ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Материаловедение

УДК 621.791:669.14/.15

Влияния термического цикла сварки на трещиностойкость, структуру и свойства низколегированных сталей, применяемых в условиях Арктики и Субарктики

М.С. Бисонг^{*,**,***}, В.Е. Михайлов^{**,***}, В.В. Лепов^{***}, С.Н. Махарова^{***}

*Университет Дуаля, Камерун,

Аннотация. Для оценки влияния термического цикла сварки на свойства зоны термического влияния исследована микротвердость девяти жестких проб сварных образцов, изготовленных из низколегированной трубной стали 14X2ГМР, испытанных, и образца из стали Ст3сп, подвергшегося действию усталостного малоциклового нагружения. Было выявлено, что температура внешней среды в диапазоне от -40°C до +20°C практически не влияет на распределение микротвердости в зоне сварки и 3ТВ, несмотря на существенную разницу в скоростях охлаждения. Также исследования показали, что возникающие трещины растут преимущественно вдоль границ зерен мартенсита и бейнита (как перехлаждённого аустенита) в 3ТВ стали 14X2ГМР, однако могут наблюдаться и трещины, пересекающие тело зерна. В образце из стали Ст3сп холодные трещины наблюдаются как в зоне сварки, так и в 3ТВ, и имеют преимущественно межзеренный характер, даже несмотря на более мягкие по сравнению с принятыми технологическими пробами на трещиностойкость условиями испытания.

Ключевые слова: микротвердость, термический цикл сварки, зона термического влияния, рост трещин, граница зерна, модуль упругости.

Благодарности: Работа выполнена по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук (проект III.28.1.1.) с использованием оборудования ЦКП «Станция натурных испытаний» ИФТПС СО РАН

Welding thermal cycling influence on crack resistance, structure and hardness for low-alloy high strength steel

Mbelle Samuel Bisong*,**,***, V.E. Mikhailov**,***, V.V. Lepov***, S.N. Makharova***

БИСОНГ М.С. (Mbelle Samuel Bisong) – преподаватель кафедры сварки в университете Дуаля, университете Дчанг, Камерун; аспирант ФТИ СВФУ; МИХАЙЛОВ Владимир Егорович – к.т.н., преподаватель, в.н.с.; ЛЕПОВ Валерий Валерьевич – д.т.н., зам. дир. по научной работ; МАХАРОВА Сусанна Николаевна – к.т.н., с.н.с. отдела материаловедения

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ, Т.23, №1, 2018

^{**}Физико-технический институт, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

^{***}Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия mbellesabi@yahoo.com, wisecold@mail.ru

*Университет Дуаля, Камерун,

Abstract. Vickers micro hardness measurement was done on nine hard probes of welded samples of low-alloyed 14H2GMR steel and on one sample of low-carbon St3sp steel using the PMT-5 equipment. An investigation was carried out to see the thermal cycling influence on the HAZ. It was discovered that, welding at 40°C does not lead to a significant increase of its micro hardness as compare welding at +20°C despite the large difference in cooling rates. It was also discovered that, the crack grows mainly along the grain boundaries of martensite and bainite (as overchilled austenite), but in some places passes through the body of grain and cuts across it for 14H2GMR steel. For St2sp steel the intergranular cracks are revealed both in weld metal and in the heat affected zone nevertheless of milder test conditions against hard technological probes.

Key words: Micro hardness, Thermal cycling, heat affected zone, crack growth, grain boundaries, elasticity Acknowledgments: the study was performed within the framework of the scientific project No. III.28.1.1 of program III.28.1 of the SB RAS.

Введение

Образование холодных трещин часто связано с перегревом детали или образца в зоне термического влияния (ЗТВ), в области которой неблагоприятная наблюдается комбинация структурных факторов, таких как интенсивный рост зёрен с высоким уровнем остаточных напряжения и деформаций, и достаточно большое содержание водорода. Поэтому одним из актуальных направлений исследований является оценка структурной неоднородности, механических свойств и дефектности ЗТВ и сварного шва [1]. Особую важность данные вопросы приобретают при эксплуатации техники в экстремальных условиях российского Севера, Арктики и Субарктики.

