

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.791.753.042.4
DOI 10.26583/gns-2023-02-04
EDN SMBSCO

Исследование критериев устойчивости дугового разряда на
предельном режиме сварки покрытыми электродами

С.М. Бурдаков¹  , О.Ф. Цуверкалова¹ , Ю.В. Заяров¹ ,
Л.В. Постой² , В.Г. Ткачев¹ 

¹Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

²Общество с ограниченной ответственностью фирма «МОНРЕМ», Волгодонск, Ростовская обл.,
Россия

 SMBurdakov@mephi.ru

Аннотация. В данной работе показаны результаты экспериментов по исследованию влияния вспомогательного напряжения частотой $f_{\text{имп}}=40000\text{Гц}$ на устойчивость дугового разряда постоянного тока при предельном режиме сварочного процесса штучными, покрытыми электродами. Этот эффективный способ соединения прокатных и сборных элементов металлических конструкций нашел повсеместное использование при их монтаже, изготовлении, ремонте в строительстве разнообразных объектов: промышленного и гражданского назначения, сооружений тепловой и атомной энергетики ответственного назначения. В этой связи, повышение качества и технологических, прочностных параметров сварных швов, производительности процесса изготовления металлических конструкций, в большой степени связано с режимами сварки и увеличением устойчивости дугового разряда как важного элемента системы: «источник питания–дуга–сварочная ванна–изделие». Улучшение производительности рассматриваемого процесса сварки, особенно актуально в монтажных условиях в связке с его устойчивостью и является важной, стоящей на повестке дня задачей. При выполнении исследования были приняты во внимание следующие критерии и их значения относительно устойчивости сварочной дуги, такие как: $I_{\text{разр}}$ –разрывная длина в миллиметрах, коэффициенты вариации: $KV(I_{\text{св.осц}})$ –сварочного тока, $KV(U_{\text{д.осц}})$ –напряжения, θ_t –постоянная времени, а так же получены их численные значения. Численные значения указанных выше критериев были получены на основе анализа графиков (осциллограмм) зависимости электрического тока ($I_{\text{св.осц}}$, А) и напряжения ($U_{\text{д.осц}}$, В) дуги от времени длительности процесса ($t_{\text{проц}}$, сек). Полученные результаты проведенного анализа, свидетельствуют о повышении устойчивости, понижении инерции отклонения сопротивления (проводимости) сварочной дуги, при наложении вспомогательного напряжения частотой $f_{\text{имп}}=40000\text{Гц}$ на предельном режиме сварки покрытыми электродами.

Ключевые слова: стальные балки, балочные клетки, монтаж, атомно-энергетическая отрасль, атомные электрические станции, строительно-монтажные работы, строительные конструкции, устойчивость, производительность процесса, ремонтные работы, система «источник питания–дуга–сварочная ванна–изделие», производительность сварочного процесса, критерии устойчивости, покрытый электрод, каплеперенос, динамические характеристики дугового разряда, уравнение динамики дуги.

Для цитирования: Бурдаков С.М., Цуверкалова О.Ф., Заяров Ю.В., Постой Л.М., Ткачев В.Г. Исследование критериев устойчивости дугового разряда на предельном режиме сварки покрытыми электродами. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):31–38. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-04>

Arc stability study at the limit mode of welding with coated electrodes

Sergey M. Burdakov¹  , Olga F. Tsvetkova¹ , Yuriy V. Zayarov¹ ,
Lydmila V. Postoy² , Vladimir G. Tkachev¹ 

¹ Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgodonsk, Rostov region, Russia

² Limited Liability Company Firm «MONREM», Volgodonsk, Rostov region, Russia
 SMBurdakov@mephi.ru

