

Л.А. Ефименко, д-р техн. наук, О.Ю. Елагина, д-р техн. наук, Г.И. Вышегородцева, канд. техн. наук (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва, Россия); О.В. Коновалова, канд. техн. наук (ООО «Газпром энергодиагностика», г. Москва, Россия)

Оценка влияния технологических и эксплуатационных параметров на долговечность и безопасность монтажных сварных соединений запорной арматуры

Запорная арматура является одним из наиболее важных элементов газопроводных систем, поэтому при монтаже запорной арматуры предъявляются повышенные требования как к используемым материалам, так и к технологическим процессам. При сварке существенным образом изменяются структура и свойства металла сварного соединения по сравнению с его исходным состоянием, поэтому для обеспечения срока службы монтажного сварного соединения, сопоставимого с нормативным сроком службы газопровода (40 лет), требуется учет как технологических факторов при проведении сварочных работ, так и эксплуатационных параметров.

Наибольшую опасность для работоспособности сварного соединения представляет охрупчивание металла зоны термического влияния (ЗТВ) и, в частности, металла околошовного участка (ОШУ). В связи с этим в качестве критерия долговечности металла сварных соединений может быть принята ударная вязкость.

Для оценки влияния технологии сварки на потерю вязкостных свойств металла ОШУ ЗТВ непосредственно после сварки в СТО Газпром 2-4.1-212-2008 регламентируется

ударная вязкость металла сварного соединения при температуре испытаний $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, которая должна быть не менее 25 Дж/см^2 . Наряду с этим в СТО Газпром 2-2.3-137-2007 регламентируются требования к твердости металла ЗТВ сварных соединений, которая должна быть не более 300 HV_{10} .

Значительную часть монтажных сварных соединений запорной ар-

матуры, используемой на магистральных газопроводах, выполняют на сталях категорий прочности К42 и К52, имеющих ферритно-перлитную структуру. В табл. 1 представлен химический состав сталей указанных категорий прочности.

Стали 20 и 17ГС имеют склонность к образованию закалочных структур при сварке, что вызывает падение ударной вязкости металла

