

PREVENTION OF COLD CRACKS IN HEAT AFFECTED ZONE IN UNDERWATER WELDING OF LOW-ALLOYED HIGH-STRENGTH STEELS**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ СВАРКЕ ПОД ВОДОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ**

Serhii Yu. Maksimov

maksimov@paton.kiev.ua

ORCID: 0000-0002-5788-0753

С. Ю. Максимов,

д-р техн. наук

The E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv*Институт электросварки им. Е.О. Патона, г. Киев*

Abstract. In the underwater welding of the low-alloyed high-strength steels of 17G1S or H60 types the unfavorable combination of the hardening structures and the high level of hydrogen leads to the cold cracking. The article aim is to clarify the mechanism of cold cracking and to suggest the measures of their prevention. The Tekken samples 14 mm thick were used for research which were welded under the water at a depth of 1 m. 5 polished sections were cut from each sample and the presence of cracks was determined. Various welding materials as well as the explosion treatment were used for welding. It is determined that the radical means of reduction of the diffusible hydrogen in the HAZ is the use of welding austenitic materials. The necessary and sufficient range of the equivalent weld metal alloying by chromium (17.5...23.0 %) and nickel (18...28 %) to prevent cold cracking is specified. The pre-shock-wave treatment of welded edges which forms a compression stress is also useful.

Keywords: underwater welding, low-alloyed steels, joint weld, heat-affected zone, cold cracks, water pipeline.

Аннотация. Рассмотрены меры по предотвращению образования холодных трещин в ЗТВ сварных соединений низколегированных сталей, выполненных под водой. Показано, что для решения поставленной задачи необходимо предотвратить поступление в ЗТВ из шва водорода в больших количествах. Это достигается путем применения электродных материалов аустенитного типа или созданием в основном металле вблизи линии сплавления зоны напряжений сжатия.

Ключевые слова: подводная сварка, низколегированные стали, сварное соединение, зона термического влияния, холодные трещины, водород.

Анотація. Розглянуто заходи з попередження утворення холодних тріщин у ЗТВ зварних з'єднань низколегованих сталей, виконаних під водою. Показано, що для розв'язання поставленої задачі необхідно запобігти значному навантаженню металу воднем у зоні термічного впливу. Це досягається застосуванням електродних матеріалів аустенітного типу або створенням в основному металі біля лінії сплавлення напружень стиску.

Ключові слова: підводне зварювання, низколеговані сталі, зварне з'єднання, зона термічного впливу, холодні тріщини, водень.

REFERENCES

- [1] Grivnyak I. *Svarivaemost staley* [Steels weldability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 215 p.
- [2] Kozlov R.A. *Svarka teploustoychivyykh staley* [Welding of heat-resistant steels]. Lvov, Mashinostroenie Publ., 1986. 160 p.
- [3] Maksimov S.Yu. Podvodnaya mokraya svarka stali 17G1S s predvaritelnoy obrabotkoy kromok vzryvom [Underwater wet welding of 17G1S steel with explosion pretreatment of welded edges]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 2004, no. 3, pp. 56–57.
- [4] Makhnenko V.I., Maksimov S.Yu., Koroleva T.V. Issledovanie osobennostey perenosa vodoroda pri podvodnoy svarkе plavleniem konstruktsionnykh staley [Study of hydrogen transfer features in underwater fusion welding of structural steels]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 2004, no. 1, pp. 12–22.

