

ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ПРОКАТА СТАЛИ 10ХСНДА И 15ХСНДА

Е.А. Ледников¹, Д.П. Чепрасов¹, Д.А. Конник²

¹ Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул

² Сибирское управление Ростехнадзора, г. Барнаул

В статье показано, что стыковые сварные соединения из высококачественного проката стали 10ХСНДА и 15ХСНДА, микролегированной сильными карбидообразующими элементами толщиной 12-14 мм, полученные односторонней однопроходной автоматической сваркой под флюсом сплошной проволокой с гранулированной металлопорошковой (ПМП) присадкой на формирующих подкладках, склонны к низкотемпературному охрупчиванию по зоне сплавления.

Установлены причины охрупчивания. Предложена технология выполнения монтажных швов на пониженных погонных энергиях с последующим наложением отжигающего валика.

Ключевые слова: мостовые конструкции, монтажная сварка, автоматическая сварка под флюсом, охрупчивание, зона сплавления, металлопорошковая присадка.

COLD RESISTANCE OF WELDED JOINTS OF STEEL BRIDGE STRUCTURES OF HIGH QUALITY ROLLED STEEL 10HSNDA AND 15HSNDA

E.A. Lednikov¹, D.P. Cheprasov¹, D.A. Konnik²

¹ The Altai state technical university of I.I. Polzunov, Barnaul

² Siberian Department of Rostekhnadzor, Barnaul

The article shows that the butt-welded joints of high quality rolled steel 10HSNDA and 15HSNDA, strong carbide micro-alloyed elements with a thickness of 12-14 mm obtained unilateral single-pass automatic submerged arc welding solid wire with granulated metal-particle (PMP) doped to form linings, prone to low temperature embrittlement at the zone of fusion.

The causes of embrittlement. The proposed technology to perform welds on low linear energy followed by the imposition of annealing roller.

Keywords: bridge structures, Assembly welding, automatic submerged arc welding, embrittlement, alloying, metal-particle additive.

Введение

В связи с развитием туристической зоны «Бирюзовая Катунь» в Алтайском регионе интенсивно ведется строительство через горные реки стальных мостовых переходов с применением сварки в монтажных условиях, как в летний, так и в зимний периоды.

Традиционно, для изготовления металлических конструкций пролетных строений стальных мостов северного исполнения в качестве основного материала применялись стали марок 10ХСНД и 15ХСНД, выпускаемые по ГОСТ 6713-92.

В целях улучшения физико – механических свойств листового проката для мостостроения на основе сталей 10ХСНД и 15ХСНД были разработаны и освоены выпуск новых ма-

рок сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА. Главным отличием данных сталей от сталей 10ХСНД и 15ХСНД является наличие в их составе сильных карбидообразующих элементов и несколько пониженное содержание углерода, марганца, хрома, никеля и вредных примесей.

Первые опыты применения этих сталей при строительстве мостового перехода через реку Обь в районе г. Барнаула показали, что многослойная многопроходная ручная дуговая сварка покрытыми электродами группы «Б» с последующим наложением облицовочного отжигающего валика, выполняемая как в летний, так и в зимний периоды при температуре окружающей среды от +30°С до -20°С, обеспечивала удовлетворительную хладостойкость как по наплавленному металлу, так и по околошовной зоне (ОШЗ).

Однако, при автоматической односторонней однопроходной сварке под флюсом сплошной проволокой с гранулированной металлохимической присадкой (МХП) на формирующих подкладках, стыковые сварные соединения толщиной до 12 мм оказались склонны к низкотемпературному охрупчиванию, особенно по зоне сплавления.

В работах [1,2], выполненных совместно с Научно – исследовательским институтом транспортного строительства НИЦ «Мосты», были обстоятельно рассмотрены основные причины низкотемпературного охрупчивания и на основе этих выводов была проведена корректировка химического состава данных сталей в сторону уменьшения углеродного эквивалента [3]. Между тем, практика выполнения монтажных швов однопроходной автоматической сваркой под флюсом ортотропных плит толщиной 12-14 мм показала, что охрупчивание по зоне сплавления сохранялось. Ударная вязкость сварных соединений при -60°С не соответствовала требованиям нормативных документов.

