя выведению оксида марганца из стали, и поэтому используется совместно с марганцем для легирования. Уменьшение содержания кислорода в металле шва ведет к повышению ударной вязкости.

Другим путем металлургического воздействия на металл сварного шва является его модифицирование. В качестве модификаторов могут использоваться различные карбидообразователи: вольфрам, молибден, тантал, ванадий, ниобий. Наиболее эффективными элементами по устойчивости карбидов являются вольфрам, молибден и ниобий, а наиболее доступным, но менее эффективным — ванадий. В качестве модификаторов возможно использование и термически стабильных оксидов элементов: алюминия, титана и др. Общим недостатком оксидов является опасность их неравномерного распределения в структуре, которая может привести к снижению механических свойств, в первую очередь, ударной вязкости. Модификация низколегированной стали титаном (оксидом титана) приводит к уменьшению доли игольчатого феррита в сварных швах и поэтому не может быть рекомендована к использованию для улучшения структуры швов. Применение модификаторов на основе оксида алюминия тоже не представляется возможным, так как известна технологическая трудность

равномерного введения в структуру очень маленького количества оксида алюминия. Введение в структуру стали стойких карбидов в качестве зародышей для выпадения карбидной смеси — достаточно хорошо зарекомендовавший себя прием, при этом очевидны преимущества более стойких карбидов. Так, введение ниобия в количестве 0,02% способствует выпадению термически стойких карбидов, что препятствует росту зерна и, как следствие, приводит к измельчению структуры и однозначно может быть использовано для управления структурой сварных швов. Введение ванадия вместо ниобия менее эффективно по своему воздействию. Исходя из проведенного анализа следует, что для обеспечения мелкодисперсной структуры сварных швов низкоуглеродистой стали, выполненных дуговой сваркой неплавящимся электродом, может быть эффективно использована проволока Св-08Г2С, которая широко используется при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов.

При сварке легированных сталей в связи с разными принципами легирования этих сталей, обусловленными их назначением, рациональным является использование сварочной проволоки, близкой по составу к основному металлу [7]. Поскольку использование проволоки оптимального состава для сварки конкретной марки легированной стали осложнено доступностью только стандартных сварочных проволок, которые не всегда способны обеспечить мелкодисперсную структуру сварных швов, особый интерес представляет изучение технологических приемов оптимизации структуры сварных швов.

Технологические методы управления структурой

Принципиальным преимуществом технологических методов перед металлургическими является возможность воздействия на структуру металла в ЗТВ. Основные технологические приемы управления структурой представлены на рис. 2.

Рассмотрим основные технологические приемы управления структурой подробнее. Известно, что предварительная холодная деформация на уровне не менее 5...8% позволяет измельчить структуру зерна за счет образования



Рис. 2. Технологические приемы воздействия на структуру сварных швов при сварке неплавящимся электродом

зародышей новых зерен. При этом с повышением степени деформации интенсивность образования зародышей увеличивается. В связи со сложностью реализации при сварке в монтажных условиях этот технологический прием не получил распространения. Термообработка по режиму нормализации наиболее эффективно воздействует на структуру сварных соединений, однако практическая реализация термообработки в условиях монтажа является весьма затратной. Использование медных накладок и (или) подкладок-холодильников является достаточно доступным приемом и зачастую используется не только для управления структурой, но и формой сварного шва. Ограничения в использовании холодильников относятся в первую очередь к сталям, склонным к закалке. Импульсное тепловложение при сварке является распространенным технологическим

приемом, который облегчает формирование швов при сварке в различных пространственных положениях и сварке тонкого металла, при этом из-за изменения временной интенсивности введения теплоты этот прием воздействует на процессы образования структуры как сварного шва, так и ЗТВ.

Анализ типовых режимов автоматической импульсной аргодуговой сварки неповоротных стыков трубопроводов показывает, что в зависимости от пространственного положения стыка погонная энергия сварки q/v изменяется в пределах 6...9 кДж/см, что позволяет оценить скорости охлаждения металла шва и ЗТВ. Для однопроходной сварки металла толщиной δ с полным проплавлением согласно [8] мгновенная скорость охлаждения металла шва при температуре T определяется по формуле:

$$w(T) = -2\pi\lambda c\rho \frac{(T - T_n)^3}{\left(\frac{q}{v\delta}\right)^2}, \quad (1)$$

где $w(T)$ — мгновенная скорость охлаждения металла шва; λ — коэффициент теплопроводности; c — удельная теплоемкость; ρ — плотность; q/v — погонная энергия; δ — толщина металла; T — температура, для которой определяется мгновенное значение скорости охлаждения; T_n — температура металла до начала процесса сварки.