- [5] Savich I.M. [et al.]. Otsenka kriteriev svarivaemosti pod vodoy nizkolegirovannykh staley [Evaluation of underwater weldability criteria of low-alloyed steels]. *Svarivaemost i tekhnologiya svarki konstruksionnykh staley i chugunov – Weldability and welding technology of structural steels and cast iron parts*, 1985, pp. 22–26.
- [6] Pokhodnya I.K., Shvachko V.I., Portnov O.M. Matematicheskoe modelirovanie absorbtсии gazov metallom v protsesse svarki [Mathematical modeling of gas absorption by metal in the process of welding]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 2000, no. 7, pp. 13–17.
- [7] Petushkov V.G. et al. Uluchshenie svoystv svarnykh soedineniy putem predvaritelnoy obrabotki vzyryvom podlezhashchikh svarke kromok [Improvement of welded joints properties by explosion pretreatment of edges entitled to be welded]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 1992, no. 9–10, pp. 48–52.
- [8] Granjon H. Cold cracking in the welding of steels. *Welding in the world*, 1971, no. 11/12, pp. 382–396.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Сварные соединения малоуглеродистых и ряда низколегированных сталей сравнительно простого состава (типа 09Г2, 19Г), выполненные под водой электродными материалами ферритного типа, обладают достаточной стойкостью против образования холодных трещин (рис. 1,а). Однако при сварке низколегированных сталей повышенной прочности типа 17Г1С или Х60 образования трещин избежать не удается (см. рис. 1,б).

Определяющим фактором образования холодных трещин является неблагоприятное сочетание зака-

лочных структур и высокого уровня водорода. Учитывая ограниченность применения мер по смягчению термического цикла подводной сварки, более реальным путем решения данной проблемы может быть ограничение поступления в эту область сварного соединения водорода из металла шва.

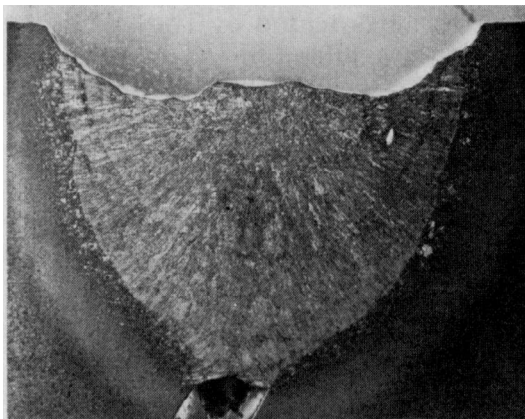
АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Как известно [1, 8], для образования холодных трещин в ЗТВ должны выполняться три условия:

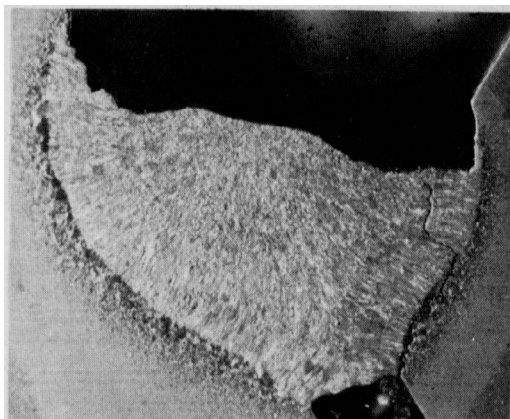
1. Микроструктура металла ЗТВ должна быть чувствительной к водороду. Такой структурой являются мартенсит и нижний бейнит, характерные для соединений низколегированных сталей повышенной прочности.
2. В зоне сварного соединения должен быть определенный минимум диффузионного водорода, источником которого служит преимущественно металл шва.
3. В зоне сварного соединения должны действовать растягивающие напряжения.

Проведенные исследования [5] показали, что в условиях сварки под водой повышенная склонность к образованию холодных трещин обусловлена в основном совместным воздействием первых двух факторов – наличием закалочных структур и повышенным содержанием диффузионного водорода. Кратковременность пребывания металла при высоких температурах несколько снижает степень влияния третьего из перечисленных выше факторов. Тем не менее, уровень напряжений, возникающих в результате деформационного цикла подводной сварки, в сочетании с большим количеством водорода и чувствительной к водородной хрупкости микроструктурой оказывается достаточным для образования подваликовых трещин.

Схематически процесс взаимодействия трех указанных факторов для случая сварки низколегированной стали повышенной прочности типа 17Г1С или Х60 представлен на рис. 2. Под воздействием термического цикла сварки в процессе нагрева металл ЗТВ претерпевает аустенитное превращение. После прохождения дуги по мере остывания в нем происходят обратные превращения.



