



коуглеродистой сталей является более однородной, если производить наплавку низкоуглеродистой стали на аустенитную и заполнять шов ферритным металлом. Однако заполнение шва низкоуглеродистым нелегированным металлом приводит к снижению прочности сварного соединения.

В дальнейшем для заполнения шва в качестве присадочного материала использовали армко-железо, легированное небольшим количеством упрочняющих элементов. В целом показатели механических свойств разнородных сварных соединений, выполненных по предлагаемой технологии, полностью соответствуют требованиям, регламентируемым ПНАЭ Г-7-010–89 для оборудования АЭС.

Выводы

1. В ходе предварительных коррозионных испытаний сварных соединений разнородных сталей 20 и 08X18H10T установлено, что их сварные соединения в нейтральной среде хлористого натрия (рН 6,5...7,0) представляют собой сложный много-

электродный элемент с разностью потенциалов между основными металлами в сварном соединении до 0,5 В, что обуславливает интенсивное разрушение металла в зоне сплавления.

2. В процессе испытаний сварных соединений при нагружении до $0,90\sigma_T$ в кипящем растворе смеси азотнокислого кальция и нитрита аммония в образцах, сваренных как по штатной технологии, так и при наплавке технического железа на кромки стали 08X18H10T, имеет место коррозионное растрескивание. В аналогичных условиях испытаний образцов с наплавкой кромок углеродистой стали армко-железом коррозионное растрескивание не зафиксировано.

3. Разработанную технологию сварки трубопроводов второго контура из разнородных сталей предполагается аттестовать на Хмельницкой АЭС.

1. Земзин В.Н. Сварные соединения разнородных сталей // Сварка и свариваемые материалы. — М.: Металлургия, 1991. — Т. 1. — С. 422–442.
2. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 248 с.

The main factors promoting corrosion cracking of welded joints of pipelines from dissimilar steels are analyzed. Welding consumables and technologies allowing improvement of welded joint resistance to local corrosion damages are proposed.

Поступила в редакцию 10.09.2009

УДК 621.791.763.1

ВЛИЯНИЕ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА ШВА НА ПРОЧНОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, д-р техн. наук, В. М. КИСЛИЦЫН, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты экспериментов по качественной оценке влияния термомеханической обработки на прочность сварного точечного соединения. Показана целесообразность использования ударного приложения усилия сжатия при температуре вблизи точки рекристаллизации свариваемого металла.

Ключевые слова: точечная контактная сварка, сварное соединение, термомеханическая обработка, ударное приложение усилия сжатия, измельчение кристаллической структуры, механическая прочность

Как известно, наиболее распространенной причиной снижения прочности сварного соединения является возникновение в зоне сварного шва напряжений растяжения, вызываемых усадкой металла в процессе охлаждения.

Для снижения уровня остаточных механических напряжений используют термическую, термомеханическую [1, 2] и ударно-механическую виды обработки зоны сварного шва, которую про-

водят после завершения операции сварки. Например, выполнение упрочнения способом «высокочастотной механической проковки» [3, 4], «проковкой пневмомолотом» [5] или «дробеструйной обработкой» [6] позволяет увеличить в несколько раз циклическую долговечность сварной конструкции за счет перераспределения в зоне шва остаточных механических напряжений. Указанные способы упрочнения характеризуются многократным ударным приложением усилия сжатия, осуществляемым со скоростью около сотни метров в секунду.

Термин «проковка» характеризует процесс сварки со значительно меньшей скоростью приложения усилия сжатия (не более десятка метров

© А. С. Письменный, В. М. Кислицын, 2010



в секунду) и однократностью воздействия, что вызвано инерционностью узла пневмопривода перемещения электрода как на этапе сварки, так и на этапе проковки.

В связи с этим возникла необходимость отказаться от термина из области контактной сварки «проковка» и использовать термин из смежной области техники — «ударная обработка металла» [3–6], который характеризует высокоскоростную и многократную обработку металла непосредственно в процессе сварки на этапе охлаждения сварной точки.

К недостаткам термической обработки сварных соединений относится необходимость длительного (в течение нескольких часов) нагрева по определенному циклу или всего сварного изделия в печах, или не менее длительного локального нагрева зоны сварного шва.

Однако в некоторых случаях оказалось возможным заменить дорогостоящую и энергоемкую термообработку всего изделия дополнительным оплавлением сварных швов с помощью дугового нагрева в аргоне. Эта технология разработана в ИЭС им. Е. О. Патона. Результаты проведенных исследований показали, что аргонодуговое оплавление сварных швов позволяет восстановить ударную вязкость металла сварного шва, повысить предел выносливости сварного соединения, что, как объясняют авторы работы [7], связано со структурными изменениями металла сварного шва.

