

УДК 621.791.85.011:546/56:669

Кабацкий В. И., Кабацкий А. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ

Холодные трещины, как известно, являются наиболее распространенным дефектом при сварке легированных сталей. При этом образование и развитие холодных трещин определяется комплексом факторов, воздействие каждого из которых зависит от состава основного металла, вида сварной конструкции, способа сварки и др.

В ряде работ [1, 2] показано, что перспективным путем борьбы с холодными трещинами может служить нитридное модифицирование металла шва сварных соединений. Рассмотренные в работах [2, 3] исследования позволили выбрать перспективную легирующую основу, позволяющую осуществлять разработку электродных материалов для сварки закаливающих сталей.

Целью работы являлось исследование стойкости против холодных околошовных трещин (отколов) при различных видах модифицирования сварных швов.

Выше было установлено, что рассмотренный способ легирования и модифицирования обеспечивает получение комплекса оптимальных показателей прочности и пластичности низколегированного высокопрочного металла сварных швов в сочетании с их стабильно высокой стойкостью против образования холодных трещин в металле швов. Эти задачи более-менее успешно решаются при сварке низкоуглеродистых легированных сталей с содержанием углерода до 0,2–0,25%.

Для исследования склонности к образованию отколов были выполнены испытания стойкости против холодных трещин использовании рассмотренных в работе [3] электродных материалов с нитридным модифицированием. Были испытаны электроды с добавками титана и ванадия, а также электроды, в покрытие которых вводили азот и нитридообразующие элементы. Расчетный состав металла сварных швов приведен в табл. 1.

Предварительный выбор параметров легирования производился на основании полученных в [2] результатов изменения пластичности и вязкости металла, а также стойкости сварных швов против трещин. С учетом этого для проведения исследований было выбрано следующее соотношение легирующих элементов: 0,09–0,11 % С; 1,4–1,6 % Мn; 0,3–0,6 % Si; 0,1–0,3 % Cr; 1,4–1,6 % Ni; 0,4–0,6 % Mo.

Стойкость против трещин при использовании опытных сварочных материалов определяли по методу Теккен. Электродами диаметром 4 мм заваривали пластины толщиной 15 мм из стали 33ХСН2МА по методике, описанной в работах [2, 4].

Установлено (табл. 2), что пробы с металлом типа 10ХГНМТФ имеют невысокую сопротивляемость отколам – трещина появилась через 30–40 минут после сварки. При модифицировании азотом и ванадием была достигнута более высокая, хотя и недостаточно стабильная, стойкость против околошовных трещин – разрушение образцов в ряде испытаний не наблюдалось, либо было минимальным (надрыв в корне шва на шлифе). В то же время, как показывают испытания, дополнительное введение в модифицированный азотом и ванадием наплавленный металл титана или алюминия приводит к существенному ухудшению стойкости против трещин (см. табл. 2).

Вместе с тем, найденные в ходе экспериментальных исследований соотношения добавок модификаторов, хотя и позволяют значительно повысить трещиностойкость, не обеспечивают стабильности получаемых результатов. Таким образом, результаты испытаний показывают, что при сварке легированных сталей с более высоким содержанием углерода

(особенно, выше 0,3 % С) на первый план выходит проблема стабильного предотвращения образования отколов – трещин в зоне термического влияния соединений. С учетом отмеченных различий в стойкости против холодных трещин при испытании электродов с различиями в модифицировании представляется необходимым провести дополнительные исследования особенностей зарождения и распространения разрушения и, в частности, отколов в сварных соединениях среднеуглеродистых низколегированных сталей типа 30ХГСА, 33ХСН2МА, 35ХМ и др.

Таблица 1

Химический состав металла шва для экспериментальных сварочных материалов

Металл шва	Содержание элемента, %									
	С	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Al	Ti	N
10ХГНМТФ	0,10	1,5	0,5	0,3	1,5	0,5	0,05–0,15	–	0,05–0,1	–
10ХГНМАФ	0,10	1,5	0,5	0,15–0,5	1,5	0,5	0,05–0,15	–	–	0,025–0,035
10ХГНМАФТ	0,10	1,5	0,5	0,4	1,5	0,5	0,1	–	0,05–0,15	0,03
10ХГНМАФЮ	0,10	1,5	0,5	0,4	1,5	0,5	0,1	0,05–0,15	–	0,03

Таблица 2

Стойкость против отколов при испытании опытных электродов

Марка электрода	Марка стали	Наличие трещин в пробе Теккен		Примечание
		Визуально	по макрошлифу	
10ХГНМТФ	33ХСН2МА	Есть	–	5 часов – смешанная; < 1 часа – ЗТВ
10ХГНМАФ	– –	Нет	Нет	–
		–	Есть	24 часа, надрыв на шлифе
		Есть*	–	Трещина через > 8 часов
		Есть*	–	Трещина через 7 часов
10ХГНМАФТ		Есть	–	3 часа – ЗТВ; 2 часа – смешанная
10ХГНМАФЮ		Есть	–	3,5 часа; 2 часа – смешанная

* Результаты повторных испытаний при тиражировании электродов.