а



б

Рис. 1. Макрошлифы пробы Теккен, выполненной порошковой проволокой ППС-АН1 на стали 09Г2 (а) и 17Г1С (б); ×5

Их характер и степень завершенности зависят от ряда факторов, в первую очередь от скорости охлаждения, химического состава, режима сварки и др. Превращения протекают шаг за шагом вдоль шва в направлении, противоположном перемещению дуги, т. е. для данного момента времени металл шва состоит из жидкометаллической ванны 1,

закристаллизовавшегося металла со структурой аустенита 2 и отделенного от него изотермой T_a начала распада аустенита участка 3, где превращение идет или уже закончилось. Таким же образом ЗТВ состоит из участка с нераспавшимся аустенитом 4 и отделенного от него изотермой T_m начала мартенситного превращения участка с мартенситной структурой 5.

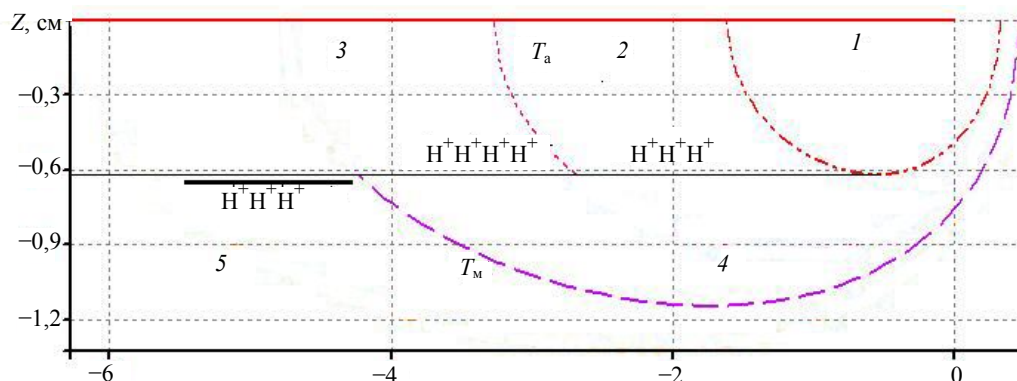


Рис. 2. Схема процесса образования подваликовых трещин в ЗТВ

При высокой температуре водород диссоциирует на атомы или протоны и растворяется в сварочной ванне. При кристаллизации, пока в металле шва сохраняется аустенитная структура, перераспределение его между швом и ЗТВ практически не происходит. С началом перлитного превращения (изотерма T_a) в металле шва подвижность водорода резко возрастает и он начинает перемещаться в ЗТВ. До начала распада в ней аустенита водород скапливается вблизи линии сплавления, не диффундируя вглубь основного металла. По мере дальнейшего охлаждения в ЗТВ начинаются структурные превращения. Но так как фронт превращений движется от периферийных участков в направлении шва, он встречается с фронтом диффузии водорода. Как известно, сталь с мартенситной структурой имеет высокие остаточные локальные напряжения, приводящие к образованию участков с растянутой кристаллической решеткой. Являясь ловушками для растворенного водорода, эти участки сильно понижают его диффузионную подвижность. Таким образом, образовавшаяся прослойка мартенсита является как бы «запирающим» слоем для дальнейшей диффузии водорода. В результате складывается ситуация, когда участок металла ЗТВ, прилегающий к линии сплавления и в котором распад аустенита происходит в последнюю очередь, оказывается более всего насыщен водородом. Чем выше скорость охлаждения, тем больше наклон изотермы T_m к линии сплавления. Поэтому этот участок ЗТВ получается закатым между двумя участками металла (со стороны шва и основного металла), в которых превращения уже закончились, а следовательно, неподвижными. В ре-

зультате здесь возникает напряженное состояние, которое при достаточном количестве водорода может вызвать образование трещины.

