



ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА РЕМОНТНЫХ ШВОВ ПРИ ИСПРАВЛЕНИИ ДЕФЕКТОВ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОСЛОЙНОЙ СВАРКИ

А. А. РЫБАКОВ, Т. Н. ФИЛИПЧУК, Ю. В. ДЕМЧЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Исследованы структура и свойства металла ремонтных швов, выполняемых многопроходной сваркой при исправлении дефектов в швах газо-, нефтепроводных труб. Определены изменения химического состава и ударной вязкости при отрицательных температурах, а также особенности структурных характеристик металла отдельных проходов ремонтных швов. Показано, что при ручной дуговой и механизированной сварке под флюсом и в защитных газах с применением традиционных для производства труб сварочных материалов металл последних проходов ремонтного шва чрезмерно обогащается теми или иными легирующими элементами (марганцем, кремнием, хромом, молибденом и др.), присутствующими в таких материалах. Это приводит к формированию неблагоприятной структуры: участков верхнего бейнита, развитой сетки полигонизационных границ, пограничных выделений углеродистой второй фазы, что в свою очередь провоцирует образование в швах холодных трещин. С учетом результатов исследований разработаны требования к химическому составу сварочной проволоки для исправления дефектов в швах труб многопроходной сваркой, предусматривающие ограничение содержания легирующих элементов. При многопроходной сварке под флюсом предложено также применять алюминатный флюс. Проволока рекомендованного состава апробирована при исправлении дефектов в швах труб сваркой в защитном газе и обеспечила высокую ударную вязкость металла ремонтных швов в сочетании с достаточной стойкостью против возникновения трещин. Результаты исследований могут быть использованы для исправления дефектов в швах при производстве труб, а также многопроходной сварке других металлических конструкций. Библиогр. 5, табл. 4, рис. 7.

Ключевые слова: труба, шов, ремонт, дефекты, многопроходная сварка, сварочные материалы, ударная вязкость, структура, трещины

Известно, что при изготовлении труб большого диаметра, свариваемых многодуговой сваркой под флюсом, исправлять в швах отдельные внутренние дефекты (поры, шлаковые включения, непровары или несплавления) посредством их предварительного удаления и последующего заполнения образовавшейся канавки многослойной сваркой допускается в ограниченном количестве (например, не более чем на 5 % труб) [1–3 и др.]. Согласно действующим нормативным документам длина такого «ремонтного» участка должна находиться в пределах 50...500 мм. При этом предполагается, что качественные показатели таких участков, в том числе уровень механических свойств металла, должны соответствовать требованиям, предъявляемым к основным сварным соединениям труб.

Исправление дефектов в швах труб выполняют ручной дуговой сваркой, механизированной сваркой под флюсом или в защитном газе. Количество необходимых проходов ремонтного шва определяется глубиной канавки, образуемой при удалении дефекта, что в свою очередь зависит от места его расположения в сечении шва и толщины

стенки трубы. В типовых случаях, например, для труб с толщиной стенки 15...20 мм выполняют до шести – десяти проходов ремонтного шва. В странах СНГ при механизированной сварке под флюсом преимущественно применяют плавный марганцевый высококремнистый флюс АН-60 и проволоку типа Св-10Г2. Такое сочетание сварочных материалов обеспечивает сравнительно низкие показатели вязких характеристик металла ремонтного шва (на уровне 30 Дж/см² при 0°С). Между тем требования к вязким свойствам металла швов собственно труб, в том числе в местах исправления дефектов, существенно возросли. Согласно действующим нормативным документам наиболее часто средние значения ударной вязкости металла сварных соединений труб для магистральных трубопроводов должны быть не менее 49 Дж/см² при –20 °С, а для трубопроводов, прокладываемых под водой, такие же требования при –30 °С и даже –40 °С. Для обеспечения этих показателей требуется оптимизировать химический состав металла ремонтных швов, в том числе сварочных материалов, обеспечивающих более высокое легирование.

Как показано в работе [4], при исправлении дефектов в швах труб с помощью многослойной



сварки присутствует еще одна проблема, связанная с образованием холодных трещин в ремонтируемых участках швов. Отмечается, что их возникновение обусловлено повышением в последних слоях ремонтного шва массовой доли легирующих элементов. Так, в случае использования флюса АН-60 и проволоки Св-10Г2 при исправлении дефектов в продольном шве труб с толщиной стенки 15,7 мм содержание марганца в последнем (в нашем случае, пятом) проходе ремонтного шва возросло до 2,4 %, а кремния — до 1,0 %. Для сравнения отметим, что в металле собственно продольного шва трубы количество этих элементов не превышало 1,73 и 0,45 % соответственно. В результате в металле замыкающих проходов ремонтного шва формировались участки с неблагоприятной структурой, что при охлаждении металла в условиях относительно жесткого контура провоцировало образование указанных холодных трещин. Следует полагать, что в случае применения сварочных материалов, обеспечивающих более высокое легирование, и большей толщины стенки свариваемых труб, а следовательно, и большего количества проходов, опасность ухудшения структуры металла и возникновения трещин в участках ремонта будет возрастать.