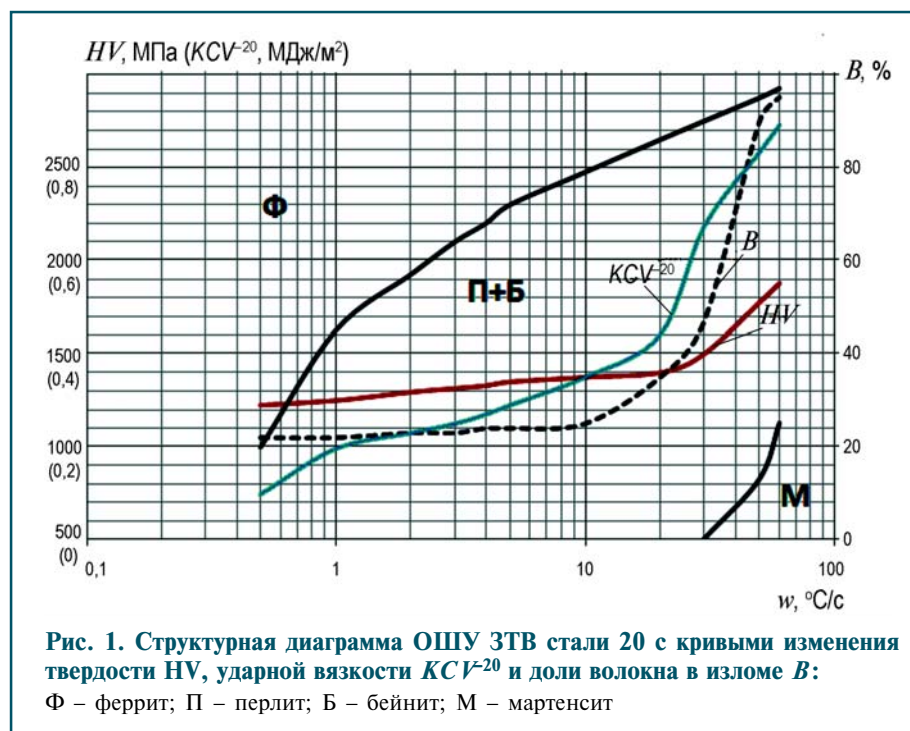


Таблица 1

Сталь	Категория прочности	Содержание легирующих элементов в стали, %								
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
20	42	0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	0,040	0,040	0,25	0,25	0,25	0,05
17ГС	52	0,18	0,41	1,20	0,013	0,016	0,025	0,080	0,013	–

ОШУ ЗТВ и появление холодных трещин. Для определения влияния сварочного процесса на ударную вязкость образцы из выбранных сталей подвергали имитационной обработке по термическому циклу сварки с максимальной температурой нагрева 1350 °С и скоростями охлаждения w_{8-5} в интервале температур диффузионного превращения аустенита от 0,2 до 100 °С/с.

На рис. 1 представлена структурная диаграмма ОШУ ЗТВ стали 20. Как видно из полученных данных, при выполнении монтажных сварных соединений запорной арматуры, изготовленных из стали категории прочности К42, высокая ударная вязкость по Шарпи (KCV) на уровне 0,6–0,8 МДж/м² может быть обеспечена при скорости охлаждения металла ОШУ ЗТВ в диапазоне 30–50 °С/с. При этом твердость металла рассматриваемого участка ЗТВ составляет 150–175 HV и находится на уровне твердости основного металла. Дальнейшее повышение скорости охлаждения нецелесообразно в связи с увеличением содержания мартенситной фазы в структуре металла шва, повышением твердости и связанного с этим падением ударной вязкости.

Структурная диаграмма ОШУ ЗТВ сварного соединения, выполненного из стали 17ГС категории прочности К52, приведена на рис. 2.

Как видно из рис. 2, ударная вязкость не ниже нормативных требований обеспечивается при скоростях охлаждения w не более 60 °С/с, а максимальная ударная вязкость (KCV на уровне 0,5–0,6 МДж/м²) — при скоростях охлаждения 10–50 °С/с. При этом твердость металла сварного соединения не превышает 300 HV.

При приварке патрубков запорной арматуры, изготовленных из ферритно-перлитных сталей категории прочности К42 и К52, для сохранения высокого уровня ударной вязкости скорость охлаждения металла ОШУ ЗТВ должна быть не более 50 °С/с.

Монтажные сварные соединения патрубков запорной арматуры могут быть выполнены с применением ручной дуговой сварки (РДС), автоматизированной дуговой сварки в среде защитных газов (АДСЗГ) и механизированной сварки в среде защитных газов самозащитной порошковой проволокой. Режимы технологии сварки регламентируются СТО Газпром 2-2.2-137-2007. Для определения диапазона скоростей охлаждения, характерных для используемых режимов сварки, исследовали термические циклы сварки многопроходного кольцевого шва. Регистрация температурно-временных параметров осуществлялась хромель-алюмелевыми термопарами.



Рис. 2. Структурная диаграмма ОШУ ЗТВ сварных соединений стали 17ГС с кривыми изменения твердости HV и ударной вязкости (KCV^{+40})

Обработка полученных результатов показала, что скорость охлаждения металла ЗТВ монтажных сварных соединений при использовании РДС на подъем для корневого прохода находится в пределах 25 °С/с, при использовании АДСЗГ для заполняющих проходов — в пределах 40 °С/с, для облицовочных проходов — в пределах 60 °С/с.

Сопоставление полученных скоростей охлаждения с данными об изменении механических свойств металла ОШУ ЗТВ в процессе сварки (см. рис. 1, 2) показывает, что для сталей рассматриваемых категорий прочности формирование структурно-фазового состава происходит преимущественно в бейнитной области, а ударная вязкость KCV находится в пределах, допускаемых нормативными документами (табл. 2).