Такой механизм образования холодных трещин в ЗТВ позволяет наметить меры по их предотвращению. Как уже было сказано выше, практически применить в условиях сварки под водой термическую обработку довольно сложно. Поэтому избежать образования закалочных структур в околосшовной зоне вряд ли удастся. Значит, необходимо предотвратить поступление в нее из шва водорода в больших количествах. Одним из традиционных в практике сварки на воздухе подходов к решению этой задачи является использование электродных материалов, обеспечивающих образование аустенитного металла шва. При этом также увеличивается податливость металла шва, что способствует снижению уровня напряжений. С другой стороны, известно [6], что при исследовании влияния механического и фазового наклепа на водородопроницаемость железа и его сплавов наблюдалось торможение диффузии водорода, связанное с возрастанием энергии активации. А в работе [2] показано, что диффузионный водород перемещается в зоны металла, где имеются растягивающие напряжения, так как там растворимость водорода выше. Поэтому реализация обоих указанных подходов в условиях мокрой подводной сварки также должна принести положительный результат.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ – уточнить механизм образования холодных трещин в ЗТВ сварных соединений низколегированных сталей, выполненных под водой, и предложить меры по их предупреждению.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Приведенные в [4] результаты численных исследований влияния состава металла шва на его структуру показали, что при выборе уровня легирования металла шва необходимо обеспечить достаточный запас аустенитности участков, прилегающих к линии сплавления. Для определения условий предотвращения образования в металле шва хрупкой прослойки численным методом было исследовано влияние степени легирования на долю образующегося мартенсита. Для этого имитировали легирование металла шва никелем в пределах 12...25 % и хромом в пределах 11...15 %. Результаты вычислений (рис. 3) показали, что для минимизации доли мартенсита, который образовывается в прослойке металла шва близ линии сплавления, никелевый и хромовый эквиваленты последнего должны лежать выше линии на диаграмме состояния, которая параллельна линии, разделяющей области с аустенитной и аустенитно-мартенситной структурой и проходящей через точку с координатами $Ni_{экв} = 24,2 \%$ и $Cr_{экв} = 14,3 \%$. При этих условиях твердость прослойки находится на уровне твердости окружающего металла (рис. 4).

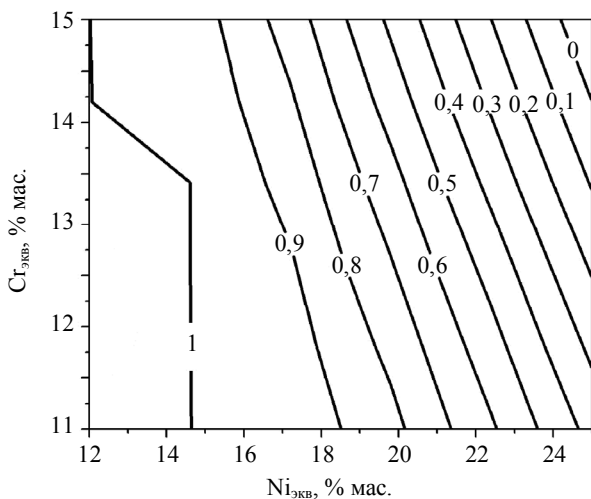


Рис. 3. Влияние легирования аустенитного металла шва на долю мартенсита в прослойке

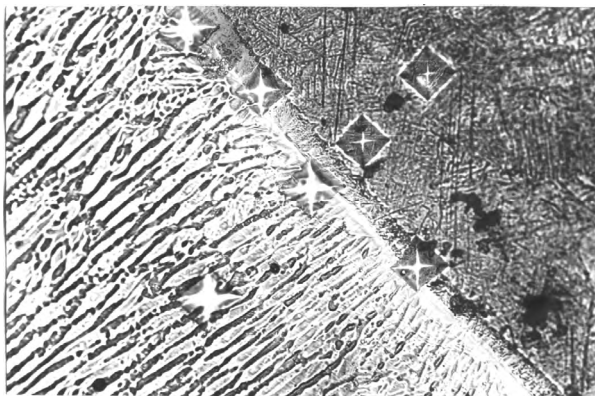


Рис. 4. Параллельная граница с прослойкой низкой твердости; $\times 650$

Для проведения испытания технологической прочности сварных соединений были изготовлены партии экспериментальных электродов диаметром 4 мм с покрытием рутил-флюоритного типа. В качестве стержней были выбраны сварочные проволоки, уровень легирования которых соответствовал требованиям, установленным выше. В связи с ограниченным кругом доступных высоколегированных проволок состав металла шва моделировали путем закладывания в корень шва легированных стержней и предварительной облицовкой кромок хромоникелевым сплавом. Образцы Теккен толщиной 14 мм из стали 17Г1С сваривали в лабораторном бассейне на глубине 1 м. Из каждого образца вырезали по 5 шлифов, по которым определяли наличие трещин.

