

На правах рукописи

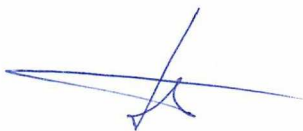
УДК 621.791

Вышемирский Дмитрий Евгеньевич

**ОБОСНОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ
ЭКВИВАЛЕНТА УГЛЕРОДА
НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛЕЙ
ДЛЯ ТРУБ КЛАССА ПРОЧНОСТИ K65 И K70**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2017

Работа выполнена в Российском государственном университете нефти и газа
(НИУ) имени И.М. Губкина (г. Москва)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ЕФИМЕНКО Любовь Айзиковна,
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

Официальные оппоненты: доктор технических наук (05.02.10)
ДОРОНИН Юрий Викторович,
ООО «АЦГХ», начальник лаборатории сварки

кандидат технических наук (05.02.10)
Коберник Николай Владимирович,
МГТУ им. Н.Э.Баумана, доцент

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»** (г. Москва)

Защита состоится «27» апреля 2017 года в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



А.В. Коновалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Успешная реализация современных инвестиционных проектов, таких как Бованенково-Ухта, Сила Сибири, Сила Сибири - 2, Сахалин-Хабаровск-Владивосток и других напрямую связана с использованием труб повышенной класса прочности. Это позволяет повысить давление в магистрали и одновременно снизить металлоемкость, сократить расходы на выполнение сварочно-монтажных работ и на строительство. В настоящее время все более широкое применение находят трубы больших диаметров и толщин класса прочности K60, K65, а в перспективе K70 и выше. Для их производства разработан современный класс сталей, характеризующихся низким содержанием углерода, кремний-марганцевой системой легирования, высокой степенью чистоты по сере и фосфору и микролегированием сильными карбидообразующими элементами: ниобием, ванадием, титаном. Важной характеристикой, определяющей влияние химического состава металла на его реакцию на термический цикл сварки, является эквивалент углерода ($C_{\text{экв}}$). В зависимости от эквивалента углерода меняются требования к режимам сварки, при которых обеспечиваются требуемые структура и комплекс механических свойств сварных соединений.

Наиболее полно вопросы свариваемости традиционных низкоуглеродистых сталей с содержанием углерода свыше 0,12% изучены в работах отечественных и зарубежных исследователей, таких как Кузмак Е.М., Шоршоров М.Х., Макаров Э.Л., Гривняк И., Бессио К., Ито К. и других. В них также предложены зависимости для определения эквиваленты углерода, а рядом нормативных документов установлены его критические значения.

Применительно к малоуглеродистым микролегированным высокопрочным сталям для труб класса прочности K65 и K70 ранее установленные критические значения эквивалента углерода не позволяют достаточно достоверно оценить их реакцию на термический цикл сварки (например, с позиции образования холодных трещин).

Целью настоящей работы являлось расширение возможностей применения труб класса прочности K65 и K70 в магистральных газопроводах.

В процессе работы были решены следующие задачи:

1. Обоснование выбора зависимости для определения эквивалента углерода малоуглеродистых сталей для труб класса прочности K65 и K70 и определение значения коэффициентов эквивалентности для основных легирующих элементов.

2. Выполнение оценки взаимосвязи эквивалента углерода с реакцией сталей для труб класса прочности K65 и K70 на основе анализа особенностей распада аустенита в околошовном участке зоны термического влияния (ОШУ ЗТВ) в процессе сварки.

3. Исследование влияния эквивалента углерода на склонность металла труб класса прочности K65 и K70 на изменение твердости и ударной вязкости при сварке и ремонте кольцевых стыков трубопроводов.

4. Выполнение экспериментальных исследований влияния эквивалента углерода на склонность сталей для труб класса прочности K65 и K70 к образованию холодных трещин.

5. Разработка методики определения критического значения эквивалента углерода для высокопрочных малоуглеродистых сталей, обеспечивающего заданный уровень механических свойств в ОШУ ЗТВ сварных соединений трубопроводов класса прочности K65 и K70 и отсутствие холодных трещин.

Научная новизна:

1. Показана возможность расширения диапазона допустимых значений эквивалента углерода $C_{\text{экв}}$ (МИС) сталей для труб класса прочности K65 и K70 до 0,54% при высокой сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин при сварке за счет перераспределения углерода между матрицей и карбидной фазой, вызывающего уменьшение степени тетрагональности решетки мартенсита и снижение уровня микронапряжений в нем.

2. Выявлена необходимость ограничения максимально допустимой скорости охлаждения (w_{8-5}) не выше 40 °C/с сталей для труб класса прочности K65 и K70 с эквивалентом углерода превышающим критическое значение, принятое для сталей более низких классов прочности, позволяющая обеспечить формирование комплекса нормативных характеристик металла ОШУ ЗТВ при способах сварки, используемых при строительстве и ремонте магистральных газопроводов.

3. Показана необходимость уточнения значений коэффициентов эквивалентности марганца, титана, ниобия и ванадия в зависимости для определения эквивалента углерода $C_{\text{экв}}$ (МИС) сталей для труб класса прочности K65 и K70 из-за изменения их вклада в прирост прочностных свойств малоуглеродистых микролегированных сильными карбидообразующими элементами трубных сталей с содержанием углерода менее 0,1%. Предложена зависимость определения эквивалента углерода $C_{\text{экв}}$ (Н) сталей для труб класса прочности K65 и K70 скорректированная относительно формулы Международного Института Сварки (МИС).

Практическая значимость

Результаты выполненной научно-исследовательской работы явились основанием для создания методики определения критического эквивалента углерода сталей для труб классов прочности K65 и K70 на основе анализа их склонности к образованию холодных трещин при сварке и разработке Р Газпром 2-2.3-992-2015.

Методология и методы исследования

В работе использовали методику моделирования различных сварочных процессов на установке токов высокой частоты Power Cube 90/180 с регистрацией термических циклов прибором Мемограф-М. Структурно-фазовые превращения в ОШУ ЗТВ изучались дилатометрическим методом с использованием закалочного дилатометра марки L78 RITA, исследования микроструктуры и её морфологии с применением оптических микроскопов Meiji IM 7200, Leica DMI 5000, сканирующих электронных микроскопов Phenom ProX, TESCAN Mira 3M и рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV. Полученные данные обобщались в структурные диаграммы ОШУ ЗТВ. Измерения значений твердости металла ОШУ ЗТВ выполняли на автоматическом твердомере DuraScan-50. Склонность к хрупкому разрушению ОШУ ЗТВ оценивалась по результатам испытания на ударный изгиб на инструментированном маятниковом копре INSTRON MPX-450 с криокамерой. Испытания образцов на сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке проводились согласно методике ГОСТ 26388 на установке ЛТП-2-3.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Результаты исследования особенностей реакции на термический цикл сварки малоуглеродистых микролегированных сильными карбидообразующими элементами высокопрочных сталей с эквивалентом углерода от 0,35 % до 0,54 %.

