

УДК 621.791.92

АНАЛИЗ ОСНОВ УПРОЧНЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И ВЫБОР СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МНОГОДУГОВОЙ СВАРКИ ПОД ФЛОСОМ ТРУБ ИЗ СТАЛИ 17Г1С-У

©Деревина Е. С.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про автора:

Деревина Євгенія Станіславівна: ORCID: 0000-0002-5531-0124, 216464@ipmail.com, кандидат технічних наук, доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва, Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Проаналізовані дані про вплив складу сталей на їхні властивості та на процес зварювання під флюсом. Показано вплив термічного циклу зварки, складу зварочних матеріалів та інших параметрів зварки на схильність до утворення холодних тріщин, яка обумовлена механічними властивостями сталей та складом зварочних матеріалів. Показано вплив термічного циклу зварки, складу зварочних матеріалів та інших параметрів зварки на схильність до утворення холодних тріщин, яка обумовлена механічними властивостями сталей та складом зварочних матеріалів. Показано вплив термічного циклу зварки, складу зварочних матеріалів та інших параметрів зварки на схильність до утворення холодних тріщин, яка обумовлена механічними властивостями сталей та складом зварочних матеріалів.

Представлені результати досліджень впливу складу сталей на їхні властивості та на процес зварювання під флюсом. Показано вплив термічного циклу зварки, складу зварочних матеріалів та інших параметрів зварки на схильність до утворення холодних тріщин, яка обумовлена механічними властивостями сталей та складом зварочних матеріалів. Показано вплив термічного циклу зварки, складу зварочних матеріалів та інших параметрів зварки на схильність до утворення холодних тріщин, яка обумовлена механічними властивостями сталей та складом зварочних матеріалів.

Представлені результати досліджень впливу складу сталей на їхні властивості та на процес зварювання під флюсом. Показано вплив термічного циклу зварки, складу зварочних матеріалів та інших параметрів зварки на схильність до утворення холодних тріщин, яка обумовлена механічними властивостями сталей та складом зварочних матеріалів. Показано вплив термічного циклу зварки, складу зварочних матеріалів та інших параметрів зварки на схильність до утворення холодних тріщин, яка обумовлена механічними властивостями сталей та складом зварочних матеріалів.

Ключові слова: низколеговані сталі; холодні тріщини; ударна в'язкість; метал шва; швидкість поширення тріщини; критична швидкість деформації.

Деревина Е. С. «Анализ основ изменения низколегированных сталей и выбор зварочных материалов для многодуговой сварки под флюсом труб из стали 17Г1С-У».

Проаналізовано дані про вплив складу сталей на їхні властивості та на процес зварювання під флюсом. Показано вплив термічного циклу зварки, складу зварочних матеріалів та інших параметрів зварки на схильність до утворення холодних тріщин, яка обумовлена механічними властивостями сталей та складом зварочних матеріалів. Показано вплив термічного циклу зварки, складу зварочних матеріалів та інших параметрів зварки на схильність до утворення холодних тріщин, яка обумовлена механічними властивостями сталей та складом зварочних матеріалів.

Представлені результати досліджень впливу складу сталей на їхні властивості та на процес зварювання під флюсом. Показано вплив термічного циклу зварки, складу зварочних матеріалів та інших параметрів зварки на схильність до утворення холодних тріщин, яка обумовлена механічними властивостями сталей та складом зварочних матеріалів. Показано вплив термічного циклу зварки, складу зварочних матеріалів та інших параметрів зварки на схильність до утворення холодних тріщин, яка обумовлена механічними властивостями сталей та складом зварочних матеріалів.

нікелем. Наведено швидкості поширення тріщин, критичні швидкості деформації металу шва, аналіз яких дозволив рекомендувати зварювальні дроти Sv-08TM і Sv-08XM при дводуговому зварюванні під флюсом АН-60 для забезпечення рівномірності з основним металом і високій опірності металу шва утворенню та поширенню тріщин без попереднього підігріву перед зварюванням, що сприяє розширенню застосування сталі 17Г1С-У для виробництва зварних труб великого діаметру.

Ключові слова: низьколеговані сталі; холодні тріщини; ударна в'язкість; метал шва; швидкість поширення тріщин; критична швидкість деформації.

Державна Е. "Analysis of the bases of low-steel steel strengthening and selection of welding materials for multi-welded welding under the flux of pipes from steel 17G1S-U".

