

Орлов А.С., Померанцев А.С., Сизинцев С.В. Применение высокочастотного индукционного подогрева с целью повышения трещиностойкости при сварке закаливающих сталей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 12–17. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.02

Orlov A.S., Pomerantsev A.S., Sizintsev S.V. Application of high-frequency induction heating for increasing crack resistance in the welding of hardening steels. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 12–17. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.02

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 20, № 3, 2018
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.02
УДК 621.78.013.6

А.С. Орлов, А.С. Померанцев, С.В. Сизинцев

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО ПОДОГРЕВА
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ
ПРИ СВАРКЕ ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ**

Проведен анализ источников тепла для реализации подогрева при сварке, а именно: газового пламени, индукционных нагревателей промышленной частоты, электрических нагревателей сопротивления, плазменных струй. Выявлены достоинства и недостатки каждого из них. Представлена блок-схема устройства для реализации высокочастотного индукционного подогрева при сварке. Целью настоящей работы является исследование возможности реализации такого варианта электродуговой сварки с подогревом, при котором тепло от источника подогрева вводится соосно со сварочным источником и суммируется с теплом сварочной дуги. Источник тепла для подогрева перемещается синхронно со сварочным источником тепла. Представлен электродуговой способ сварки с подогревом, при котором источником подогрева является высокочастотное электромагнитное поле, генерируемое многовитковым индуктором, соосно закрепленным на сварочной горелке. Показана локальная зона нагрева свариваемого изделия от действия высокочастотного индукционного источника, а также схема нагрева свариваемой детали, которая условно представлена в виде 3 секторов. Каждый по отдельности сектор обеспечивает предварительный, сопутствующий и послесварочный (термообработка) подогрев свариваемой детали. Приведены экспериментальные исследования для определения эффективности предполагаемого варианта технологии сварки с использованием высокочастотного подогрева как средства повышения стойкости против образования холодных трещин при сварке закаливающих сталей для автоматической сварки под флюсом и аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. Для этого сваривали соединения в виде технологической пробы. Представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность высокочастотного индукционного подогрева для повышения сопротивляемости образованию холодных трещин при сварке закаливающих сталей.

Ключевые слова: электродуговая сварка, высокочастотный индукционный подогрев, переменный ток, холодная трещина, технологическая проба, источник тепла, индуктор, закаливающиеся стали, трещиностойкость, кольцевой источник нагрева, сварочная горелка, концентратор напряжения.

A.S. Orlov, A.S. Pomerantsev, S.V. Sizintsev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

**APPLICATION OF HIGH-FREQUENCY INDUCTION HEATING
FOR INCREASING CRACK RESISTANCE
IN THE WELDING OF HARDENING STEELS**

The purpose of this work is to investigate the feasibility of implementing such a variant of electric arc welding with heating, in which heat from the source of heating is introduced coaxially with the welding source and added together with the heat of the welding arc. The paper presents an electric arc welding method with heating, in which the source of heating is a high-frequency electromagnetic field generated by a multi-turn inductor coaxially fixed on a welding torch. The local heating zone of the welded article is shown from the action of the high-frequency induction source, as well as the heating circuit of the workpiece to be welded. Experimental studies are conducted to determine the effectiveness of the proposed variant of the welding technology using high-frequency heating as a means of increasing the resistance to cold cracking in the welding of hardening steels for automatic submerged arc welding and argon-arc welding by a non-consumable electrode. For this purpose, the compounds were welded in the form of a technological sample. The results of experimental studies confirming the effectiveness of high-frequency induction heating for increasing the resistance to the formation of cold cracks in the welding of hardening articles are presented.

Keywords: arc welding, high-frequency induction heating, alternating current, cold crack, process test, heat source, inductor, hardening steels, crack resistance, annular heating source, welding torch, voltage concentrator.

В качестве источников тепла для реализации подогрева при сварке чаще всего используется газовое пламя, а также индукционные нагреватели промышленной частоты, электрические нагреватели сопротивления, плазменные струи [1–6]. Эти способы подогрева наряду с определенными достоинствами обладают одним существенным недостатком – подогрев реализуется как отдельный технологический процесс, разделенный по времени от воздействия сварочного источника тепла. Трудоемкость подогрева в этих случаях зачастую превышает трудоемкость сварки. Исходя из вышеизложенного, можно сказать, что совершенствование технологии подогрева при сварке и использование новых источников тепла для подогрева являются актуальными задачами в сварочном производстве [7–10].

