

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №4 (130). С. 18-24.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №4 (130). P. 18-24.

Научная статья
УДК 534-8, 621.9.048.6
doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-18-24

Анализ способов введения ультразвуковых колебаний в зону сварки

Сергей Константинович Сундуков, к.т.н.
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия
sergey-lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>

***Аннотация.** Приведен обзор современного состояния исследований по интенсификации процессов получения сварных соединений путём использования ультразвуковых колебаний. Рассмотрены следующие способы введения ультразвуковых колебаний в зону сварки: через плавящийся и неплавящийся электрод, через проволоку, через корпус газовой горелки, через свариваемый элемент и через сварочную дугу.*

***Ключевые слова:** ультразвук, колебания, сварка, структура, сварочная дуга*

***Благодарность:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00185, <https://rscf.ru/project/21-79-00185/>.*

***Для цитирования:** Сундуков С.К. Анализ способов введения ультразвуковых колебаний в зону сварки // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №4 (130). – С. 18-24. doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-18-24.*

Original article

Analysis of methods for introducing ultrasonic vibrations into the welding zone

Sergey K. Sundukov, Cand. Sc. Tech.
Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia
sergey-lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>

***Annotation.** An overview of the present state of investigation of welds obtaining intensification operation by using ultrasonic vibrations is given. The following methods of introducing ultrasonic vibrations into the welding zone are viewed: using a melting and non-melting electrode, using a wire, using gas burner housing, using a welding component and an arc.*

***Keywords:** ultrasonic, vibrations, welding, structure, welding arc*

***Acknowledgements:** the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 21-79-00185.*

***For citation:** Sundukov S.K. Analysis of methods for introducing ultrasonic vibrations into the welding zone / Science intensive Technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.4 (130), pp. 18-24. doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-18-24..*

Введение

Актуальность исследований, направленных на интенсификацию и модернизацию процессов получения сварных соединений, обус-

ловлена с одной стороны масштабом распространения сварки, а с другой наличием ряда проблем и сложностей, требующих решения. Так, к основным проблемам сварки относятся сварочные деформации и напряжения, вы-

званные неравномерным нагревом соединяемых деталей, вследствие чего металл в зоне шва и околошовной зоне имеет различные структуры, которые, в свою очередь, отличаются от структуры основного металла [1]. Переход от дендритной структуры шва к крупнозернистой структуре зоны перегрева характеризуется резким изменением свойств и является слабым местом сварного соединения [2].

Одним из методов, позволяющих положительно воздействовать на структуру сварного шва, является применение ультразвуковых колебаний в процессе получения соединения.

Данные методы, несмотря на недостаточное распространение по сравнению с методами, применяемыми после сварки (например, ультразвуковое поверхностно-пластическое деформирование), позволяют воздействовать на металл, который находится в расплавленном состоянии. Это является основным преимуществом, определяющим актуальность исследований по этому направлению.

Впервые о применении вибрационных технологий с целью формирования структуры кристаллизующихся металлических слитков упоминается в 1950 году (Д.К. Чернов Наука о металлах / Под ред. акад. Н.Т. Гудцова. – Москва: Металлургиздат. – 1950. – 564 с).

Для интенсификации процессов сварки, характеризующихся быстрой кристаллизацией, оптимальным вариантом является применение ультразвуковых колебаний, что позволяет оказывать большое воздействие за ограниченное время.

Данная работа является обзором научных работ по методам и технологиям применения ультразвуковых колебаний в процессе сварки деталей.

Анализ способов введения ультразвуковых колебаний в зону сварки

Наложение ультразвуковых колебаний на электрод. Способ введения колебаний в сварочную ванну через электрод описан в патентах [3, 4] (рис. 1).

Предлагаемый способ работает в следующей последовательности. На электрод с обмазкой подаются импульсные ультразвуковые колебания определенной амплитуды и зажигается сварочная дуга. На конце электрода формируется капля расплавленного металла. Каплю вводят в контакт с расплавленным металлом сварочной ванны и отключают коле-

бания, но при этом сохраняют связь между электродом и сварочной ванной. Далее процесс повторяется.

