М. В. Ефимов, Н. А. Кидалов, Н. И. Габельченко, Д. О. Алиев, Л. С. Семенова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ
СВАРКИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАРОК СТАЛЕЙ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mitlp@vstu.ru

Работа посвящена исследованию режимов сварки и термообработки разнородных сталей: низколегированных марганцевокремнистых и теплоустойчивых хромомолибденовых с целью обеспечения прочности сварного соединения в соответствии с требованиями действующих НТД. Для достижения поставленной цели были разработаны специальные процессы сварки, заключающиеся в изменении геометрии подготовки кромок сварных соединений и ужесточении допуска на температурные пределы термообработки. Представленные мероприятия позволяют обеспечить механические и эксплуатационные свойства сварных соединений на требуемом уровне.

Ключевые слова: сварка, термообработка, сталь, режим, механические свойства.

M. V. Efimov, N. A. Kidalov, N. I. Gabelchenko, D. O. Aliev, L. S. Semenova

**INVESTIGATION OF THE MUTUAL INFLUENCE
OF WELDING TECHNOLOGY AND HEAT TREATMENT
OF WELDED JOINTS MADE OF DISSIMILAR GRADES OF STEEL**

Volgograd State Technical University

The work is devoted to the study of welding and heat treatment modes of dissimilar steels: low-alloyed manganese-silicon and heat-resistant chromium-molybdenum to ensure the strength of the welded joint in accordance with the requirements of the current NTD. To achieve this goal, special welding processes were developed, which consist in changing the geometry of the preparation of the edges of the welded joints and tightening the tolerance for the temperature limits of heat treatment. The presented measures make it possible to ensure the mechanical and operational properties of welded joints at the required level.

Keywords: welding, heat treatment, steel, mode, mechanical properties.

В отрасли нефте-, газохимического машиностроения сварка разнородных сталей является одной из наиболее часто возникающих задач. Как правило, к корпусам аппаратов, изготовленных из дорогостоящих теплоустойчивых сталей, имеется необходимость приварки вспомогательных конструкций: опор, кронштейнов для крепления площадок обслуживания и трубопроводов и т. д. Изготовление перечисленных вспомогательных узлов и конструкций из теплоустойчивых сталей является нерациональным по ряду причин: во-первых, применение дорогостоящих материалов для вспомогательных конструкций экономически нецелесообразно, значительно повышается стоимость изготовления оборудования; во-вторых, особенность сварки теплоустойчивых сталей, обусловленная необходимостью снятия остаточных напряжений путем обязательной термической обработки для предотвращения образования трещин, приводит к необходимости ее выполнения на монтажной площадке после приварки к данным конструкциям изделий, для которых они предназначены (например, площадок обслуживания к кронштейнам). Таким образом, изготовление вспомогательных узлов и деталей в нефте-, газохимическом машиностроении происходит, как правило, из низколегированных или углеродистых конструкционных сталей.

Однако на основании п. 5.11.3 ГОСТ 34347-2017 сосуды и аппараты из теплоустойчивых сталей необходимо подвергать термической обработке после выполнения всех сварочных операций [1]. При этом термообработка должна проходить по режиму для теплоустойчивой части готового аппарата. В таких случаях сварное соединение и ОШЗ из разнородных сталей испытывают в процессе термообработки чрезмерную тепловую нагрузку, так как температура отпуска хромомолибденовой стали на 30–40 °С выше, чем для низколегированной марганцево-кремнистой стали. Данное обстоятельство может привести к снижению механических свойств сварного соединения и околошовной зоны ниже нормативных значений.

Учитывая описанные выше особенности сварки разнородных сталей в нефте-, газохимическом машиностроении подобные соединения преимущественно не используются, либо используются для ненагруженных конструкций, либо для узлов с незначительными значениями напряжений. В случае, когда конструктивные

или эксплуатационные особенности не позволяют избежать сварного соединения разнородных сталей (одной из которых является теплоустойчивая сталь), используют сварочные материалы, обеспечивающие получение аустенитных швов. Пластичный аустенитный шов позволяет снизить внутренние напряжения в зоне сварки и тем самым предотвратить образование холодных трещин.