Целью настоящей работы является исследование возможности реализации такого варианта электродуговой сварки с подогревом, при котором тепло от источника подогрева вводится соосно со сварочным источником и суммируется с теплом сварочной дуги. Источник тепла для подогрева перемещается синхронно со сварочным источником тепла.

С целью реализации такой схемы в качестве источника тепла для подогрева используют токи высокой частоты, генерируемые в кольцевом многовитковом индукторе, закрепленном на сварочной горелке соосно с электрической дугой [11]. Одним из основных достоинств высокочастотного индукционного подогрева являются существенно меньшие энергетические затраты по сравнению с другими известными способами подогрева [12].

Блок-схема устройства для реализации высокочастотного индукционного подогрева при сварке представлена на рис. 1. Устройство состоит из сварочной горелки электродуговой сварки 1, высокочастотного кольцевого индуктора 2, закрепленного соосно со сварочной дугой на сварочной горелке 1, источника питания сварочной дуги 3, источника питания высокочастотным переменным током 4 многовиткового индуктора 2, свариваемой детали 5.

Локальная зона нагрева свариваемого изделия от действия высокочастотного индукционного источника представляет собой кольцо, которое повторяет форму поперечного сечения индуктора шириной, равной диаметру витка кольцевого индуктора (рис. 2).

Такой кольцевой источник нагрева может быть представлен в виде 3 секторов (рис. 3). Передний сектор 1 расположен перед электрической дугой и сварочной ванной 4. Его тепло обеспечивает предварительный подогрев. Два участка среднего сектора 2, перемещающегося по бокам элект-

рической дуги, обеспечивают сопутствующий подогрев свариваемой детали; задний сектор 3 выполняет функцию послесварочного подогрева (термообработки) металла шва 5 и зоны термического влияния.

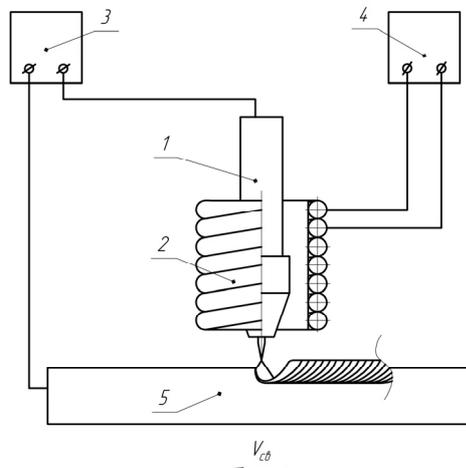


Рис. 1. Блок-схема для реализации высокочастотного подогрева при сварке



Рис. 2. Локальная зона нагрева от действия высокочастотного индуктора

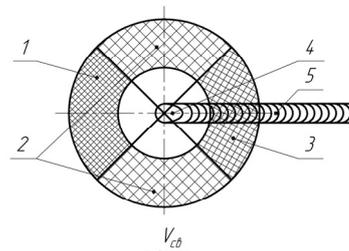


Рис. 3. Схема нагрева свариваемой детали от действия высокочастотного индукционного источника нагрева

Варьирование частоты и мощности электрического тока источником питания многовиткового индуктора позволяет в значительных пределах регулировать температуру и размеры локальных зон нагрева кольцевого источника тепла.

Экспериментальное подтверждение эффективности предполагаемого варианта технологии сварки с использованием высокочастотного подогрева как эффективного средства повышения стойкости против образования холодных трещин при сварке закаляющихся сталей проводилось в условиях автоматической сварки под флюсом и аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. Для этого производилась сварка соединений в виде технологической пробы, применяемой для качественной оценки стойкости к холодным трещинам при сварке¹ [13–22].

Технологическая проба представляет собой стыковое соединение пластин размером 100×80×10 мм, предварительно приваренных по всему контуру к жесткому основанию (рис. 4). Для инициирования холодной трещины в соединении служил концентратор напряжения в виде непровара. В качестве материала для контрольных соединений использовалась высокоуглеродистая низколегированная сталь марки 60С2 (ГОСТ 14959–79).