Abstract. This paper shows the results of experiments to study the effect of the auxiliary voltage with frequency $f_i = 40000\text{Hz}$ on the stability of arc discharge at the limit mode of the welding process with single, coated electrodes. This effective method of connecting rolled and prefabricated elements of metal structures has found widespread use in their installation, manufacture and repair in the construction of various facilities: industrial and civil purposes, thermal and nuclear power facilities for responsible purposes. In this regard, the increase in the quality and technological, strength parameters of welds, the productivity of the manufacturing metal structure process, is largely associated with welding modes and an increase in the stability of arc discharge as an important element of the system: "power source-arc-welding tub-product." Improving the performance of the welding process under consideration is particularly important under mounting conditions in conjunction with its stability is an important task on the agenda. When performing the study, the following criteria and their values regarding the stability of the welding arc were taken into account, such as: l_{expl} - rupture length in mm, coefficients of variation: $KV(I_{\text{wd}})$ - welding current, $KV(U_{\text{wd}})$ - voltage, q_t - constant time, as well as their numerical values were obtained. The obtained numerical values of the above criteria were obtained based on the analysis of graphs (oscillograms) of the dependence of the electric current (I_{wd} , A) and the voltage (U_{wd} , V) of the arc on the time of the process duration (t , sec). The obtained results of the analysis indicate an increase in stability, a decrease in inertia of the deviation of the resistance (conductivity) of the welding arc when the auxiliary voltage is applied with a frequency of $f_i = 40000\text{Hz}$ at the limit mode of welding with coated electrodes.

Keywords: steel beams, beam cages, installation, nuclear power industry, nuclear power plants, construction and installation works, building structures, stability, process performance, repair work, power supply-arc-welding tub-product system, welding process performance, stability criteria, coated electrode, drop transfer, arc discharge dynamic characteristics, arc dynamics equation.

For citation: Burdakov S.M., Tsvetkova O.Yu., Zayarov Yu.V., Postoy L.V., Tkachev V.G. Arc Stability Study at the limit mode of welding with coated electrode. *Global nuclear safety*. 2023;13(2):31-38 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-04>

Введение

В рамках атомно-энергетической отрасли идет увеличение возведения и грядущий ввод в эксплуатацию новых тепловых и атомных электрических станций, а также объектов их инфраструктуры и обеспечения, ведется проведение планово-предупредительных ремонтов на их базе. Выполняемые строительно-монтажные, ремонтные работы проводятся с использованием государственного контроля и поддержки. На сегодняшний день этому успешно способствует проведение текущей реформы ценообразования в строительной отрасли Российской Федерации с 2020 г. по 2023 г. включительно¹, введение государственной программы «Строительство» с 1.01.2023 г.², что позволит сократить сроки возведения строений, финансируемых из бюджета и число долговременных.

В промышленных и отраслевых объектах, в том числе тепловой и атомной энергетики металлические конструкции на основе сталей, в основном применяют, в

¹ Приказ Минстроя России от 04.08.2020 N 421/пр «Об утверждении Методики определения сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации на территории Российской Федерации» (Зарегистрировано в Минюсте России 23.09.2020 N 59986). Официальный сайт компании «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_362957/ (дата обращения: 19.03.2023).

² Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11.04.2022 № 829-р. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202204120022> (дата обращения: 10.03.2023).

составе элементов каркасов, оснований и опор оболочек. Это могут быть центрально-сжатые и внецентренно-сжатые колонны, прокатные и сварные балки, стальные рабочие площадки со сплошными и решетчатыми настилами, а также образуемые ими балочные клетки, различного рода фермы. Соединение составных элементов названных конструкций в составе каркасов или балочных клеток на монтаже в основном осуществляется с применением ручной дуговой сварки штучными, покрытыми электродами³.

Сокращение сроков возведения объектов строительства, напрямую связано с штучно-калькуляционным временем выполнения сборочно-сварочных работ при изготовлении, ремонте и монтаже стальных элементов объекта строительства. Повышение качества и технологических, прочностных параметров сварных соединений, производительности сварочного процесса напрямую связано с его режимами проведения и увеличением устойчивости дугового разряда как важного элемента системы: «источник питания—дуга—сварочная ванна—изделие» [1].

Увеличение производительности сварочного процесса может быть осуществлено применением сварочных материалов: электродов больших диаметров, режимами сварки: применением сварочного тока предельных паспортных значений (максимального и минимального сварочного тока, для выбранной марки штучного, покрытого электрода), что в отдельных случаях вызывает повышение коэффициента разбрызгивания металла [2].