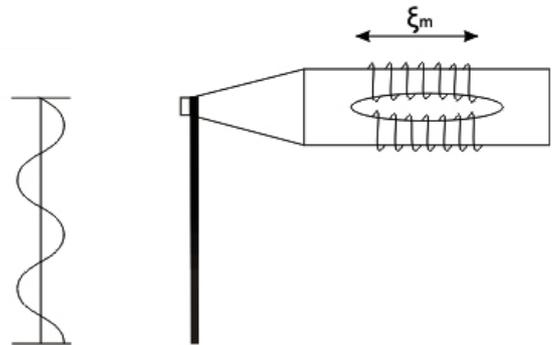


Рис 1. Схема наложения колебаний на электрод

С физической точки зрения процесс струйно-импульсного переноса расплавленного металла в сварочную ванну может быть представлен следующим образом: колебания электрода удерживают каплю расплавленного металла, предотвращая её отрыв под действием электромагнитных сил, действующих в дуге промежутке. При этом импульсы ультразвуковых колебаний на электрод осуществляют синхронно с периодами горения дуги и периодами коротких замыканий.

Такая обработка капли осуществляет её дегазацию. После отключения ультразвука обработанная капля, вносится в сварочную ванну и формирует шов. Далее процесс повторяется.

В работе [5] представлены исследования по наложению колебаний на сварочную проволоку (рис. 2).

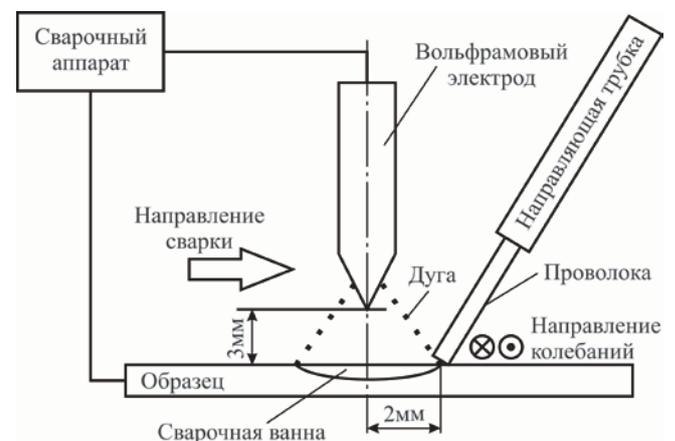


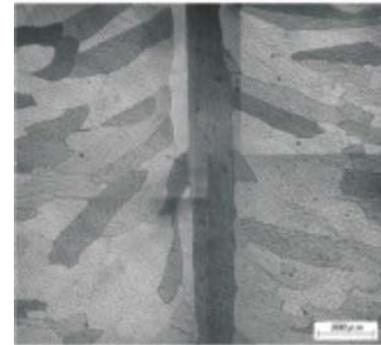
Рис. 2. Схема наложения колебаний на присадочную проволоку

Колебания передавались через направляю-

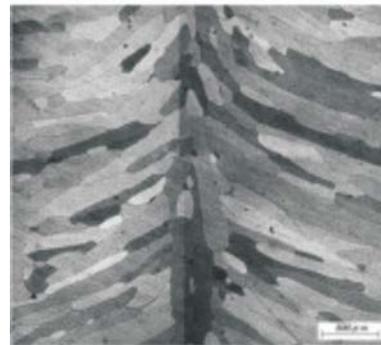
щую трубку, которая жёстко закреплена на конце ультразвуковой колебательной системы. Данная схема применялась для сварки ферритной нержавеющей стали высокой чистоты стали SUS444, основной проблемой которой является образование чрезмерно крупнозернистой структуры при нагреве до высоких температур.

В результате наложение колебаний привело к измельчению размера зёрен с 370 до 200 мкм при скорости сварки 1,67 мм/с, с 275 до 190 мкм при скорости 3,33 мм/с. Начиная со скорости сварки 6,67 мм/с и далее измельчение зерна практически не наблюдается. При этом на всех скоростях в центральной части шва отмечено формирование равноосных зёрен (рис. 3). При испытании образцов на растяжение получено незначительное повышение временного сопротивления и увеличение относительного удлинения до 40 %.