В настоящей статье рассмотрены результаты исследований, проведенных авторами при решении задачи оптимизации химического состава и структуры металла швов в местах исправления дефектов дуговой сваркой, с целью обеспечения повышенных требований к вязким характеристикам металла швов и предотвращения образования холодных трещин.

Ремонт (имитацию операции ремонта дефектов, залегающих на глубине примерно 10...12 мм) проводили на образцах труб размером 1420×18,7 мм из стали Х70 с продольными швами, сваренными под флюсом АН-60 проволокой Св-08Г1НМА. На образцах, вырезанных из труб, по центру продольного шва специализированными электродами АНР-2 выполняли выборку глубиной 15 мм, которая имитировала удаление дефекта. В некоторых случаях при использовании образцов труб с толщиной стенки 15,7 мм глубина канавки перед сваркой составляла 10 мм. Содержание основных элементов в металле продольного шва находилось в следующих пределах, мас. %: 0,05...0,06 С; 1,62...1,79 Мп; 0,429...0,470 Si; 0,008...0,009 Nb, 0,150...0,190 Мо; 0,180...0,236 Ni; 0,015...0,018 Ti. Некоторое колебание содержания отдельных элементов в металле продольного шва связано с использованием в опытах труб из стали Х70 различной толщины (разного химического состава).

Выборки преимущественно заполняли механизированной сваркой в CO₂, смеси Ar + 20 % CO₂

Таблица 1. Содержание основных легирующих элементов в сварочных проволоках, мас. %

Марка проволоки	С	Мп	Si	Ni	Мо	Cr
Св-08ГА	0,09	0,95	0,05	0,14	—	—
Св-10Г2	0,10	1,70	0,05	0,12	—	—
Св-08Г2С	0,09	2,01	0,85	0,11	—	—
Св-08ХМ	0,08	0,50	0,20	0,14	0,50	1,02
Св-08ГМ	0,08	1,19	0,35	0,11	0,59	—
Св-08Г1НМА	0,09	1,20	0,31	0,49	0,52	—
S2Mo	0,07	1,15	0,21	0,11	0,50	—
G MoSi	0,10	1,11	0,60	—	0,50	—

и под флюсом, а на отдельных образцах — ручной дуговой сваркой. Заварку канавок глубиной 15 мм выполняли за восемь проходов, а глубиной 10 мм — за пять проходов. Применяли типовые сварочные материалы, используемые при производстве труб: для сварки под флюсом — проволоку Св-08ГА, Св-10Г2, Св-08ХМ, Св-08ГМ, Св-08Г1НМА, S2Mo и флюс АН-60, АН-67Б, ОР 107, ОР 132, ОК 10.71, ОК 10.74; для сварки в защитном газе — проволоку Св-08Г2С, G MoSi; для ручной дуговой сварки — электроды Schwarz 3К. Химический состав сварочных проволок приведен в табл. 1. Сварку под флюсом выполняли проволокой диаметром 2,5 мм ($I_{св} = 320...350$ А, $U_{д} = 28...30$ В, $v_{св} = 17...20$ м/ч), в защитном газе — проволокой диаметром 1,2 мм ($I_{св} = 160...180$ А, $U_{д} = 26...28$ В), а ручную дуговую сварку — электродами диаметром 3,2 мм ($I_{св} = 130...150$ А, $U_{д} = 25...26$ В).

От выполненных соединений отбирали образцы для определения химического состава металла шва, его ударной вязкости и металлографических исследований. Анализ химического состава металла отдельных проходов выполняли спектральным методом на приборе «Спектровак 1000» фирмы «Baird» и дифракционном спектрометре «ДФС-36». Зоны контроля химического состава, представленные на рис. 1, располагались в металле ремонтируемого продольного шва (зона 1), в металле первого прохода ремонтного шва (зона 2), в металле промежуточных проходов (зоны 3, 4) и в металле замыкающего прохода этого шва (зона 5). Испытания на ударную вязкость проводили при температуре от -10 до -40 °С на образцах с острым надрезом, наносимым по центру наплавки согласно ГОСТ 6996. Микроструктуру металла изучали с применением оптической и растровой электронной микроскопии при увеличении 50-500 на шлифах после травления в нитале (4 % спиртовом растворе азотной кислоты), в горячем растворе пикрата натрия и насыщенном водном растворе пикриновой кислоты.