Так, при указанных тепловложениях средняя скорость охлаждения низкоуглеродистой или низколегированной стали толщиной 3 мм в интервале температур минимальной устойчивости аустенита (600...500°C) изменяется в диапазоне 2...5°C/с. Согласно диаграммам анизотермического распада аустенита при сварке в этих условиях формируется феррито-бейнитная структура (рис. 3).

При выполнении корневого прохода многослойного сварного соединения скорости охлаждения можно оценить по формуле

$$w(T) = -2\pi\lambda \frac{(T - T_n)^2}{q/v}. \quad (2)$$

В этом случае скорости охлаждения оказываются выше (до 50°C/с), и для указанных в табл. 1 сталей с повышенным значением углеродного эквивалента возможна частичная закалка, вредные последствия которой могут быть исправлены термическими воздействиями последующих проходов.

При многопроходной сварке структура различных зон сварного соединения формируется в условиях многократных циклов нагрева и охлаждения (рис. 4). Известно, что многопроходная сварка имеет большой потенциал по регулированию сварочных термических циклов (СТЦ) для получения благоприятного структурного состояния ЗТВ сварного соединения. Такая формулировка интуитивно понятна, но требует уточнения — какое структурное состоя-

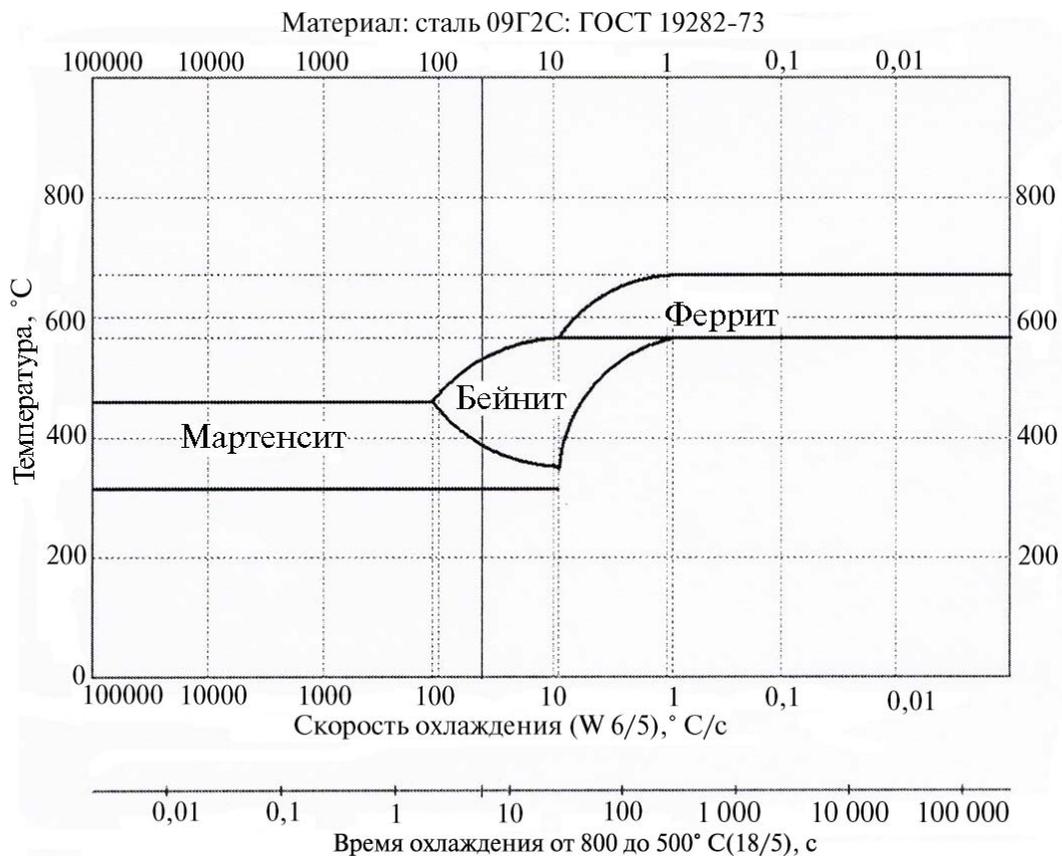


Рис. 3. Диаграмма анизотермического распада аустенита при сварке стали 09Г2С

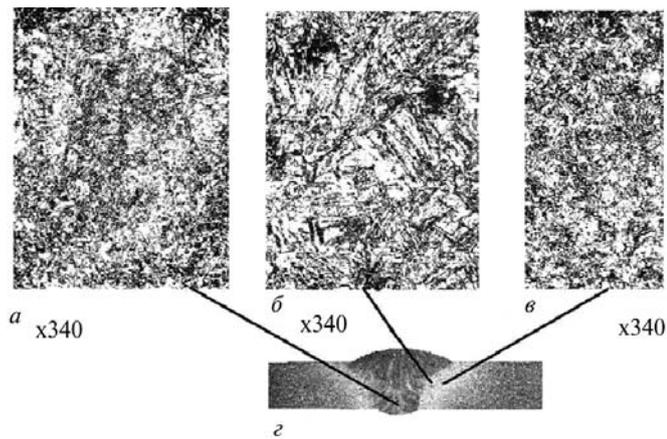


Рис. 4. Структура различных участков сварного соединения низколегированной стали с 2 % марганца, выполненного сваркой в три прохода:

- a* — структура литого металла промежуточного слоя;