2) Результаты исследования кинетики полиморфных превращений аустенита в металле околосшовного участка зоны термического влияния сварных соединений в широком диапазоне скоростей охлаждения для различных способов сварки труб в интервале содержания углерода от 0,027% до 0,11%.

3) Результаты исследования влияния эквивалента углерода на склонность к образованию холодных трещин при сварке сталей для труб класса прочности K65 и K70.

4) Результаты оценки роли сильных карбидообразующих элементов в структурообразовании при сварке исследованных сталей.

5) Скорректированная зависимость по расчету значения эквивалента углерода сталей для труб классов прочности K65 и K70 и методика для определения его критического значения.

Достоверность результатов исследования

Достоверность результатов обеспечивается значительным объемом экспериментальных данных, полученных с использованием аттестованного испытательного оборудования, применением современной исследовательской техники, использованием апробированных методик проведения исследований и положительными результатами машинных испытаний.

Личный вклад автора

Автор лично выполнял лабораторные эксперименты, результаты которых изложены в диссертации. Проводил испытания механических свойств, исследование структурного состояния металла ЗТВ и оценки свариваемости, обрабатывал результаты экспериментов. Основные положения диссертационной работы изложены автором лично.

Апробация работы. Результаты работы докладывались:

1. VI Международная научно-техническая конференция и выставка «Газотранспортные системы: настоящее и будущее», 28–29 октября 2015, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», п. Развилка.
2. VIII Отраслевое совещание «Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО «Газпром», 15–16 ноября 2016, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», п. Развилка.
3. Международный конкурс научных научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли, диплом лауреата первой премии, 2016, г. Москва.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 4 печатных работы, в том числе 3 - в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка литературы из 76 наименований, работа изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков и 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, показано направление исследования свариваемости сталей для труб класса прочности K60, K65 и K70.

В первой главе представлен обзор литературных источников, посвященных особенностям свариваемости перспективных трубных сталей для строительства магистральных газопроводов. Проанализирован химический и структурно-фазовый состав высокопрочных трубных сталей. Выявлено, что в отличие от традиционных низколегированных трубных сталей, стали нового поколения отличаются гораздо более низким содержанием углерода, относительно высоким содержанием марганца (1,6% – 1,85%), добавками легирующих элементов: Mo, Cr, Ni, Cu (в разных сочетаниях). Отличительной особенностью рассматриваемых сталей является комплексное микролегирование их карбидообразующими элементами Nb, Ti, V, суммарное содержание которых составляет примерно 0,15%. Эти элементы, повышают прочностные характеристики и улучшают вязкость, за счет влияния на процессы рекристаллизации аустенита, получения мелкозернистой структуры и дисперсионного упрочнения проката карбонитридами.

Анализ расчетных методов оценки свариваемости высокопрочных сталей, выполненный в работе показал, что в используемых в настоящее время зависимостях, связывающих значение углеродного эквивалента с химическим составом стали, вклад одних и тех же легирующих элементов оценивается по-разному. Структурно-фазовые превращения, протекающие в определенной группе сталей, обладают существенной спецификой, что не позволяет применять одни и те же зависимости по расчету эквивалента углерода к сталям различных групп. В связи с этим, применительно к исследуемым сталям, необходимо скорректировать зависимости для расчета эквивалента углерода с учетом как системы легирования сталей, так и влияния режимов сварки.

Анализ применяемых технологий сварки кольцевых стыков магистральных газопроводов показал, что наиболее распространенным диапазоном погонных энергий является интервал от 0,5 до 1,5 кДж/мм. Ограничение тепловложения в основной металл за счет изменения режимов вызывает существенное повышение скоростей охлаждения металла ОШУ ЗТВ сварного соединения. Как следствие этого возникает опасность появления закалочных структур, происходит повышение твердости этого участка сварного соединения и падение его ударной вязкости, что необходимо учитывать при назначении критического значения эквивалента углерода.

Во второй главе дана оценка влияния легирующих элементов на значения эквивалента углерода, определенного с использованием различных зависимостей на примере более чем 40 марок сталей. Проведенный анализ долевого участия легирующих элементов в формировании значения эквивалента углерода показал, что, для всех групп свариваемых сталей наблюдается тенденция по снижению вклада углерода в величину эквивалента углерода по мере увеличения значения последнего. Вклад марганца, как основного легирующего элемента, также подвержен тенденции к снижению его роли в формировании эквивалента углерода по мере увеличения концентрации углерода. В случае легирования сталей сильными карбидообразующими элементами необходимо учитывать тот факт, что на процесс образования закалочных структур при сварке в наибольшей степени влияет содержание углерода, оставшегося в аустените после выделения специальных карбидных фаз. В малоуглеродистых микролегированных сильными карбидообразующими элементами сталях с содержанием углерода менее 0,05% количество углерода в аустените по отношению к его содержанию в химическом составе стали может снижаться до 2 раз. В этом случае образование закалочных структур при распаде аустенита в процессе сварки вызовет уменьшение степени тетрагональности решетки мартенсита, снижение уровня напряжений и склонности к образованию холодных трещин. Данный факт может стать основанием для пересмотра критического значения эквивалента углерода в сталях для труб категории прочности K65 и K70.