The information on the introduction of low-alloy steels of high and high strength during the construction of main pipelines and other metal structures operating at negative temperatures is analyzed, which is an effective way to reduce metal consumption. Data on the effect of the chemical composition on the mechanical properties, the structure of the steels, and their propensity to cracking are generalized. The influence of the thermal cycle of welding, the composition of welding materials and other technological parameters of welding on the propensity to form cold cracks is shown, which is caused by a combination of metallurgical, technological and constructive factors.

The results of studies of the toughness of weld metal on low-alloy steel of high strength grade 17G1S-U in the temperature range from minus 20°C to minus 60°C, welded with welding wires doped with manganese, molybdenum, chromium, and nickel are presented. The propagation rates of cracks and the critical strain rate of weld metal are given, the analysis of which allowed recommending the welding wires Sv-08GM and Sv-08MM for two-arc welding under the AN-60 main flux to ensure equal strength with the base metal and high resistance of weld metal to formation and propagation of cracks without preliminary preheating before welding, which contributes to the expansion of the use of 17G1S-U steel for the production of welded pipes of large diameter.

Key words: low-alloy steel; cold cracks; impact strength; weld metal; crack propagation velocity; critical strain rate.

1. Актуальність

Снижение удельного расхода металла на изготовление сварных конструкций обеспечивается при применении низколегированных сталей, упрочняемых легированием их углеродом (до 0,25%), марганцем (1,1-1,8%), хромом (до 0,8%), хромом (до 0,9%), медью (до 0,3%) [1]. При повышении содержания этих легирующих элементов снижается ударная вязкость и хладостойкость стали, ухудшается свариваемость низколегированных сталей феррито - перлитной структуры, затруднено обеспечение свойств металла шва и металла зоны термического влияния (ЗТВ) равнопрочных основному металлу, образованию холодных трещин при сварке. Повысить прочность и свариваемость низколегированных сталей удастся при комплексном микролегировании их небольшим количеством бора, молибдена, ванадия, ниобия титана, образующих стойкие карбиды (NbC, TiC, VC), выделяемые в виде мелких частиц внутри зерна феррита, приводя к его упрочнению.

2. Постановка проблемы и анализ последних исследований

Добавление азота в стали вместе с карбидообразующими элементами способствует образованию прочных карбонитридов и измельчению зерна. К мелкозернистым сталям

карбидного и карбонитридного упрочнения относятся стали 14Г2АФ, 15Г2СФ, 16Г2АФ, 18Г2АФ и классов прочности X-60, X-65, X-70 (табл. 1), используемые согласно стандарту США API 5LX для труб магистральных трубопроводов [2].

Проблеме холодных трещин при ручной дуговой сварке этих сталей посвящено много работ [2-5], но практически отсутствуют рекомендации для их автоматической сварки под флюсом.

Улучшение свойств низколегированных сталей достигается путем термической, термомеханической обработки, а также уменьшением ее загрязненности путем рафинирующих переплавов, обработки синтетическими шлаками, добавления редкоземельных элементов [6].

Изготовление сварных конструкций из высокопрочных низколегированных сталей обуславливает необходимость строгого соблюдения технологии сборки и сварки из-за их повышенной чувствительности к воздействию термомеханического шва сварки, приводящего к образованию наводочных структур и возникновению холодных трещин, уменьшение склонности к которым обеспечивается применением стыковых сварных соединений и подбором сварочных материалов с обязательной прокавкой, постоянного тока обратной полярности и введении предварительного и сопутствующего подогрева свариваемых элементов [7].

3. Цель исследований

Целью настоящей работы состояла в детальном анализе влияния химического состава стали на свойства, структуру и склонность металла шва к образованию холодных трещин, исследовании влияния легирования металла шва на стойкость против образования холодных трещин при многоэлектродной сварке низколегированной стали повышенной прочности марки 17Г1С-У.

4. Основной материал

В зависимости от системы легирования и кинетики превращений различают стали мартенситного или при введении молибдена - бейнитного класса, обладающие лучшей свариваемостью по сравнению с мартенситными [8].

Одна из причин повышения склонности к образованию холодных трещин низколегированных сталей повышенной и высокой прочности - увеличение содержания водорода в металле сварного соединения. Наибольшее количество водорода в наплавленном металле содержится при сварке широко применяющихся электродами с покрытием органического типа. Значительно меньше водорода в металле шва при сварке электродом с покрытием оксидного типа и автоматической сварке под флюсом, особенно после высокотемпературной прокавки материалов. Наименьшее количество водорода содержится в металле, наплавленном в CO₂.