Снижение уровня остаточных напряжений растяжения в сварных соединениях можно достичь также за счет использования специальных присадочных материалов, характеризующихся низкой температурой межфазных переходов в металле сварного шва [8].

Формирование напряжений сжатия в сварных соединениях происходит непосредственно в процессе сварки, например, при точечной контактной сварке с циклом проковки, предусматривающей воздействие дополнительного и более высокого усилия сжатия металла на этапе охлаждения образовавшейся сварной точки. Данный вариант обработки нашел применение при сварке металлов, склонных к образованию трещин и пор, в целях снижения остаточных напряжений и повышения усталостной прочности сварных соединений [9, 10]. Однако этот вариант обработки характеризуется незначительным уровнем создаваемых в металле сварной точки напряжений сжатия из-за невысокой скорости приложения усилия проковки, инерционности механизма сжатия; к тому же он исключает возможность варьирования моментом приложения импульса проковки относительно температуры нагрева металла сварной точки.

К ударно-механическим видам обработки сварных соединений относятся проковка пневматическим виброинструментом, дробеструйная и ультраз-

вуковая. В технической литературе имеется информация об увеличении циклической долговечности сварных соединений в несколько раз после проведения операции проковки металла пневмомолотом или обработки его дробью. Ультразвуковая обработка также позволяет достичь увеличения механической прочности, например, при обработке сварных соединений стали 20ХГСА и некоторых сплавов алюминия [11, 12].

Из-за технологических недостатков, свойственных указанным способам обработки, в настоящее время широкое распространение получила высокочастотная механическая проковка. Проведенные исследования [3, 4] показали, что использование такого вида обработки даже без предварительного нагрева металла позволяет достичь более благоприятного перераспределения остаточных напряжений в поверхностных слоях металла и сформировать достаточно высокий уровень напряжений сжатия, особенно в зоне перехода металла шва к основному металлу.

Исходя из приведенного выше можно предположить, что совместное воздействие термической обработки и механической проковки может оказаться эффективным средством повышения как механической прочности, так и предела выносливости сварных соединений. Воздействие ударной обработки при повышенной температуре, несомненно, должно увеличить глубину поверхностного слоя металла, подвергаемого пластической деформации, а следовательно, и размеры зоны перераспределения остаточных (после сварки) механических напряжений.

Таким образом, возникают следующие вопросы, требующие экспериментальной проверки возможности повышения механической прочности сварного соединения, а именно, определение оптимального диапазона температуры, при которой целесообразно ударное воздействие усилия сжатия, оптимального соотношения энергии термического и механического воздействия, оптимальной скорости приложения усилия сжатия.

Решение этих вопросов представляет теоретический и практический интерес не только для совершенствования способов сварки металлов и соединения новых конструкционных материалов, но и при проведении ремонтно-профилактических работ сварных конструкций. При этом необходимо оценить также эффективность применения для этой цели различных видов нагрева — электроконтактного, дугового, газопламенного.

В настоящей работе предпринята попытка с качественной стороны оценить перспективы ударной обработки металла сварного шва при контактной сварке тонколистовой стали.

С целью технологической проверки ожидаемого положительного влияния ударного приложения усилия сжатия на механическую прочность за счет измельчения кристаллической структуры

металла сварной точки нами проведены исследования по следующей методике. В качестве образцов использовали пластины из стали Ст3 размером 100×30×1 мм. Выбор стали Ст3 толщиной 1 мм был обоснован повсеместно принятой в настоящее время практикой применения (ради удешевления продукции за счет снижения срока службы изделия с десятков лет до десятка месяцев) низколегированной тонколистовой стали с ненормируемым содержанием примесей для массово выпускаемой продукции (например, изделий для автомобилестроения, электротехнической аппаратуры, бытовой техники).

В состав лабораторной установки точечной контактной сварки для проведения данного эксперимента входили блок регулирования количества импульсов сварочного тока (от 1 до 8 полупериодов) и блок установки момента выдачи импульса напряжения на соленоид узла ударного приложения усилия сжатия, регулируемого в пределах от 1 до 12 полупериодов.

Образцы после механической и химической очистки от загрязнений подвергали контактной сварке на двух режимах: с применением устройства для создания ударного приложения усилия сжатия и без термомеханической обработки. Для сравнительной оценки прочности сварных соединений, полученных на указанных выше режимах, сваренные пластины разрезали на полоски с шагом 5 мм, которые попарно соединяли между собой точечной контактной сваркой, как показано на рис. 1.