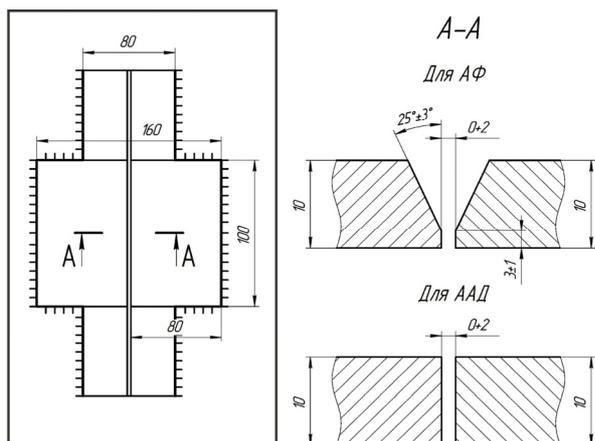


Рис. 4. Схема технологической пробы

Сварку соединений выполняли за 1 проход. Для автоматической сварки применялся флюс марки АН-348А, сварочная проволока Св-08 диаметром 1,6 мм. Параметры режима: сварочный ток 270–280 А, напряжение на дуге 27–28 В, скорость сварки 26 м/ч.

Режим аргонодуговой сварки: сварочный ток 180–190 А, напряжение на дуге 9–10 В, скорость сварки 7 м/ч, расход защитного газа, аргона, 12 л/мин, диаметр вольфрамового электрода 2,4 мм.

В условиях обоих методов сварки выполнялась серия из 3 образцов без подогрева и с высокочастотным индукционным подогревом. Параметры индукционного подогрева: частота переменного электромагнитного поля 60 кГц, электрическая мощность 3 кВт.

После завершения сварки пробы выдерживали при комнатной температуре не менее 3 сут. Наличие трещин фиксировали путем визуального контроля. Трещины возникали в образцах, сваренных без подогрева в течение 2–3 ч после полного охлаждения (рис. 5). Изломы поверхностей трещин имели характерный металлический блеск, что позволило их уверенно отнести к классу холодных трещин.



а



б

Рис. 5. Результаты сварки технологической пробы без подогрева: а – автоматическая сварка под флюсом; б – автоматическая аргонодуговая сварка неплавящимся электродом

¹ ГОСТ 25.506. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.

Во всех сварных соединениях проб, выполненных в условиях высокочастотного подогрева, трещины отсутствовали (рис. 6).



а



б

Рис. 6. Результаты сварки технологической пробы с высокочастотным индукционным подогревом: а – автоматическая сварка под флюсом; б – автоматическая аргонодуговая сварка неплавящимся электродом

Выводы

1. Применение высокочастотного индукционного подогрева эффективно для повышения сопротивляемости образованию холодных трещин во время сварки сталей при относительно малых энергозатратах по сравнению с традиционными способами подогрева.

2. Закрепление индуктора для высокочастотного нагрева соосно со сварочной дугой на сварочной горелке обеспечивает формирование в свариваемом изделии кольцевого пятна нагрева, что позволяет реализовать за 1 проход одновременно

предварительный, сопутствующий и послесварочный подогрев при сварке.

Список литературы

1. Предварительный подогрев и качество наплавленного металла / В.В. Ветер, Г.А. Белкин, М.И. Самойлов, И.С. Сарычев // Сварочное производство. – 1990. – № 10. – С. 6–8.
2. Фруммин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка. – Харьков: Metallurgizdat, 1961. – 422 с.
3. Карп И.Н., Сорока Б.С., Дашевский Л.Н. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах. – Киев: Техника, 1967. – 132 с.
4. Китаев А.М., Китаев Я.А. Справочная книга сварщика. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
5. Сварка в машиностроении: справ. в 4 т. / под ред. Н.А. Ольшанского. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 504 с.
6. Сварка в машиностроении: справ. в 4 т. / под ред. А.И. Акулова. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 2. – 462 с.
7. Безбах Д.К. Влияние ширины зазора на формирование односторонних стыковых швов при автоматической сварке под флюсом // Автоматическая сварка. – 1988. – № 6. – С. 48–49.
8. Оборудование для дуговой сварки: справ. пособие / под ред. В.В. Смирнова. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 656 с.
9. Справочник электросварщика / М.М. Борт, Л.А. Бялоцкий, Г.Д. Васильев [и др.]. – 2-е изд., перераб. – Киев: Машгиз, 1954. – 515 с.
10. Справочник по сварке, пайке, склейке и резке металлов и пластмасс / под ред. А.Н. Ноймана, Е.А. Рихтера. – М.: Metallurgia, 1980. – 464 с.
11. Способ автоматической сварки плавлением: пат. 039219 Рос. Федерация / Орлов А.С., Померанцев А.С., Сизинцев С.В. № 2016125032/02; Заявл. 22.06.2016.
12. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
13. Гайворонский А.А., Жуков В.В., Шишкевич А.С. Свариваемость высокопрочной углеродистой стали 65Г // Сварка и диагностика. – 2014. – № 5. – С. 49–53.
14. Скульский В.Ю. Особенности кинетики замедленного разрушения сварных соединений закаливающих сталей // Автоматическая сварка. – 1997. – № 5. – С. 3–12.
15. Влияние технологических факторов на структуру и свойства металла ЗТВ при ремонтно-восстановительной наплавке гребней цельнокатаных вагонных колес / В.А. Саржевский, А.А. Гайворонский, В.Г. Гордонный [и др.] // Автоматическая сварка. – 1996. – № 3. – С. 22–33.
16. Влияние состава наплавленного металла на структуру и механические свойства восстановленных железнодорожных колес / Гайворонский А.А., Поздняков В.Д., Маркашова Л.И. [и др.] // Автоматическая сварка. – 2012. – № 8. – С. 18–24.
17. Новые методы оценки сопротивляемости металлов хрупкому разрушению / под ред. Ю.Н. Роботнова. – М.: Мир, 1972. – 439 с.