В третьей главе выполнена экспериментальная оценка взаимосвязи эквивалента углерода с реакцией исследуемых сталей на термический цикл сварки (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав исследованных высокопрочных сталей

Номер плавки	Содержание химических элементов, %																		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cr	Cu	Al	V	Ti	Nb	N	Ca	W	Zr	C _{экв}	P _{см}
I	0,075	0,14	1,33	0,008	0,001	0,20	0,004	0,163	0,113	0,032	0,002	0,0177	0,063	-	-	0,025	0,006	0,35	0,16
II	0,085	0,17	1,4	0,007	0,001	0,19	0,135	0,005	0,088	0,041	0,050	0,012	0,046	-	-	0,05	-	0,37	0,18
III	0,11	0,26	1,73	0,013	0,005	0,024	-	0,03	0,026	0,04	0,10	0,021	0,046	0,002	-	-	-	0,43	0,22
IV	0,027	0,195	2,00	0,005	<0,004	0,49	0,31	0,23	0,512	0,039	<0,02	0,027	0,027	-	-	<0,025	0,0089	0,54	0,20
V	0,068	0,28	1,78	0,011	0,001	0,24	0,197	0,015	0,240	0,027	0,002	0,0112	0,031	-	-	0,025	0,059	0,44	0,20
VI	0,084	0,22	1,90	0,012	<0,002	0,21	0,25	0,062	0,05	0,044	<0,005	0,018	0,048	-	-	-	-	0,48	0,21
VII	0,066	0,25	1,81	0,005	<0,001	0,24	0,25	0,008	0,23	0,02	0,046	0,0178	0,053	0,005	0,005	0,0075	0,0038	0,46	0,20
$C_{\text{экв}} = C + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Ni} + \text{Cu})/15$ $P_{\text{см}} = C + \text{Si}/30 + (\text{Cr} + \text{Mn} + \text{Cu})/20 + \text{Ni}/60 + \text{Mo}/15 + \text{V}/10 + 5\text{B}$																			

Согласно нормативным документам значения эквивалента углерода не должно превышать 0,43% и 0,46% для металла труб из сталей класса прочности К60. Из сопоставления химических составов семи плавок сталей, принятых для исследования видно, что металл IV, VI и VII плавок характеризуется значениями эквивалента углерода выше нормативных значений.

Влияние эквивалента углерода на реакцию высокопрочных сталей на термический цикл сварки оценивалось путем имитации процессов дуговой сварки плавлением в околошовном участке зоны термического влияния, как наиболее опасном с позиции формирования закалочных структур и сопротивления хрупкому разрушению. В качестве оценочных показателей рассматривались особенности кинетики распада аустенита, формирование структурно-фазового состава, его морфологии и изменения механических характеристик (твердости и ударной вязкости). На термокинетические и структурные диаграммы, а также графики изменения твердости, ударной вязкости и доли вязкой составляющей в изломе были нанесены области скоростей охлаждения (20 - 50°С/с) соответствующие режимам сварочных процессов, применяемым при сварке и ремонте кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов.

На Рис. 1 и Рис. 2 приведены термокинетические и структурные диаграммы околошовного участка зоны термического влияния и фотографии микроструктур высокопрочных сталей с различным значением эквивалента углерода.

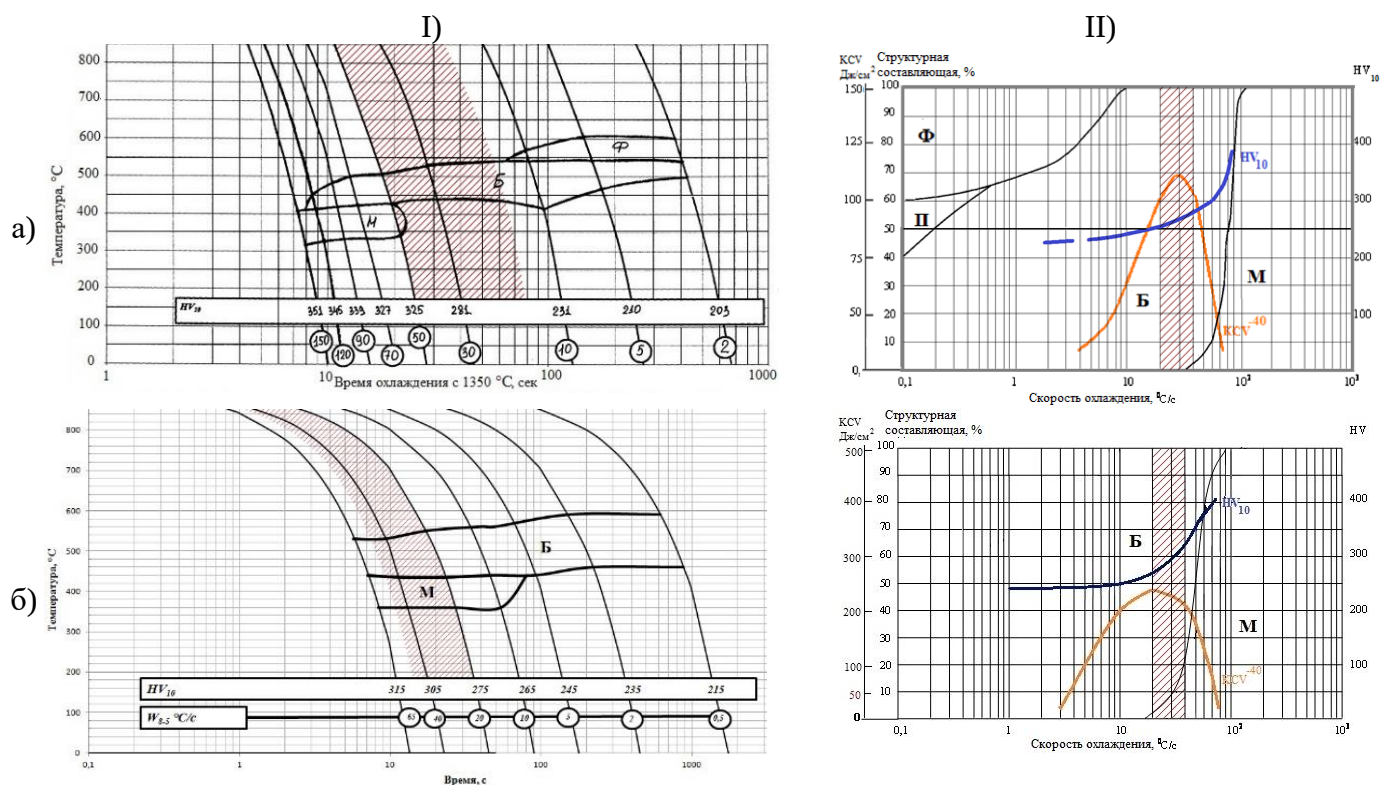


Рис. 1. Термокинетические (I) и структурные (II) диаграммы ОШУ ЗТВ исследованных высокопрочных сталей со значениями эквивалента углерода 0,43 % (а) и 0,54 % (б)