- b* — структура металла околошовной зоны ЗТВ вблизи линии сплавления; *в* — структура металла околошовной зоны ЗТВ с меньшим размером зерна;
- z* — макроструктура сварного соединения

ние является «благоприятным», и каким должен быть СТЦ для его достижения.

Так, для получения высоких показателей ударной вязкости металла ЗТВ и его сопротивления образованию холодным трещинам необходимо, чтобы размер действительного ау-

стенитного зерна в ЗТВ был минимальным. С этой точки зрения СТЦ в ЗТВ многослойного соединения должен быть таким, чтобы первые тепловые воздействия приводили к неизбежному росту зерна и закалке; очередное тепловое воздействие должно привести к рекристаллизации аустенита с измельчением зерна и, возможно, повторной закалкой (рис. 5). Для этого максимальная температура очередного воздействия должна быть выше A_{c3} , но ниже температуры начала интенсивного роста зерна $T_{нир}$. Все последующие воздействия должны обеспечивать отпуск закаленных структур, для чего их максимальная температура не должна превышать A_{c1} . Такой термический цикл обеспечит получение структуры ЗТВ в виде мелкодисперсной смеси продуктов отпуска, обладающей высокими показателями прочности и ударной вязкости.

Для реализации приведенной схемы должно выполняться не менее двух проходов, что позволит иметь зону измельчения зерна в ЗТВ. К такому выводу приходят и другие исследователи [9]. С увеличением числа проходов уменьшается доля структурной области укрупнения

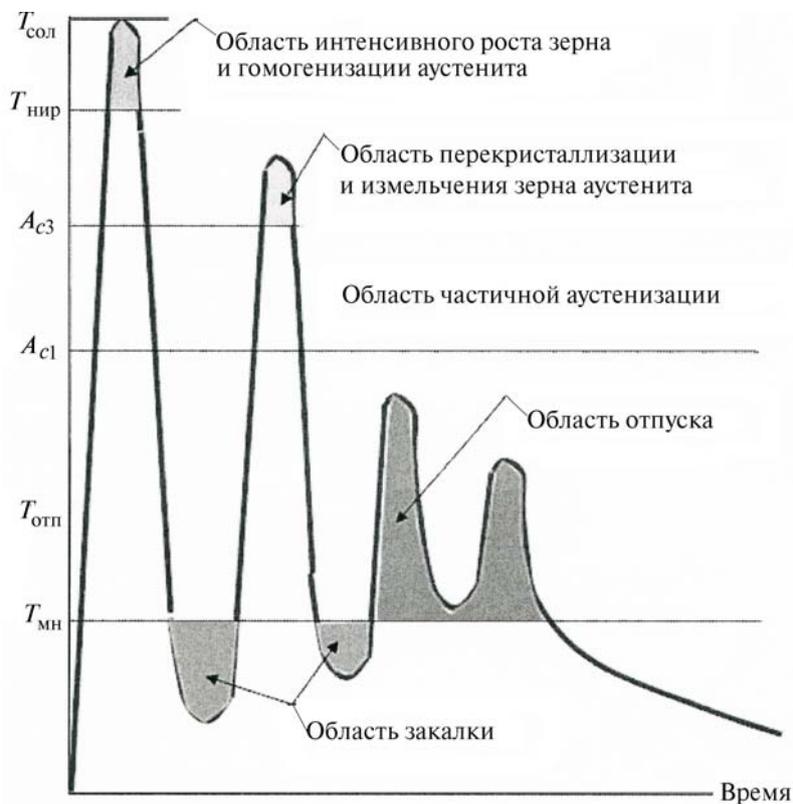


Рис. 5. Желательный термический цикл многослойной сварки низколегированных сталей