Таким образом, при проведении испытаний на разрыв одновременно подвергались разрывной нагрузке три сварные точки, полученные на одном режиме источника питания, но отличающиеся воздействием или отсутствием ударного приложения усилия сжатия при температуре вблизи точки рекристаллизации металла.

При этом для оценки влияния проковки на прочность сварного соединения вместо измерения разрушающего усилия оказалось достаточным зафиксировать разрушение одной из сварных точек, имеющей минимальную прочность, т. е. наиболее слабое звено в соединениях четырех полосок, сваренных в трех точках.

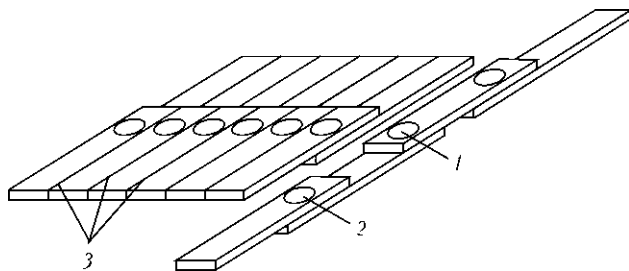


Рис. 1. Схема подготовки образцов к испытаниям на разрыв: 1, 2 — сварные точки соответственно с проковкой и без нее; 3 — линии разреза

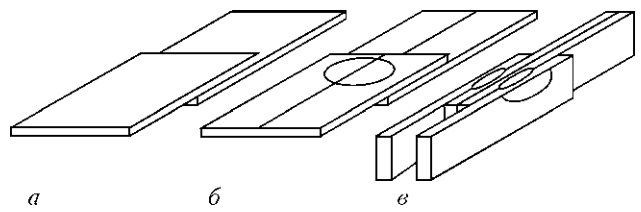


Рис. 2. Схема подготовки сварных образцов к изготовлению микрошлифов: а — перед сваркой; б — после сварки с линейной разрезом вдоль сварной точки; в — для изготовления микрошлифа

Такая подготовка образцов сварных соединений позволяет исключить ряд негативных факторов: возможное влияние на прочность металла флуктуаций его исходных свойств; различия в толщине и химическом составе оксидных пленок на соединяемых поверхностях; случайные отклонения режима сварки и температуры, при которой осуществляется ударное приложение усилия сжатия.

Предложенная сравнительная оценка прочности сварных соединений может рассматриваться как методика качественной оценки эффективности воздействия режимов нагрева и последующего термомеханического воздействия. Несмотря на ограниченный объем информации о прочности соединения, получаемой при использовании предложенной методики испытаний, ее преимуществом является возможность оценки результатов конкретной технологической пробы за минимальное время, что особенно ценно при наладочных работах.

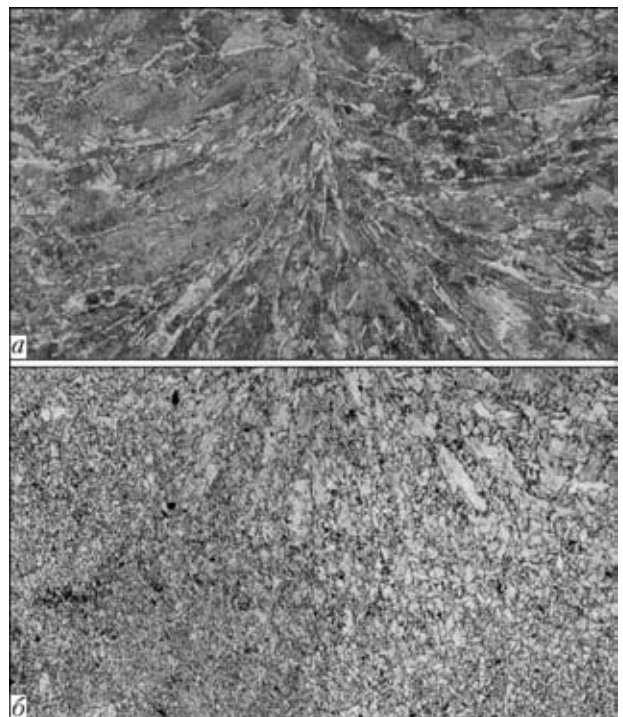


Рис. 3. Микроструктуры (×100) металла сварной точки до термомеханического воздействия (а) и металла зеркальной половины этой же сварной точки после термомеханического воздействия (б)



Результаты проведенных испытаний образцов на разрыв показали, что более 97 % сварных соединений разрушаются по сварным точкам, не подвергнутым ударному приложению усилия сжатия.