Улучшение устойчивости дугового разряда на предельных режимах сварки, будет способствовать стабилизации и повышению технологических свойств соединения, производительности процесса производства в целом, эксплуатационной надежности металлических конструкций.

Методы исследования

Основной целью представленной работы является определение воздействия накладываемого вспомогательного напряжения $U_{\text{имп}}=80,0\text{В}$, частотой $f_{\text{имп}}=40000\text{Гц}$ (QPC) на критерии устойчивости дуги постоянного тока при предельном режиме сварки штучными, покрытыми электродами.

Формирование воздействия вспомогательным напряжением $U_{\text{имп}}=80,0\text{В}$, частотой $f_{\text{имп}}=40000\text{Гц}$ на дуговой разряд постоянного тока было выполнено с помощью специального генератора, в составе информационно-измерительной и управляющей системы, при параллельном его подключении к основному источнику питания (ВДУ–504) [3]. Регулировка сварочного тока основного источника (ВДУ–504) осуществлялась внутренней электронной схемой управления с контролем по встроенному амперметру.

При выполнении исследования для определения устойчивости сварочной дуги использовались определенные критерии, такие как: $I_{\text{разр}}$, – разрывная длина [3–5], коэффициенты вариации: $KV(I_{\text{св.осц}})$, – сварочного тока, $KV(U_{\text{д.осц}})$, – напряжения, θ_t , – постоянная времени [6–8].

Методические указания и рекомендации для выполнения проведенных экспериментов были представлены в литературных источниках [3,9,10].

На основании ТУ 1272-125-55224353-2013(технические условия) на сварочные плавящиеся покрытые электроды марки УОНИИ 13/55 номинальным диаметром $d_{\text{электр}}=3,00\text{мм}$, максимальный сварочный ток для нижнего положения сварочной ванны составляет: $I_{\text{св.осц}}=130\text{А}$, а минимальный: $I_{\text{св.осц}}=90\text{А}$.

В рамках данной работы определяли устойчивость дугового разряда в нижнем расположении сварочной ванны без разделки кромок на пластине толщиной $t=10\text{мм}$ из

³ Приказ Минстроя России от 27.02.2017 N 126/пр Об утверждении СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции» URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_278905/ (дата обращения: 04.03.2023).

стали марки ВСтЗсп5, с использованием воздействия на сварочную дугу вспомогательного напряжения $U_{\text{имп}}=80,0\text{В}$, частотой $f_{\text{имп}}=40000\text{Гц}$ и без воздействия указанным напряжением.

Результаты проведенных исследований

С помощью специальной информационно-измерительной и управляющей системы, осуществляющей формирование вспомогательного напряжения $U_{\text{имп}}=80,0\text{В}$, частотой $f_{\text{имп}}=40000\text{Гц}$ и съем графиков–осциллограмм зависимости электрического тока ($I_{\text{св.осц}}$, А) и напряжения ($U_{\text{д.осц}}$, В) дуги от времени длительности процесса ($t_{\text{проц}}$, сек) (см. рис. 1) [10].

Для определения значений коэффициентов вариации $KV(I_{\text{св.осц}})$ для сварочного тока, и напряжения $KV(U_{\text{д.осц}})$, постоянной времени дуги θ_t , была проведена обработка полученных зависимостей электрического тока ($I_{\text{св}}=I_{\text{св.осц}}$, А) и напряжения ($U_{\text{д}}=U_{\text{д.осц}}$, В) дуги от времени длительности процесса ($t_{\text{проц}}$, сек) в специально разработанной программе для Mathcad©.

При сварочном процессе на минимальном токе: $I_{\text{св.осц}}=90\text{А}$ (без (QPC)), получили следующие значения параметров устойчивости: $l_{\text{разр}}=14\text{мм}$, $KV(I_{\text{св.осц}})=30,488$, $KV(U_{\text{д.осц}})=51,648$. $I_{\text{св.осц}}=90\text{А}$ (с (QPC) $f_{\text{имп}}=40000\text{Гц}$): $l_{\text{разр}}=28\text{мм}$, $KV(I_{\text{св.осц}})=43,597$, $KV(U_{\text{д.осц}})=38,021$.