зерна и закалочных структур в околошовной зоне последнего прохода по отношению к общему размеру ЗТВ (см. рис. 4). При этом увеличение числа проходов приводит к дополнительному снижению напряжений благодаря отжигу предыдущих слоев.

Описанное благоприятное воздействие многопроходной сварки на структуру ЗТВ может быть отнесено и к металлу шва. Для литого металла сварных швов, полученного многопроходной сваркой, характерна более мелкая и более разориентированная структура. Увеличение числа проходов при сварке является благоприятным технологическим приемом для формирования структуры соединения в целом. Для автоматической орбитальной сварки плавящимся электродом оно несущественно влияет на изменение производительности труда сварщика, а с учетом увеличения качества сварки и снижения потерь на исправление дефектов даже может способствовать повышению производительности труда.

Изменение направления кристаллизации металла шва также возможно с помощью нескольких технологических приемов. Известен положительный опыт использования переменного электромагнитного поля для измельчения структуры металла шва. Однако усложнение конструкции и габаритных размеров оборудования может быть критичным для стесненных условий монтажа. Направление кристаллизации может быть изменено за счет коэффициента формы шва (глубины проплавления), например, при использовании активирующих флюсов [10], применение которых на неповоротных стыках относительно тонкого металла затруднено из-за сложности точной дозировки флюса. На направление кристаллизации существенным образом влияет импульсное тепловложение с формированием сварного шва в виде отдельных ванн (рис. 6).

Установлено [11], что наиболее эффективно импульсное тепловложение обеспечивается при реализации шаго-импульсного процесса автоматической орбитальной TIG-сварки, циклограмма которого представлена на рис. 7.

Из проанализированных технологических приемов именно шаго-импульсный процесс

является наиболее удобным для обеспечения необходимой структуры литого металла шва стали 09Г2С (рис. 8) за счет изменения направления кристаллизации.

Согласно проведенным расчетам скоростей охлаждения шва были назначены режимы сварки трубных образцов (шаго-импульсный режим сварки корня шва и импульсный режим облицовочного слоя). Режимы сварки обеспечивали скорость охлаждения шва на всех проходах на уровне $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, что при использовании присадочной проволоки Св-08Г2С соответствовало структуре шва без мартенсита. Результаты, полученные расчетным путем, подтвержде-

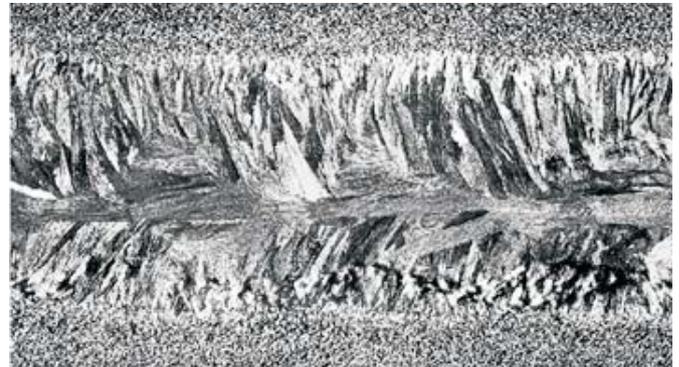


Рис. 6. Макроструктура сварного шва низколегированной стали, выполненного импульсной сваркой, $\times 7$