Для оценки влияния ударной проковки на изменение структуры металла сварной точки точечной сваркой изготовлены образцы (рис. 2, а), которые разрезали вдоль полосок и через сварную точку (рис. 2, б). Одну из половинок сварной точки повторно нагревали до температуры $(600 + 50)^\circ\text{C}$ (вблизи точки рекристаллизации стали) и подвергали ударному усилию сжатия, начиная с момента фиксации заданной температуры термомпарой. Затем две половинки сварной точки были соединены для изготовления микрошлифа, как показано на рис. 2, в.

Поскольку время охлаждения металла сварной точки выбранных нами образцов составляет около 0,5 с, сварная точка может быть подвергнута одному или нескольким десяткам ударов даже при частоте следования импульсов 50 Гц.

Как видно из рис. 3, микроструктуры зеркальных половинок одной сварной точки существенно отличаются как размером кристаллитов, так и однородностью структуры металла вблизи сварочной точки. На микроструктурах соединений, подвергнутых проковке, видно существенное измельчение наиболее крупных кристаллитов, выросших в центральной зоне сварной точки.

Кроме того, в металле сварной точки наблюдается снижение содержания инородных включений и пористости, т. е. уменьшается различие между структурой металла сварной точки, околошовной зоны и основного металла.

Таким образом, проведенные технологические исследования влияния ударной термомеханической обработки, осуществляемой непосредственно во время сварки, показали возможность существенного повышения механической прочности сварных соединений.

Исходя из существующей взаимосвязи между параметрами кристаллической решетки металла и его эксплуатационными свойствами, можно предположить, что ударная обработка сварного шва при температуре вблизи точки рекристаллизации позволит повысить предел выносливости сварных соединений.

1. *Основы материаловедения: Учеб. для вузов / Под ред. И. И. Сидорина.* — М.: Машиностроение, 1976. — 436 с.
2. *Гуляев А. П. Металловедение.* — М.: Гос. изд-во оборон. пром-сти, 1951. — 484 с.
3. *Кныш В. В., Соловей С. А., Кузьменко А. З.* Накопление усталостных повреждений в тавровых сварных соединениях стали 09Г2С в исходном и упрочненном высокочастотной проковкой состояниях // *Автомат. сварка.* — 2008. — № 10. — С. 12–18.
4. *Кныш В. В., Кузьменко А. З., Соловей С. А.* Повышение циклической долговечности сварных тавровых соединений с поверхностными трещинами // *Там же.* — 2009. — № 1. — С. 38–43.
5. *Branko C., Infante V., Bartista R.* Fatigue behavior of the weld joints with cracks repaired by hammer peening // *Fatigue & Fract. of Eng. Materials and Struct.* — 2004. — 27. — P. 785–798.
6. *Improving the fatigue crack resistance of wespalloy by shot peening / A. Turnbull, E. R. Los Rios, R. Tait et al.* // *Ibid.* — 1998. — 21. — P. 1513–1524.
7. *Аснис А. Е.* Аргонодуговая обработка — резерв повышения прочности сварных соединений // *Аргонодуговая обработка сварных соединений.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — С. 5–9.
8. *Мазель Ю. А.* Мартенситная сварочная проволока на основе 10 % Cr и 10 % Ni с низкой температурой $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода // *Welding Intern.* — 2003. — 17(5). — P. 386–389.
9. *Моравский В. Э., Ворона Д. С.* Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. — Киев: Наук. думка, 1985. — 272 с.
10. *Моравский В. Э.* Сварка аккумулятивной энергией. — Киев: Гостехиздат, 1963. — 298 с.
11. *Снижение остаточных сварочных напряжений ультразвуковой обработкой / И. Г. Полоцкий, А. Я. Недосека, Г. И. Прокопенко и др.* // *Автомат. сварка.* — 1974. — № 4. — С. 74–75.
12. *Холопов Ю. В.* Обработка сварных соединений металлов ультразвуком с целью снятия остаточных напряжений // *Свароч. пр-во.* — 1973. — № 12. — С. 20–21.

The paper gives the results of experiments on qualitative assessment of the influence of thermomechanical treatment on the strength of spot welded joint. Rationality of shock application of the compressive force at the temperature close to the recrystallization point of the metal being welded is shown.

Поступила в редакцию 16.07.2009