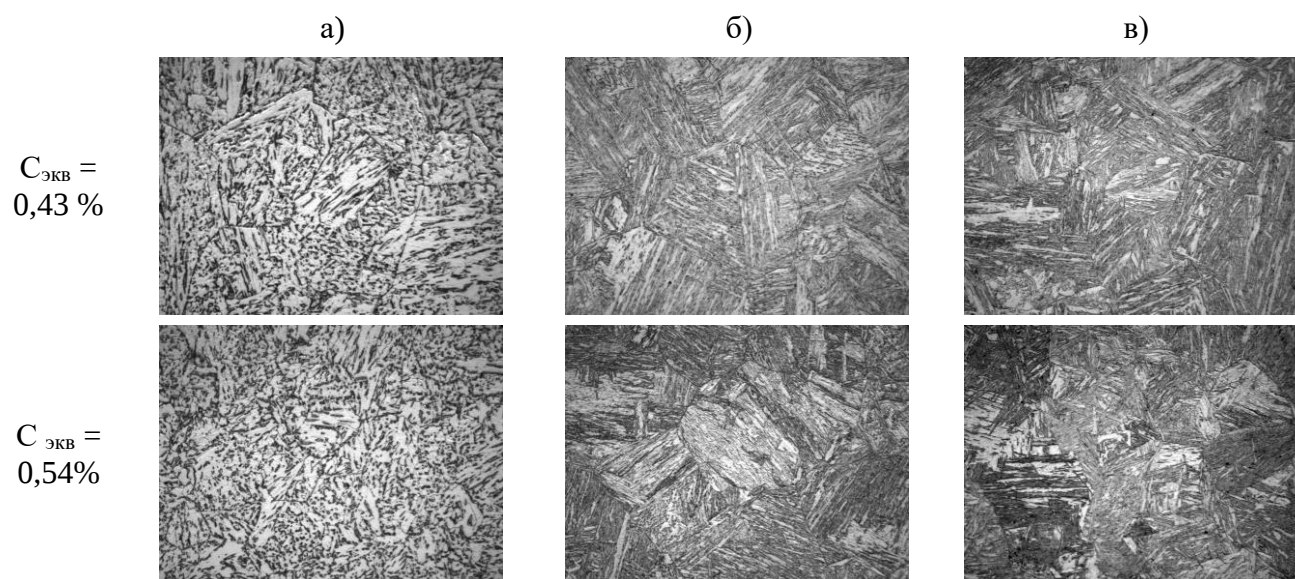


Рис. 2. Фотографии микроструктуры (x500) металла околошовного участка зоны термического влияния исследованных сталей при скоростях охлаждения 3°С/с (а), 40-50°С/с (б) и 70-80°С/с (в)

Анализ представленных данных (Рис. 1 и Рис. 2) показывает, что характерной особенностью малоуглеродистых высокопрочных сталей, в отличие от низколегированных традиционных трубных сталей, является формирование преимущественно бейнитной структуры во всем исследованном диапазоне скоростей охлаждения. При этом чем выше значение эквивалента углерода, тем меньше ферритной фазы в структуре ОШУ ЗТВ, при прочих равных условиях.

Формирование мартенситной фазы в ОШУ ЗТВ, например, в количестве около 50% наблюдается при скоростях охлаждения (w_{8-5}) 80°C/с и 50°C/с для сталей с эквивалентом углерода 0,43% (III плавка) и 0,54% (IV плавка) соответственно.

Для изучения особенностей строения мартенсита был выполнен рентгеноструктурный анализ сталей со значениями эквивалента углерода 0,35%, 0,44%, 0,54%, предварительно закаленных на мартенсит. Результаты анализа (табл. 2) показали, что во всех образцах α -Fe-фаза характеризуется отсутствием значительной тетрагональности кристаллической решетки. При этом с понижением содержания углерода снижается плотность дислокаций. Формирующийся мартенсит характеризуется повышенной пластичностью по сравнению с мартенситом традиционных сталей.

Таблица 2

Величина плотности дислокаций исследуемых сталей

Эквивалент углерода, %	Содержание углерода, %	Плотность дислокаций, 10^{11} см^{-2}
0,35	0,075	2,8
0,44	0,068	2,4
0,54	0,027	2,2

На Рис. 3 показано изменение твердости металла ОШУ ЗТВ исследованных сталей в зависимости от скорости охлаждения при сварке с выделением области нормативных значений твердости, соответствующие 325 HV₁₀ и 350 HV₁₀.

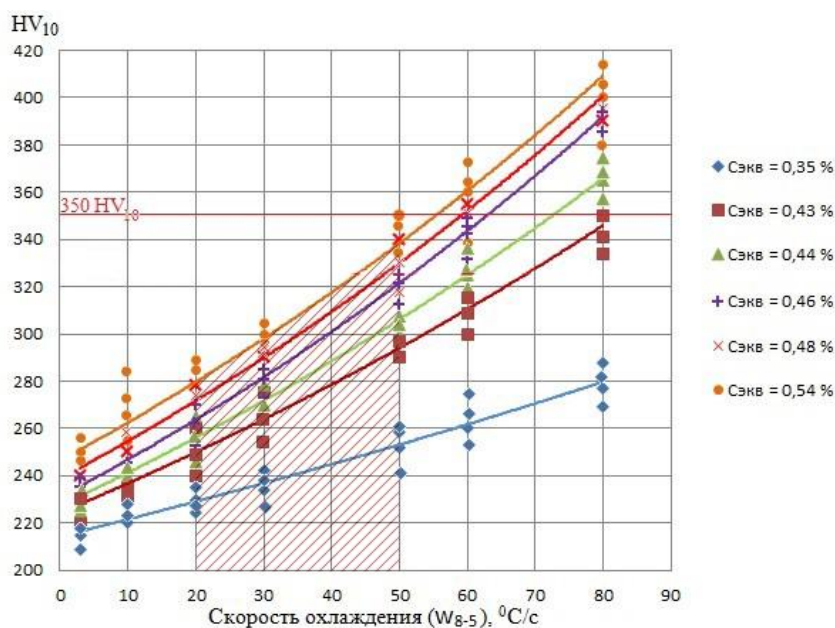


Рис. 3. Изменение твердости металла ОШУ ЗТВ высокопрочных сталей, характеризующихся различным значением эквивалента углерода в зависимости от скорости охлаждения

Анализ полученных данных показывает, что при сварке малоуглеродистых высокопрочных сталей значения твердости, не превышающие нормативные показатели, могут быть обеспечены при скоростях охлаждения от 40°C/с до 70°C/с (325 HV₁₀) и от 50°C/с до 80°C/с (350 HV₁₀) несмотря на то, что эквивалент углерода ряда сталей выше нормативных значений предусмотренных.