Одним из вариантов реализации данной схемы является наложение колебаний на неплавящийся вольфрамовый электрод [6]. Основным преимуществом данного метода является независимость режима колебаний от режима сварки, т.к. по сути вольфрамовый электрод является излучателем колебаний. При сварке нержавеющей стали 304 по данной схеме наблюдается изменение микроструктуры от крупных столбчатых дендритов до мелких равноосных кристаллов дендритов. Также при больших значениях силы тока (100 А и 150 А) значительно увеличивается глубина проплавления и отношение глубины шва к ширине. Авторы объясняют полученные эффекты увеличением давления сварочной дуги на ванну расплава.



а)

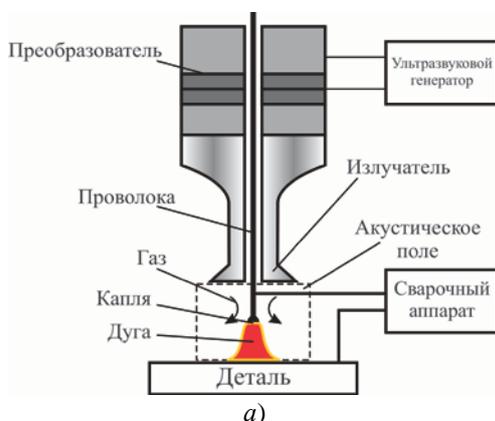


б)

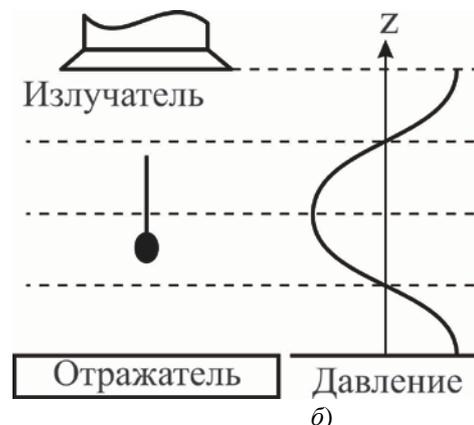
Рис. 3. Микроструктура стали SUS444 при скорости сварки 1,67 мм/с:

а – без колебаний; б – с колебаниями

Сообщение колебаний через корпус газовой горелки. В исследовании [7] предложена конструкция, в которой в качестве корпуса газовой горелки используется двухполуволновая пьезокерамическая колебательная система, имеющая осевое отверстие для подачи сварочной проволоки и защитного газа (рис. 4, а).



а)



б)

Рис. 4. Сообщение колебаний через корпус газовой горелки:

а – схема конструкции; б – распределение давления в дуговом промежутке

Принцип предлагаемого способа заключается в приложении дополнительной силы от-

рыва капле металла за счёт ультразвукового излучения. Расстояние от излучающей поверх-

ности колебательной системы до свариваемой поверхности выбирается таким образом, чтобы отрыв капли от проволоки происходил в зоне нисходящего звукового давления (см. рис. 4, б)

В результате использования данной конструкции в процессе сварки наблюдалась деформация капли в осевом направлении и был уменьшен её размер. Значительно увеличилась частота передачи металла в сварочную ванну – при скорости подачи проволоки 6 м/мин с 14 до 52 Гц.

Наложение колебаний на элементы свариваемого соединения. Данный способ сварки осуществляется при обеспечении механического контакта между колебательной системой и свариваемым элементом. На рис. 5 представлена схема экспериментальных исследований по наплавке на супераустенитную нержавеющую сталь AL-6XN BM [8].

