

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 621.791

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА
ДУГОВОЙ РАЗРЯД**

© 2021 С.М. Бурдаков*, М.Б. Дамаскина**, Д.И. Желецкий**

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

**Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, Волгодонск, Ростовская обл., Россия

В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния дополнительного импульсно-квазигармонического напряжения частотой 40кГц на структуру сварных соединений, технологические свойства дугового разряда постоянного тока при ручной дуговой сварке покрытыми электродами. Получение мелкозернистой структуры сварного соединения, является одним из условий повышения его технологических и прочностных свойств, эксплуатационной надежности изготавливаемого изделия в целом.

Ключевые слова: мелкозернистая структура, металлические конструкции, сварной шов, ручная дуговая сварка, устойчивость горения дугового разряда, механические свойства, качество металла, измельчение дендритов, импульсное воздействие, электромагнитное поле, металлографические исследования, макро и микроструктура образцов, феррит, дендрит.

Поступила в редакцию 21.12.2020

После доработки 25.01.2021

Принята к печати 02.02.2021

Получение мелкозернистой структуры металла сварного шва, околошовной зоны является важным условием повышения его технологических свойств и эксплуатационной надежности изготавливаемого изделия в целом. Решение этой задачи актуально при осуществлении работ при изготовлении, монтаже и ремонте металлических конструкций и оборудования блоков АЭС с применением ручной дуговой сварки покрытыми электродами.

К числу наиболее эффективных способов измельчения структуры металла шва относится введение колебаний в сварочную ванну как низких (1-100 Гц), так и ультразвуковых частот [1, 2]. Причем измельчение структуры металла шва наблюдается при колебаниях как жидкого металла в сварочной ванне, так и источника сварочного тепла. Введение кратковременных импульсов тепла в хвостовую часть сварочной ванны дает аналогичные результаты. Кроме того, при кристаллизации с колебаниями сплавы более склонны к измельчению зерна, чем чистые металлы [3].

Известно положительное действие ультразвука и вибраций низкой частоты на измельчение структуры шва. Однако из-за отсутствия надежных способов введения ультразвуковых колебаний в сварочную ванну и больших потерь при передаче энергии этот метод не нашел широкого практического применения при сварке металлов [4].

Более перспективен бесконтактный метод передачи колебаний в сварочную ванну путем наложения импульсного продольного магнитного поля, вызывающего встряхивание жидкого металла и измельчение структуры. Однако применение этого

метода при сварке конструкций сложной конфигурации ограничено из-за больших габаритов сварочного оборудования [4].

Одним из основных технологических факторов, влияющим на качество сварных швов является устойчивость горения дугового разряда [5]. Известно, что качество металла, его структура, прочностные характеристики сварного шва во многом определяется стабильностью и степенью завершенности гидродинамических и металлургических процессов. Главным источником нестабильности гидродинамических процессов является изменение силового воздействия дуги на сварочную ванну под действием внешних факторов в монтажных условиях [5, 6]. Решение этой проблемы возможно за счет управляемого, электрического, импульсного воздействия повышенной частоты на дуговой разряд от специализированного маломощного преобразователя [5, 6, 7].

Следует отметить, что процессы, протекающие в этом случае, изучены мало. Поэтому целью данной работы является исследование структуры сварных соединений, при использовании дугового разряда с комбинированной системой питания.

Можно сказать, что электромагнитное поле частотой 40кГц обеспечивает формирование структуры металла сварного шва с более высокими показателями ударной вязкости [8]. Наложение на дугу импульсного воздействия повышенной частоты приводит к повышению ее устойчивости, изменению таких технологических характеристик процесса, как формирование шва, условия первичной кристаллизации металла сварочной ванны [9, 10]. Для оценки влияния низковольтного импульсного напряжения частотой 40кГц на структуру металла шва при сварке покрытыми электродами был проведен ряд экспериментов, с целью выявления особенностей структуры сварного шва.

Металлографические исследования проводили на образцах, вырезанных из средней части единичных валиков, выполненных по базовой технологии ручной дуговой сварки покрытыми электродами (ТМЛ-3У [11]) и предлагаемой технологии при импульсном квазигармоническом воздействии напряжением 80В частотой 40кГц ($I_{св}=100А$) на дуговой разряд.