Облицовка кромок оказалась неэффективной, так как в условиях подводной сварки не удастся обеспечить равномерную толщину наплавленного металла. Закладывание в разделку высоколегированных прутков позволило изменять химический состав наплавленного металла в достаточно широких границах. В результате металлографических исследований сечений макро- и микрошлифов, которые были вырезаны из образцов Теккен, установлено, что с позиций предотвращения как холодных трещин в ЗТВ, так и горячих трещин в наплавленном металле, необходимый и достаточный диапазон легирования совместно хромом и никелем определяется следующими величинами: хромовый эквивалент – 17,5...23,0 %, никелевый эквивалент – 18...28 %. В качестве примера на рис. 5 приведен макрошлиф пробы Теккен, выполненной электродами со стержнями из проволоки Св.-10Х16Н25АМ6.

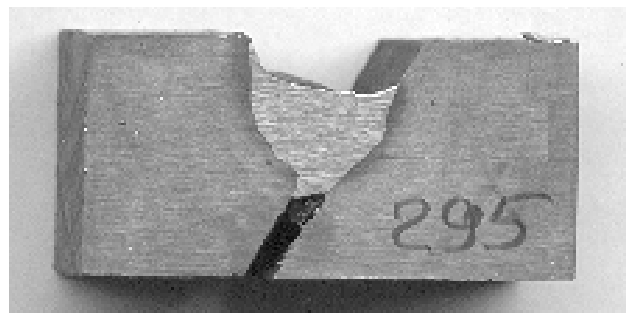


Рис. 5. Макрошлиф технологической пробы Теккен; $\times 3,5$

В начале 80-х годов XX столетия в ИЭС было предложено использовать обработку взрывом кромок, подготовленных к сварке плавлением, для улучшения свойств сварных соединений [7]. Возникающий при взрыве заряда взрывчатых веществ (ВВ) импульс давления приводит к возбуждению в металле ударной волны, которая вызывает дробление зерен и нарушение сплошности сульфидных строчек, увеличение концентрации дефектов кристаллической решетки. В результате при последующем сварочном нагреве это создает благоприятные условия для

возникновения большого количества центров перекристаллизации. Рост зерен тормозится, сужая ширину зоны крупного зерна в ЗТВ. Поэтому использование предварительного ударно-волнового нагружения свариваемых кромок может служить инструментом для снижения опасности образования холодных трещин при сварке под водой.

Результаты исследований применительно к условиям сварки под водой [3] показали следующее. Опыты проводились на пластинах 14×150×200 мм из стали 17Г1С, содержащей 0,19 % С, 0,49 % Si, 1,43 % Mn, 0,021%P и 0,033 % S и характеризующейся высокой склонностью к образованию холодных трещин. Взрывное нагружение осуществляли по схеме косых ударных волн, возбуждаемых в металле скользящей по поверхности детонационной волной. После обработки в лабораторном бассейне на глубине 1 м выполнялась сварка порошковой проволокой ППС-АН1 на режимах $I_{св} = 180 \text{ А}$, $U_{д} = 32 \text{ В}$, $V_{св} = 6 \text{ м/ч}$. Затем из образцов изготавливали поперечные шлифы и подвергали их металлографическому исследованию. Результаты сравнивали с результатами исследования образцов, сваренных без обработки.

Первую серию образцов подвергали обработке шнуровым контактным зарядом ДША-12, уложенным по периодической кривой. При этом стремились, чтобы ширина зоны, охваченной зарядом ВВ, максимально совпадала с зоной действия остаточных растягивающих напряжений, которые образовались бы в данном сварном соединении при выбранных режимах сварки. Во второй серии образцов использовали полосовые заряды пластичных ВВ НИЛ-2 (с давлением на фронт детонации 1,0; 2,0 и 2,5 ГПа) и эластит типа В84-1994-82 (с давлением 20 ГПа). В обеих сериях заряд укладывали на лицевую и обратную поверхность пластин (т. н. плоский способ наложения заряда).