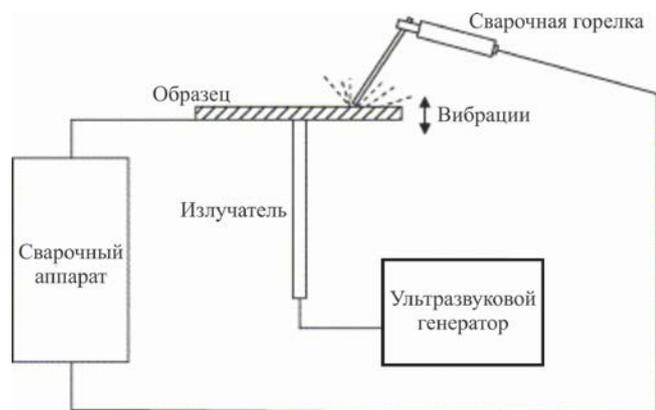


Рис. 5. Схема наложения колебаний на пластину

Основной проблемой при сварке сталей такого типа является их высокая склонность к образованию «несмешанной» зоны, которая представляет собой пограничный слой, примыкающий к границе сплавления и состоящий из основного металла, который в процессе сварки плавится и затвердевает, не испытывая механического перемешивания с присадочным металлом. Данная зона характеризуется большой вероятностью развития коррозии.

Наплавку осуществляли при сварочном токе 50 А, напряжении 22 В и скорости 300 мм/мин, частота колебаний пластины составляла 20 кГц.

В результате анализа полученных микроструктур и химического состава зон шва установлено отсутствие «несмешанной» зоны. Авторы объясняют данный эффект осуществлением перемешивания расплавленного основ-

ного металла с присадочным под действием кавитации и акустических течений, вызванных ультразвуковыми колебаниями.

В работе [9] по аналогичной схеме проведены исследования по газвольфрамовой сварке алюминия с оцинкованной сталью. Получены соединения внахлест 18 мм без зазора между соединёнными поверхностями.

Соединение алюминия типа 5A06 со сталью Q235A обладает повышенной на 27 % прочностью на растяжение. Микроструктура шва, полученного с наложением колебаний, отличается уменьшенными размерами дендритов (рис. 6).

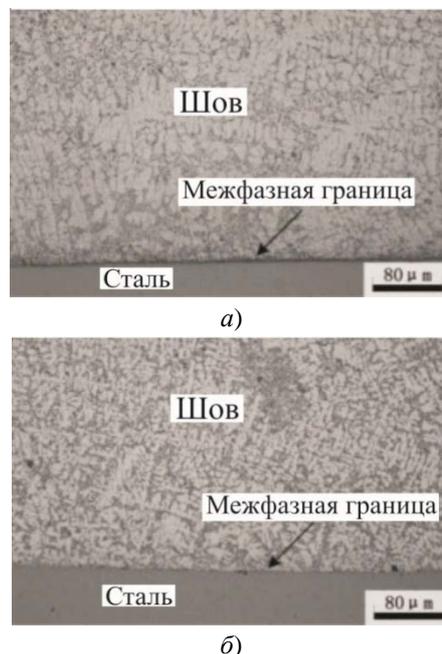


Рис. 6. Микроструктура соединения алюминия типа 5A06 со сталью Q235A:

а – без колебаний; б – с колебаниями

Фрагментация дендритов связывается также с кавитацией и акустическими течениями.

Авторами [10] проведены исследования по изучению влияния ультразвуковых колебаний на субмикроструктуру сварного шва, наплавленного на сталь Ст3.

Полученные результаты подтверждают, что кавитационное воздействие и акустические течения являются основными механизмами, влияющими на строение шва в процессе его кристаллизации.

Топография поверхности шва (рис. 7), полученного без колебаний, имеет чётко выраженную ступенчатую структуру, являющуюся следствием послойного роста зерна, характерного для самопроизвольной кристаллизации.