Однако современные тенденции ресурсосбережения диктуют жесткие условия для разработки конструкции оптимальной как с точки зрения надежности, так и с точки зрения экономической эффективности. Данное обстоятельство, в свою очередь, приводит к необходимости все более частого и широкого применения разнородных сварных соединений.

Таким образом, целью исследовательской работы являлся анализ взаимного влияния сварочной технологии и режимов термической обработки и подтверждение возможности использования подобранных режимов для комбинированных сварных соединений с гарантией сохранения механических свойств.

Исследования проводились на сварных соединениях из наиболее распространенных сочетаний разнородных марок сталей (09Г2С+12ХМ, 09Г2С+15Х5М, 12ХМ+15Х5М), заваренных ручной дуговой и автоматической сваркой под флюсом с последующей термообработкой по режиму высокого отпуска для теплоустойчивой стали.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: подобраны специальные технологии сварки и термической обработки для изготовления образцов, на основе анализов результатов исследования дана оценка работоспособности по каждому из сварных образцов и дано обоснованное заключение о возможности применения технологий сварки и термообработки исследуемых сварных соединений.

Было изготовлено по четыре пластины из сталей 09Г2С-8 ГОСТ 5520-2017 производства ПАО «Северсталь», 12ХМ-3 ГОСТ 5520-2017 производства ПАО «Северсталь», 15Х5М ГОСТ 7350-77 производства ООО «Корпорация "Красный Октябрь"» размерами 350x150, толщиной 30 и 32 мм. Механическим способом была произведена разделка кромок на всех пластинах по длине 350 мм. Вид разделки кромок показан на рисунке ниже. Механические свойства исходных пластин представлены в табл. 1.

Вид разделки кромок

Произведена сборка образцов под ручную дуговую сварку и автоматическую сварку для каждого сочетания материалов: 09Г2С+12ХМ, 09Г2С+15Х5М, 12ХМ+15Х5М.

Сварка образцов велась с предварительным подогревом и выдержкой межваликовой температуры в диапазоне 200–250 °С.

Выбор сварочных материалов произведен согласно требованию таблиц 8.1 и 8.2 СТО 00220368-011-2007 (см. табл. 2) [2].

Таблица 1

Механические свойства пластин

Материал	Предел прочности σ_b , МПа	Ударная вязкость, кгс·м/см ² при +20°С	Твердость, НВ
09Г2С ГОСТ 5520-2017	510÷520	27,2; 28,9; 27,7	147÷158
12ХМ ГОСТ 5520-2017	490÷500	25,4; 27,7; 26,5	144÷160
15Х5М ГОСТ 7350-77	530÷545	Исследования не проводились	165÷179

Таблица 2

Сварочные материалы для сварки разнородных сталей

Сочетание разнородных сталей	Сварочные материалы	
	для РДС	для Аф сварки
09Г2С+12ХМ	УОНИ 13/55 Ø 4 мм	Св-08ГА Ø 4 мм + АН-348А
09Г2С+15Х5М		
12ХМ+15Х5М	ТМЛ-1у Ø 4 мм	Св-04Х2МА Ø 4 мм + АН-348А

Режим ручной дуговой сварки для всех образцов составлял: $I_{св} = 150–170$ А; режим автоматической сварки под флюсом: $I_{св} = 450$ А; $U_d = 28–30$ В; $V_{св} = 20–24$ м/ч.

Все заваренные образцы были подвергнуты термоотдыху при температуре 300–350 °С с выдержкой 2,5–3 часа с замедленным охлаждением.

Ультразвуковая дефектоскопия сварных образцов [3], согласно требованиям СТО 00220256-005-2005, не выявила недопустимых дефектов.