Исследовали макро и микроструктуру образцов. Травление на макроструктуру выполняли 15% водным раствором азотной кислоты. Общий вид макротомплетов образцов, выполненных по различным технологиям, представлен на рисунке 1 а, б соответственно. Видно, что площадь сечения наплавленного металла, выполненного по предлагаемой технологии, больше, чем в базовом варианте. В обоих случаях в макро- и микроструктуре валиков присутствует зона столбчатых дендритов, перпендикулярных линии сплавления (рис. 2 а, б), и зона равноосных дендритов в верхней части валика (рис. 3 а, б). Макроструктура зоны термического влияния (ЗТВ) образцов, выполненных по базовой технологии, темная, сильно травящаяся. На образцах, выполненных по предлагаемой технологии, этот эффект выражен значительно слабее (рис. 1 а, б).

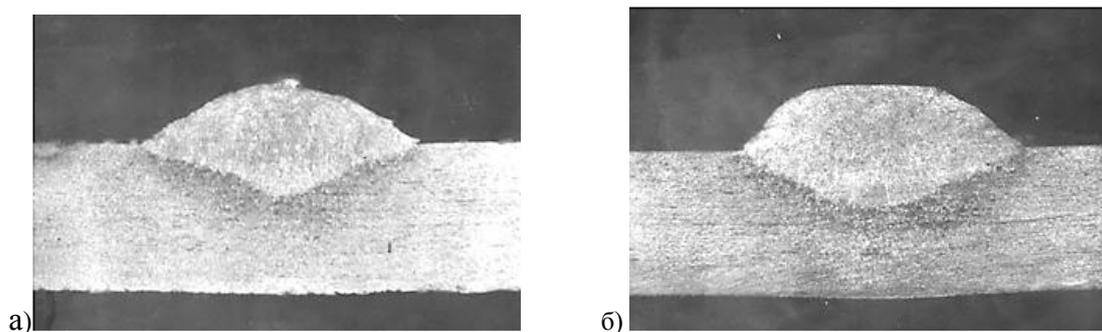


Рисунок 1 – Макрошлиф сварного шва, по базовой (а) и предлагаемой технологии сварки (б)
[Macrosection of the welded seam, according to the basic (a) and the proposed welding technology (b)]