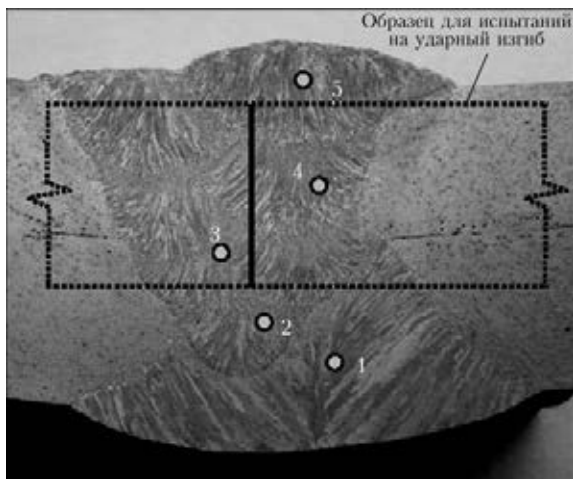


Рис. 1. Характерный макрошлиф исследуемых ремонтных швов и зоны определения химического состава (1...5)

Установлено, что для всех исследуемых вариантов сочетаний сварочных материалов по мере увеличения количества проходов ремонтного шва уровень легирования металла закономерно возрастает. Как видно из рис. 2, количество марганца и кремния уже в металле второго прохода возрастает до 2,35 и 0,62 % соответственно и далее в последующих проходах продолжает увеличиваться вплоть до максимальных значений в замыкающем проходе: 2,85 и 0,99 % соответственно. Аналогично изменяется содержание хрома и молибдена, что показано на примере использования в процессе исправления дефектов проволокой Св-08ХМ (рис. 3).

Интенсивность нарастания массовой доли того или иного легирующего элемента в первую очередь определяется применяемыми сварочными материалами. Как видно из рис. 4, наибольшее количество кремния, как и следовало ожидать, присутствует в последнем проходе шва, выполняемом с применением кислого высококремнистого флюса АН-60, причем его содержание в металле данного прохода возрастает от 0,76 до 0,99 % по мере увеличения массовой доли марганца в сварочной проволоке (напомним, что в продольном шве трубы количество кремния не превышало 0,45 %). Переход кремния из флюса в металл ремонтного шва заметно снижается с уменьшением во флюсе количества SiO₂. Минимальный рост количества кремния наблюдается при применении для рассматриваемой цели плавленого нейтрального флюса АН-67Б или керамического алюминатно-основного флюса типа ОР 132.

Содержание марганца в металле многопроходных ремонтных швов в большей мере зависит от его количества в сварочной проволоке. Так, при применении проволоки Св-10Г2 с 1,7 % марганца массовая доля этого элемента в металле последнего прохода составила 2,85 %. При меньшем количестве марганца, например, в проволоке Св-08Г1НМА (1,2 % Mn) или Св-08ХМ (0,50 %

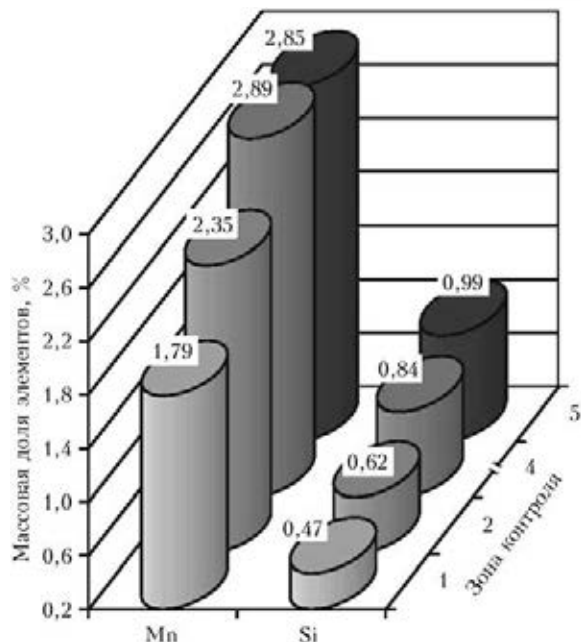


Рис. 2. Массовая доля марганца и кремния в металле различных проходов ремонтного шва, выполненного проволокой Св-10Г2 под флюсом АН-60

Mn), его максимальное количество в ремонтном шве снижалось до 1,97 и 1,77 % соответственно. Темп нарастания других легирующих элементов в исследуемых многопроходных швах также определялся их содержанием в сварочной проволоке.