Таблица 1 – Химический состав и механические свойства низколегированных сталей

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Сu	В	N	σ _т , МПа	σ _в , МПа	δ, %
17Г1С	0,14-0,2	0,4-0,6	1,0-1,4	0,3	0,3	0,3	-	-	520	250	23
15Г2СФ	0,12-0,18	0,4-0,7	1,3-1,7	0,3	0,3	0,3	≤0,10	-	560	350	18
14Г2АФ	0,12-0,18	0,3-0,6	1,2-1,6	0,4	0,3	0,3	≤0,12	0,02	550	400	20
16Г2АФ	0,14-0,2	0,3-0,6	1,3-1,7	0,4	0,3	0,3	≤0,14	0,02	600	450	20
18Г2АФ	0,14-0,22	≤0,17	1,3-1,7	0,3	0,3	0,3	≤0,15	0,03	600	450	19
14Х2ГМР	0,1-0,16	0,2-0,4	0,9-1,2	1,7	0,3	-	≤0,3	-	600	700	14
12Г2СМФ	0,09-0,15	0,4-0,7	1,3-1,7	0,3	0,3	-	≤0,15	-	600	700	14
15Г2СХМФР	0,12-0,18	0,4-0,7	1,3-1,6	0,5	0,3	-	≤0,12	-	600	700	15
15ХГ2СФР	0,12-0,18	0,4-0,7	1,5-1,8	0,7	-	-	≤0,10	-	600	700	14
5ХГ2СФМР	0,12-0,18	0,4-0,7	1,5-1,8	0,7	-	-	≤0,10	-	700	850	12

Тепловой режим на практике регулируют изменением погонной энергии сварки q_v , предварительным и сопутствующим подогревом, воздействием посредством указанных параметров технологии на основные параметры термического цикла сварки $t > A_{c_1}$, и скорости охлаждения при температурах 550 и 300 °С – W_{550}^0 и W_{300}^0 [2].

На практике в качестве критерия выбора технологического варианта сварки иногда применяют эквивалент углерода основного металла C_e и максимальную твердость HV в озоновом слое, что, по существу, сводится к попытке на основе результатов рассмотрения только структурного фактора прогнозировать образование трещин.

Предложено большое число формул для определения C_e , различающихся как содержанием тех или иных элементов, так и коэффициентами при этих элементах. При попытке учета влияния на сопротивляемость трещинам водорода и напряжений I рода путем введения в формулу C_e показателей водорода и толщины свариваемого металла с постоянными коэффициентами вносятся дополнительные условия, так как зависимости сопротивляемости сталей образованию холодных трещин от содержания водорода и значений напряжений I рода, жесткости конструкции не носят линейного характера.

На основе практического опыта в отдельных работах [2] предлагается установить максимальные твердости HV в зоне термического влияния (HV 380–480), при которых не должны образовываться холодные трещины. Часто твердость ограничивают значениями HV ≤ 350. Для гарантированного ограничения допустимой твердости HV ≤ 350 необходимо иметь $C_e ≤ 0,35$, что практически исключает возможность сварки без подогрева большинства низколегированных сталей на типовых режимах.

Сталь 17Г1С-У нормализованная повышенной хладостойкости и прочности широко применяется при изготовлении труб большого диаметра. При сварке по существующей технологии (с использованием электродной проволоки Са-08ГА и флюса АН-60, без последующей термообработки) металл шва расширяемых труб из этих сталей имеет низкую вязкость по сравнению с основным металлом. Поэтому необходимо искать такие сварочные материалы, которые повысили бы механические свойства металла шва до уровня основного металла трубы. Кроме того, металл шва должен обладать достаточной стойкостью против трещин, так как многодуговая сварка на повышенных скоростях сталей повышенной прочности усугубляет опасность появления трещин.

Легирование металла шва такими элементами, как хром, молибден, ванадий, ниобий, никель и др. дает возможность уменьшить его склонность к хрупкому разрушению. Влияние легирования на механические свойства металла шва изучали при сварке различными электродными проволоками, сопоставлялись свойства производимой промышленностью стали 17Г1С-У. Пластины 120х30х1,2 см соединили двухдуговой сваркой под флюсом АН-60 при $v_{св} = 150$ м/час. При выполнении первого шва удельное тепловложение составило 6500–7000 кал/см, второго – 7400–7800 кал/см.