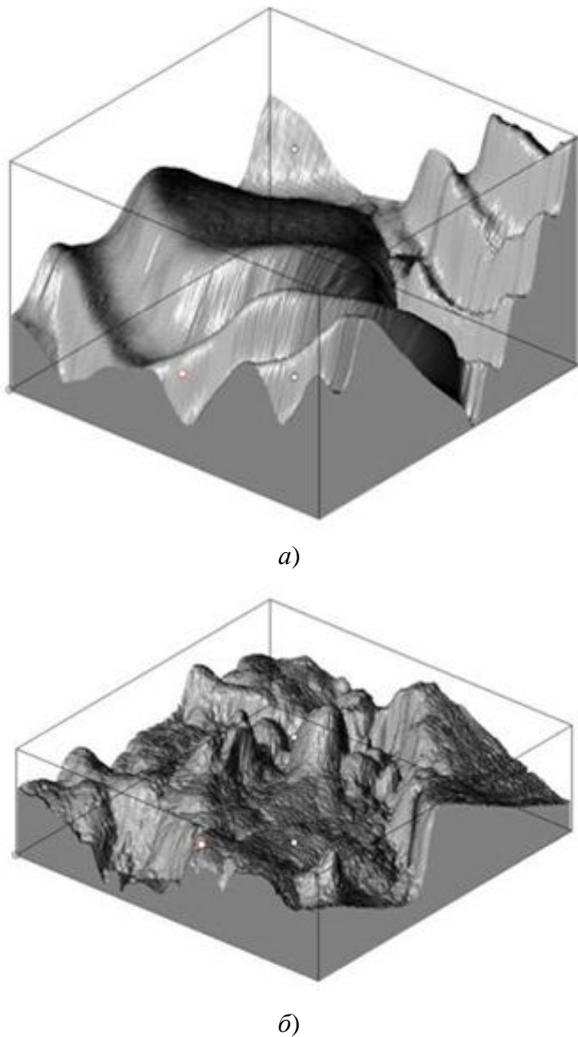


Рис. 7. Субмикроструктура шва при сварке стали Ст3:
а – без колебаний; б – с колебаниями

Действие кавитации и акустических течений приводят к разрушению слоистой наноструктуры растущего зерна и образованию равномерной структуры с хаотичным расположением неровностей, имеющих значительно меньшую высоту.

Использование сварочной дуги как источника ультразвука. Использование сварочной дуги в качестве не только источника тепла, но и как источника ультразвукового излучения, было предложено в работе [11] (рис. 8).

Дуга с ультразвуковым возбуждением достигается за счет применения постоянного тока, связанного с импульсным, имеющим частоту более 20 кГц. Так как сварочная дуга не имеет ограничения динамических характеристик в ультразвуковом диапазоне, то она будет колебаться на частоте пульсации сварочного тока, действуя как ультразвуковой преобразователь.

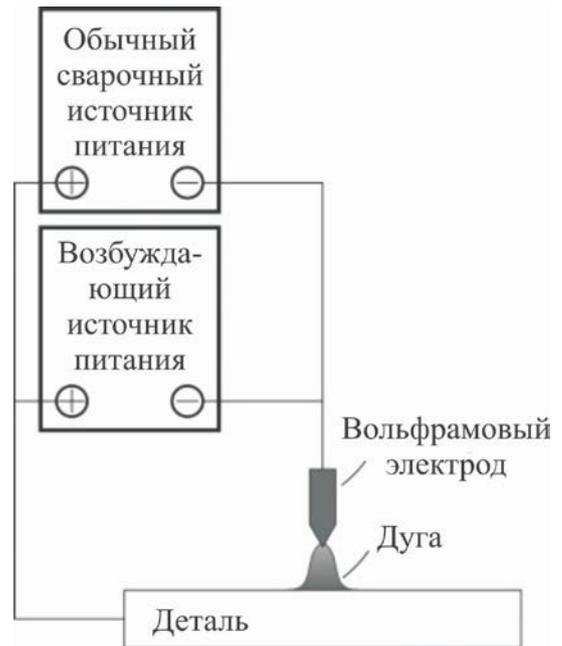


Рис. 8. Схема ультразвукового возбуждения сварочной дуги

Данный способ отличается от других отсутствием традиционных ультразвуковых преобразователей. Пульсирующий ток возбуждает сложный эффект ультразвуковой вибрации в дуге и сварочной ванне

Ультразвуковая частота импульсного тока увеличивает силу Лоренца и радиальную электромагнитную силу в дуге, что приводит к её сужению. Это способствует увеличению давления дуги, плотности энергии, повышению стабильности и проникаемости дуги. Сила электромагнитного перемешивания дополнительно увеличивает скорость потока жидкости и тепла в расплавленной ванне, обеспечивая лучшую геометрию сварного шва с большей скоростью проплавления, и ускоряет выход газа из расплава, что снижает пористость шва [12].

Увеличение давления дуги приводит к уменьшению ширины шва и увеличению глубины проплавления, аналогично рассмотренному выше.