При сварочном процессе на максимальном токе: $I_{\text{св.осц}}=130\text{А}$ (без (QPC)), получили следующие значения параметров устойчивости: $l_{\text{разр}}=16\text{мм}$, $KV(I_{\text{св.осц}})=13,887$, $KV(U_{\text{д.осц}})=14,596$. $I_{\text{св.осц}}=130\text{А}$ (с (QPC) $f_{\text{имп}}=40000\text{Гц}$): $l_{\text{разр}}=31\text{мм}$, $KV(I_{\text{св.осц}})=16,379$, $KV(U_{\text{д.осц}})=14,322$.

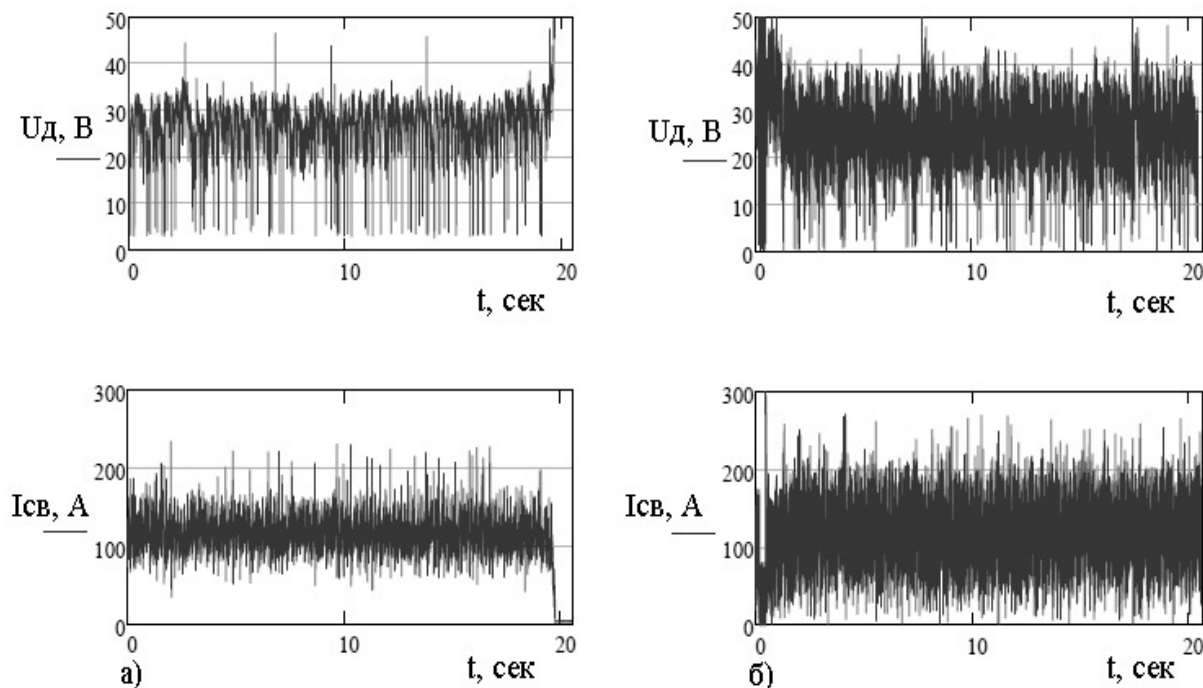


Рисунок 1. Зависимости электрического тока ($I_{\text{св.осц}}$, А) и напряжения ($U_{\text{д.осц}}$, В) дуги от времени длительности процесса ($t=t_{\text{проц}}$, сек), время измерения $t_{\text{проц}}=17,00$ сек: а) $I_{\text{св}}=I_{\text{св.осц}}=130\text{А}$; б) $I_{\text{св}}=I_{\text{св.осц}}=130\text{А}$ с (QPC) $f_{\text{имп}}=40000\text{Гц}$