Наиболее широко применяемыми технологическими пробами для оценки склонности сварных соединений низколегированных высокопрочных сталей к образованию холодных трещин являются жесткие Лихайские пробы и пробы Теккен [2]. Трещины в этих пробах образуются в результате действия высоких усадочных напряжений в корне сварного шва на концентраторе, создаваемом непроваром. Однако если в пробе Лихайского университета критерием трещиностойкости служит максимальная глубина прорезей, при которой не появляются трещины, то в пробе Текккен в качестве такового выступает критическая скорость охлаждения [3]. Жесткая проба с односторонним скосом одной кромки обусловливает высокую концентрацию напряжений в корне шва (область II-III, рис. 1). В данном случае трещина обычно зарождается в зоне крупного зерна, расположенной непосредственно за границей сплавления, и распространяется как по металлу шва, так и по металлу зоны термического влияния (области І-IV, рис.1).

Методика исследований и оборудование

Для изучения влияния скорости охлаждения в интервале 60 семператур от 600°С до 500°С — W на твердость и микроструктуру металла сварного соединения и его склонность к образованию холодных трещин были выбраны жесткие пробы из стали 14Х2ГМР размерами 200×150×16 мм. Швы в образцах заваривались электродами УОНИ-13/55, диаметром 4 мм. Перед сваркой электроды прокаливались при температуре 420°С в течение двух часов, что обеспечило уровень водорода в шве, примерно равный 3см3/100 г. Водород определяли глицериновым методом.

Режим сварки выбран следующим: ток I_{c6} = 180 A, напряжение $U_{\rm B}$ = 22 B, скорость сварки $V_{\rm CB}$ = 2,5 мм/сек. Один образец заваривался аустенитным швом электродом ОЗЛ-18. Контроль за термическим циклом околошовной зоны осуществляли с помощью термопары хромель-алюмель, диаметром 0,4 мм. Для микроанализа выбрана зона вдоль сварного шва поперек образовавшейся трещины (1, рис.1).

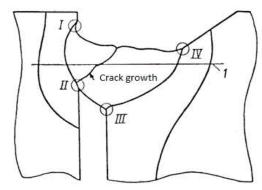


Рис. 1. Развитие трещины в сварном шве технологической жесткой пробы с односторонним скосом одной кромки: 1 — плоскость микроанализа.

^{**}Физико-технический институт, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

^{***}Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия mbellesabi@yahoo.com, wisecold@mail.ru

Замер микротвердости по поперечному шлифу сварного образца выполнен с интервалами между соседними измерениями 0,5 мм прибором ПМТ-3 и выдержкой под нагрузкой 5÷8 сек.

Анализ микроструктуры основного металла, металла шва и околошовной зоны проведен с помощью металлографического микроскопа "Neophot-32". Структуру различных зон сварных образцов из стали 14Х2ГМР изучали посредством травления 4% ниталом. Для выявления границ зерен применен реактив, в состав которого входят водный раствор пикриновой кислоты, синтол, сульфоамидопарафин и хлористый натрий.

Для сравнения были также исследованы микротвердость, структура и трещиностойкость сварного соединения из стали Ст3сп после испытаний на малоцикловую усталость [4]. Составляющие структуры образца из стали Ст3сп выявляли травлением образца, полученного шлифованием на наждачной бумаге порядке убывания зернистости и полирования алмазной пастой; состав реактива для травления – 4 %-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

Результаты и обсуждение

Оценку чувствительности сварного соединения к образованию холодных трещин производили по трем показателям [2]:

$$C_{N} = \sum_{L} \frac{Ln}{L} \times 100\%; \qquad (1)$$

$$C_{K} = \sum_{L} \frac{L\kappa}{L} \times 100\%; \qquad (2)$$

$$C_{C} = \sum_{L} \frac{Hc}{H} \times 100\%; \qquad (3)$$

$$C_K = \sum_{L}^{L_K} x 100\%;$$
 (2)

$$C_C = \sum \frac{\text{Hc}}{\text{H}} \times 100\%,$$
 (3)

где $\sum L_n, \sum L_k$ – сумма длин трещин соответственно на поверхности и в корне шва; L – общая длина шва, H_c – сумма длин трещин в сечении (среднее арифметическое по четырем шлифам); H – высота шва (среднее арифметическое по четырем сечениям).