На основе полученных данных были построены зависимости изменения скоростей охлаждения, обеспечивающих нормативные значения твердостей (325 HV_{10} и 350 HV_{10}) металла ОШУ ЗТВ высокопрочных сталей в зависимости от эквивалента углерода (Рис. 4).

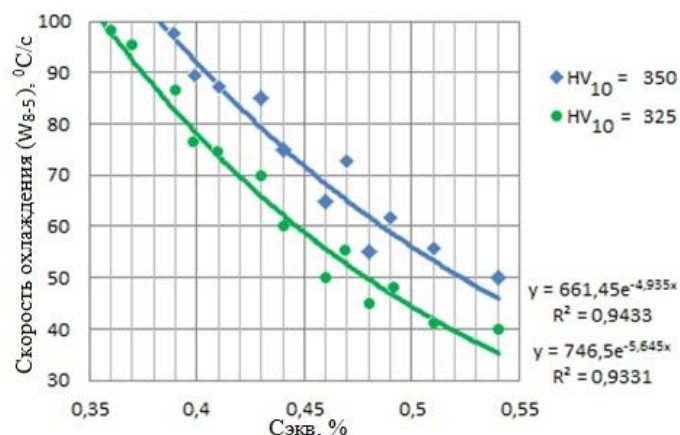


Рис. 4. Изменение скорости охлаждения w_{8-5} , обеспечивающей значения твердости 325 HV_{10} и 350 HV_{10} металла ОШУ ЗТВ высокопрочных сталей в зависимости от эквивалента углерода

Анализ кривых показывает, что чем выше значение эквивалента углерода, тем ниже w_{8-5} , обеспечивающие нормативные значения твердости при прочих равных условиях.

Характер изменения значений ударной вязкости (KCV^{-40}) околошовного участка ЗТВ при сварке малоуглеродистых высокопрочных трубных сталей с различными значениями эквивалента углерода показан на Рис. 5.

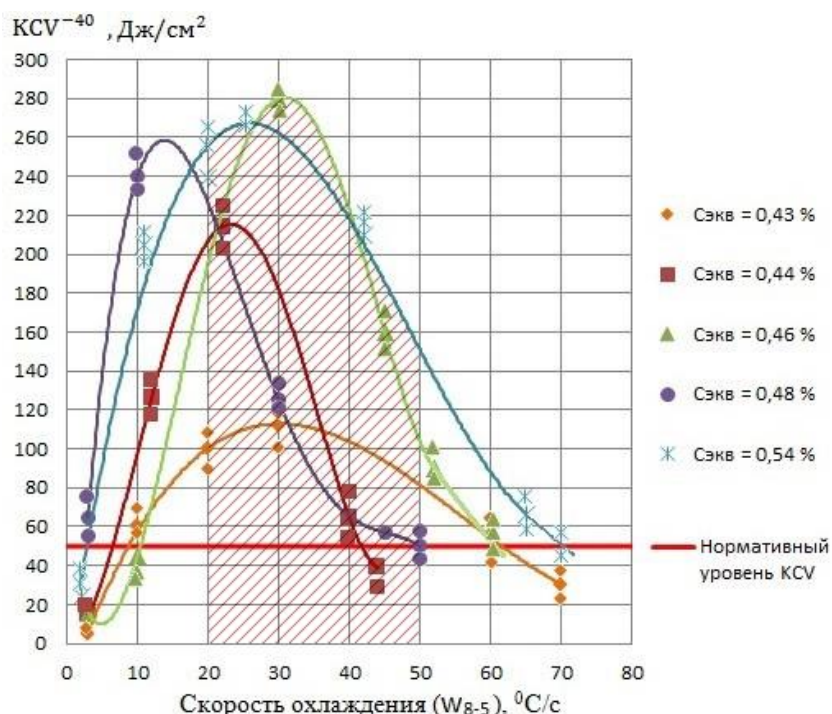


Рис. 5. Изменение ударной вязкости (KCV^{-40}) ОШУ ЗТВ высокопрочных сталей, характеризующихся различным значением $\text{С}_{\text{экв}}$ в зависимости от скорости охлаждения

Из графиков видно, что зависимости изменения показателей сопротивления хрупкому разрушению носят экстремальный характер и описываются полиномиальной функцией для всех

исследованных сталей. Значения ударной вязкости выше нормативных ($KCV^{40} \geq 50$ Дж/см²) обеспечиваются в диапазоне скоростей охлаждения гарантирующих с одной стороны отсутствие разупрочнения металла, с другой – повышение твердости до нормативного уровня.

Таким образом, выполненные исследования по оценке реакции на термический цикл сварки малоуглеродистых, микролегированных сильными карбидообразующими элементами высокопрочных сталей со значениями эквивалента углерода от 0,35% до 0,54% показали возможность обеспечения комплекса механических характеристик – твердости и сопротивления хрупкому разрушению на уровне нормативных значений в зоне термического влияния при способах сварки, используемых при строительстве магистральных газопроводов.

Выявлена необходимость ограничения максимально допустимой величиной скорости охлаждения, не превышающей 40°C/с сталей для труб класса прочности K65 и K70 с эквивалентом углерода превышающим критическое значение, принятое для сталей более низких классов прочности, позволяющая обеспечить формирование комплекса нормативных характеристик металла ОШУ ЗТВ при способах сварки, используемых при строительстве магистральных газопроводов.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния эквивалента углерода на склонность к образованию холодных трещин при сварке исследуемых сталей.

Испытания образцов на холодные трещины проводилось по ГОСТ 26388 на установке ЛТП 2-3. Сварка всех образцов проводилась с использованием одинаковых сварочных материалов и режимов сварочного процесса (скорость охлаждения около 18°C/с). Содержание диффузионного водорода, наплавленного на медную пластину металла, соответствовало 6,5 см³/100 гр.

При проведении испытаний серия образцов нагружалась различными по величине постоянно действующими усилиями в течение 24 часов. За исходную принималась нагрузка, при которой происходило разрушение сварного соединения образца в состоянии после сварки. Испытания продолжались до установления минимального разрушающего напряжения ($\sigma_{\min \text{ разр}}$). Данные об изменении минимальных разрушающих напряжений, при которых образовывались холодные трещины в исследованных образцах, представлены на Рис. 6.