Figure 1. Dependences of electric current ($I_{\text{св}}$, А) and arc voltage ($U_{\text{д}}$, В) on process time (t , sec), measurement time $t=17,00$ sec: а) $I_{\text{св}}=130\text{А}$; б) $I_{\text{св}}=130\text{А}$ with QPC $f_{\text{имп}}=40000\text{Hz}$

Стабильно растущее значение $KV(I_{\text{св.осц}})$ в более чем 1,4 раза может обозначать увеличение частоты переноса капель металла с электрода в сварочную ванну когда

применяется (QPC) при токе сварки $I_{св}=130\text{А}$. Понижение $KV(U_{д.осц})$ в 1,02–1,4 раза может свидетельствовать о повышении стабильности падения напряжения на дуге при наложении (QPC) $f_{имп}=40000\text{Гц}$ на исследуемом сварочном режиме.

Условия устойчивости сварочной дуги может быть определены с помощью использования уравнения динамики, и получения на основе него величины постоянной времени θ_t , определяющей инерцию вариаций сопротивления (проводимости) плазменного объема дуги при изменении тока в системе «источник питания—дуга—сварочная ванна—изделие» (рис. 2).

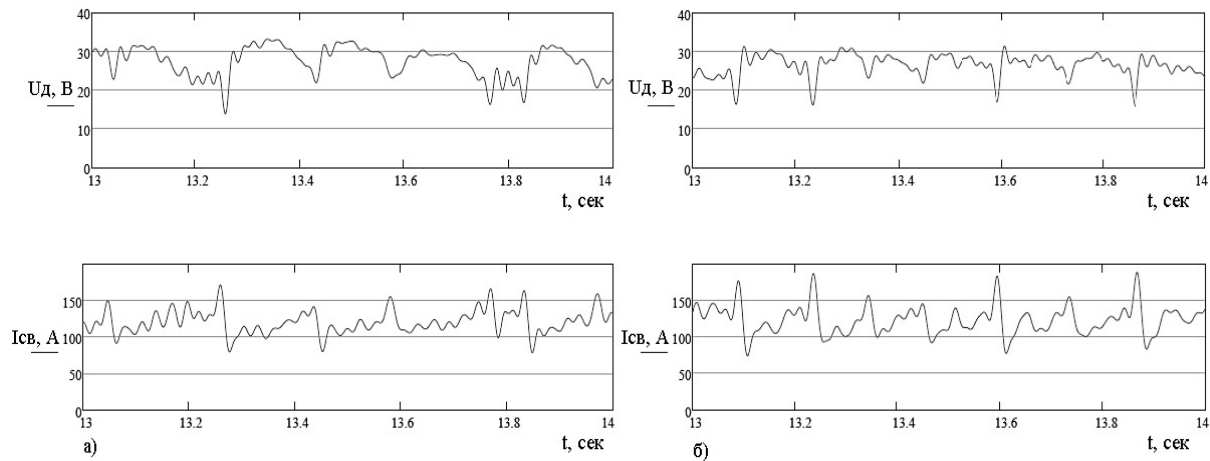


Рисунок 2. Зависимости электрического тока ($I_{св.осц}$, А) и напряжения ($U_{д.осц}$, В) дуги от времени длительности процесса ($t=t_{проц}$, сек), время измерения $t_{проц}=1,00$ сек: а) $I_{св}=I_{св.осц}=130\text{А}$; б) $I_{св}=I_{св.осц}=130\text{А}$ с (QPC) $f_{имп}=40000\text{Гц}$

Figure 2. Dependences of electric current (I_{wd} , А) and arc voltage (U_{wd} , V) on process time (t , sec), measurement time $t=1,00\text{sec}$: а) $I_{wd}=130\text{А}$; б) $I_{wd}=130\text{А}$ with QPC $f_i=40000\text{Hz}$

Уравнение динамики дуги в дифференциальной форме имеет вид формулы (1) [9]:

$$\theta_t \frac{dU_d}{dt} + U_d = \theta_t R_{ст} \cdot \frac{dI_{св}}{dt} + R_d I_{св}, \quad (1)$$

где θ_t – постоянная времени дуги;

R_d – дифференциальное сопротивление дуги, определялось из вольтамперной характеристики;

$R_{ст}$ – статическое сопротивление дуги, определяется из вольтамперной характеристики дуги, как отношение параметров режима сварки, Ом.