Обобщенные данные о химическом составе металла последних проходов ремонтных швов, выполненных за восемь или пять проходов, для разных способов сварки и сварочных материалов приведены в табл. 2. Видно, что использование практически любого из обычно применяемых при производстве труб сочетаний сварочных материалов приводит к значительному росту массовой

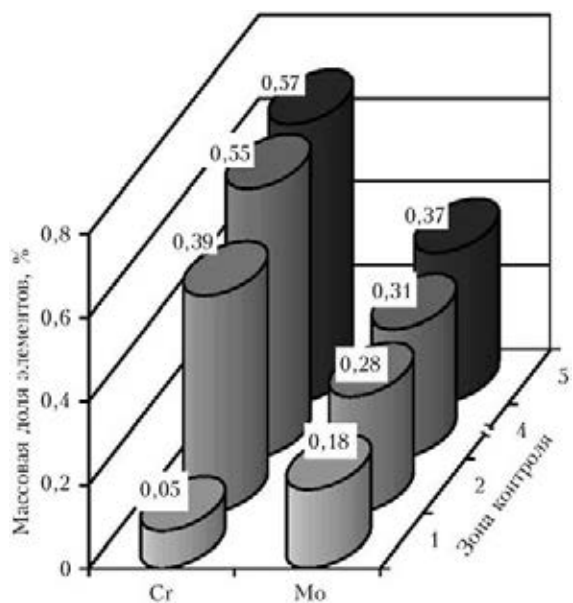


Рис. 3. Массовая доля хрома и молибдена в металле различных проходов ремонтного шва, выполненного проволокой Св-08ХМ под флюсом АН-67Б



Т а б л и ц а 2. Химический состав металла последних проходов ремонтных швов (мас. %), выполненных различными способами сварки и различными сварочными материалами

Номер варианта	Сварочные материалы	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	
<i>Ручная дуговая сварка</i>									
1	Schwarz 3K	0,055	0,268	1,22	0,011	0,015	0,05	0,422	
<i>Механизированная сварка в защитном газе</i>									
2	Св-08Г2С, CO ₂	0,081	0,569	1,48	0,013	0,016	0,06	0,021	
3	Св-08Г2С, Ar + 20 % CO ₂	0,089	0,810	1,40	0,014	0,016	0,06	0,022	
4	G MoSi, Ar + 20 % CO ₂	0,093	0,408	0,88	0,009	0,017	0,07	0,461	
<i>Механизированная сварка под флюсом</i>									
5*	Св-10Г2	АН-60	0,073	0,990	2,854	0,016	0,021	0,05	0,003
6*		АН-67Б	0,080	0,320	2,390	0,016	0,024	0,05	0,022
7		ОР 107	0,065	0,460	2,376	0,016	0,023	0,06	0,028
8		ОК 10.71	0,088	0,723	2,368	0,015	0,022	0,06	0,027
9	Св-08Г1НМА	АН-60	0,044	0,974	1,967	0,017	0,026	0,03	0,534
10		АН-67Б	0,056	0,281	2,348	0,015	0,022	0,03	0,515
11		ОР 107	0,059	0,442	2,117	0,017	0,023	0,04	0,404
12		ОК 10.71	0,071	0,670	2,156	0,015	0,024	0,05	0,431
13*	Св-08ХМ	АН-60	0,072	0,761	1,770	0,017	0,025	0,67	0,368
14*		АН-67Б	0,073	0,254	1,748	0,017	0,027	0,57	0,356
15		ОР 107	0,049	0,431	1,701	0,016	0,023	0,58	0,411
16*	S2Mo	ОК 10.74	0,059	0,613	1,740	0,016	0,028	0,07	0,461
17*	Св-08ГМ	ОК 10.74	0,060	0,618	1,600	0,017	0,029	0,06	0,470

Звездочкой отмечены номера вариантов ремонтных швов, выполненных за восемь проходов.

доли тех или иных легирующих элементов в замыкающих проходах исследуемых швов. Так, при сварке под флюсом чрезмерное количество марганца присутствует в случае применения проволоки Св-10Г2, кремния — флюса АН-60, ОК 10.71, ОК 10.74, хрома — проволоки Св-08ХМ, молибдена — проволоки Св-08Г1НМА, Св-08ГМ, Св-08ХМ, S2Mo. Такие же данные получены и при применении других способов сварки. Например, в металле ремонтных швов, свариваемых в защитном газе, возрастает содержание кремния (проволока Св-08ГА, особенно при сварке в смеси Ar + 20 % CO₂) или молибдена (проволока G MoSi). В металле последних проходов ремонтных швов, выполненных ручной дуговой сваркой электродами Schwarz 3K с массовым содержанием молибдена 0,50 %, выявлено повышенное количество этого элемента.

Увеличение содержания легирующих компонентов в металле ремонтных швов сопровождается, как отмечалось, соответствующим изменением его структуры. Так, при выполнении многослойных наплавки марганцовистой проволо-

кой Св-08ГА или Св-10Г2, когда содержание марганца в металле последних проходов возрастает до 2,4...2,8 %, в структуре металла, кроме игольчатых форм феррита, наблюдается значительное количество пластинчатого феррита с упорядоченной карбидной фазой, видманштеттвого феррита, а также отдельные участки полигонального доэвтектоидного феррита и перлита. Металлу с такой