Результаты измерений ширины участка крупного зерна ЗТВ и его микроструктура приведены в табл. 1 и на рис. 6. Из таблицы видно, что более заметное сужение зоны крупного зерна происходит при использовании полосового заряда пластичных ВВ, особенно НИЛ-2. Однако избежать образования холодных трещин не удалось (рис. 7,а), хотя их количество заметно уменьшилось по сравнению с необработанными образцами.

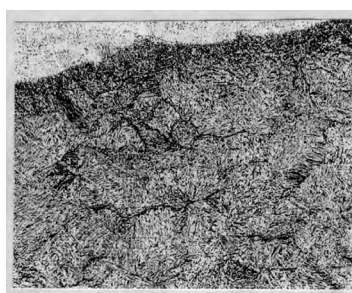
Таблица 1. Влияние типа заряда ВВ и способа его наложения на ширину участка крупного зерна в ЗТВ

Тип заряда ВВ	Способ наложения заряда	Ширина участка крупного зерна, мкм
1. Без обработки	—	1652...1950
2. ДША-12	Плоский	1495...1950
3. Эластит	Плоский	1755...1820
4. НИЛ-2	Плоский	1300...1365
5. Эластит	Объемный	1300...1365
6. НИЛ-2	Объемный	780...1170

Для усиления эффекта обработки ВВ в следующей серии образцов заряд НИЛ-2 накладывался не только на лицевую и обратную, но и на торцевую поверхность свариваемых кромок. Благодаря такому расположению к поперечной деформации, которая возникает под действием встречных волн от заряда ВВ, находящегося на лицевой и обратной плоскостях, добавляется продольная деформация, которую обуславливает заряд ВВ на торцевой плоскости. В процессе двумерного перемещения металла достигается большая степень деформации, которая приводит к еще большему измельчению зерен в области ЗТВ, прилегающей к линии сплавления (см. табл. 1). При этом нарушается текстура в металле, что приводит к разрушению и локализации строчечных неметаллических включений.



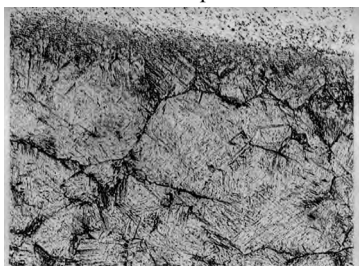
Без обработки



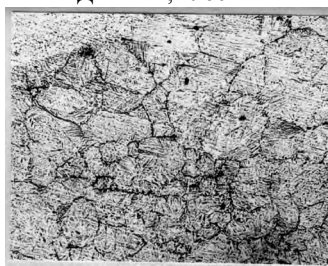
ДША-12, плоский



Эластит, плоский



НИЛ-2, плоский



Эластит, объемный



НИЛ-2, объемный

Рис. 6. Влияние типа заряда взрывчатых веществ и способа его наложения на структуру участка крупного зерна ЗТВ сварного соединения стали 17Г1С; ×350

Кроме того, возникающие в обработанном металле сжимающие напряжения [9] ликвидируют благоприятные условия для диффузии водорода из металла шва в около-

шовную зону. Совместное воздействие перечисленных факторов в конечном итоге препятствует образованию холодных трещин в ЗТВ (см. рис. 7,б).