После чего была проведена термообработка сварных образцов по режиму высокого отпуска более легированной стали (см. табл. 3). Основные параметры и режимы проведения послесварочной термообработки приняты в соответствии с требованиями СТО 00220368-017-2010 раздел 13 с дополнительными наложенными ограничениями в части температурного диапазона, находящимися в пределах температурных допусков согласно НТД [4].

Таблица 3

Режим термообработки образцов из разнородных сталей

Сочетание разнородных сталей	Режим термообработки		
	температура выдержки, °С	время выдержки	охлаждение
09Г2С+12ХМ	680÷700	Выдержка 2,5 мин на 1 мм толщины	В печи до температуры 300 ±С, далее на воздухе
09Г2С+15Х5М	740÷760		
12ХМ+15Х5М	740÷760		

После термообработки образцы были подвергнуты УЗК, согласно п. 12 СТО 00220368-011-2007. Ультразвуковая дефектоскопия свар-

ного образца, согласно требованиям СТО 00220256-005-2005, не выявила недопустимых дефектов.

Механические испытания сварных образцов после выполнения послесварочной обработки проводились по ГОСТ 6996-66. Результаты механических испытаний сведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты механических испытаний образцов из разнородных сталей

Марки стали	Вид сварки	Сварного соединения			Примечание
		ударная вязкость, кгс·м/см ² при +20 °С, тип VI	угол загиба при α оправки 60 мм, °	предел прочности, σ_b , МПа	
09Г2С+12ХМ	Р	30,0; 28,0; 30,0	120°, 120°	466; 461	Соотв. ГОСТ 34347-2017
09Г2С+12ХМ	Аф	16,9; 16,0; 15,6	120°, 120°	480; 475	
09Г2С+15Х5М	Р	17,0; 17,9; 16,6	120°, 120°	460; 460	
09Г2С+15Х5М	Аф	26,9; 27,5; 27,4	120°, 120°	470; 475	
12ХМ+15Х5М	Р	27,5; 28,8; 30,0	120°, 120°	451; 446	
12ХМ+15Х5М	Аф	7,8; 7,6; 7,6	120°, 120°	470; 475	

Результаты металлографических испытаний после выполнения послесварочной обработки сведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты металлографических испытаний сварных соединений из разнородных сталей

Марки стали	Вид сварки	Вид исследования						Примечание
		замер твердости, НВ					микроанализ	
		ОМ	ЗТВ	Св. шов	ЗТВ	ОМ		
09Г2С+12ХМ	Р	128÷132	140÷147	134÷174	149÷159	133÷140	Деф. нет	Соотв. ГОСТ 34347-2017
09Г2С+12ХМ	Аф	126÷131	137÷156	131÷163	147÷187	134÷140	Деф. нет	
09Г2С+15Х5М	Р	118÷119	114÷152	116÷149	143÷163	134÷143	Деф. нет	
09Г2С+15Х5М	Аф	119÷120	118÷122	128÷156	140÷170	146÷152	Деф. нет	
12ХМ+15Х5М	Р	126÷128	143÷159	152÷179	140-185	128÷133	Деф. нет	
12ХМ+15Х5М	Аф	121÷128	163÷174	163÷179	163÷197	143÷147	Деф. нет	

Критерии оценки механических и металлографических свойств на основании требований ГОСТ 34347-2017 приведены в табл. 6. За отбраковочные признаки, исходя из эксплуатационных особенностей и требований безопасности, на основании требований таблицы 14 ГОСТ 34347-2017, были приняты [1]:

1. Предел прочности по менее легированному элементу, так как при расчете на прочность учитывается механика наиболее «слабого» элемента.

2. Твердость по более легированному элементу, так как теплоустойчивые стали склонны к образованию горячих трещин.

3. Ударная вязкость согласно требований таблицы 14 ГОСТ 34347-2017 имеет равные значения для данных классов сталей.

4. Минимальный угол изгиба по менее легированному элементу с целью подтверждения отсутствия холодных трещин.