Учитывая производственную необходимость, представлялось целесообразным установить причины охрупчивания и на этой основе наметить пути по их устранению.

Цель работы – изыскание оптимальной технологии автоматической сварки под флюсом сплошной проволокой с гранулированной МХП или ПМП присадками на формирующих подкладках, обеспечивающей требуемую по нормативным документам ударную вязкость по зоне сплавления КСУ при -60°С не ниже 29 Дж/см².

Материал и методика проведения исследований

Согласно [4] и проектно – технической документации для строительства мостов Северного исполнения применяется прокат 1-го или 2-го классов с содержанием серы и фосфора 0,015-0,020% и 2-й категории после нормализации. Химический состав и механические свойства проката из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА представлены в табл.1,2.

Исследования выполнялись непосредственно на штатных мостовых конструкциях Северного исполнения в монтажных условиях с использованием выводных планок. Отработку технологий сварки осуществляли на контрольных технологических пробах. Применялась автоматическая сварка под флюсом стыковых соединений толщиной 12-14 мм, сварку вели на постоянном токе обратной полярно-

сти. В качестве сварочных материалов применялась сварочная проволока Св-10НМА, стальная крупка из данной стали, сварочный флюс АН-47. В зависимости от времени года температура воздуха при проведении сварочных работ колебалась от +30°С до -20°С. Перед сваркой сварочные материалы прокаливались, а кромки основного материала после зачистки просушивались нагревом до 100-120°С.

Комплексное исследование механических свойств выполняли с применением выводных планок или контрольных технологических проб. Испытания на ударный изгиб различных зон сварного соединения проводили на стандартных образцах типа VI ГОСТ 6996-66 при комнатной температуре и при температуре -60°С. Усиление шва снимали до уровня основного металла фрезерованием. Разметку для нанесения надреза производили по макрошлифам, изготовленным на боковых гранях заготовок.

Для оценки влияния количества проходов на распределение ударной вязкости по слоям шва сваривали образцы толщиной 26 мм. Затем заготовки обрабатывали фрезерованием со стороны наплавленного металла, со стороны корня шва или равномерно с двух сторон до толщины 10 мм.

В целях оценки строения различных участков ОШЗ изучали общую и тонкую структуру с применением световой и электронной микроскопии, рентгеноструктурного и микрохимического анализов.

Результаты исследований и их обсуждение

В табл. 3 приведены механические свойства сварных соединений толщиной 12-14 мм из сталей 10ХСНДА, 15ХСНДА, полученных односторонней однопроходной автоматической сваркой под флюсом сплошной проволокой с МХП или ПМП присадками на формирующих подкладках. Как видно, по временному сопротивлению разрыву и пределу текучести сварные соединения не уступают основному металлу. Относительное удлинение, определенное на пятикратных образцах, хотя и несколько ниже, чем у основного металла, однако оно находится на уровне требований (не ниже 16%) нормативно – технической документации и технологического регламента по сварке монтажных швов металлоконструкций пролетного строения мостов в Северном исполнении [4]. Максимальное значение твердости металла шва и околшовной зоны не превышало 350 единиц по Виккерсу (HV). Угол

статического изгиба сварного стыкового соединения с поперечным швом при испытаниях корнем шва вниз и корнем шва вверх был не ниже 120°, что соответствовало требованиям технологического регламента и СТО – ГК [4].

Что касается ударной вязкости, то её значение по зоне сплавления при температуре испытания -60 °С оказалось ниже требований нормативных документов, т.е. ниже 29 Дж/см² [4].