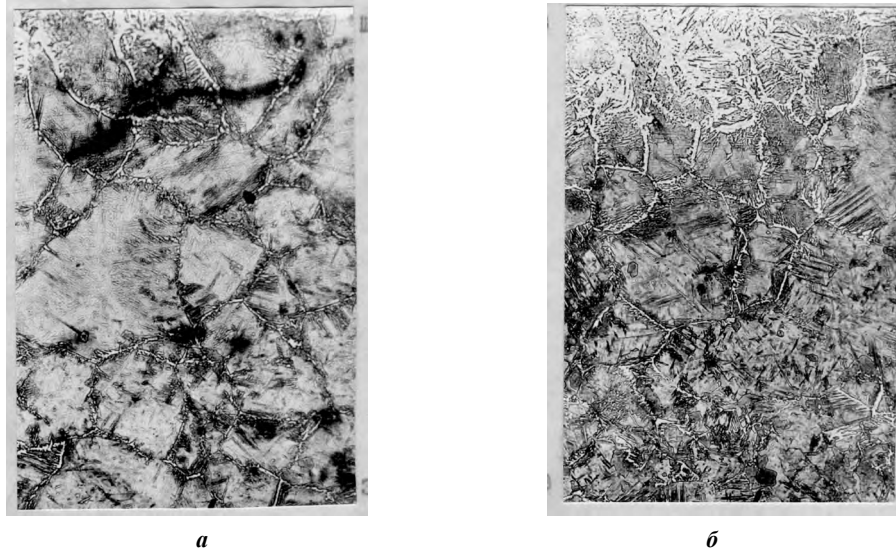


Рис. 7. Микроструктура ЗТВ сварного соединения стали 17Г1С, выполненного под водой ($\times 500$): а – обработка плоским полосовым зарядом (эластит); б – обработка объемным зарядом (НИЛ-2)

ВЫВОДЫ

1. Радикальной мерой снижения содержания водорода (как диффузионного, так и остаточного) в ЗТВ является применение электродных материалов аустенитного типа, однако при этом основная задача предотвращения трещин не решается в случае образования хрупкой мартенситной прослойки повышенной твердости (до HV430).

2. В результате исследований по выбору состава металла шва с позиций предотвращения трещин

установлен необходимый и достаточный диапазон легирования совместно хромом и никелем, который определяется следующими данными: хромовый эквивалент – 17,5...23,0 %, никелевый эквивалент – 18...28 %.

3. С позиции предотвращения околошовных трещин полезной технологической мерой является предварительная ударно-волновая обработка кромок, создающая зону напряжений сжатия и таким образом снижающая интенсивность диффузии водорода в металл ЗТВ в процессе его перераспределения в сварном соединении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гривняк, И. Свариваемость сталей [Текст] / И. Гривняк. – М. : Машиностроение, 1984. – 215 с.
- [2] Козлов, Р. А. Сварка теплоустойчивых сталей [Текст] / Р. А. Козлов. – Л., Машиностроение, 1986. – 160 с.
- [3] Максимов, С. Ю. Подводная мокрая сварка стали 17Г1С с предварительной обработкой кромок взрывом [Текст] / С. Ю. Максимов // Автоматическая сварка. – 2004. – № 3. – С. 56–57.
- [4] Махненко, В. И. Исследование особенностей переноса водорода при подводной сварке плавлением конструкционных сталей [Текст] / В. И. Махненко, С. Ю. Максимов, Т. В. Королева // Автоматическая сварка. – 2004. – № 1. – С. 12–22.
- [5] Оценка критериев свариваемости под водой низколегированных сталей [Текст] / И. М. Савич [и др.] // Свариваемость и технология сварки конструкционных сталей и чугунов : сб. науч. ст. – К. : ИЭС им. Е.О. Патона, 1985. – С. 22–26.
- [6] Походня, И. К. Математическое моделирование абсорбции газов металлом в процессе сварки [Текст] / И. К. Походня, В. И. Швачко, О. М. Портнов // Автоматическая сварка. – 2000. – № 7. – С. 13–17.
- [7] Улучшение свойств сварных соединений путем предварительной обработки взрывом подлежащих сварке кромок [Текст] / В. Г. Петушков [и др.] // Автоматическая сварка. – 1992. – № 9–10. – С. 48–52.

- [8] **Granjon, H.** Cold cracking in the welding of steels [Text] / H. Granjon // Welding in the world. – 1971. – № 11/12. – P. 382–396.
- [9] Investigation of stressed state of 17G1S steel welded joints in wet underwater welding [Text] / M. L. Lobanov [et al] // Proc. Int. Conf. – Helsinki, 4–5 Sept. 1989. – P. 137–140.

© С. Ю. Максимов

Надійшла до редколегії 17.05.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *В. Ф. Квасницький*