Свойства металла ЗТВ сварного соединения так же, как и основного металла тела трубы, в процессе эксплуатации изменяются. В наибольшей степени это проявляется в снижении сопротивления разрушению при динамических нагрузках. В связи с этим проанализировали влияние деформационного старения на ударную вязкость металла ОШУ ЗТВ на образцах из стали 17ГС с различными структурно-фазовыми составами.

Как видно из рис. 3, металл ОШУ ЗТВ сварного соединения независимо от исходного структурно-фазового состава после деформационного старения характеризуется существенным снижением ударной вязкости. В частности, значения KCV^{+20} до деформационного старения металла ОШУ ЗТВ во всех рассматриваемых структурных составах находятся на высоком

Таблица 2

Категория прочности стали	Сварные проходы					
	корневой ($w_{8-5} = 25$ °С/с)		заполняющие ($w_{8-5} = 40$ °С/с)		облицовочные ($w_{8-5} \approx 60$ °С/с)	
	KCV , МДж/м ²	HV	KCV , МДж/м ²	HV	KCV , МДж/м ²	HV
К42	0,60	140	0,80	160	0,90	190
К52	0,58	250	0,55	300	0,30	340

уровне (выше нормативных требований). Однако присутствие феррита, перлита или мартенсита в структуре металла ОШУ ЗТВ более существенно сказывается на охрупчивании металла в результате деформационного старения по сравнению с металлом, имеющим бейнитную структуру. Так, после деформационного старения ударная вязкость KCV^{+20} металла ОШУ, в структурном составе которого около 40 % феррита и 60 % перлита, уменьшается от 0,84 до 0,11 МДж/м², а разрушение металла происходит практически по механизму хрупкого разрушения. Коэффициент деформационного старения C_d металла в этом случае составляет 87 %, что значительно выше коэффициента C_d основного металла. Наличие мартенситной составляющей также способствует существенному (до 45–55 %) снижению вязкой составляющей в изломе. Эта структура характеризуется минимальной ударной вязкостью на уровне 0,22 МДж/м². Только при преимущественно бейнитной структуре металл ОШУ после деформационного старения имеет ударную вязкость на уровне нормативных требований и составляет 0,44 МДж/м². Даже в этом случае коэффициент C_d составлял около 50 %, а ударная вязкость при температуре испытаний –40 °С снизилась с 0,52 до 0,21 МДж/м². Следует отметить, что такое значение коэффициента C_d согласно работам [1, 2], соответствует стали 17ГС примерно с 30-летним сроком наработки.

Таким образом, оценка степени деформационного старения основного металла и металла ОШУ ЗТВ показывает, что металл сварных соединений в процессе эксплуатации охрупчивается более интенсивно, чем основной металл. Вместе с тем, на склонность металла к деформационному старению можно повлиять изменением структурно-фазового состава ЗТВ. Как показано в работе [3], наибольшее сопротивление деформационному старению имеет металл ОШУ ЗТВ с

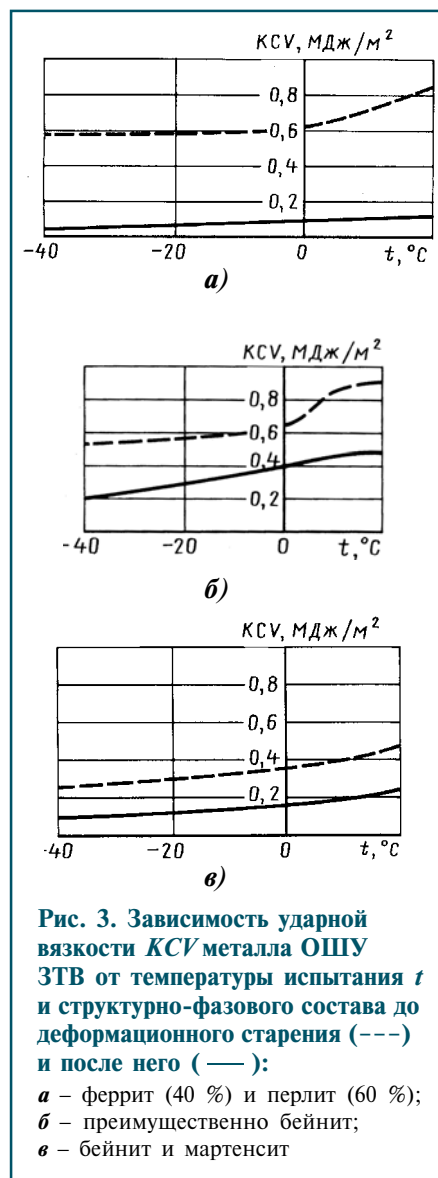
преимущественно бейнитной структурой. Сталь с такой структурой характеризуется минимальным уменьшением ударной вязкости и наименьшим коэффициентом деформационного старения C_d , который на 40 % ниже коэффициента C_d металла с ферритно-перлитной структурой.