Таблица 1 - Химический состав сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА

Марка стали	Массовая доля элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Nb
10ХСНДА	Не более 0,12	0,80-1,10	0,65-0,95	0,30-0,60	0,20-0,60	0,40-0,60	0,03-0,06
15ХСНДА	0,10-0,15	0,40-0,70	0,60-0,90	0,30-0,60	0,20-0,50	0,20-0,40	0,03-0,06

Примечание: массовая доля серы и фосфора не более 0,010-0,015%, азота до 0,012%. Допускается замена ниобия ванадием в количестве 0,08-0,12%.

Таблица 2 - Механические свойства проката из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА

Марка стали	Механические свойства				
	Предел текучести, σ_t , Н/мм²	Временное сопротивление, σ_B , Н/мм²	Относительное удлинение δ_5 , % не менее	Ударная вязкость КСУ, Дж/см² не менее	
				+20 °С	-60 °С
10ХСНДА	390-495	530-685	19	69	69
15ХСНДА	345-450	490-685	21	69	69

Таблица 3 - Механические свойства сварных соединений толщиной 12-14 мм из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА

Марка стали	Механические свойства				
	Предел текучести, σ_{02} , Н/мм²	Временное сопротивление, σ_B , Н/мм²	Относительное удлинение δ_5 , %	Ударная вязкость по зоне сплавления КСУ, Дж/см² не менее	
				+20 °С	-60 °С
10ХСНДА	420-490	550-640	16-17	40-55	10-15
15ХСНДА	380-430	510-620	17-19	50-65	15-25

Двухпроходная сварка под флюсом с первым корневым проходом с МХП или ПМП присадкой, вторым проходом без присадки, табл.4, варианты 3-4, также не обеспечивала требуемую хладостойкость по зоне сплавления. И только односторонняя двухпроходная сварка с последующим наложением отжигающего валика по режиму сварки второго прохода, табл.4, варианты 5-6, позволила обеспечить требуемый уровень ударной вязкости по зоне сплавления. Многослойное заполнение шва, табл.4, варианты 7-8, предотвращает низкотемпературное охрупчивание, за исключением зоны сплавления последнего прохода, где сохраняется повышенная чувствительность к удару при низких температурах. Представленные в табл.4 данные хорошо согласуются с результатами исследований, приведенными в работе [1].

В целях установления причин низкотемпературного охрупчивания по зоне сплавления сварных соединений из сталей 10ХСНДА

и 15ХСНДА исследовали общую и тонкую структуру образцов, вырезанных непосредственно из штатных стыковых соединений. Было установлено, что при сварке на повышенных погонных энергиях (табл.4, варианты 1-2) в ОШЗ сформировалось крупное зерно с игольчатым расположением ферритной составляющей в теле зерен перлита, что свидетельствовало о наличии сильного перегрева, сравнительно длительного пребывания металла ОШЗ при высоких температурах и быстрого отвода тепла в холодные слои металла в интервале температур фазовых превращений, приведшие к формированию неблагоприятной видманштеттовой структуры, рис. 1.

ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ПРОКАТА СТАЛИ 10ХСНДА И 15ХСНДА



Рисунок 1 - Видманштеттова структура с игольчато – пластинчатым ферритом в теле зерен перлита $\times 500$

В зоне сплавления ферритная составляющая более пересыщена углеродом, чем равновесная доэвтектоидная α - фаза основного

металла, о чем свидетельствует высокое значение периода её кристаллической решетки, рассчитанное по характеристическим интерференционным пикам (110), (200), (211) по методике [5]. Скалярная плотность дефектов кристаллического строения находится на уровне скалярной плотности мартенситной α -фазы, формирующейся при распаде аустенита в области мартенситного превращения, табл.5. В стыках и на границах ферритных кристаллов присутствуют как крупные, так и мелкие карбиды, преимущественно округлой формы, рис. 2. Границы кристаллов напряжены. Амплитуда кривизны кручения кристаллической решетки достигает $950-1000\text{ см}^{-1}$ и по своему значению приближается к максимальной величине, отмечаемой в мартенситной α - фазе.