Определение перечисленных параметров производили через 10 суток после окончания

сварки (таол..., Вычисление микротьеро производилось по формуле: $HV = 1854 \frac{100}{2},$ Вычисление микротвердости по Виккерсу

$$HV = 1854 \frac{100}{2}, \qquad (4)$$

где d -диагональ отпечатка алмазной пирамиды в мкм.

Данные измерений микротвердости образца из стали 14X2ГМР приведены на рис.2. Максимум твердости HV_{max} наблюдается в зоне термического влияния непосредственно за металлом

Таблица 1

Результаты испытаний жестких проб из стали 14Х2ГМР

№	Тпод, °С	Cn, %	Ск,	CC, %	HVmax	W 600 500, °C/c	Структурные составляющие*
1	-40	100	100	100	380	16,0	58% М, 35% Б
2	20	100	100	100	380	15,5	55% М, 36% Б
7	65	100	100	100	375	16,5	59% М, 35% Б
8	80	0	37	20	375	15,5	55% М, 36% Б
9	90	100	100	100	370	13,5	54% М, 37% Б
6	90	100	100	100	360	11,8	52% М, 37% Б
3	120	0	100	40	325	12,2	52% М, 37% Б
4	160	0	36	56	310	7,8	49% М, 37% Б,
							10%Ф
5	20	0	29	52	360	30,0	65% М, 35% Б

*М - мартенсит, Б - бейнит, Ф - феррит

шва, что подтверждается также исследованиями других авторов [4-6]. Предварительный подогрев до 90°С несколько сглаживает распределение твердости по сечению сварного соединения, однако уровень максимальной твердости HV_{max} не меняется, и только подогрев свыше 100 $m ^{\circ}$ приводит к существенному снижению HV_{max}.

Также в ходе экспериментов выявлено, что сварка при -40 °C ($W_{\overline{00}} = 17$ град/с) не приводит к существенному повышению $W_{\overline{00}} = 10-12$

На рис. 3 представлено распределение микротвердости по Бринелю НВ (шкала НВ соответствует приблизительно 3*HV [1]) в области шва и ЗТВ сварного соединения для образца из стали Ст3сп после испытаний на малоцикловую усталость [7]. Распределение микротвердости характеризует однородность фазового состава, а максимальные значения HV или HB количественно характеризуют прочностные свойства составляющих. Тем самым можно судить о трещиностойкости сварного соединения, - более однородный состав обладает и более высоким сопротивлением образованию и росту трещин.

Необходимо отметить, что представленное на рис.2 распределение микротвердости не является характерным для обычных сварных швов [4, 5, 8], так как высокая неравномерность распределения структурных составляющих соответствует технологическим жестким пробам [1]. В таких условиях легче выявляется склонность материала к образованию холодных трещин.

Структура основного металла в образцах из стали 14Х2ГМР представляет собой мартенсит отпуска с баллом зерна $7 \div 8$ (ГОСТ 5639-82), твердостью 252-268 HV. Участок неполной

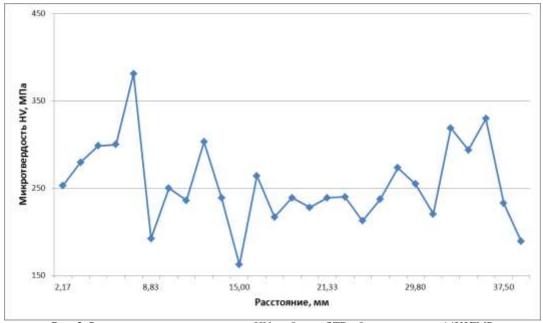


Рис. 2. Распределение микротвердости HV в области ЗТВ образца из стали 14X2ГМР

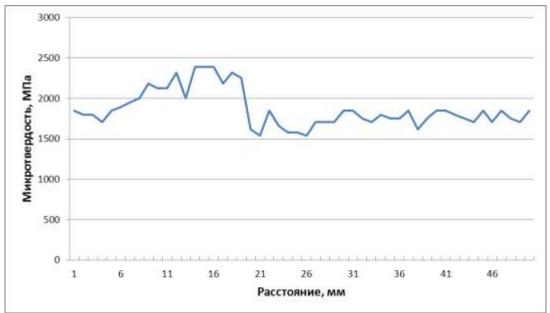


Рис. 3. Распределение микротвердости НВ в области ЗТВ образца из стали Ст3сп после малоцикловых испытаний

