

ВОПРОСЫ СВАРКИ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ

УДК 621.791

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-10-293-53-57

Д. А. Муругов, А. В. Савинов, А. А. Чудин, В. И. Лысак, О. А. Полесский, П. П. Красиков

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ (ОБЗОР)*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: svarka-nv@vstu.ru

В работе на основе анализа литературных данных описаны различные методы применения ультразвуковых колебаний в дуговой сварке. Основное внимание уделяется недавно разработанному методу воздействия ультразвука на дугу. Показаны преимущества и недостатки существующих методов применения ультразвуковых колебаний при сварке неплавящимся электродом.

Ключевые слова: ультразвук, дуга с неплавящимся электродом, глубина проплавления

D. A. Murugov, A. V. Savinov, A. A. Chudin, V. I. Lysak, O. A. Polesskiy, P. P. Krasikov

APPLICATION OF ULTRASONIC OSCILLATIONS IN ARC WELDING (REVIEW)

Volgograd State Technical University

The paper describes various methods of using ultrasonic vibrations in arc welding based on the analysis of literature data. The main attention is paid to the recently developed method of ultrasound action on the arc. The advantages and disadvantages of existing methods of using ultrasonic vibrations in non-consumable electrode welding are shown.

Keywords: ultrasonic, arc with a non-consumable electrode, ultrasound, depth of penetration

Применение ультразвуковых колебаний при дуговой сварке плавлением способствует повышению качества сварного шва, снижению трещинообразования, улучшению механических характеристик сварных швов [1–5]. Однако применение ультразвуковых колебаний не распространено в производстве из-за отсутствия рациональных колебательных систем, которые способны стабильно работать при определенных механических и тепловых нагрузках, а также рациональных способов введения ультразвука в сварочную ванну и плазму сварочной дуги. Кроме того, еще недостаточно исследованы процессы воздействия ультразвуковых колебаний на дугу переменного тока с прямоугольной формой импульсов (ПФИ) посредством ультразвуковых излучателей.

Ниже приведены работы, представляющие значительный интерес, в которых рассмотрены

способы введения ультразвуковых колебаний в плазму дуги, а также результаты исследования влияния ультразвука на процессы сварки металлов.

В работе [2] представлен способ сварки неплавящимся электродом с воздействием ультразвука на дугу постоянного тока прямой полярности. При непосредственном воздействии УЗ колебаний на сварочную дугу происходит взаимодействие ультразвука с плазмой дуги и его передача в сварочную ванну. Результаты экспериментов показывают, что с воздействием ультразвука давление дуги значительно увеличивается. Авторы утверждают, что применение данной технологии оказывает влияние на сварочную ванну и позволяет увеличить глубину проплавления.

Влияние ультразвука на обработку материалов известно по исследованиям [3]. Тем не

© Муругов Д. А., Савинов А. В., Чудин А. А., Лысак В. И., Полесский О. А., Красиков П. П., 2024.

* Исследование выполнено за счет средств программы развития ВолгГТУ «Приоритет 2030», в рамках научного проекта № 15/631-24.

менее, возможность применения ультразвука в дуговой сварке интенсивно изучается. Результаты исследований подчеркивают потенциал применения ультразвука в дуговой сварке для увеличения производительности процесса и улучшения качества сварных швов. Особое внимание уделяется методам использования ультразвуковых излучателей, которые бывают пьезоэлектрическими, либо магнито-стрикционными [2]. Также разработан новый метод, основанный на импульсном токе ультразвуковых частот, получившим название дугового с ультразвуковым возбуждением тока. В этом методе дуга действует не только как источник тепла, но и как механизм, который воздействует ультразвуком на сварочную ванну [3, 4].

Способы применения ультразвуковых колебаний можно классифицировать следующим образом:

1) воздействие на заготовку (Wen, Dong, Watanabe и др.);

2) влияние на сварочную ванну в процессе сварки (L. He, T. Yuan);

3) воздействие на электрод или сварочную проволоку (Watanabe и др.)

4) ультразвук с дуговым возбуждением (Hua и др.);

5) воздействие на сварочную дугу (J. Wang, Sun, Fan и др.).

В последние годы основное внимание уделяется воздействию ультразвука на дугу (U-GTAW).

Т. В. Атаманенко и Д. Г. Ескин [5] исследовали влияние ультразвука на расплавленный металл и установили, что механические свойства сварных соединений улучшаются. С. Хиаоуи и др. [6] предложили процесс сварки неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковыми колебаниями на заготовку (рис. 1).



Рис. 1. Влияние мощности УЗК на глубину проплавления:
а – без УЗК; б – 400 Вт; в – 1000 Вт [6]

Авторы работы [6] утверждают, что увеличение мощности УЗ колебаний приводило к росту глубины проплавления, ультразвуковая кавитация способствует измельчению микро-структуры, следовательно, повышались механические свойства. По сравнению со сварными соединениями, выполненными традиционной сваркой, твердость увеличилась на 8 %, а предел прочности на растяжение – на 29 %.