Следовательно, исходя из формулы (1), можно определить параметр θ_t выражением (2):

$$\theta_t = \frac{R_d I_d - U_d}{\frac{dU_d}{dt} - \frac{dI_d}{dt} R_{ст}}. \quad (2)$$

Так при режиме сварки на $I_{св.осц}=90\text{ А}$ (без (QPC)), $\theta_t=0,04\text{сек}$, соответственно для сварки на режиме $I_{св.осц}=90\text{А}$ (с QPC) $f_{имп}=40000\text{Гц}$, $\theta_t=0,018\text{сек}$.

Так при режиме сварки на $I_{св.осц}=130\text{ А}$ (без (QPC)), $\theta_t=0,079\text{сек}$, соответственно для сварки на режиме $I_{св.осц}=130\text{А}$ (с QPC) $f_{имп}=40000\text{Гц}$, $\theta_t=0,032\text{сек}$.

После вычислений значения θ_t показывают фактическое (более чем в два раза) уменьшение инертности варьирования электропроводности дуги, когда используется

наложение на него (QPC) $f_{\text{имп}}=40000\text{Гц}$ при исследуемом режиме сварки. Подобное улучшение устойчивости наблюдалось так же при ее определении исходя из показателей разрывной длины дуги $l_{\text{разр}}$ [3]. Изменения показателей устойчивости на исследуемых режимах ведения сварочного процесса может быть связано с возникающими новыми условиями ионизации и рекомбинации носителей заряда (ионов и электронов) в плазме электродугового разряда, что было показано в работах: а) об устойчивости горения сварочной дуги с использованием информационно-измерительной и управляющей системы; б) о физической модели электрического дугового разряда с наложением высокочастотного напряжения [10,11].

Используя результаты обработки осциллограмм (см. рис. 1,2) сварочного электродугового разряда, можно определить его динамические характеристики в плане исследования устойчивости на примере скоростей изменения силы сварочного тока и напряжения обозначенных как $dI_{\text{св.осц}}/dt$ и $dU_{\text{д.осц}}/dt$ соответственно. По данным работы А.Ф. Уварова [12] пониженные величины $dI_{\text{св.осц}}/dt$ и $dU_{\text{д.осц}}/dt$ способствуют уменьшению устойчивости электродугового разряда что сказывается в целом на качестве, а также на технологических, прочностных параметрах выполняемых сварных соединений, производительности сварочного процесса.

Для указанных выше условий ведения сварочного процесса ($I_{\text{св.осц}}=90\text{А}$ (без (QPC)) и $I_{\text{св.осц}}=90\text{А}$ (с QPC) $f_{\text{имп}}=40000\text{Гц}$), были получены следующие результаты по максимальным скоростям изменения $dI_{\text{св.осц.мах}}/dt$ и $dU_{\text{д.осц.мах}}/dt$:

$$dI_{\text{св.осц.мах}}/dt = 8,913 \cdot 10^3, \text{ А/сек}; dU_{\text{д.осц.мах}}/dt = 2,035 \cdot 10^3, \text{ В/сек} - \text{без (QPC)};$$

$$dI_{\text{св.осц.мах}}/dt = 1,34 \cdot 10^4, \text{ А/сек}; dU_{\text{д.осц.мах}}/dt = 2,158 \cdot 10^3, \text{ В/сек} - \text{без (QPC)}.$$