Таблица 4 – Режимы сварки и ударная вязкость сварных соединений

№ варианта	Марка стали сварного соединения	Количество проходов	Среднее значение погонной энергии сварки прохода, Дж/см	Среднее значение времени пребывания металла при температуре свыше 1300°C , с	Ударная вязкость КСЧ при -60°C , Дж/см ²		
					Основной металл	Металл шва	Зона сплавления
1	10ХСНДА	1	61000	52,0	80-100	30-45	10-15
2	15ХСНДА	1	61000	52,0	90-110	35-50	15-25
3	10ХСНДА	2	48000 40000	28,5 24,0	80-100	40-55	20-30
4	15ХСНДА	2	48000 40000	28,5 24,0	90-110	45-60	25-35
5	10ХСНДА	3	48000 36000	28,5 23,0	80-100	50-60	35-45
6	15ХСНДА	3	48000 36000	28,5 23,0	90-110	55-70	40-50
7	10ХСНДА	6	32000 22700	22,0 10,2	80-100	40-55 65-80	18-26 70-85
8	15ХСНДА	6	32000 22700	22,0 10,2	90-110	50-65 70-85	20-30 87-96

Примечание: Варианты 1-6 толщина стыкового соединения – 12мм., варианты 7-8 – 24 мм. В числителе погонная энергия и время пребывания металла 1-го прохода, в знаменателе – последующих.

Данные ударной вязкости: в числителе – для верхних слоёв, в знаменателе – для нижних.