Sun и др. [7, 8] предложили способ, в котором применялся пьезоэлектрический ультразвуковой преобразователь. Во время сварки ультразвуковые колебания передаются в сварочную ванну независимо от формы волны и полярности сварочного тока. Используя этот метод и основываясь на результатах, полученных при сварке коррозионностойкой стали AISI 304, Sun и др. [8, 9] показали, что применение УЗК может значительно увеличить глубину проплавления. По результатам экспериментов установлено, что глубина проплавления увели-

чилась с 1,18 до 3,12 мм и с 1,20 до 3,71 мм, при значении сварочного тока 100 А и 150 А, соответственно. Частота УЗК составляла 20,5 кГц, мощность – 200 Вт [9] (рис. 2).

Соотношение глубины/ширины сварных швов с УЗК было явно выше, чем без ультразвука, независимо от значения сварочного тока.

Увеличение проплавления подтверждается в работах [10, 11] за счет применения ультразвуковых колебаний мощностью до 1 кВт. Кроме того, при тех же условиях, когда рассматривается коэффициент формы шва, наблюдается увеличение проплавления на 235 % при значении сварочного тока $I_{св.}=100$ А и на 380 % при $I_{св.}=150$ А по сравнению с проплавлениями, выполненными без УЗК. [10]. По мнению авторов [10, 11], это связано с большей проникающей способностью ультразвукового поля, что, по-видимому, увеличивает давление дуги на сварочную ванну.

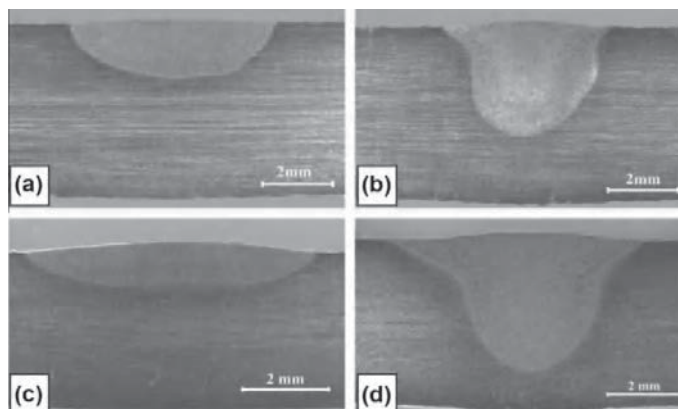


Рис. 2. Макрошлифы проплавлений:
 $I_{св.}=100$ А: (а) без УЗК; (б) с УЗК; $I_{св.}=150$ А: (с) без УЗК; (д) с УЗК [9]

В работе [12] показано, что давление дуги при сварке с УЗК имеет некоторые особенности. В отличие от того, что происходит при обычной сварке, где давление дуги постоянно уменьшается с увеличением расстояния между электродом и заготовкой, при использовании УЗК максимальное значение давления дуги достигает при дуговом промежутке, равном 4,4 мм.

Авторы работы [13] подтверждают увеличение глубины проплавления при сварке с УЗК. По результатам, полученным при аргонодуговой сварке алюминиевого сплава 7075-T6 с частотой ультразвуковых колебаний 20 кГц и мощностью 2 кВт, произошло увеличение глубины проплавления до 45 % и уменьшение размера зерна до 42 %.

Wen, Dong [13, 14] исследовали влияние УЗК при сварке внахлест сплава АМг-6 с оцинкованной сталью и коррозионностойкой сталью. Предел прочности сварного соединения на растяжение увеличился на 20 %.

В отличие от того, что предлагают исследователи Wen, Dong [13, 14], Watanabe и др. [15] применяли ультразвуковые колебания параллельно перемещению горелки при аргонодуговой сварке

неплавящимся электродом. С помощью этого метода авторы [15] обнаружили увеличение предела прочности на растяжение сварных швов и уменьшение ширины аустенитных зерен, выполненных при различных скоростях сварки.

Методы, в которых ультразвуковой преобразователь не соединен со сварочной горелкой [13, 14, 1], являются более гибкими, поскольку ультразвуковая колебательная система не подвергается воздействию высоких температур дуги или перемещению во время сварки. Однако эти способы предназначены для сварки изделий небольших размеров, так как по мере увеличения размеров пластины, в которую вводятся ультразвуковые колебания, требуется большая мощность УЗК, что делает их применение нецелесообразными [15].

Столкнувшись с этой трудностью, Watanabe и др. [16] разработали метод введения ультразвуковых колебаний непосредственно в сварочную ванну через присадочную проволоку (рис. 3). Таким образом, УЗК передаются в сварочную ванну через присадочный материал, колебания осуществляются перпендикулярно направлению сварки и параллельно поверхности заготовки.