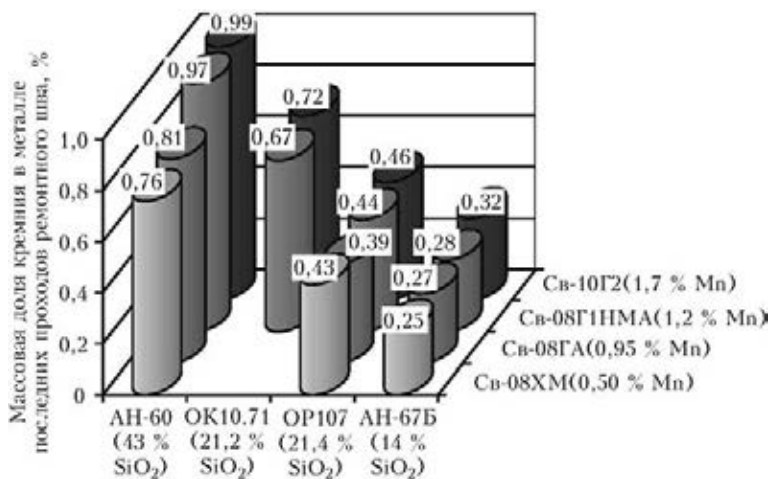


Рис. 4. Зависимость содержания кремния в металле последних проходов ремонтного шва от применяемых сварочных материалов (в скобках дано содержание марганца в проволоке и SiO₂ во флюсе)

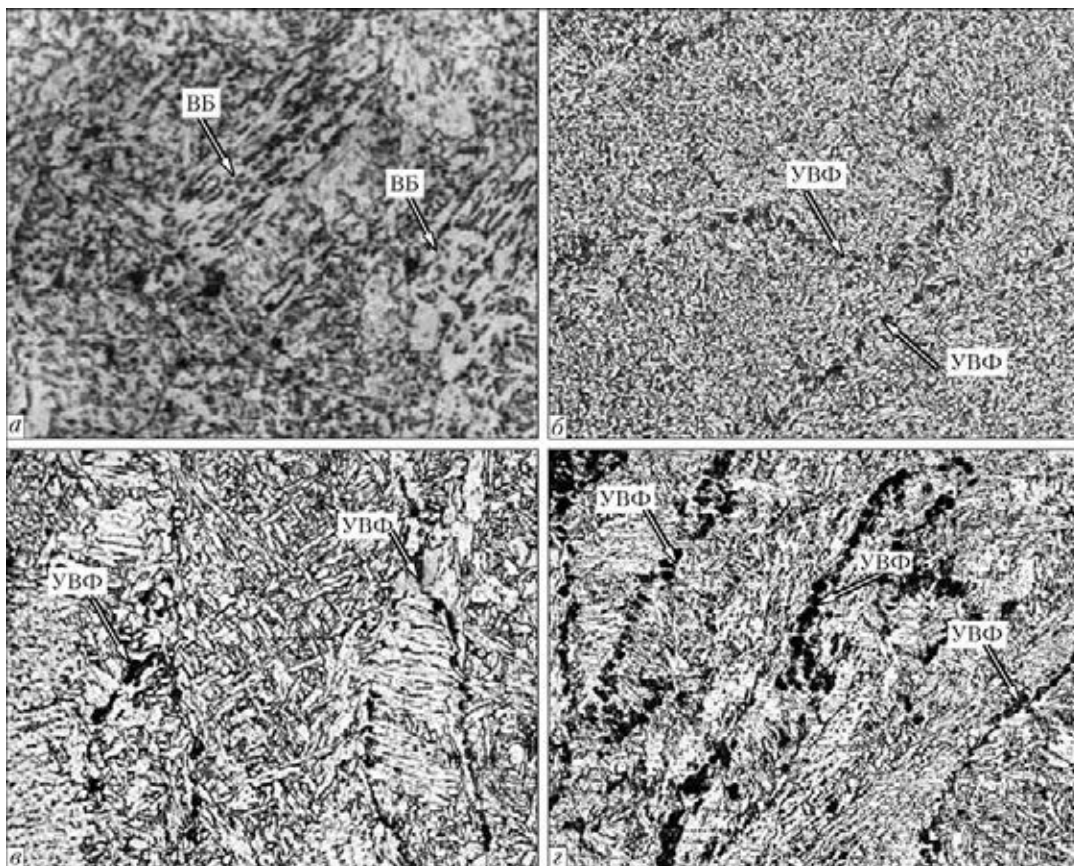


Рис. 5. Характерная микроструктура металла последних (а) и промежуточных (б–з) проходов ремонтных швов с повышенным содержанием легирующих элементов (травление в 4 % растворе азотной кислоты): а, б — механизированная сварка под флюсом: проволока S2Mo, флюс ОК 10.74 (табл. 2, вариант 16*), соответственно $\times 500$, 300; в — ручная сварка: электроды Schwarz 3K (табл. 2, вариант 1), $\times 500$; з — механизированная сварка в защитном газе: проволока G MoSi, Ar + 20 % CO₂ (табл. 2, вариант 4), $\times 500$ (ВБ — участки со структурой верхнего бейнита; УВФ — углеродистая вторая фаза (карбиды, МАК-фаза))

структурой присущи довольно низкие характеристики вязкости. Обогащение такого металла кремнием из флюса или проволоки приводит к дополнительному охрупчиванию ферритной матрицы.