перекристаллизации состоит из сорбитообразной структуры с твердостью 373-380 HV, а зона мелкого зерна характеризуется наличием смеси мартенсита и продуктов промежуточного превращения с твердостью 380-387 HV. В зоне крупного зерна балл изменяется от 8÷10 до 4÷5, при том выявлена бейнитно-мартенситная структура с твердостью зоны перегрева 376-390 HV. Наблюдения на микрошлифах развития холодных трещин в сварных соединениях низколегированных высокопрочных сталей показали, что наиболее чувствительной к замедленному разрушению областью 3ТВ является зона круп-

ного зерна, расположенная на расстоянии 0,1-0,4 мм от границы сплавления. Металл здесь нагревается до температуры, близкой к 1350 °C, а трещина распространяется преимущественно по границам зерен бейнита (переохлажденного аустенита), но в некоторых местах проходит по телу зерна, перерезая его.

Для образца из стали Ст3сп микроструктура основного металла (рис. 4, а, б) представляет собой феррит и перлит с величиной зерна 11-12 баллов по шкале ГОСТ 5639-82, что соответствует среднему диаметру зерна ≈ 7 мкм. Структура металла сварного шва (рис. 4, в, г)

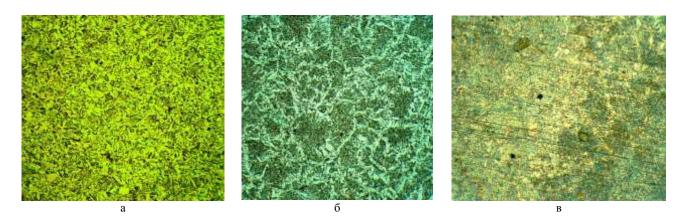


Рис 4. Микроструктура участков сварного образца из стали Ст3сп: а – основного металла; б – сварного шва; в - участка 3ТВ (с отпечатком пирамидки измерителя микротвердости ПМТ).

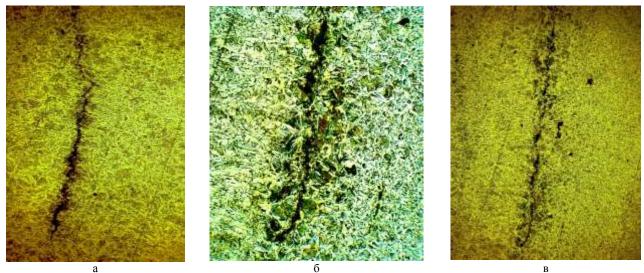


Рис 5. Характерные трещины, выявленные на участках сварного образца из стали Ст3сп: а, б - участка ЗТВ, в – сварного шва.

феррит + перлит (столбчатые кристаллы литого металла). В околошовной зоне (рис. 4, д, е) наблюдается видманштеттовая структура, видманштеттовость незначительна — до 1 балла по шкале ГОСТ 5640-68. Ширина зоны термического влияния (ЗТВ) составляет \approx 1,5 *мм*. В разных областях зоны термического влияния наблюдается мелкозернистая феррито-перлитная структура с различной дисперсностью. Трещины образуются преимущественно в ЗТВ, но также наблюдаются и в зоне шва (рис.5, а-в).

Заключение

Наиболее чувствительной к замедленному разрушению зоной, как показали наблюдения за процессом образования холодных трещин в сварных соединениях малоуглеродистых и низколегированных сталей, является область зоны термического влияния с крупнозернистой структурой, расположенная на расстоянии 0.1-0.4 мм от границы сплавления, нагревающейся

до 1350°C. Микроструктурные исследования и анализ распределения микротвердости в области сварного соединения показал, что рост трещин в зоне термического влияния зависит от жесткости напряженно-деформированного состояния и не зависит от температуры сварки низколегированных сталей, происходит преимущественно по границам зерен перегретого бейнита для образцов из стали 09Х2ГМР, и мартенсита для образцов из стали Ст3сп. Таким образом, жесткое напряженное состояние, вызываемое в том числе низкими температурами эксплуатации, вызывает высокую неоднородность механических свойств в околошовной зоне, что провоцирует образование холодных трещин и замедленное разрушение элементов конструкций.