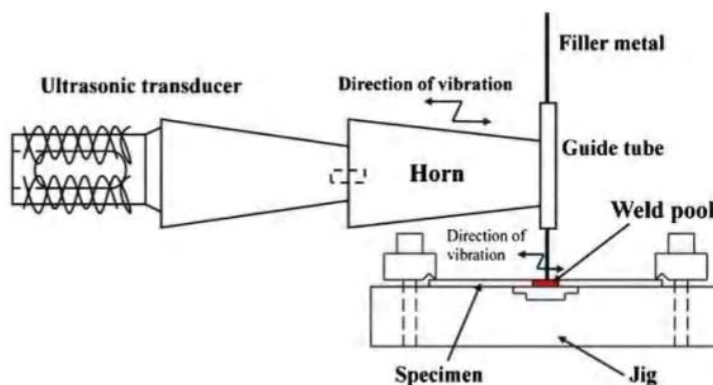


Рис. 3. Схема экспериментальной установки с воздействием ультразвука на присадочную проволоку [16]

Результаты [16] показали, что предел прочности на растяжение увеличился на 20 %, а относительное удлинение на 40 %.

Sun и др. [17] исследовали влияние УЗК на дугу постоянного тока при сварке неплавящимся электродом с различными конструкциями излучателей (рис. 4).

На рисунке 5 показаны макрошлифы проплавлений с воздействием УЗК при различном расстоянии излучателя до поверхности заготовки.

По результатам экспериментов [17] было обнаружено, что глубина проплавления увеличивается при диаметре излучателя от 25 до 31 мм (рис. 6). Наибольшее проплавление наблюдается при диаметре 31 мм, что составляет 250 % от значения, полученного при обычной аргонодуговой сварке (0,78 мм).



Рис. 4. Концентраторы ультразвуковых колебаний с различными диаметрами излучателей [17]

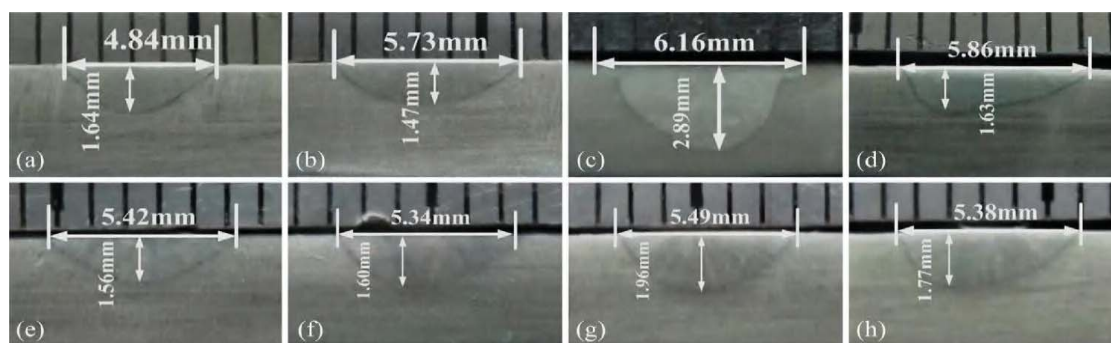


Рис. 5. Проплавления при различной высоте излучателя:
a – 15 мм; b – 17 мм; c – 19 мм; d – 21 мм; e – 23 мм; f – 25 мм; g – 27 мм; h – 29 мм [17]

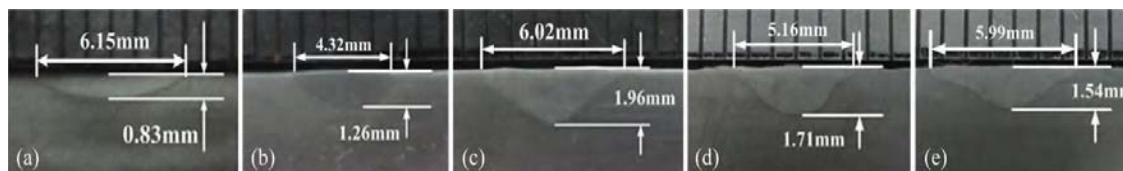


Рис. 6. Поперечное сечение сварных швов при разных диаметрах излучателя:
a – 25 мм; b – 28 мм; c – 31 мм; d – 34 мм; e – 37 мм [17]

Степень сужения сварочной дуги приближается к максимальному значению при высоте излучателя $H=19$ и 27 мм. Наименьшее значение коэффициента сжатия дуги при диаметре излучателя 31 мм, что указывает на его оптимальный размер. Размер зерна значительно уменьшается, что приводит к лучшим механическим характеристикам сварных соединений. Основной механизм дуго-акустического взаимодействия объясняется с учетом распределения акустического давления. Оптимальная конфигурация излучателя со ступенчатыми пластинами имеет самое высокое акустическое давление, что создает сильный вибрационный эффект.