Стойкость против хрупкого разрушения оценивается по ударной вязкости, равной 3,5 Дж/см² при -60 °С. Испытания проводились на образцах Тагарина, изготовленных из металла второго шва и стали 17Г1С-У. Равнопрочность металла шва и нормализованной стали 17Г1С-У с содержанием элементов на верхнем пределе марочного состава обеспечивает почти все электродные проволоки, за исключением Са-08ГА (табл. 2).

Таблиця 2 – Хімічний склад і механічні властивості досліджуваних матеріалів

Матеріал	Складові частини, %								σ_s , МПа	σ_b , МПа	A_5 , %	K_{IC} , МПа $\sqrt{м}$	
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	N					
17Г1С-У	0,19	1,36	0,54	0,24	0,10	-	-	0,026	0,024	620	420	286	620
Св-08Г	0,09	1,48	0,49	0,20	0,09	-	-	0,023	0,023	571	407	278	640
Св-12М	0,11	1,28	0,56	0,24	0,10	0,16	-	0,022	0,023	629	476	265	566
Св-10НМА	0,09	1,29	0,43	0,22	0,48	0,12	-	0,023	0,022	652	507	259	572
Св-08М	0,11	1,37	0,58	-	-	0,24	-	0,024	0,029	747	681	208	501
Св-08ХМ	0,12	1,34	0,55	0,46	0,10	0,16	-	0,020	0,023	653	495	250	583
Св-08ГНМА	0,13	1,30	0,40	0,20	0,56	-	-	0,020	0,021	635	465	262	580
Св-06НЗА	0,11	1,30	0,40	0,20	1,09	-	-	0,024	0,021	646	504	281	602

Склонность основного металла и шва к хрупкому разрушению определяли на ударных образцах типа V1 (ГОСТ 6996-66). Надрез наносили со стороны второго шва, по его центру. Результаты показали, что для металла шва это требование можно выполнять при использовании проволок типов Св-12М, Св-08ХМ, Св-08ХМВА, Св-08ХМВБ, Св-10НМА и Св-06НЗА (табл. 3).

Таблиця 3 – Ударная вязкость (KCV) и удельная работа (A_0) металла шва

Материал	KCV Дж/см ² при температурах				KCV Дж/см ² при температурах			
	+20°C	0°C	-20°C	-40°C	+20°C	0°C	-20°C	-40°C
17Г1С-У								
нормализованная	87	80	69	52	50	35	28	18
Св-08Г	111	91	73	51	19	47	27	14
Св-12М	101	-	62	56	39	55	33	23
Св-10НМА	99	90	77	62	56	52	41	33
Св-08М	98	69	66	58	45	32	30	25
Св-08ХМ	80	71	60	56	48	37	33	29
Св-08ГНМА	99	81	71	64	48	43	31	25
Св-06НЗА	90	71	68	45	45	42	32	27

Более высокую ударную вязкость при отрицательных температурах имеет металл шва, сваренный проволокой Св-10НМА. В процессе термомеханического перехода металл деформируется, поэтому ударная вязкость металла шва на трубе будет ниже, чем у шва на пластине.

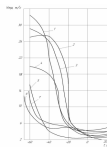
Ударная вязкость является интегральной характеристикой, которая не дает полного представления об отдельных этапах разрушения. Более показательными характеристиками хрупкости стали являются удельная работа A_0 и скорость развития трещины v_{tr} . На рис. 1 показана зависимость средней скорости распространения трещины v_{tr} в образце от температуры металла шва и нормализованной стали 17Г1С-У, а на рис. 2 - v_{tr} до $v_{tr,cr}$. Кинетический критерий склонности металла к хрупкому разрушению v_{tr} более тесно связан с легированием металла шва, чем энергетический критерий A_0 . Резкое возрастание скорости v_{tr} говорит о переходе металла образца в хрупкое состояние. Это свидетельствует о более высокой сопротивляемости распространению трещины металла швов, сваренных проволоками Св-08ХМ и Св-08М под флюсом АН-60.

Выводы

Выполнен анализ влияния химического состава стали на механические свойства, структуру и склонность к образованию холодных трещин металла шва низкотемпературных сталей повышенной и высокой прочности.