Согласно СТО Газпром 2-4.1-212–2008 срок службы запорной арматуры до списания соответствует сроку службы трубопровода и составляет не менее 40 лет (ресурс до списания — не менее 320 000 ч). Как показали проведенные исследования, за такой долгий срок эксплуатации происходит значительное снижение пластических и вязкостных

характеристик металла, повышается его склонность к хрупкому разрушению.

Использование ударной вязкости металла ОШУ ЗТВ сварных соединений в качестве показателя долговечности позволяет оценить снижение этой характеристики надежности в процессе эксплуатации. Так, согласно данным рис. 3, ударная вязкость металла ОШУ ЗТВ сварного соединения из стали 17ГС с преимущественно бейнитной структурой при температуре испытаний –40 °С непосредственно после сварки составляла 0,52 МДж/м². После деформационного старения, соответствующего примерно 30-летнему сроку наработки, ударная вязкость снизилась до 0,21 МДж/м². Сопоставление этих данных в виде отношения ударных вязкостей после деформационного старения a_i к ударным вязкостям после сварки a_0 позволяет получить безразмерный показатель, характеризующий склонность металла к охрупчиванию и равный соответственно 0,4. Рассматривая процесс падения вязкостных характеристик металла сварного соединения как постепенное снижение предложенного безразмерного показателя с единицы, соответствующей началу эксплуатационного периода, до 0,4, что соответствует примерно 30-летней эксплуатации, можно построить график снижения безразмерного показателя ударной вязкости в течение нормативного срока службы газопровода для металла ОШУ ЗТВ сварного соединения с бейнитной структурой (рис. 4). Аналогичным образом были построены графики и для других структурных составов металла ОШУ ЗТВ.

Полученные графики можно использовать для оценки долговечности металла сварного соединения и определения продолжительности периода эксплуатации, в течение которого не произойдет критического падения ударной вязкости, равно-го соответственно отношению нормативной минимально допустимой ударной вязкости $a_{норм}$ к ударной



вязкости, полученной непосредственно после сварки a_0 . Для исследованных сталей предельные значения a_0 и $a_{\text{норм}}$ представлены в табл. 3. Сопоставление полученных значений со значениями, представленными на рис. 2, позволило определить ожидаемую продолжительность безопасной эксплуатации.

Полученные результаты показывают, что использование предлагаемых режимов сварки может привести к появлению трещиноподобных дефектов в металле ЗТВ облицовочных слоев сварного шва, выполненного из сталей категории прочности K52, через 9–10 лет, а в металле корневого и заполняющих проходов — через 24–28 лет.

Для увеличения продолжительности межремонтного цикла необходимо повысить уровень ударной вязкости металла ОШУ ЗТВ сварных соединений запорной арматуры, выполненных из стали категории прочности K52. Достичь повышения уровня ударной вязкости можно путем регулирования термического цикла сварки с учетом оптимизации режимов и температуры подогрева в процессе сварки, обеспечивающих скорость охлаждения металла ОШУ ЗТВ облицовочных проходов в интервале 15–25 °С/с.