В исследовании [13] авторы наблюдали микроструктурные изменения в металле шва при сварке стали SAE 1020 при токе возбуждения 50 А и частоте импульсов 20 кГц. Отмечено некоторое измельчение зерна и размытость зоны термического влияния (рис. 9), что делает переход от металла шва к основному более плавным.

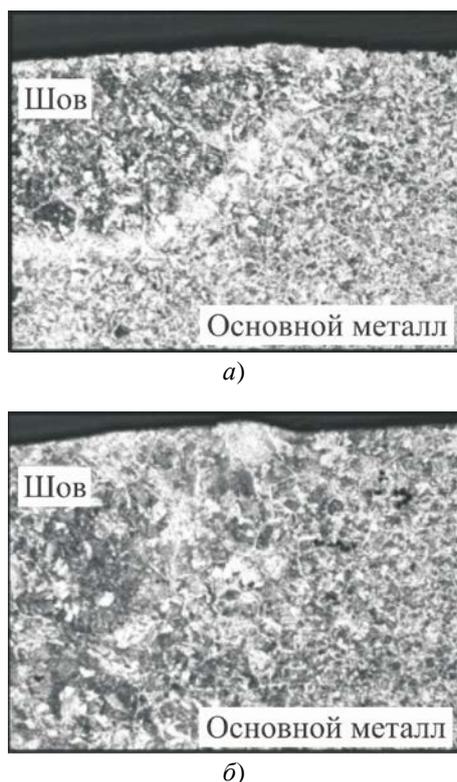


Рис. 9. Микроструктура шва при сварке стали SAE 1020:

а – по традиционной технологии; б – с ультразвуковыми колебаниями дуги

Заключение

Обзор основных технологий применения ультразвука в процессах сварки показывает уникальные возможности колебаний по интенсификации процесса получения соединения. Поэтому, несмотря на сложности, связанные с реализацией рассмотренных методов, исследования по данной тематике являются актуальными и перспективными.

К основным сложностям, возникающим при применении ультразвука в процессах сварки и препятствующим их широкому распространению, можно отнести следующие:

- необходимость использования дополнительно сложного оборудования;
- согласование режимов сварки и колебаний;
- модернизация существующих техпроцессов;
- поддержание стабильности колебаний в условиях изменяющихся высоких температур;
- сложности передачи колебаний изделиям разной формы и из разных материалов.

Основными механизмами, влияющими на эффективность ультразвукового воздействия, являются кавитация, акустические потоки и давление сварочной дуги.

Среди рассмотренных способов выделяется наложение колебаний на элементы свариваемой конструкции, так как, по сравнению с остальными, он позволяет оказывать воздействие на формирование сварного шва в течение всего цикла сварки от формирования ванны расплава до полной кристаллизации и остывания металла. Другие способы оказывают наибольший эффект при медленных скоростях сварки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нигметзянов, Р.И., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С. Наложение ультразвуковых колебаний в процессе сварки // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – №10 (112). – С. 29-33.
2. Sundukov, S.K., Nigmatzyanov, R.I., Fatyukhin, D.S. Structure of the Weld Formed during the Application of Ultrasonic Vibrations // Russian Metallurgy (Metally), 2021, No. 13, pp. 29-34
3. Пат. 515608 СССР, М. Кл.2 В 23К 9/14. Способ ручной электродуговой сварки / Статников Е.Ш., Шевцов Е.М., Меркель М.С., Казанцев В.Ф. – 2022257/27; опубл. 30.05.76. – 2 с.
4. Пат. 946841 СССР, М. Кл.5 В 23 К 9/14. Способ ручной электродуговой сварки / Статников Е.Ш., Федо-

ров В.Ю., Киямов Р.Н., Петриди Н.И., Снятков Е.И. – 2998525/25-27; опублик. 30.07.82. – 3 с.

5. **Improvement** of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration / T. Watanabe, et al. // *J. Mater. Process. Technol.*, 2010, Vol. 210 (12), P. 1646-1651.

6. **TIG** welding of the stainless steel 304 based on the ultrasonic vibration / Y. Fan, et al. // *Trans. China Weld. Inst.*, 2009, Vol. 30 (2).