Для обеспечения равнопрочности с основным металлом и высокой сопротивляемости металла шва стали 17Г1С-У образованию и распространению трещин, без проведения предварительного подогрева перед сваркой под флюсом АН-60, рекомендованы сварочные

проволоки Св-08ГМ и Св-08ХМ. Применение которых позволит снизить скорость распространения трещин и возможно увеличить критическую скорость деформации.



Металл шва наплавленный на стали 17Г1С-У под флюсом АН60 сварочными проволоками: 1 – Св08ГМ, 2 – Св-Г2М, 3 – Св-10НМА, 4 – Св-08ГМ, 5 – Св-06НЗА, 6 – Св-08ГНМА, 7 – Св-06НЗА

Рис. 1 – Скорость распространения трещин

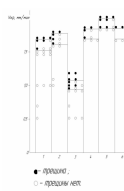


Рис. 2 – Критическая скорость деформации до появления трещины

Разработка рациональной технологии сварки способствует расширению применения низколегированных сталей повышенной и высокой прочности (вместо углеродистых и не упрочненных низколегированных сталей) для изготовления сварных металлических конструкций, что обеспечит снижение их металлоемкости на 25-35%.

Список использованных источников:

1. Касаркин В. Ф. Мушаченко. – Киев: Техника, 1990. – 188с.
2. Чибриков В. Ф. Холодные трещины при сварке низколегированных сталей повышенной и высокой прочности // В. Ф. Чибриков. – М.: Машиностроение, 1996. – 72с.
3. Касаркин В. С. Особенности процесса образования холодных трещин в сварных соединениях низколегированных высокопрочных сталей // В. С. Касаркин, В. И. Бреднев // Автоматическая сварка. – 1985. – №8. – С. 146-153.
4. Влияние водород на склонность к образованию трещин в ЗПБ с концентратором напряжений // Е. С. Касаркин, О. Д. Селин, Е. Е. Михайлов [и др.] // Автоматическая сварка. – 1989. – № 11. – С. 20-23.
5. Neues in der Schweisstechnik 1998 / E. H. Herold, M. Zinke, H. Zwickert et al. // Schweissen und Schneiden. – 1998. – № 5. – S. 266-268.
6. Состатинская В. М. Влияние реляционной термомеханической обработки на структуру и механические свойства листового проката из низколегированных сталей // В. М. Состатинская, Г. И. Габитовичев // Вопросы материаловедения. – 2005. – №3(43). – С.13-23.
7. Бреднев В. И. Успешная работа образования очагов холодных трещин при сварке низколегированных сталей // В. И. Бреднев // Автоматическая сварка. – 1988. – № 11. – С. 3-8, 11.
8. Митюшина Г. Г. Влияние структуры на хладостойкость низколегированной стали // Г. Д. Митюшина, В. Н. Орлов, Е. И. Хлусова // Вопросы материаловедения. – 2005. – №3(43). – С.5-13.

References

1. Kasarkin, V. & Musiachenko, V. 1990, *Nizkolegированные стали высокой прочности для сварных конструкций*, Техника, Киев.
2. Kasarkin, V. 1986, *Холодные трещины при сварке низколегированных сталей повышенной и высокой прочности*, Машиностроение, Москва.
3. Kasarkin, V. & Brednev, V. 1985, "Особенности процесса образования холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей", *Автоматическая сварка*, no. 8, pp. 146-153.
4. Kasarkin, Selin, O. & Mikhailov, V. 1989, "Влияние водорода на склонность к образованию трещин в ЗПБ с концентратором напряжений", *Автоматическая сварка*, no. 11, pp. 20-23.
5. Herold, E., Zinke, M. & Zwickert, H. 1998, "Neues in der Schweisstechnik", *Schweissen und Schneiden*, no. 5, pp. 266-268.
6. Sostatsinskaya, V. & Gabitovich, G. 2005, "Влияние реляционной термомеханической обработки на структуру и механические свойства листового проката из низколегированных сталей", *Вопросы материаловедения*, no. 3(43), pp.13-23.
7. Brednev, V. 1988, "Успешная работа образования очагов холодных трещин при сварке низколегированных сталей", *Автоматическая сварка*, no. 11, pp. 3-8, 11.
8. Mityushina, G., Orlov, V. & Khlusova, E. 2005, "Влияние структуры на хладостойкость низколегированной стали", *Вопросы материаловедения*, no. 3(43), pp. 5-13.

Статья найдена до редакції 03 квітня 2017 р.