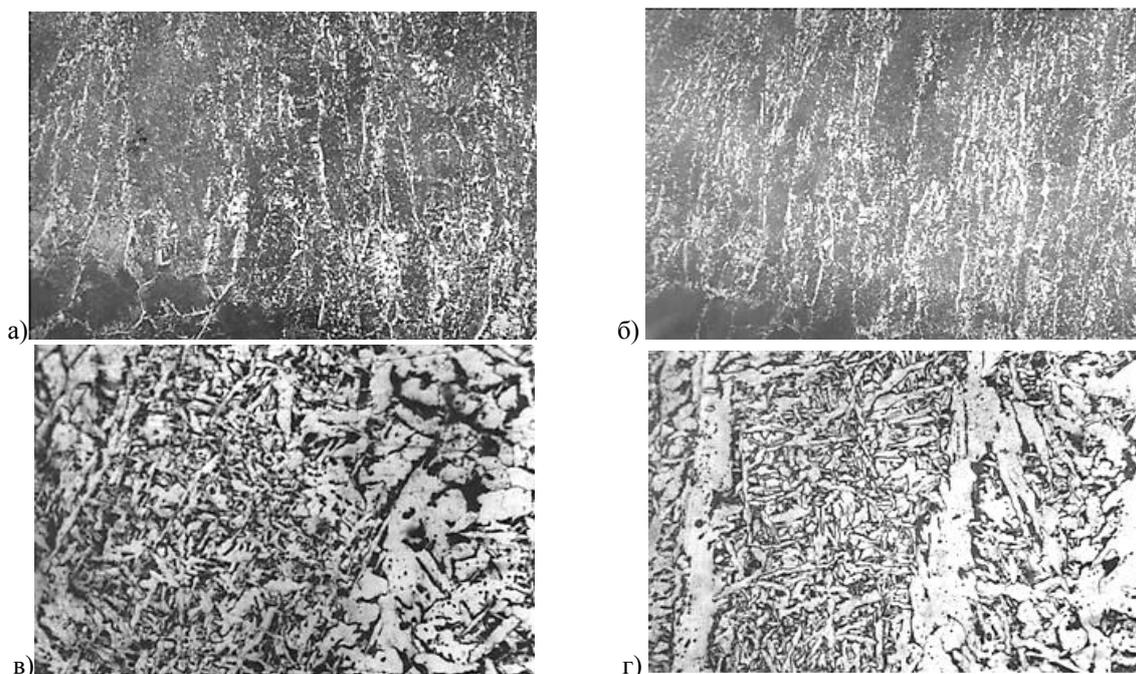


Рисунок 2 – Зона столбчатых дендритов сварного шва, по базовой (а), и предлагаемой технологии сварки (б), увеличение структуры $\times 50$; то же с увеличением структуры $\times 500$ (в), (г) [The zone of columnar dendrites of the weld, according to the basic (a), and the proposed welding technology (b), an increase in the structure $\times 50$; the same with an increase in the structure $\times 500$ (c), (d)]

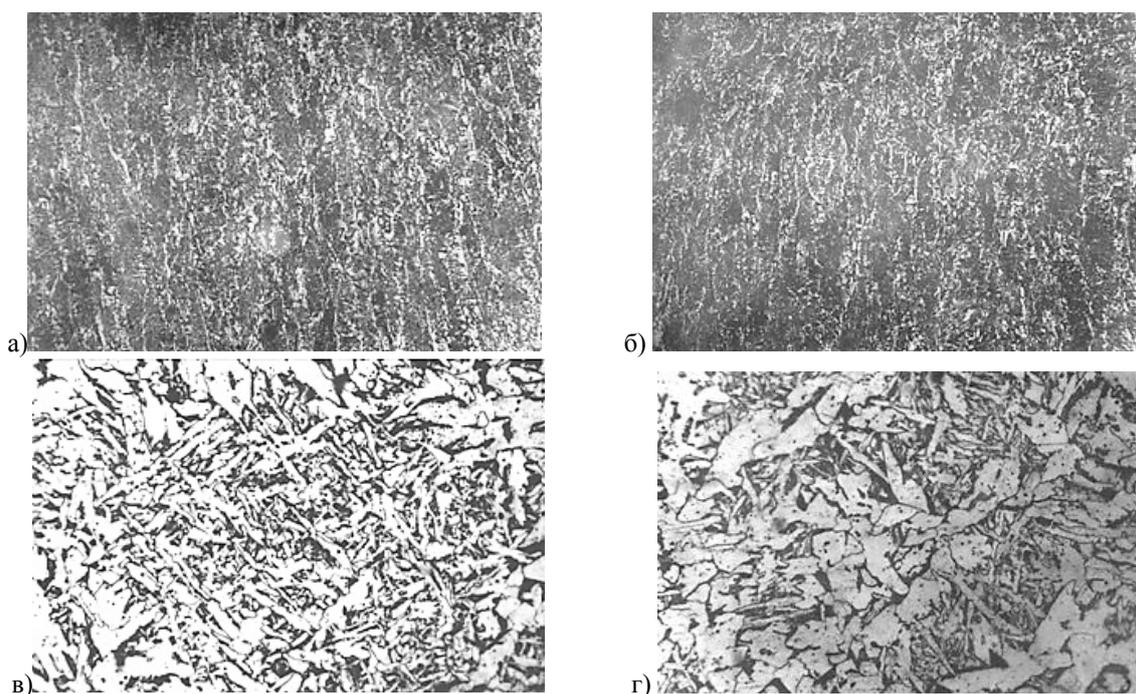


Рисунок 3 – Зона равноосных дендритов сварного шва, по базовой (а), и предлагаемой технологии сварки (б), увеличение структуры $\times 50$; то же с увеличением структуры $\times 500$ (в), (г) [The zone of equiaxed dendrites of the weld, according to the basic (a), and the proposed welding technology (b), an increase in the structure $\times 50$; the same with an increase in the structure $\times 500$ (c), (d)]