Результаты проведенных исследований сварных образцов из разнородных сталей марок в сочетании 09Г2С+12ХМ, 09Г2С+15Х5М, 12ХМ+15Х5М, заваренных ручной дуговой сваркой и автоматической сваркой под флюсом свидетельствуют о соответствии механических свойств сварного соединения требованиям ГОСТ 34347-2017.

Подобранная специальная технология сварки с измененным углом раскрытия кромок: увеличенным до $27\pm 3^\circ$, вместо стандартных $25\pm 2^\circ$ согласно ГОСТ 5264-80 для ручной дуговой сварки по типу С17 и уменьшенным до $27\pm 3^\circ$, вместо стандартных $30\pm 3^\circ$ согласно ГОСТ 8713-79 для автоматической сварки по типу С18, С21. При автоматической сварке, при которой имеют место максимальные тепловложения в металл шва и околошовную зону, уменьшенный угол раскрытия позволил снизить тепловложения, что положительно сказа-

лось на получении оптимальных значений твердости. При ручной дуговой сварке, при которой удельное значение тепловложений в металл шва и околошовную зону значительно ниже, чем при автоматической, увеличение угла раскрытия кромок позволило увеличить поверхность, доступную для оптимального проплавления, что

также снизило удельные тепловложения при обеспечении надлежащего качества сварного соединения. Одновременно, данная технология позволила избежать образования трещин и дефектов в сварном шве, что подтвердилось результатами проведенной УЗД сварных швов до и после термической обработки образцов.

Таблица 6

Отбраковочные признаки сварных соединений

Марки стали	Твердость, НВ, не более	Ударная вязкость, кгс·м/см ² при +20 °С, тип VI, не менее	Угол загиба при α оправки 60 мм, °, не менее	Предел прочности σ_b , МПа
09Г2С+12ХМ	240	5,0	60°	460–630
09Г2С+15Х5М	240	5,0	60°	460–630
12ХМ+15Х5М	240	5,0	40°	430–550

Также специально подобранные режимы термической обработки, заключающиеся в ужесточении допуска на температурные пределы термообработки со стандартных ± 20 °С (согласно СТО 00220368-017-2010 табл. 13.1 температура отпуска для стали 12ХМ составляет 670–710 °С); до ± 10 °С позволили провести термообработку, обеспечивающую одновременно снятие остаточных послесварочных напряжений, что подтверждается полученными значениями твердости и удовлетворительными результатами УЗД, и сохранение требуемых механических свойств как на низколегированной, так и на теплоустойчивой стали. Для образцов, прошедших термическую обработку по режимам стали 15Х5М, температурные пределы термообработки были приняты по табл. 13.3 СТО 00220368-017-2010 и составляли также ± 10 °С.

Таким образом, экспериментальным путем была подтверждена возможность использования специальных режимов термической обработки, принятой по теплоустойчивой стали и сварочной технологии для комбинированных

сварных соединений без снижения механических свойств сварного соединения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 34347-2017. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия : межгосударственный стандарт : дата введения 2018–08–01. – Текст : электронный // NormaCS : справочная нормативная система. – Текст : электронный.
2. СТО 00220368-011-2007. Сварка разнородных соединений сосудов, аппаратов и трубопроводов из углеродистых, низколегированных, теплоустойчивых, высоколегированных сталей и сплавов на железоникелевой и никелевой основах : стандарт организации : дата введения 2008–01–29. – Текст : электронный // NormaCS : справочная нормативная система. – Текст : электронный.
3. СТО 00220256-005-2005. Швы стыковых, угловых и тавровых сварных соединений сосудов и аппаратов, работающих под давлением. Методика ультразвукового контроля : стандарт организации : дата введения 2006–04–11. – Текст : электронный // NormaCS : справочная нормативная система. – Текст : электронный.
4. СТО 00220368-017-2010. Сварка сосудов, аппаратов и трубопроводов из теплоустойчивых сталей : стандарт организации : дата введения 2011–02–07. – Текст : электронный // NormaCS : справочная нормативная система. – Текст : электронный.