Анализ полученных результатов показал, что сварные соединения из сталей с эквивалента углерода 0,35% разрушились по сварному шву. В ОШУ ЗТВ холодных трещин не обнаружено. Образцы остальных партий металла разрушились с образованием холодных трещин в ОШУ ЗТВ. При этом минимальные значения напряжений (около 83 МПа) характерны для взятой в качестве сравнения традиционной низколегированной стали 10ХСНД ($C_{\text{ЭКВ}}=0,46\%$, $C=0,085\%$).

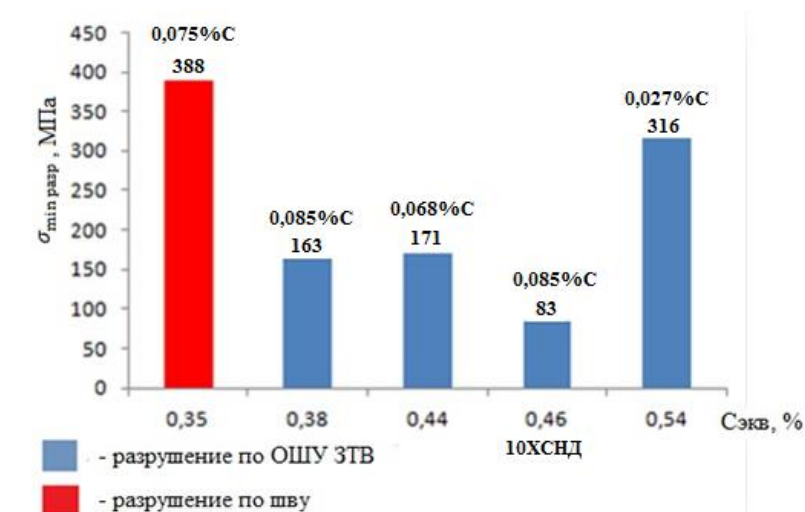


Рис. 6. Минимальные разрушающие напряжения образования холодных трещин в сварных образцах с различным значением эквивалента углерода и содержанием углерода

Значения соответствующих напряжений сварных соединений высокопрочных сталей значительно выше. Для исследованных плавок сталей напряжения изменяются примерно от 160 до 320 МПа. Это свидетельствует об отсутствии прямой зависимости склонности к холодным трещинам от значений эквивалента углерода. При прочих равных условиях это объясняется, очевидно, различным содержанием углерода в исследуемых высокопрочных сталях. При эквиваленте углерода равном 0,54% и содержании углерода 0,027%, значения напряжений, при которых возможно появление трещин, практически в 2 раза выше, чем для сталей с эквивалентом углерода 0,38% и 0,44%, но с более высоким содержанием углерода (0,068% и 0,085% соответственно).

Фрактографические исследования поверхностей изломов образцов не выявили существенной разницы в микромеханизмах их разрушения. Во всех случаях вязкая составляющая изломов представлена разновеликими ямками. Поверхности хрупких изломов образованы относительно плоскими фасетками транскристаллитного скола и фасетками квазискола.

Таким образом, выполненные с использованием «машинных» методов исследования показали, что при оценке склонности малоуглеродистых сталей для труб класса прочности К65 и К70 к образованию холодных трещин при сварке необходимо учитывать не только значение эквивалента углерода, но и содержание углерода в стали, определяющее пластичность формирующихся в ОШУ ЗТВ закалочных структур. При использовании эквивалента углерода в качестве показателя оценки свариваемости малоуглеродистых микролегированных сильными карбидообразующими элементами сталей и их склонности к образованию холодных трещин, его значения могут быть увеличены относительно нормативных (критических) значений эквивалента углерода, принятых для традиционных низколегированных сталей.

В пятой главе обоснованы значения коэффициентов эквивалентности углероду легирующих элементов, отражающих особенности системы легирования исследованных сталей на их твердость.

В общем виде формулу для определения углеродного эквивалента ($C_{э\kappa\text{в}}$, %) можно представить как зависимость

$$C_{э\kappa\text{в}} = \frac{C}{m_C} + \frac{Si}{m_{Si}} + \frac{Mn}{m_{Mn}} + \frac{Cr}{m_{Cr}} + \frac{Ni}{m_{Ni}} + \frac{Mo}{m_{Mo}} + \frac{V}{m_V} + \frac{Nb}{m_{Nb}} + \frac{Ti}{m_{Ti}} + \frac{Zr}{m_{Zr}}, \quad (1)$$

где C, Si, Mn, Cr, Ni, Mo, V, Nb, Ti, Zr содержание легирующих элементов, %;

$m_C, m_{Si}, m_{Mn}, m_{Cr}, m_{Ni}, m_{Mo}, m_V$ коэффициенты эквивалентности соответствующих легирующих элементов.

В работе была определена взаимосвязь между приростом твердости, вызванным увеличением содержанием углерода на 0,01%. Обобщение данных по значениям твердости нелегированных сталей показали, что увеличение концентрации углерода на каждые 0,01% (ΔC , %) приводит к приросту твердости (ΔHV , МПа) на 1,21 единиц HV (Рис. 7а).

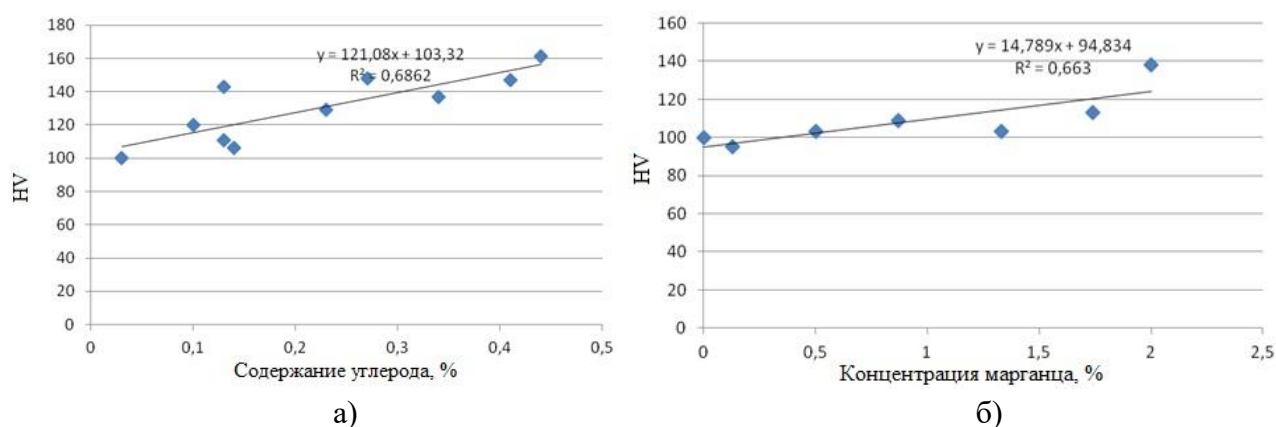


Рис. 7. Изменение твердости в зависимости от содержания в малоуглеродистых нелегированных сталях углерода (а) и в низкоуглеродистых низколегированных сталях марганца (б)

Для оценки вклада марганца в прирост твердости были обобщены данные по значениям твердости для малоуглеродистых низколегированных сталей (0,01-0,043% C, 0,01-0,03% Si) (Рис. 7б).