Исследования микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе MEF 2 фирмы Reichert при увеличениях от 50 до 500 раз. Травление микрошлифов выполняли в 4% спиртовом растворе азотной кислоты. Исследовали микроструктуру зон столбчатых и равноосных дендритов, а также микроструктуру ЗТВ и линии сплавления. Размер равноосных зерен ЗТВ у линии сплавления при базовом варианте

больше (эталонный номер зерна $G=1$, средняя площадь зерна $a=0,0625\text{мм}^2$) [12], чем по предлагаемой технологии (эталонный номер зерна $G=2$, средняя площадь зерна $a=0,0312\text{мм}^2$) [12] по сравнению структур на рисунке 4 а, б. В базовом варианте технологии более выражена видманштеттовость микроструктур шва (см. рис. 2 а). Средний размер поперечного сечения отдельных столбчатых дендритов, растущих от зоны сплавления, здесь также больше (см. рис. 2 а, в и рис. 2 б, г).

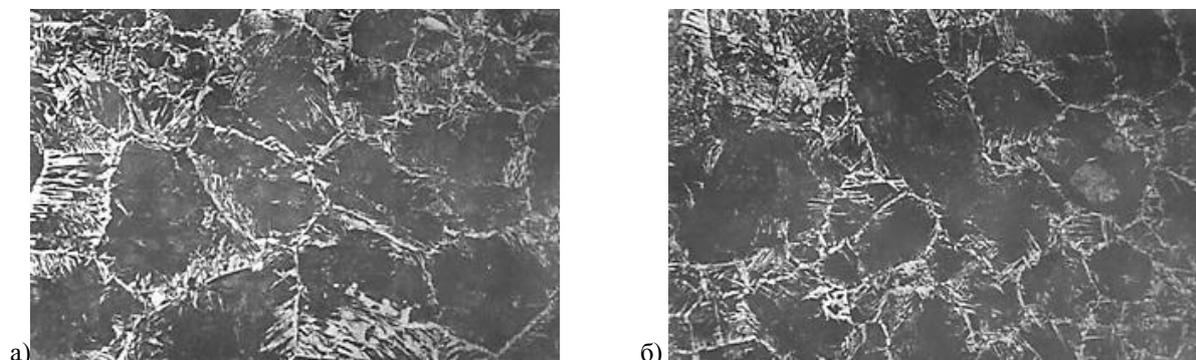


Рисунок 4 – Зона термического влияния в сварном шве, по базовой (а), и предлагаемой технологии сварки (б), увеличение структуры $\times 100$ [Heat-affected zone in the weld, according to the basic (a) and the proposed welding technology (b), an increase in the structure $\times 100$]

Структура зон равноосных дендритов мало отличается (см. рис. 3 а, б). В обоих случаях в микроструктуре присутствует полигональный феррит в виде сплошных массивных выделений по границам первичных кристаллов (см. рис. 2 в, г). Остальная часть микроструктуры представляет собой участки игольчатого феррита в виде пластинчатых или игольчатых образований в центральной части бывшего аустенитного зерна (дендрита).

По второй гипотезе разрушение растущих кристаллов при колебаниях жидкой фазы происходит за счет сил трения, возникающих между движущейся жидкой фазой и растущим кристаллом. Результаты расчетов показали, что при частотах колебаний свыше 9 кГц силы трения достигают значений превышающих прочность кристаллита при температуре плавления. Обе гипотезы могут удовлетворительно объяснить измельчение кристаллов под влиянием импульсного напряжения частотой 40кГц при формировании структуры металла шва [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дюргеров, Н.Г. Оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом / Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров, В.А. Ленивкин. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 80 с.
2. Вагнер, Ф.А. Оборудование и способы сварки пульсирующей дугой / Ф.А. Вагнер. – Москва: Энергия, 1980. – 117 с.
3. Болдырев, А.М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну / А.М. Болдырев // Сварочное производство. – 1976. – № 2. – С. 52–55.
4. Славин, Г.А. Управление процессом кристаллизации путем динамического воздействия дуги / Г.А. Славин, Е.А. Столпнер, Т.В. Морозова, Н.Д. Маслова, В.Б. Хорошева // Сварочное производство. – 1974. – № 8. – С. 2–3.
5. Бурдаков, С.М. Исследование параметров дугового разряда с комбинированной системой питания / С.М. Бурдаков, В.М. Козловцев // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 2(11). – С. 54–58.
6. Chernov A.V., Poletaev Yu.V., Karvishvili Z.O. and Burdakov S.M. Increasing the stability of arcing in welding with coated electrodes. *Welding International*. 2000. №14(8). ISSN 0950-7116. P. 640-641.
7. Burdakov S.M., Chernov A.V., Poletaev Yu.V., Polezhaev S.V. Physical model of electric arc discharge with the application of high-frequency voltage. *Welding International*. 2002. №16 (4). ISSN 0950-7116. P. 317-319.