18. Структурные изменения в участке перегрева металла ЗТВ колесной стали при дуговой наплавке / А.А. Гайворонский, В.В. Жуков, В.Г. Васильев [и др.] // Автоматическая сварка. – 2014. – № 1. – С. 17–23.

19. Шоршоров М.Х. Испытания металлов на свариваемость. – М.: Металлургия, 1972. – 240 с.

20. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.

21. Гривняк И. Свариваемость сталей. – М.: Машиностроение, 1984. – 215 с.

22. Ющенко К.А., Дерломенко В.В. Анализ современных представлений о свариваемости наплавке // Автоматическая сварка. – 2005. – № 1. – С. 9–13.

References

1. Veter V.V., Belkin G.A., Samoilo V.M., Sarychev I.S. Predvaritel'nyi podogrev i kachestvo naplavlennogo metalla [Preliminary heating and quality of the built-up metal]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1990, no. 10, pp. 6–8.

2. Frumin I.I. Avtomaticheskaya elektrodugovaya naplavka [Automatic arc naplavka]. Khar'kov: Metallurgizdat, 1961, 422 p.

3. Karp I.N., Soroka B.S., Dashevskii L.N. Produkty sgoraniia prirodnogo gaza pri vysokikh temperaturakh [Products of combustion of natural gas at high temperatures]. Kiev: Tekhnika, 1967, 132 p.

4. Kitaev A.M., Kitaev Ia.A. Spravochnaya kniga svarshchika [Reference book by the welder]. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 256 p.

5. Svarka v mashinostroenii [Welding in mechanical engineering]. Spravochnik v 4 tomakh. Ed. N.A. Ol'shanskogo. Moscow: Mashinostroenie, 1978, vol. 1, 504 p.

6. Svarka v mashinostroenii [Welding in mechanical engineering]. Spravochnik v 4 tomakh. Ed. A.I. Akulova. Moscow: Mashinostroenie, 1978, vol. 2, 462 p.

7. Bezbakh D.K. Vliianie shiriny zazora na formirovanie odносторонnikh stykovykh shvov pri avtomaticheskoi svarke pod flusom [Influence of width of a gap on formation of unilateral butt seams at automatic welding under gumbol]. *Avtomaticheskaya svarka*, 1988, no. 6, pp. 48–49.

8. Oborudovanie dlia dugovoi svarki [Equipment for arc welding]. Spravochnoe posobie. Ed. V.V. Smirnova. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, 656 p.

9. Bort M.M., Bialotskii L.A., Vasil'ev G.D. Spravochnik elektrosvarshchika [Reference book by the electric welder]. 2nd ed., Kiev: Mashgiz, 1954, 515 p.

10. Spravochnik po svarke, paike, skleike i rezke metallov i plastmass [Reference book on welding, soldering, gluing together and cutting of metals and plastic]. Ed. A.N. Noimana, E.A. Rikhtera. Moscow: Metallurgiya, 1980, 464 p.