При выполнении многослойных ремонтных швов легированными проволоками (Св-08Г1НМА, Св-08ХМ, Св-08ГМ, S2Mo, G MoSi) с массовой долей молибдена более 0,5 % из-за повышенного содержания марганца, молибдена и хрома, снижающих температуру превращения аустенита, в металле последних проходов, наряду с игольчатым ферритом, формируются участки верхнего бейнита (рис. 5, а), увеличивается количество МАК-фазы, образуется развитая сетка полигонизационных границ. Формирование отдельных полигонизационных границ в металле ремонтного шва, выполненного указанными проволоками, начинается при сварке второго прохода, а в третьем и последующих проходах эти границы располагаются в виде замкнутых контуров. Кроме того, в подвергнутом повторному нагреву металле промежуточных проходов, где содержание молибдена уже значительно, формируются пограничные образования углеродистой второй фазы: МАК-фа-

зы и карбидов (рис. 5, б). Аналогичные скопления углеродистой фазы по границам кристаллитов и полигонизационным границам присутствуют также в металле промежуточных проходов при ручной дуговой сварке (рис. 5, в; табл. 2, вариант 1) и сварке в защитном газе (рис. 5, з; табл. 2, вариант 4) электродами или проволокой, легированными молибденом. Указанные структурные особенности обуславливают пониженную стойкость металла таких ремонтных швов против образования трещин, что подтверждается наличием таких дефектов в исследуемых образцах в виде крупных трещин, выходящих на поверхность шва, и сетки микротрещин, локализующихся преимущественно по зернограничным образованиям углеродистой второй фазы: МАК-фазы и карбидов (рис. 6).

Известно, что для обеспечения вязких характеристик металла шва на микролегированной, в том числе трубной, стали в качестве легирующих элементов активно используют молибден (или молибден в сочетании с никелем). Например, при производстве труб для продольных или спиральных швов применяют проволоку типа S2Mo и S3NiMo [5]. Результаты наших испытаний на