Выводы

1. При использовании ультразвуковых преобразователей при дуговой сварке возникает ряд трудностей, связанных с размером и массой преобразователей, которые затрудняют движение сварочной горелки. Кроме того, в сочетании с относительно низкой максимальной рабочей температурой преобразователя, это еще больше усложняет применение из-за присущих дуге высоких температур. С другой стороны, когда ультразвуковые колебания непосредственно воздействуют на заготовку, требуется высокая мощность ультразвука, которую необходимо значительно повышать с увеличением размеров заготовки.

2. Несмотря на присущие сложности использования ультразвука при дуговой сварке с использованием преобразователей с плоским излучателем, отмечается увеличение глубины проплавления, что способствует повышению производительности сварки. Однако мощность акустического поля может достигать более 1500 Вт, что энергетически неэффективно, так как затраты электрической энергии на преобразование в ультразвуковые колебания больше, чем повышение мощности дуги посредством увеличения силы тока. Впрочем, остается открытым вопрос влияния сфокусированных в межэлектродном пространстве ультразвуковых колебаний малой мощности на изменение технологических свойств дуги с неплавящимся электродом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Arc characteristic of ultrasonic assisted TIG welding. S. Qingjie; Q. Sun; L. Sanbao; Y. Chunli; F. Yangyang; Z. Guoqing // *China Welding (English Edition)*. – V. 17 (4). – P. 52–57. – 2008.
2. High Power Ultrasonics in Pyrometallurgy / S. V. Komarov, M. Kuwabara, O. V. Abramov // *ISI International*. – 2005. – Vol. 15. – P. 1765–1782.
3. Ultrasonic generation by exciting electric arc: a tool for grain refinement in welding process / L. He // *Applied Physics Letters*. – 2006. – Vol. 89. – P. 13–15
4. Improving weld quality by arc-excited ultrasonic treatment / C. Zhang, M. Wu, J. Du, t. Tsinghua // *Tsinghua Science and Technology*. – 2001. – V. 6. – No. 5. – P. 475–478.
5. Experimental study of grain growth in aluminum melts under the influence of ultrasonic melt treatment / T. V. Atamanenko, D. G. Eskin // *Mater. Sci.* – 2007. – P. 987–990.
6. Characteristics of Periodic Ultrasonic Assisted TIG Welding for 2219 Aluminum Alloys / C. Xiaoyu, L. Sanbao, W. Xianneng, Y. Chunli, F. Chenglei // *Materials*. – 2019. – Vol. 12. – P. 70–81.
7. Penetration increase of AISI 304 using ultrasonic assisted tungsten inert gas welding / Q. J. Sun // *Welding Joining*. – 2009. – Vol. 10. – P. 330–334.
8. The arc characteristic of ultrasonic assisted TIG welding / Q. Sun // *China Welding*. – 2008. – Vol. 17. – P. 100–104.
9. Penetration increase of AISI 304 using ultrasonic assisted tungsten inert gas welding / Q. J. Sun, S. B. Lin, C. L. Yang & G. Q. Zhao // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2009. – Vol. 14. – P. 765–767.
10. TIG welding of the stainless steel 304 based on the ultrasonic vibration / Y. Fan // *Transactions of the China Welding Institution*. – 2009. – Vol. 30. – P. 91–94.
11. Investigation and application of ultrasonic–TIG hybrid welding equipment / Q. Sun et al. // *China Welding*. – Inst. 02 (2010).
12. Characteristic of arc pressure in ultrasonic–TIG hybrid welding / Q. Sun et al. // *Journal of Engineering Mechanics* – 2011. – Vol. 47. – P. 65–69.
13. Effects of high-intensity ultrasonic-wave emission on the weldability of aluminum alloy 7075-T6 / L.D. Wen // *Materials Letters*. – 2003. – Vol. 57. – P. 2447 – 2454.
14. Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel H. Dong, L. Yanga, C. Dong, S. Kou / *Materials Science and Engineering A*. – 2012. – Vol. 534. – P. 424–435.
15. The Effect of Ultrasonic Vibration on The Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel Weld / T. Watanabe, S. Ookawara, S. Seki, A. Yanagisawa, S. Konuma // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2003. – Vol. 21. – P. 249–255.
16. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration / T. Watanabe, M. Shiroki, A. Yanagisawa // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2010. – Vol. 210. – P. 1646–1651.
17. Enhanced arc-acoustic interaction by stepped-plate radiator in ultrasonic wave-assisted GTAW / J. Wang, Q. Sun, J. Teng, P. Jin, T. Zhang, J. Feng // *Journal of Materials Processing Tech.* – 2018. – Vol. 262. – P. 19–31.