Для определения параметров сварочного процесса, обеспечивающих требуемую скорость охлаждения, с использованием теории тепловых процессов Н.Н. Рыкалина

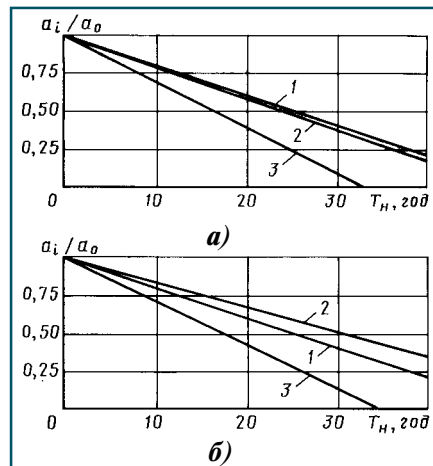


Рис. 4. Снижение безразмерного показателя ударной вязкости a_i/a_0 металла ОШУ ЗТВ сварных соединений с разными структурно-фазовыми составами при температуре испытаний -40 °С (а) и -20 °С (б) в зависимости от нормативного срока службы газопровода T_n : 1 – бейнит и мартенсит; 2 – бейнит; 3 – феррит и перлит

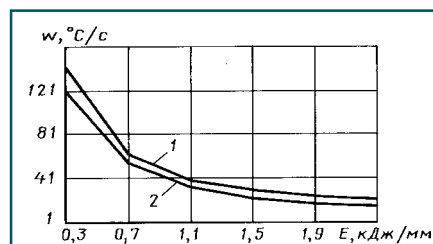


Рис. 5. Зависимость скорости охлаждения металла ОШУ ЗТВ w в интервале температур 800–500 °С для облицовочных проходов от погонной энергии сварки E при приварке патрубка запорной арматуры: 1 – при температуре 100 °С; 2 – при температуре 150 °С

был проведен расчет скоростей охлаждения металла ОШУ ЗТВ в процессе приварки патрубка запорной арматуры (рис. 5).

Как показали расчеты, для получения заданного диапазона скоростей охлаждения необходимо при выполнении облицовочных проходов повысить погонную энергию сварки E до 1,5 кДж/мм и увеличить минимальную межслойную температуру металла сварного шва до 150^{+30} °С. Применение указанных режимов сварки позволит обеспечить ударную вязкость металла ОШУ ЗТВ при температуре испытаний -40 °С на уровне 0,55–0,58 МДж/м² и соответственно увеличить продолжительность периода безопасной эксплуатации для сварных соединений запорной арматуры до 33–35 лет ($a_{\text{норм}}/a_0 = 0,43 \div 0,45$).

Список литературы

1. Ямалеев К.М., Пауль А.В. Структурный механизм старения трубных сталей при эксплуатации нефтепроводов // Нефтяное хозяйство. 1988. № 11. С. 61.
2. Гумеров А.Г., Ямалеев К.М., Журавлев Г.В., Бадиков Ф.И. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. 231 с.
3. Ефименко Л.А., Коновалова О.В., Илюхин В.А., Ячинский А.А. и др. Оценка деформационного старения металла зоны термического влияния сварных соединений низколегированных сталей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2005. № 10. С. 45–48.

Таблица 3

Сварочные проходы	Ударная вязкость ОШУ ЗТВ после сварки a_0 , МДж/м ²	Минимально допустимая ударная вязкость $a_{\text{норм}}$, МДж/м ²	Отношение $a_{\text{норм}}/a_0$	Продолжительность безопасного периода эксплуатации, год
<i>Категория прочности стали K42</i>				
Корневой	0,60	0,25 (при $t = -20$ °С)	0,42	34–35
Заполняющие	0,80		0,31	Свыше 40
Облицовочные	0,90		0,28	Свыше 40
<i>Категория прочности стали K52</i>				
Корневой	0,58	0,25 (при $t = -40$ °С)	0,43	27–28
Заполняющие	0,52		0,48	24–25
Облицовочные	0,30		0,83	Менее 10