11. Sposob avtomaticheskoi svarki plavlaniem: patent 039219 Ros. Federatsiia / Orlov A.S., Pomerantsev A.S., Sizintsev S.V. № 2016125032/02; Zaiavl. 22.06.2016.

12. Slukhotskii A.E., Ryskin S.E. Induktory dlia indukcionnogo nagreva [Inductors for induction heating]. Leningrad: Energiia, 1974, 264 p.

13. Gaivoronskii A.A., Zhukov V.V., Shishkevich A.S. Svarivaemost' vysokoprochnoi uglerodistoi stali 65G

[Svarivaemost' of high-strength carbonaceous steel 65G]. *Svarka i diagnostika*, 2014, no. 5, pp. 49–53.

14. Skul'skii V.Iu. Osobennosti kinetiki zamedlennogo razrusheniia svarykh soedinenii zakalivaiushchikhsia stali [Features of kinetics of the slowed-down destruction of the welded connections which are tempered staly]. *Avtomaticheskaya svarka*, 1997, no. 5, pp. 3–12.

15. Sarzhevskii V.A., Gaivoronskii A.A., Gordonnyi V.G. Vliianie tekhnologicheskikh faktorov na strukturu i svoystva metalla ZTV pri remontno-vostranovitel'noi naplavke grebnei tsel'nokatanykh vagonnykh koles [Influence of technology factors on structure and property of ZTV metal at a repair and recovery naplavka of crests of seamless-rolled carriage wheels]. *Avtomaticheskaya svarka*, 1996, no. 3, pp. 22–33.

16. Gaivoronskii A.A., Pozdniakov V.D., Markashova L.I. Vliianie sostava naplavlennogo metalla na strukturu i mekhanicheskie svoystva vostranovlennykh zheleznodorozhnykh koles [Influence of composition of the built-up metal on structure and mechanical properties of the restored railway wheels]. *Avtomaticheskaya svarka*, 2012, no. 8, pp. 18–24.

17. Novye metody otsenki soprotivliaemosti metal-lov khрупkomu razrusheniiu [New methods of assessment of resilience of metals to fragile destruction]. Ed. Iu.N. Robotnova. Moscow: Mir, 1972, 439 p.

18. Gaivoronskii A.A., Zhukov V.V., Vasil'ev V.G. Strukturnye izmeneniia v uchastke peregreva metalla ZTV kolesnoi stali pri dugovoi naplavke [Structural changes in the site of overheating of ZTV metal of wheel steel at an arc naplavk]. *Avtomaticheskaya svarka*, 2014, no. 1, pp. 17–23.

19. Shorshorov M.Kh. Ispytaniia metallov na svarivaemost' [Tests of metals on a svarivaemost']. Moscow: Metallurgiya, 1972, 240 p.

20. Makarov E.L. Kholodnye treshchiny pri svarke legirovannykh stali. – М.: Mashinostroenie, 1981. – 247 s.

21. Grivniak I. Svarivaemost' stali [Cold cracks when welding alloyed by staly]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 215 p.

22. Iushchenko K.A., Derlomenko V.V. Analiz sovremennykh predstavlenii o svarivaemosti naplavke [Analysis of modern ideas of a svarivaemost' to a naplavka]. *Avtomaticheskaya svarka*, 2005, no. 1, pp. 9–13.

Получено 15.08.2018

Об авторах

Орлов Александр Семенович (Воронеж, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры металлических конструкций и сварки в строительстве Воронежского государственного технического университета; e-mail: svarka@vgsu.vrn.ru.

Померанцев Андрей Сергеевич (Воронеж, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сварки в строительстве Воронежского государственного технического университета; e-mail: svarka@vgsu.vrn.ru.

Сизинцев Сергей Валерьевич (Воронеж, Россия) – аспирант кафедры металлических конструкций и

сварки в строительстве Воронежского государственного технического университета; e-mail: sizincev.1991@mail.ru.

About the authors

Alexander S. Orlov (Voronezh, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Metal Constructions and Welding in Construction, Voronezh State Technical University; e-mail: svarka@vgasu.vrn.ru.

Andrei S. Pomerantsev (Voronezh, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Metal Constructions and Welding in Construction, Voronezh State Technical University; e-mail: svarka@vgasu.vrn.ru.

Sergei V. Sizintsev (Voronezh, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Metal Constructions and Welding in Construction, Voronezh State Technical University; e-mail: sizincev.1991@mail.ru.