8. *Бурдаков, С.М.* Механизм повышения ударной вязкости соединений при импульсном воздействии на сварочный контур / С.М. Бурдаков // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 3(20). – С. 51-56.
9. *Бурдаков, С.М.* Повышение устойчивости дугового разряда и качества соединений при сварке покрытыми электродами / С.М. Бурдаков, А.В. Чернов, Ю.В. Полетаев, С.В. Полежаев, В.В. Прокопенко // Новые методы теоретических и экспериментальных исследований материалов, приборов и технологий: сборник научных трудов Волгодон. ин-та Новочерк. гос. техн. ун-та. – Новочеркасск : Набл, 2001. – С. 111-115.
10. *Burdakov S.M., Chernov A.V., Poletaev Yu.V., Polezhaev S.V.* Effect of high-frequency voltage on the geometrical characteristics of direct current arc. *Welding International*. 2005. № 19(11). ISSN 0950-7116. P. 917-920.
11. ГОСТ 9466-75 (СТ СЭВ 6568-89). Electrodes coated with metal for manual arc welding of steels and repair. Classification and general technical conditions (red. from 01.06.1990) // Official website of the company «ConsultantPlus». – URL : <http://consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=STR&n=7936#049212932436850143> (date of application: 18.12.2020).
12. ГОСТ 5639-82. Steels and alloys. Methods of detection and determination of grain size (red. from 01.03.1987) // Official website of the company «ConsultantPlus». – URL : <http://consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=STR&n=18004#034184396498906144> (date of application: 18.12.2020).

REFERENCES

- [1] Djurjerov N.G., Sagirov H.N., Lenivkin V.A. *Oborudovanie dlja impul'sno-dugovoj svarki plavjashhimsja jelektrodom* [Equipment for Pulse-Arc Welding with Melting Electrode]. Moskava: Jenergoatomizdat [Moscow: Jenergoatomizdat]. 1985. 80 p. (in Russian).
- [2] Vagner F.A. *Oborudovanie i sposoby svarki pul'sirujushhej dugoj* [Pulsating Arc Welding Equipment and Methods]. Moskava: Jenergija [Moscow: Jenergija]. 1980. 117 p. (in Russian).
- [3] Boldyrev A.M. *O mekhanizme formirovaniya struktury metalla shva pri vvedenii nizkochastotnykh kolebaniy v svarochnuyu vannu* [Mechanism of Formation of Metal Structure of Seam at Introduction of Low-Frequency Fluctuations to a Welding Bath]. *Svarochnoye proizvodstvo* [Welding Fabrication]. 1976. №2. ISSN 0491-6441. P. 52-55 (in Russian).
- [4] Slavin G.A., Stolpner E.A., Morozov T.V., Maslova N.D., Khorosheva V.B. *Upravlenie protsessom kristallizatsii putem dinamicheskogo vozdeystviya dugi* [Controlling the Crystallization Process by Dynamic Action of the Arc]. *Svarochnoye proizvodstvo* [Welding Fabrication]. 1974. №8. ISSN 0491-6441. P. 2-3 (in Russian).
- [5] Burdakov S.M., Kozlovtssev V.M. *Issledovanie parametrov dugovogo razrjada s kombinirovannoj sistemoj pitaniya* [Arc Category Parameters Research with Combined Power Supply System]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'* [Global Nuclear Safety]. 2014. №2(11). ISSN2305-414X. P. 54-58 (in Russian).
- [6] Chernov A.V., Poletaev Yu.V., Karvishvili Z.O. and Burdakov S.M. *Increasing the Stability of Arcing in Welding with Coated Electrodes*. *Welding International*. 2000. №14(8). ISSN 0950-7116. P. 640-641 (in English).
- [7] Burdakov S.M., Chernov A.V., Poletaev Yu.V., Polezhaev S.V. *Physical Model of Electric Arc Discharge with the Application of High-Frequency Voltage*. *Welding International*. 2002. №16 (4). ISSN 0950-7116. P. 317-319 (in English).
- [8] Burdakov S.M. *Mehanizm povysheniya udarnoj vjazkosti soedinenij pri impul'snom vozdejstvii na svarochnyj kontur* [The Mechanism of Connection Impact Strength Increase during Pulse Impact on the Welding Circuit in the Nuclear Power Complex]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'* [Global Nuclear Safety]. 2016. №3(20). ISSN2305-414X. P. 51-56 (in Russian).
- [9] Burdakov S.M., Chernov A.V., Poletaev Yu.V., Polezhaev S.V., Prokopenko V.V. *Povyshenie ustoychivosti dugovogo razryada i kachestva soedinenij pri svarke pokrytymi elektrodami* [Increase of Stability of the Arc Category and Quality of Connections when Welding by the Covered Electrodes]. *Novyye metody teoreticheskikh i eksperimental'nykh issledovaniy materialov, priborov i tekhnologii: sbornik nauchnykh trudov* [New Methods of Theoretical and Experimental Research of Materials, Devices and Technologies: collection of scientific papers Volgondsk Institute of Novocherkassk University]. Novocherkassk: Nabla. 2001. P. 111-115 (in Russian).
- [10] Burdakov S.M., Chernov A.V., Poletaev Yu.V., Polezhaev S.V. *Effect of High-Frequency Voltage on the Geometrical Characteristics of Direct Current Arc*. *Welding International*. 2005. № 19 (11). ISSN 0950-7116. P. 917-920 (in English).
- [11] GOST 9466-75 (ST SJeV 6568-89). *Jelektrody pokrytye metallicheskie dlja ruchnoj dugovoj svarki stalej i naplavki. Klassifikacija i obshhie tehicheskie uslovija* (red. from 01.06.1990) [Coated Metal