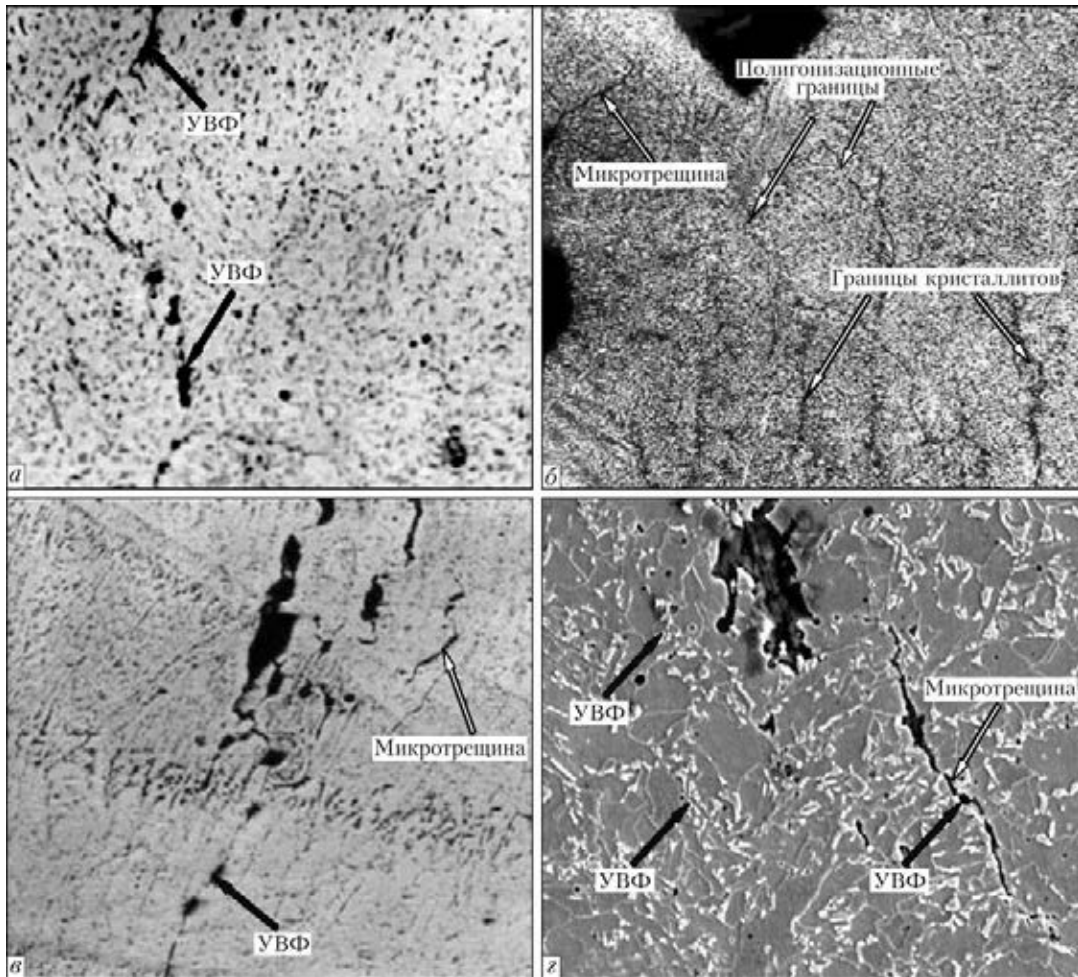


Рис. 6. Трещины в металле ремонтных швов: *а* — травление в горячем растворе пикрата натрия, $\times 500$; *б, в* — травление в насыщенном водном растворе пикриновой кислоты, соответственно $\times 50, 200$; *г* — травление в 4 % спиртовом растворе азотной кислоты, $\times 400$; *а-в* — оптическая; *г* — растровая электронная металлография

Таблица 3. Ударная вязкость металла многопроходного ремонтного шва при использовании различных сварочных материалов

Способ сварки	Номер варианта	Сварочные материалы	KCV, Дж/см ²	
			-20 °C	-40 °C
Ручная дуговая	1	Schwarz 3K	$\frac{65,5...107,0}{81,0}$	$\frac{40,3...61,2}{48,8}$
Механизированная в защитном газе	2	CO ₂ , Св-08Г2С	$\frac{27,6...34,3}{30,8}$	—
	3	Ar + 20 % CO ₂ , Св-08Г2С	$\frac{34,9...48,6}{42,9}$	—
	4	Ar + 20 % CO ₂ G MoSi	$\frac{74,5...124,4}{93,2}$	$\frac{31,8...63,8}{53,1}$
Механизированная под флюсом	5*	АН-60, Св-10Г2	$\frac{21,2...29,6}{25,0}$	—
	13*	АН-60, Св-08ХМ	$\frac{29,8...35,4}{32,2}$	—
	16*	OK 10.74, S2Mo	$\frac{65,9...75,8}{70,3}$	$\frac{37,7...42,4}{40,8}$
	17*	OK 10.74, Св-08ГМ	$\frac{77,8...109,8}{90,7}$	—

Примечание. Номера вариантов сварочных материалов даны согласно табл. 2.

ударный изгиб подтверждают также эффективность легирования металла многопроходных ремонтных швов указанными элементами с целью повышения его вязких свойств (табл. 3). Так, применение проволоки с молибденом при сварке ремонтных швов в смеси Ar + 20 % CO₂ (проволока G MoSi) и под агломерированным алюминатно-основным флюсом типа ОК 10.74 (проволока S2Mo и Св-08ГМ), как и ожидалось, позволило получить относительно высокие значения KCV при температуре -20 °C (в среднем более 70 Дж/см²) и -40 °C (в среднем более 40 Дж/см²). Однако структура металла последних проходов таких ремонтных швов, с точки зрения устранения опасности образования холодных трещин, осталась неприемлемой.

Результаты проведенных испытаний позволили сформулировать требования к химическому составу сварочной проволоки для исправления дефектов в швах труб с помощью многопроходной сварки.