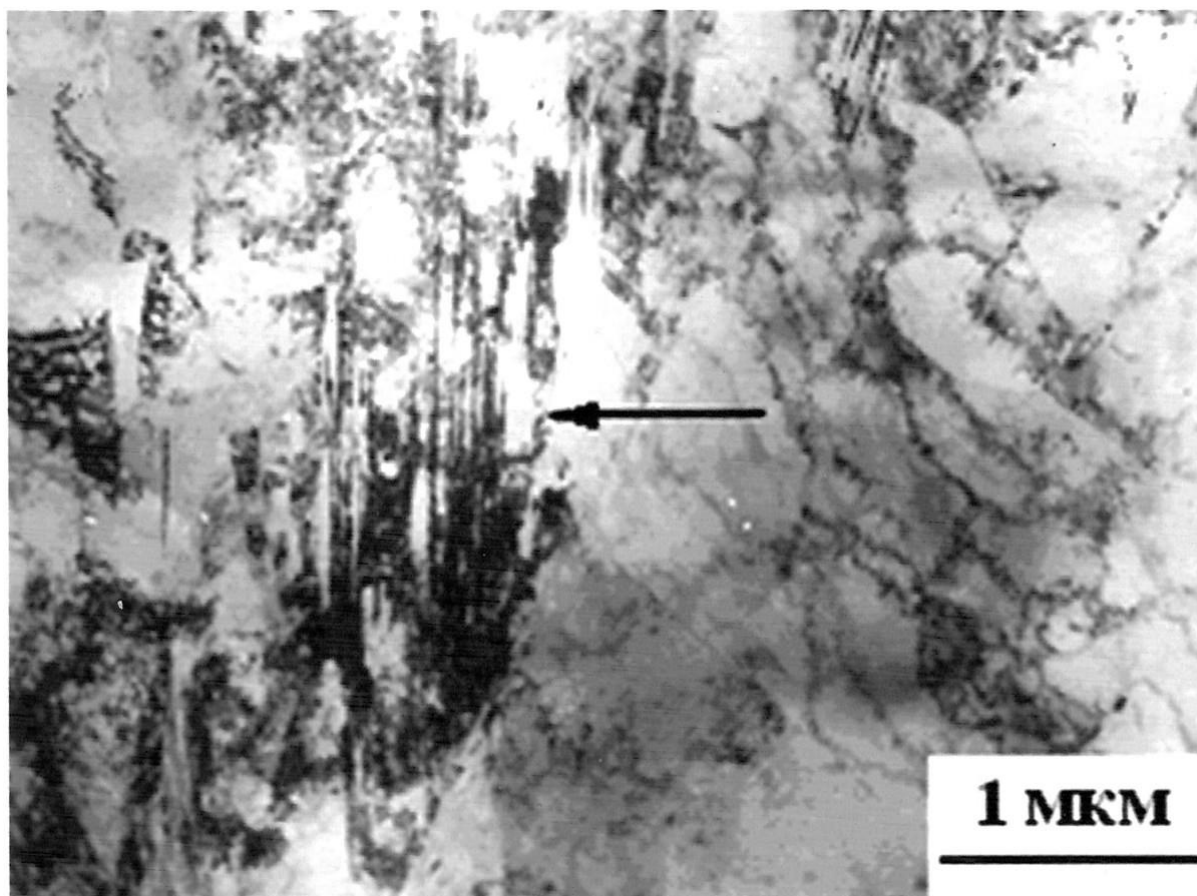


Рисунок 2 - Электронная микроскопия тонкой структуры стали 10XCHDA в локальных участках зоны сплавления. Стрелкой отмечены карбидные или карбонитридные включения

При многослойной сварке на пониженных погонных энергиях (табл.4, варианты 5-6), с наложением отжигающего валика (3-й проход) видманштеттова структура отсутствует. В ОШЗ формируется феррито – перлитная структура с величиной зерна 6-5 № по ГОСТ 6639-82. Ферритная α - фаза менее пересыщена углеродом, чем при сварке на повышенных погонных энергиях. Границы кристаллов не напряжены. Амплитуда кривизны кручения кристаллической решетки не превышает $560-640 \text{ см}^{-1}$. Напряжения в основном упругие, не релаксированные. Скалярная плотность дефектов кристаллического строения находятся в пределах скалярной плотности доэвтектоидного феррита отожженной стали, табл. 5. В поле кристаллов и по границам α - фазы карбидной фазы не наблюдалось. Дополнительным подтверждением полученных при электронной микроскопии экспериментальных данных о наличии в зоне сплавления карбидных и карбонитридных включений, могут служить результаты микрохимического анализа, выполненного на установке «МАР».

Установлено, что на образцах, полученных при сварке на повышенных погонных энергиях (табл.4, варианты 1-2), при прохождении электронного пучка по зоне сплавления четко фиксировались фосфорисцирующие вспышки при попадании в электронный пучок карбидных и карбонитридных включений ниобия, ванадия и других карбидообразующих элементов, входящих в состав сталей 10XCHDA и 15XCHDA. При анализе образцов, сваренных многослойной сваркой на пониженных погонных энергиях (табл.4, варианты 5-6), количество фосфорисцирующих вспышек при попадании в электронный пучок карбидных и карбонитридных включений резко уменьшилось. Их количество в зоне сплавления не превышало аналогичных показателей в основном металле.

Полученные экспериментальные данные позволяют заключить, что основной причиной низкой хладостойкости сварных соединений мостовых конструкций из сталей 10XCHDA и 15XCHDA, полученных односторонней односторонней автоматической сваркой под флюсом сплошной проволокой с гранулированной

ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ПРОКАТА СТАЛИ 10ХСНДА И 15ХСНДА

присадкой на формирующих подкладках следует считать сформировавшуюся в зоне сплавления крайне неоднородную структуру, состоящую из дефектного феррита, насыщен-

ного карбидными и карбонитридными включениями, которые служат своеобразными концентраторами напряжения, обуславливая хрупкость соединения.

Таблица 5 - Физические характеристики α - фазы

Наименование	Физические характеристики α - фазы		
	Период кристаллической решётки, нм	Скалярная плотность дислокации, ρ , 10^9 , см^{-2}	Амплитуда кривизны кручения кристаллической решётки, см^{-1}
Табличное значение для Fe α [5]	0,28664	-	-
Сталь 10ХСНДА в отожженном состоянии	0,28720	1,55-2,15	450-550
α – фаза зоны сплавления. Сталь 10ХСНДА			
Сварное соединение Таблица 4, вариант 1	0,28770	5,60-6,70	950-1000
Сварное соединение Таблица 4, вариант 5	0,28725	2,10-3,20	560-640

Примечание: точность определения периода решетки $\pm 0,00005$ Нм, скалярной плотности дислокаций $\pm 0,2 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$, кривизны кручения кристаллической решетки $\pm 50 \text{ см}^{-1}$.