- Electrodes for Manual Arc Welding of Steels and Surfacing. Classification and General Technical Conditions (edition of 01.06.1990)]. Ofitsial'nyy sayt kompanii «Konsul'tant Plyus» [Official site of the Consultant Plus company]. URL: <http://consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=STR&n=7936#049212932436850143> – 18.12.2020 (in Russian).
- [12] GOST 5639-82. Stali i splavy. Metody vyjavlenija i opredelenija velichiny zerna (red. ot 01.03.1987) [Steels and Alloys. Methods for Detecting and Determining the Grain Size (edition of 01.03.1987)]. Ofitsial'nyy sayt kompanii «Konsul'tant Plyus» [Official site of the Consultant Plus company]. URL: <http://consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=STR&n=18004#034184396498906144> – 18.12.2020 (in Russian).

Study of Welded Joint Metal Structure under Pulsed Impact on Arc Discharge

S.M. Burdakov^{*1}, M.B. Damaskina^{**2}, D.I. Zheletskiy^{**3}

**Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University “MEPhI”, Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

***«Atommash» the branch of «AEM-technologies» JSC in Volgodonsk, Zhukovskoe highway, 10, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹ORCID iD: 0000-0002-8599-6008

WoS Researcher ID: F-6903-2017

e-mail: SMBurdakov@mephi.ru

²ORCID iD: 0000-0003-2488-1191

e-mail: damaskina_mb@atommash.ru

³ORCID iD: 0000-0001-9627-7685

e-mail: zheletskiy_di@atommash.ru

Abstract – The article presents the results of an experimental study of the effect of an additional pulse-quasi-harmonic voltage with a frequency of 40 kHz on the structure of welded joints, the technological properties of a DC arc discharge in manual arc welding with covered electrodes. Obtaining a fine-grained structure of a welded joint is one of the conditions for increasing its technological and strength properties, and the operational reliability of the manufactured product as a whole.

Keywords: fine-grained structure, metal structures, weld seam, manual arc welding, arc discharge stability, mechanical properties, metal quality, dendritic grinding, impulse action, electromagnetic field, metallographic studies, macro and microstructure of samples, ferrite, dendrite.