Согласно полученным данным прирост твердости рассмотренных сталей составил 1,48 единиц HV при увеличении марганца на каждые 0,1% Mn. Сопоставляя данные по приросту твердости от углерода и марганца было найдено значение коэффициента эквивалентности для марганца в диапазоне от 8 до 9 единиц.

Влияние карбидообразующих элементов на уровень механических свойств сварного соединения было определено на основе данных по твердости выделяющихся карбидных фаз и их количества. Процентное содержание выделяющейся карбидной фазы (K_{MeC} , %) рассчитывалось по формуле

$$K_{MeC} = (Zr + Ti + Nb + V) + \frac{Zr \cdot k_{Zr} + Ti \cdot k_{Ti} + Nb \cdot k_{Nb} + V \cdot k_V}{k_{\min} \cdot k_c}, \quad (2)$$

где Zr, Ti, Nb, V – содержание легирующих элементов, %;

k_{Zr} , k_{Ti} , k_{Nb} , k_V , k_C – коэффициенты перевода весового содержания легирующего элемента в сплав на железной основе в атомарные проценты;

k_{min} – коэффициент карбидообразования.

Учитывая значения микротвердости карбидных фаз, их вклад в прирост твердости ($\Delta H\mu$, МПа) стали определяется следующим образом

$$\Delta H\mu = H\mu_{cp} \cdot \frac{K_{MeC}}{100}, \quad (3)$$

где $H\mu_{cp}$ – среднее значение твердости карбидной фазы на основе Zr, Ti, Nb, V.

Используя полученный прирост прочностных свойств за счет выделения карбидных фаз нашли эквивалентную суммарную концентрацию карбидообразующих элементов ($C_{э\kappa\text{в}}^{Zr,Ti,Nb,V}$, %)

$$C_{э\kappa\text{в}}^{Zr,Ti,Nb,V} = \frac{\Delta H\mu}{\Delta HV \cdot 10} \cdot \Delta C_{э\kappa\text{в}}, \quad (4)$$

По эквивалентной концентрации карбидообразующих элементов и их фактическому содержанию в 45 марках проанализированных сталей определено значение коэффициента эквивалентности $m_{Zr, Ti, Nb, V}$

$$m_{Zr,Ti,Nb,V} = \frac{Zr + Ti + Nb + V}{C_{э\kappa\text{в}}^{Zr,Ti,Nb,V}}, \quad (5)$$

которое составило 4 единицы.

Таким образом, для расчета эквивалента углерода сталей для труб категории прочности K65 и K70 предложено использовать следующую зависимость

$$C_{э\kappa\text{в}}(H) = C + \frac{Mn}{8} + \frac{Cr + Mo}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Zr + Ti + Nb + V}{4}, \quad (6)$$

Выполненные в работе исследования позволили разработать методику определения критического значения эквивалента углерода $C_{э\kappa\text{в}}(H)$, предусматривающую:

1. Расчет фактического значения эквивалента углерода для рассматриваемой стали по предложенной зависимости.
2. Определение погонной энергии (q , кДж/мм) применяемого процесса сварки по выражению

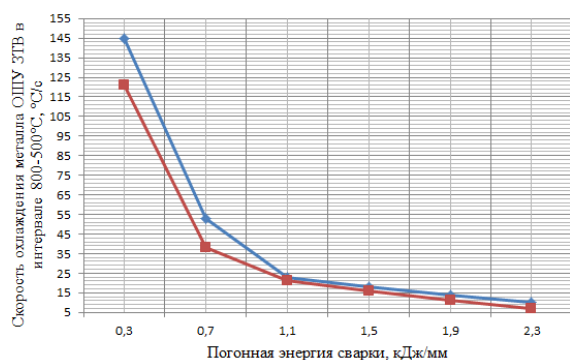
$$q = \frac{I \cdot U}{v}, \quad (7)$$

где I – сила тока, кА;

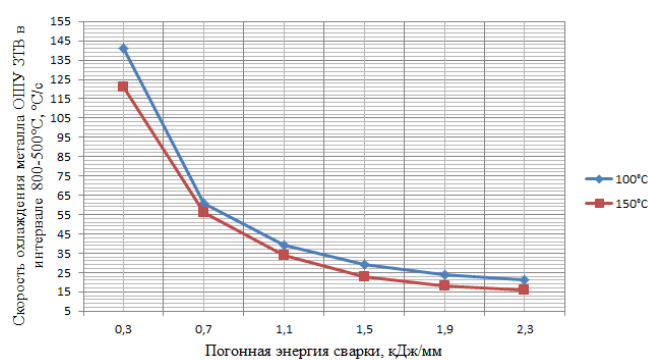
U – напряжение дуги,

v – скорость сварки, мм/с.

3. Определение по погонной энергии, соответствующей процессу сварки, скорости охлаждения металла ОШУ ЗТВ сварного соединения труб с различной толщиной стенки (графики приведены в работе). Для толщин стенок от 10 мм до 16 мм и от 23 мм до 32 мм графики для перевода значений представлены на Рис. 8.