Для решения поставленных задач было выполнено детальное изучение распространения трещин-отколов в металле сварных соединений. На первом этапе работы нами было предпринято исследование траекторий развития холодных трещин микроскопическими методами. Такие исследования, по мнению Э. Л. Макарова [4], позволяют во многих случаях

выявить типичные признаки этого вида разрушения. Изучение проводилось на микрошлифах, полученных из натуральных сварных соединений, из образцов технологической пробы Теккен, а также «жесткой» пробы. Результаты металлографических исследований представлены на рис. 1. Можно видеть, что очень часто наблюдается переход трещин из металла шва в околошовную зону и обратно. При этом необходимо отметить, что разрушение во многих случаях захватывает участок зоны сплавления соединений, подвергающийся полной или частичной перекристаллизации при сварке. Можно также наблюдать, как трещина распространяется по линии сплавления или параллельно ей, но в непосредственной близости – по так называемому участку подплавления (рис. 1).

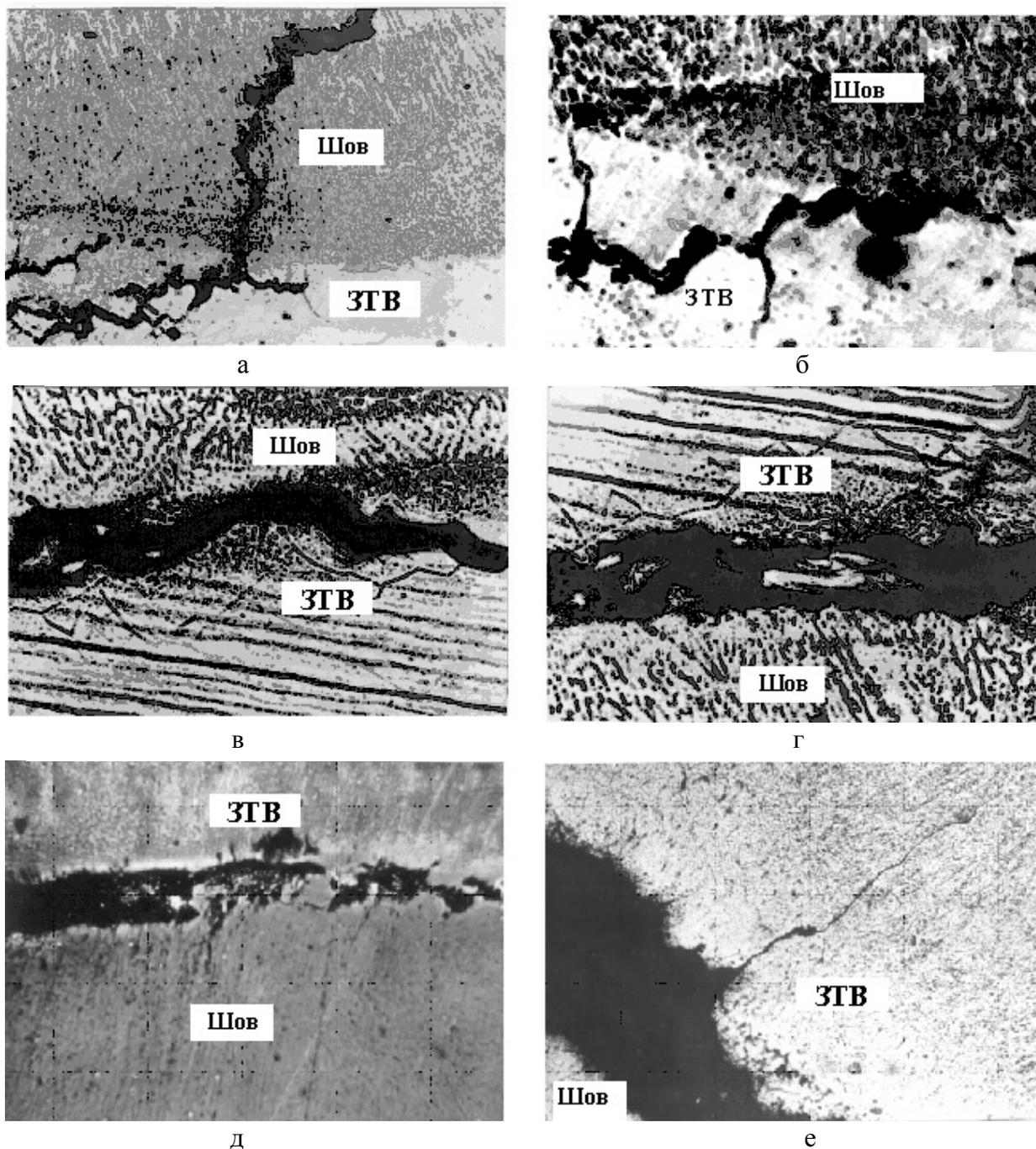


Рис. 1. Траектория развития разрушения в сварных соединениях стали 33XCH2MA с низколегированным швом:

а–д – травление на первичную структуру ($\times 125$); е – на вторичную структуру ($\times 500$)

Довольно часто также наблюдаются микротрещины именно в переходной зоне на имеющихся здесь дефектах (непроварах, включениях и т. п.) (рис. 2, а–д). Видно также, что на начальном участке распространения трещины в металле часто отмечаются скопления неметаллических включений, имеющих сложную форму с острыми углами. Таковыми могут быть карбонитриды, оксикарбонитриды, окси- и карбосульфиды, сложные шпинели, силикатные стекла и т. п. Во многих случаях микротрещины обнаружены в участках с повышенным содержанием пленочных и строчечных включений (рис. 2, а, в), которые, по-видимому, являются легкоплавкими сульфидными эвтектиками.

Существенна роль включений также и в распространении трещин. На рис. 2, е показано развитие разрушения, траектория которого проходит по вытянутым в строчку включениям.

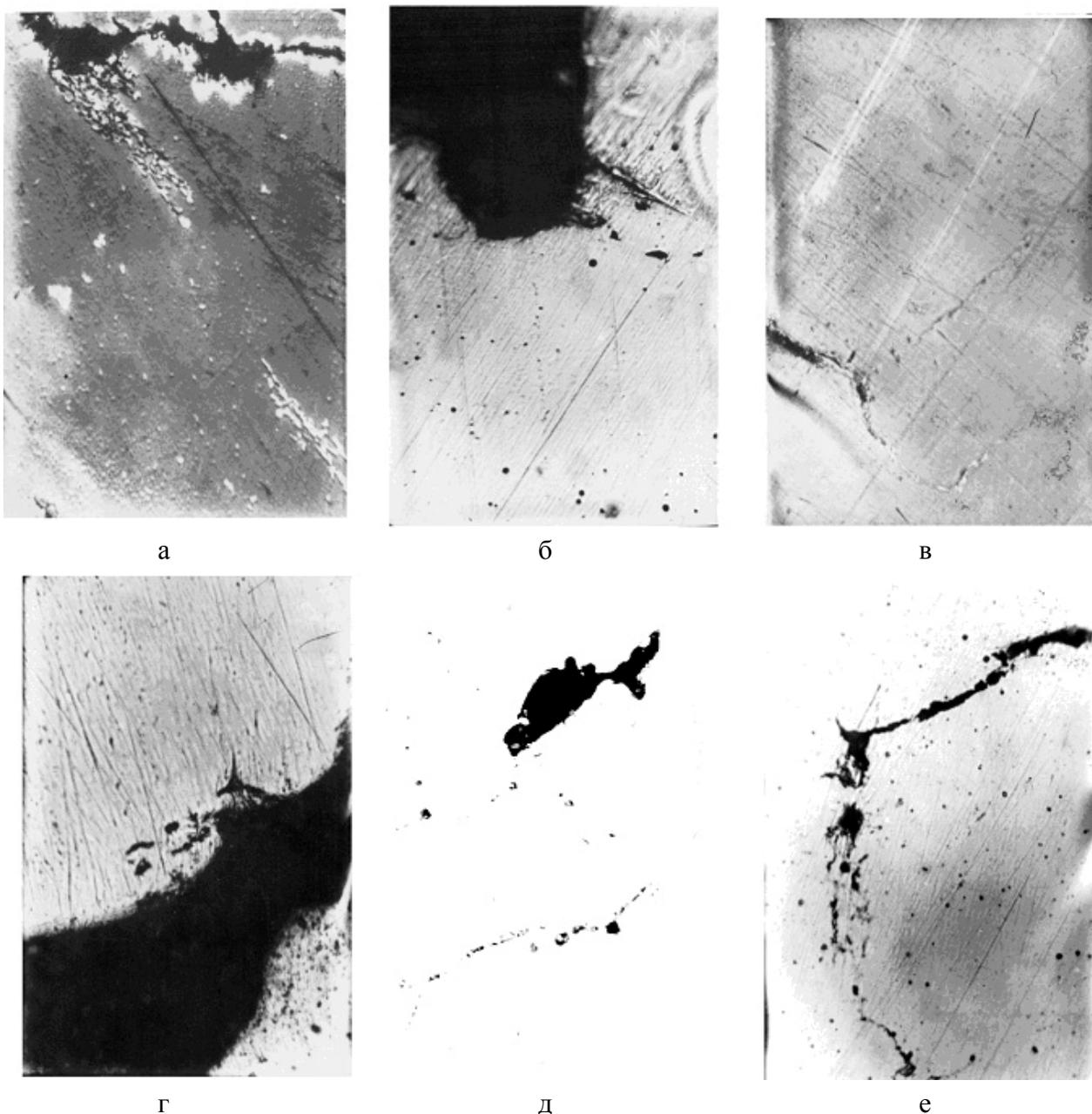


Рис. 2. Горячие надрывы в зоне сплавления стали 33XCH2MA с низколегированным швом ($\times 1500$):