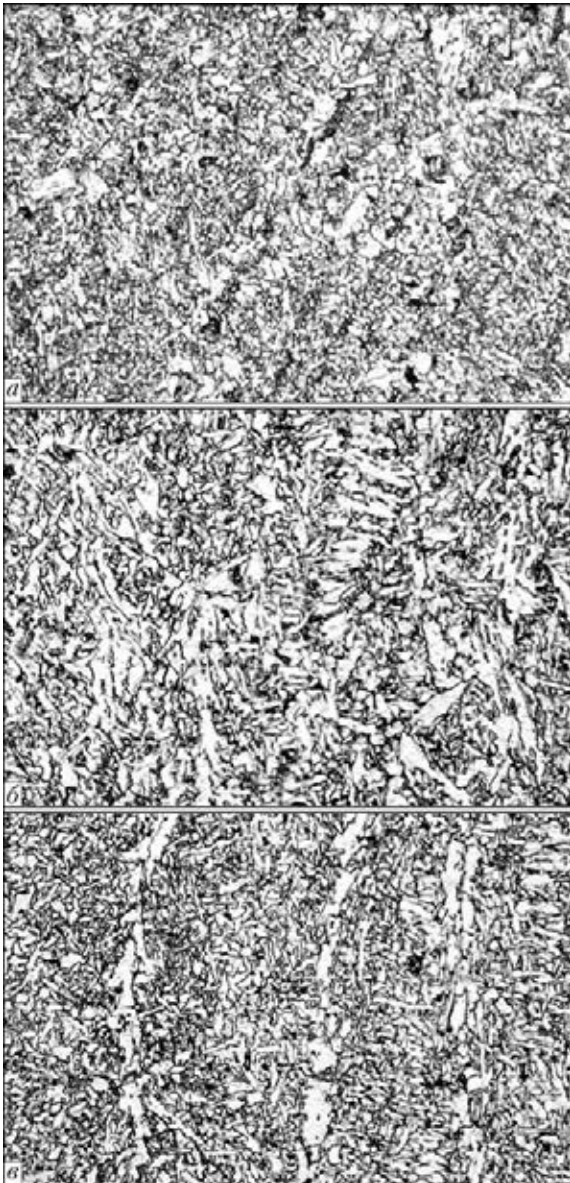


Рис. 7. Микроструктура ($\times 500$) металла различных проходов ремонтного шва, выполненного механизированной сваркой в смеси защитных газов $Ar + 20\% CO_2$ проволокой NiMo1-1G с ограниченным содержанием молибдена: а, б — промежуточные соответственно 2-3 и 5-6 проходы; в — последние проходы

Такая проволока должна содержать ограниченное количество марганца, кремния, а дополнительное легирование ее молибденом должно обеспечивать его присутствие в металле последних проходов многослойного ремонтного шва в количестве не более 0,30 %. При сварке под флюсом рекомендуемую проволоку следует применять в сочетании с флюсом, например, алюминатным, исключая чрезмерное обогащение металла многопроходного ремонтного шва марганцем и кремнием. Проволоку NiMo1-1G, химический состав которой следующий, мас. %: 0,081 С, 1,7 Мн, 0,57

Таблица 4. Химический состав металла ремонтных швов при сварке в смеси $Ar + 20\% CO_2$ проволокой NiMo1-1G, мас. %

Зона контроля	С	Мн	Si	Ni	Mo	Ti	V
Первые проходы	0,08	1,35	0,37	0,87	0,24	0,025	0,05
Закрывающие проходы	0,08	1,36	0,40	0,87	0,26	0,022	0,04

Si, 0,88 Ni, 0,04 V, 0,29 Mo, 0,056 Ti, 0,014 S, 0,017 P, испытывали при многопроходной (количество проходов — восемь) сварке в смеси $Ar + 20\% CO_2$, имитирующей исправление дефекта с предварительным его удалением в продольном шве трубы из стали X70 с толщиной стенки 18,7 мм. Применяемая проволока была дополнительно легирована небольшим количеством никеля. Данные спектрального анализа, приведенные в табл. 4, подтвердили достаточную стабильность химического состава ремонтных швов. Содержание основных легирующих элементов (марганца, кремния, никеля, молибдена, титана) в металле первых и замыкающих проходов практически не изменилось, при этом оно не превышало рекомендуемых значений.

При испытании на ударный изгиб образцов с острым надрезом металл ремонтных швов, выполненных данной проволокой, характеризовался высокими значениями ударной вязкости при температуре $-10\text{ }^\circ C$ (170,4...199,8 Дж/см²), $-20\text{ }^\circ C$ (140,9...170,2 Дж/см²) и $-40\text{ }^\circ C$ (67,8...136,2 Дж/см²). В то же время в металле такого шва, в том числе его последних проходов, формируется достаточно дисперсная структура игольчатого феррита при отсутствии полигонизационных границ и участков с грубыми зернограницными образованиями фаз с повышенным содержанием углерода: МАК-фаза, карбиды (рис. 7).

Результаты исследований могут быть использованы также при многослойной сварке других металлоконструкций.

1. ДСТУ ISO 3183-2:2006. Нафтогазова промисловість. Труби сталеві для трубопроводів. Технічні умови постачання. Частина 2. Труби класу вимог В.
2. ANSI/API Specification 5L. Specification for line pipes, ISO 3183:2007. Petroleum and natural gas industries, steel pipe for pipelines. Technical delivery conditions. — 2007. — 167 p.
3. DNV Offshore Standart DNV-OS-F101. Submarine pipeline systems. Det Norske Veritas. — 2007. — 240 p.
4. Рыбаков А. А., Филичук Т. Н., Гончаренко Л. В. Трещины в сварных соединениях труб большого диаметра и меры их предупреждения // Автомат. сварка. — 2013. — № 4. — С. 16–22.
5. Повышение ударной вязкости металла швов труб большого диаметра из микролегированных сталей / С. Л. Мандельберг, Ю. Л. Богачек, В. А. Ковалевский, В. С. Токарев // Там же. — 1986. — № 1. — С. 36–40.

Поступила в редакцию 11.07.2013