7. **Y.Y. Fan, et al.** Ultrasonic wave assisted GMAW Weld. *J.*, 2012, Vol. 91 (3).

8. **Y. Cui, C.L. Xu, Q. Han** Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation // *Scripta Materialia*, 2006, Vol. 55, P. 975-978.

9. **Improving** arc joining of Al to steel and Al to stainless steel / H. Dong, et al. // *Materials Science and Engineering: A.*, 2012, Vol. 534, P. 424-435.

10. **Sundukov, S.K., Nigmatzyanov, R.I., Prikhodko, V.M., Sukhov, A.V., Fatyukhin, D.S.** Influence of Ultrasound on Submicrostructure of Weld Seam // *Russian Engineering Research*, 2021, 41(6), PP. 570-573.

11. **Study** on mechanism of arc-excited ultrasonic / M. Wu, et al. // *Chinese journal of mechanical*, 1999, Vol. 12 (1).

12. **Yang, M., Yang, Z., Cong, B., Wang, Q., Qi, B.** Metal molten behavior with ultra high frequency pulsed arc welding // *J B Univ Aeronaut Astronaut*, 2015, Vol. 41, PP. 589-593.

13. **Ultrasonic** generation by exciting electric arc: a tool for grain refinement in welding process / L. He, et al. // *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89 p.

REFERENCES

1. Nigmatzyanov, R.I., Sundukov, S.K., Fatyukhin, D.S. Ultrasonic oscillation superposition during welding / *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2020, no.10 (112), pp. 29-33.

2. Sundukov, S.K., Nigmatzyanov, R.I., Fatyukhin, D.S. Structure of the Weld Formed during the Application of Ultrasonic Vibrations // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021, No. 13, pp. 29-34

3. Pat. 515608 USSR, M. Kl.2 In 23K 9/14. Method of manual electric arc welding / Statnikov E.Sh., Shevtsov E.M., Merkel M.S., Kazantsev V.F. - 2022257/27; publ. 30.05.76 – 2 p.

4. Pat. 946841 USSR, M. Kl.5 V 23 K 9/14. Method of manual electric arc welding / Statnikov E.Sh., Fedorov V.Yu., Kiyamov R.N., Petridi N.I., Snyatkov E.I. - 2998525/25-27; publ. 30.07.82. - 3 p.

5. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration / T. Watanabe, et al. // *J. Mater. Process. Technol.*, 2010, Vol. 210 (12), P. 1646-1651.

6. TIG welding of the stainless steel 304 based on the ultrasonic vibration / Y. Fan, et al. // *Trans. China Weld. Inst.*, 2009, Vol. 30 (2).

7. Y.Y. Fan, et al. Ultrasonic wave assisted GMAW Weld. *J.*, 2012, Vol. 91 (3).

8. Y. Cui, C.L. Xu, Q. Han Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation // *Scripta Materialia*, 2006, Vol. 55, P. 975-978.

9. Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel / H. Dong, et al. // *Materials Science and Engineering: A.*, 2012, Vol. 534, P. 424-435.

10. Sundukov, S.K., Nigmatzyanov, R.I., Prikhodko, V.M., Sukhov, A.V., Fatyukhin, D.S. Influence of Ultrasound on Submicrostructure of Weld Seam // *Russian Engineering Research*, 2021, 41(6), PP. 570-573.

11. Study on mechanism of arc-excited ultrasonic / M. Wu, et al. // *Chinese journal of mechanical*, 1999, Vol. 12 (1).

12. Yang, M., Yang, Z., Cong, B., Wang, Q., Qi, B. Metal molten behavior with ultra high frequency pulsed arc welding // *J B Univ Aeronaut Astronaut*, 2015, Vol. 41, PP. 589-593.

13. Ultrasonic generation by exciting electric arc: a tool for grain refinement in welding process / L. He, et al. // *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89 p.

Статья поступила в редакцию 17.01.2022; одобрена после рецензирования 21.01.2022; принята к публикации 30.01.2022.

The article was submitted 17.01.2022; approved after reviewing 21.01.2022; accepted for publication 30.01.2022.