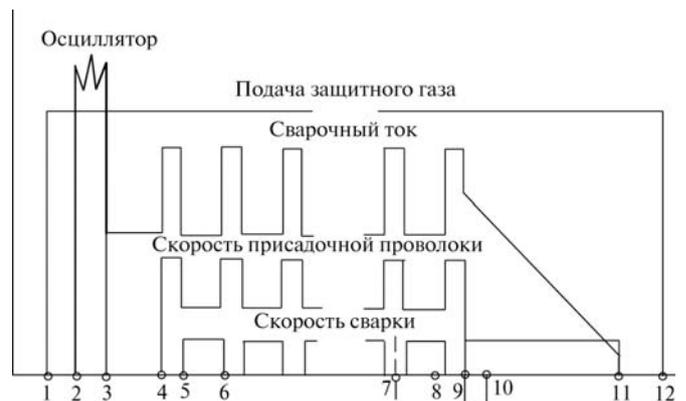


Рис. 7. Цикл шаго-импульсной сварки неплавящимся электродом с присадочной проволокой:

- 1 — команда ПУСК; 1–2 — предварительная продувка (2...5 с); 2–3 — работа осциллятора;
- 3 — возбуждение дуги; 3–4 прогрев (1...3 с);
- 4–5 — импульс тока (0,2...2,0 с); 5–6 — пауза, шаг (0,2...2,0 с); 7 — завершение полного оборота (360°);
- 7–8 — перекрытие; 8 — команда СТОП;
- 4–9 — сварка и подача присадочной проволоки;
- 9–11 — заварка кратера (1...6 с); 9–10 — оттяжка проволоки; 11–12 — обдув (2...5 с)



Рис. 8. Сварной шов технологического трубопровода КС

ны исследованиями микроструктуры этого шва. При этом в околошовной зоне ЗТВ за счет многопроходной сварки обеспечена мелкодисперсная структура.

Таким образом, анализ технологических приемов оптимизации структуры сварных швов показал, что наиболее доступными и универсальными методами воздействия являются использование импульсных или шаго-импульсных режимов сварки, а также многопроходной технологии сварки.

Выводы

1. Показана возможность и необходимость управления структурой сварных соединений технологических трубопроводов КС из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, выполняемых автоматической сваркой неплавящимся электродом.

2. В качестве металлургического метода получения мелкодисперсной структуры металла сварного шва на низкоуглеродистой стали при сварке неплавящимся электродом целесообразно использование проволоки Св-08Г2С.

3. Показана эффективность и доступность технологического приема улучшения структуры сварных швов низкоуглеродистых и низколегированных сталей путем использования импульсной или шаго-импульсной технологии и многопроходной сварки.

Литература

1. Шипилов А.В., Куркин А.С., Полосков С.И. Влияние формы и размеров сварных соединений на долговечность трубопроводов компрессорных станций // Сварка и диагностика. 2010. № 6. С. 47–51.
2. Шипилов А.В. Особенности автоматической орбитальной сварки неплавящимся электродом трубопроводов обвязки компрессорных станций // Сварка и диагностика. 2010. № 5. С. 42–47.
3. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. М.: Машиностроение, 1973. 448 с.
4. Изменение микроструктуры и механических свойств многослойных соединений из стали 30ХГСА при сварке плавлением разными способами / Д.А. Чинахов, М.К. Скаков, А.В. Градобоев и др. // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313. № 2. С. 120–122.
5. Назарчук А.Т., Снисарь В.В., Демченко Э.Л. Порционное тепловложение как способ управления структурой металла шва и ЗТВ // Автоматическая сварка. 2003. № 12. С. 39–42.
6. Морфологические особенности структуры низколегированного металла шва и их влияние на свойства сварных соединений / А. В. Денисенко, Ф.В. Грабин, А.О. Корсун, Т.Г. Соломийчук // Автоматическая сварка. 1990. № 10. С. 32–37.
7. Design of weld fillers for mitigation of residual stresses in ferritic and austenitic steel welds / R.J. Moat et al. // Science and Technology of Welding & Joining. 2011. Vol. 16. N 3. P. 279–284.
8. Теория сварочных процессов / А.В. Коновалов и др.; под ред. В.М. Неровного. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 752 с.
9. Maksuti R., Mehmeti H., Imeri S. Correlation of microstructure and hardness of two-pass submerged arc welds of line pipe steel X65 // International Journal of Microstructure and Materials Properties. 2010. Vol. 4. N 3. P. 347–355.
10. Murugan N., Gunaraj V. Prediction and control of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding of pipes // Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 168. P. 478–487.
11. Опыт создания блочно-модульного оборудования конструкции для автоматической орбитальной TIG-сварки с подачей присадочной проволоки / В.А. Галкин и др. // Сварка и диагностика. 2011. № 1. С. 36–41.

Статья поступила в редакцию 15.04.2011 г.