Таблица 6 – Режимы сварки проволокой $\varnothing$ 4 мм

Слои (проходы) стыкового шва	Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/час
Первый с ПМП	650-680	36-38	18-19
Второй без ПМП	600-650	38-40	20-21
Отжигающий валик	500-550	40-41	20-21

Примечание: вылет электрода 40-42 мм. Второй и последующие проходы проводить после остывания шва не ниже 70°C, но не выше 200°C.

Как показано в работах [6,7] структурная неоднородность способствует протеканию неравномерной деформации в объеме металла. В свою очередь, чем выше неоднородность деформации, тем при меньшей деформации будет исчерпана пластичность металла, тем раньше наступит разрушение. Что и наблюдается в наших экспериментах.

Полученные в работе экспериментальные данные были учтены при разработке технологических регламентов по сварке монтажных соединений металлоконструкций пролетных строений мостов через реки, протекающие на участке дороги «Чуйский тракт».

Рекомендуемые режимы автоматической сварки под флюсом сплошной проволокой с гранулированной металлической присадкой на формирующих подкладках монтажных стыковых соединений из стали 10ХСНДА и 15ХСНДА толщиной стенки 12-14 мм без разделки кромок даны в табл. 6.

Выводы

1. Монтажные стыковые соединения металлоконструкций пролетных строений мостов из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА толщиной 12-14 мм, полученные автоматической сваркой под флюсом на повышенных погонных энергиях, склонны к низкотемпературному охрупчиванию по зоне сплавления вследствие формирования неоднородной структуры, состоящей из дефектного феррита, насыщенного карбидными и карбонитридными включениями, игольчатого видманштетта.
2. Предложены режимы автоматической сварки под флюсом с ПМП присадкой монтажных стыковых соединений толщиной 12-14 мм без разделки кромок из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА на пониженных погонных энергиях в диапазоне значений 36000-48000 Дж/см. с последующим наложением отжигающего валика, обеспечивающая получение хладостойких до -60°C соединений.

Список литературы

1. Чепрасов Д.П., Иванайский Е.А., Платонов А.С., Гребенчук В.Г., Подберезный Н.И. Свойства монтажных сварных соединений мостовых конструкций из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА// Сварочное производство. 1998. №6. С. 16-19.
2. Чепрасов Д.П., Петров В.П., Иванайский Е.А., Платонов А.С., Гребенчук В.Г., Подберезный Н.И. Водородная хрупкость монтажных сварных соединений мостовых конструкций из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА//Сварочное производство. 2003. №3. с.12-16
3. ТУ 14-1-5120-2008 Прокат толстолистовой из низколегированной стали высокого качества для мостостроения.
4. СТО - ГК «Трансстрой»-005-2007. Стандарт организации. Стальные конструкции мостов. Технология монтажной сварки.
5. Миркин Л.И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов. Справочник. М: Машиностроение. 1979. 134 с.
6. Гудков А.А. Трещиностойкость стали. М: Металлургия. 1989. 375 с.
7. Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов. Пер. с англ. М: Металлургия. 1988. 550 с.

Ледников Евгений Александрович, ассистент кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46. e-mail masterzenya@yandex.ru тел.8-923-644-11-77

Чепрасов Дмитрий Петрович, к.т.н., профессор кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46. e-mail: ar_gac@mail.ru тел.8-(3852)55-37-96

Конник Данил Анатольевич, начальник отдела, Сибирское управление Ростехнадзора, 656037, г. Барнаул, пр. Калинина, 65; altai@nadzor22.ru. Тел. (3852) 298-438.