а – проходящие по оплавленной сульфидной строчке; в, д – по сульфидным пленкам; б, г, е – по карбосульфидным фазам

Рассматривая возможные причины значительности роли зоны сплавления в процессе образования холодных трещин, следует учитывать следующее:

1. Физическое состояние зоны сплавления, характеризующееся повышенной дефектностью кристаллической решетки. Это выражается в скоплении здесь точечных и линейных дефектов (вакансий, дислокаций) [6, 7] и объясняется тем, что данная зона по сути дела представляет собой очень узкий переход между различными по структуре и содержанию примесей и легирующих элементов участками.

2. Развитие химической неоднородности, в частности, повышенная концентрация легирующих элементов и примесей (углерода, кислорода, серы, фосфора и др.), имеющих повышенную склонность к ликвации [8]. Это приводит к появлению скоплений неметаллических включений в полосе неоднородности у границы сплавления.

3. Неравномерность распределения водорода в сварном соединении [9] и повышение его концентрации в переходной зоне, имеющие место вследствие развития локальной пластической деформации и концентрации растягивающих напряжений вблизи надрезов, дислокаций и включений.

4. Значительное развитие в переходной зоне процесса межзеренного проскальзывания, повышающее вероятность образования и распространения разрушения. [10]. Сегрегация включений на межзеренных участках приводит к торможению дислокаций, создавая все условия для формирования локальных участков с повышенной концентрацией дефектов («зон предразрушения»), характеризующихся также существованием полей локальных пиковых напряжений в металле, которые суммируются с действующими в соединении сварочными напряжениями и обуславливают образование микротрещин и развитие процесса замедленного разрушения.

ВЫВОДЫ

Таким образом, результаты проведенных исследований подтверждают сделанные ранее предположения о достаточно высокой вероятности зарождения и развития разрушения в зоне сплавления сварных соединений. Описанные исследования позволяют также определить некоторые дальнейшие меры борьбы с данным видом разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Структура и свойства зоны термического влияния сварных соединений высокопрочной стали мартенситного класса / В. И. Кабацкий, В. В. Подгаецкий, Д. П. Новикова и др. // Автоматическая сварка. – 1988. – № 1. – С. 16–20.
2. Кабацкий В. И. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства низколегированных высокопрочных сварных швов / В. И. Кабацкий, А. В. Кабацкий, В. М. Карпенко // Вестник Приазовского государственного технического университета. – Мариуполь, 1998. – Вып. 6. – С. 254–259.
3. Кабацкий В. И. Влияние характера модифицирования на свойства высокопрочных низколегированных сварных швов [Электронный ресурс] / В. И. Кабацкий, А. В. Кабацкий // Вісник ДДМА : сб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 3Е (14). – С. 66–71. – Режим доступа: <http://www.dgma.donetsk.ua/publish/vesnik/pdf/10.pdf>
4. Кабацкий А. В. Низколегированные электродные материалы для сварки закаливающихся сталей / А. В. Кабацкий // Вестник ПГТУ. – Мариуполь, 1998. – Вып. 6. – С. 260–264.
5. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей / Э. Л. Макаров. – М. : Машиностроение, 1981. – 247 с.
6. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т. 2. Внутренние напряжения, деформации и фазовые превращения / Н. Н. Прохоров. – М. : Металлургия, 1976. – 600 с.
7. Одинг И. А. Теория дислокаций в металлах и ее применение / И. А. Одинг. – М. : Изд-во АН СССР, 1959. – 127 с.
8. Влияние сульфидных включений в зоне сплавления аустенитных швов с перлитной сталью на склонность соединений к образованию трещин – отрывов / Кирьяков В. М., Парфессо Г. И., Подгаецкий В. В. и др. // Автоматическая сварка. – 1990. – № 10. – С. 7–10.
9. Распределение водорода в сварном соединении легированной стали и его влияние на образование холодных трещин / В. Ф. Мусияченко, С. Б. Касаткин и др. // Автоматическая сварка. – 1985. – № 9. – С. 3–8.
10. Чернышова Т. А. Границы зерен в металле сварных соединений / Т. А. Чернышова. – М. : Наука, 1986. – 126 с.