Литература

1. Маркашова, Л. И., Григоренко, Г.М., Позняков В. Д., Бердникова Е.Н., Алексеенко Т. А.

Влияние термических циклов сварки и внешнего нагружения на структурно-фазовые изменения и свойства соединений стали 17X2M // Автоматическая сварка, 2009. №7. С.21-29.

- 2. Сварка в машиностроении: Справочник. В 4 т. / Редкол.: Г. А. Николаев и др. Т.3 / Под ред. Винокурова. М.: Машиностроение, 1979. 567 с.
- 3. Дерломенко В. В., Ющенко К. А., Савченко В. С., Червяков Н. О. Технологическая прочность и анализ причин ухудшения свариваемости и образования трещин // Автоматическая сварка, 2010. №9. С.26-30.
- 4. Бисонг М.С., Лепов В.В., Сивцев П.В., Голиков Н.И., Махарова С.Н. Моделирование повреждений сварных конструкций в экстремальных условиях эксплуатации // Наука и образование, 2017. №3. С.67-71.
- 5. Saraev Yu.N., Lebedev V.A., Novikov S.V. Analysis of existing methods for controlling the structure of the weld metal // Russian Internet Journal of Industrial Engineering, 2016. V.4. —1. P.16-26.
- 6. Khanna, P., Maheshwari, S. Microhardness analysis in MIG welding of stainless steel 409M // Journal of production engineering, 2017. V.20. 1. P.93-96.
- 7. Pang W., Ahmed N., Dunne D. Hardness and microstructural gradients in the heat affected zone of welded low-carbon quenched and tempered steels // Australasian Welding Journal, 2011. V.56. P.36-48.
- 8. Harish Arya, Kulwant Singh, Sanjay Singh. Cooling Rate Effect on Microhardness for SAW Welded Mild Steel Plate // International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering, 2013. V.2. 2. P.2319 3182.

References

1. Markashova, L. I., Grigorenko, G.M., Posnyakov V. D., Berdnikova E. N., Alekseenko T. A. Thermal cycles and external loading influence on

- structural and phase changes and properties for steel 17H2M joints [Vliyanie termicheskih ziklov svarki i vneshnego nagrujeia na strukturno-fazovye izmenenia i svoistva soedinenii stali 17H2M] // Automatic Welding, 2009. 7. C.21-29. [in Russian]
- 2. Industrial Welding: Handbook in 4 Vol. [Svarka v mashinostroenii: Spravochnik v 4 t.] V.3 / M.: Mashinostroenie, 1979. 567 p. [in Russian]
- 3. Derlomenko V. V., Yuschenko K. A., Savchenko V. S., Chervyakov N. O. Technological strength and cause analysis of weldability impairment and cracking [Technologicheskaya prochnost i analiz prichin uhudshenia svarivaemosti i obrazovania treschin] // Automatic welding, 2010. 9. P.26-30. [in Russian]
- 4. Saraev Yu.N., Lebedev V.A., Novikov S.V. Analysis of existing methods for controlling the structure of the weld metal // Russian Internet Journal of Industrial Engineering, 2016. V.4. —1. P.16-26.
- 5. Khanna, P., Maheshwari, S. Microhardness analysis in MIG welding of stainless steel 409M // Journal of production engineering, 2017. V.20. 1. P.93-96.
- 6. Pang W., Ahmed N., Dunne D. Hardness and microstructural gradients in the heat affected zone of welded low-carbon quenched and tempered steels // Australasian Welding Journal, 2011. V.56. P.36-48.
- 7. Bisong M. S., Lepov V. V., Sivtzev P. V., Golikov N. I., Makharova S. N. Damage modeling for weld structures in extreme environment [Modelirovanie povrejdenii svarnykh konstruktzii v ekstremalnykh usloviyakh eksplyatazii] // Nauka i obrazovanie, 2017. 3. P.67-71.
- 8. Harish Arya, Kulwant Singh, Sanjay Singh. Cooling Rate Effect on Microhardness for SAW Welded Mild Steel Plate // International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering, 2013. V.2. 2. P.2319 3182.

Поступила в редакцию 20.03.2018