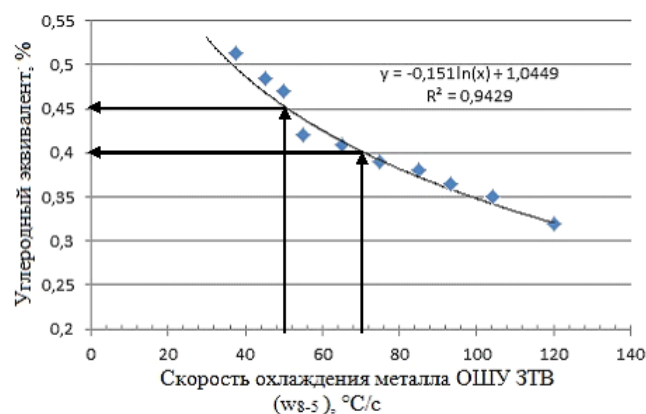
а)



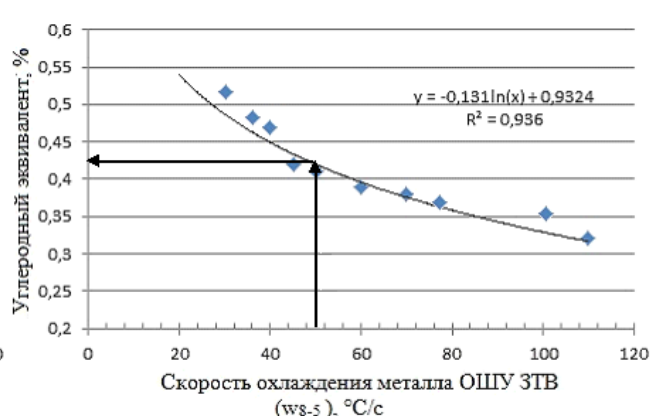
б)

Рис. 8. Графики изменения скорости охлаждения (w_{8-5}) металла ОШУ ЗТВ в зависимости от погонной энергии сварки и температуры подогрева для толщин стенок от 10мм до 16 мм (а) и от 23 мм до 32 мм

4. Определение критического значения эквивалента углерода с использованием полученного значения скорости охлаждения металла ОШУ ЗТВ по графику для определения допустимого нормативного значения твердости (Рис. 9).



а)



б)

Рис. 9. Зависимости критической скорости охлаждения w_{8-5} и предельно допустимого значения углеродного эквивалента высокопрочных сталей, обеспечивающих получение максимальных регламентированных значений твердости: а) 350 HV_{10} и б) 325 HV_{10} металла ОШУ ЗТВ

5. Сравнение критического (по требуемой твердости в ОШУ ЗТВ) и фактического (по химическому составу) значений эквивалентов углерода.

6. Принятие решения о возможности применения выбранной технологии и режимов сварки для рассматриваемых сталей или необходимости их корректировки в целях снижения скорости охлаждения металла ОШУ ЗТВ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ долевого участия легирующих элементов в формировании значения эквивалента углерода показывает, что в сталях для труб классов прочности К65 и К70 по мере прироста значения эквивалента углерода наблюдается тенденция по снижению долевого участия углерода в формировании значения эквивалента углерода по сравнению с другими легирующими элементами.

2. При легировании сталей сильными карбидообразующими элементами необходимо учитывать тот факт, что на процесс образования закалочных структур при сварке влияет содержание углерода, оставшегося в аустените после образования специальных карбидных фаз.

3. В малоуглеродистых микролегированных сильными карбидообразующими элементами сталях с содержанием углерода менее 0,05% количество углерода в аустените по отношению к его содержанию в химическом составе стали может снижаться до 2 раз. В этом случае образование закалочных структур при распаде аустенита в процессе сварки вызовет уменьшение степени тетрагональности решетки мартенсита, снижение уровня микронапряжений и склонности к образованию холодных трещин.

4. Выполненные исследования по оценке реакции на термический цикл сварки малоуглеродистых, микролегированных сильными карбидообразующими элементами высокопрочных сталей с эквивалентом углерода $C_{\text{экв}}$ (МИС) от 0,35% до 0,54% показали возможность обеспечения комплекса механических характеристик – твердости и ударной вязкости на уровне нормативных значений в зоне термического влияния при способах сварки, используемых при строительстве магистральных газопроводов.

5. На основе экспериментальной оценки реакции малоуглеродистых микролегированных сильными карбидообразующими элементами сталей для труб класса прочности К65 и К70 на термический цикл сварки и их склонности к образованию холодных трещин при сварке показана возможность увеличения эквивалента углерода относительно нормативных значений, принятых для традиционных низколегированных сталей.

6. Показано, что в зависимостях для определения эквивалента углерода сталей для оценки твердости ОШУ ЗТВ труб классов прочности К65 и К70 необходимо использовать значения коэффициента эквивалентности для марганца равное 8, а для ниобия, титана и ванадия равное 4.

7. Показано, что определение критического значения эквивалента углерода $C_{\text{экв}}$ (МИС) при оценке склонности сталей для труб классов прочности К65 и К70 к образованию холодных трещин необходимо проводить на основе взаимосвязи значений эквивалента углерода, содержания углерода в стали с параметрами термического цикла сварки (например, скоростями охлаждения w_{8-5}), обеспеченными режимами принятых процессов сварки, при которых достигается предельное значение выбранных показателей (фазового состава структуры, твердости).

8. Результаты выполненной работы явились основанием для создания методики определения критического эквивалента углерода сталей для труб классов прочности К65 и К70 на основе анализа их склонности к образованию холодных трещин при сварке, которая нашла отражение в Р Газпром 2-2.3-992-2015.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Обеспечение прочностных характеристик металла соединительных деталей трубопроводов из стали категории прочности К60 / Ефименко Л.А. [и др.] // Ежемесячный научный журнал. 2014. № 9. С. 17-18.

2. Особенности процессов распада аустенита высокопрочных сталей при многопроходной сварке / Ефименко Л.А. [и др.] // Территория Нефтегаз. 2015. № 10. С. 104-109.

3. Вышемирский, Д.Е. Оценка взаимосвязи эквивалента углерода с реакцией высокопрочных сталей на термический цикл сварки / Л.А. Ефименко, А.А. Рамусь, Д.Е. Вышемирский // Газотранспортные системы: настоящее и будущее: тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции GTS-2015 (28-29 октября 2015 г.) М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2015. 174 с.

4. Оценка взаимосвязи эквивалента углерода с реакцией высокопрочных сталей на термический цикл сварки / Вышемирский Д.Е. [и др.] // Наука и техника в газовой промышленности. 2016. № 1. С. 55-63.

5. Исследование влияния углеродного эквивалента на склонность высокопрочных сталей к образованию холодных трещин при сварке / Ефименко Л.А. [и др.] // Сварка и диагностика. 2016. № 1. С. 27-30.

6. Вышемирский, Д.Е. Уточнение зависимости оценки эквивалента углерода сталей для труб классов прочности К65 и К70 / Л.А. Ефименко, Д.Е. Вышемирский // Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО «Газпром»: тезисы докладов VIII Отраслевого совещания 14-15 ноября 2016 г. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2016. 76 с.