При режиме: ($I_{\text{св.осц}}=130\text{ А}$ (без (QPC)) и $I_{\text{св.осц}}=130\text{А}$ (с QPC) $f_{\text{имп}}=40000\text{Гц}$), были получены следующие результаты по максимальным скоростям изменения $dI_{\text{св.осц.мах}}/dt$ и $dU_{\text{д.осц.мах}}/dt$:

$$dI_{\text{св.осц.мах}}/dt = 8,504 \cdot 10^3, \text{ А/сек}; dU_{\text{д.осц.мах}}/dt = 1,949 \cdot 10^3, \text{ В/сек} - \text{без (QPC)};$$

$$dI_{\text{св.осц.мах}}/dt = 8,546 \cdot 10^3, \text{ А/сек}; dU_{\text{д.осц.мах}}/dt = 2,812 \cdot 10^3, \text{ В/сек} - \text{с (QPC)}.$$

Выводы

Подводя итог с использованием выше полученных результатов при применении максимального сварочного тока предельных паспортных значений в режиме сварочного процесса для заданной марки электрода ($d_{\text{электр}}=3,00\text{ мм}$), отметим, что использование QPC $f_{\text{имп}}=40000\text{ Гц}$ приводит к повышению динамических характеристик электродугового разряда и способствует улучшению условий обеспечения его устойчивости. Обеспечение этих условий приводит так же к формированию мелкозернистой структуры сварного соединения и повышению его прочностных и служебных свойств, что было показано в работе о структуре металла сварных соединений при импульсном воздействии на дуговой разряд [13].

Использование покрытых электродов исследуемой марки на предельных паспортных режимах так же может быть рекомендовано при сварке металлических конструкций с применением системы комбинированного питания (QPC) дугового разряда в нижнем положении сварочной ванны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Чернышев Г.Г., Ковтун В.Л. Возможности повышения производительности при дуговой сварке. *Труды МВТУ*. 1985;(434):31–41.
2. Хромченко Ф.А. Надежность сварных соединений труб котлов и паропроводов. Москва: Энергоиздат; 1982. 120 с.
3. Чернов А.В., Полетаев Ю.В., Кавришвили З.О., Бурдаков С.М. Повышение устойчивости горения дуги при сварке покрытыми электродами. *Сварочное производство*. 2000;(2):7–9.
4. Бурдаков С.М., Орехов М.И. Анализ способов повышения и критериев оценки устойчивости сварочного дугового разряда. *Инженерный вестник Дона*. 2016;(2). URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3594> (дата обращения: 04.03.2023).

5. Хренов К.К. Электрическая сварочная дуга. Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы; 1949. 203 с.
6. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. Москва: Машиностроение; 1970. 335 с.
7. Букаров В.А., Ермаков С.С., Дорина Т.А. Оценка стабильности дуговой сварки по осциллограммам процесса с использованием статистических методов. *Сварочное производство*. 1990;(12):30–32.
8. Самервил Дж.М. Электрическая дуга. Москва: Государственное энергетическое издательство; 1962. 119 с.
9. Бурдаков С.М., Чернов А.В., Цуверкалова О.Ф., Зокиров К.Д. Управление газодинамическими характеристиками дугового разряда с помощью квазигармонической компоненты питания. *Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XVI Международной научно-практической конференции, 12–13 ноября 2020 г.* Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ; 2020. С. 63–66. ISBN 978-5-72622472-5. URL: <https://nps.viti-mephi.ru/ru/arhiv-konferencii> (дата обращения: 04.03.2023).
10. Бурдаков С.М. Экспериментальные исследования устойчивости горения сварочной дуги с использованием информационно-измерительной и управляющей системы. *Сборник докладов 5-й Международной научной-практической конференции «Качество науки – качество жизни», Тамбов, 26–27 февраля 2009 г.* Тамбов: Центр Конференций ТГТУ; 2009. С. 54.
11. Бурдаков С.М., Чернов А.В., Полетаев Ю.В., Полежаев С.В. Физическая модель электрического дугового разряда с наложением высокочастотного напряжения. *Сварочное производство*. 2001;(11):13–16.
12. Уваров А.Ф. Транзисторный инверторный источник питания для импульсной дуговой сварки. *Сварочное производство*. 1988;(10):25–26.
13. Бурдаков С.М., Дамаскина М.Б., Желецкий Д.И. Исследование структуры металла сварных соединений при импульсном воздействии на дуговой разряд. *Глобальная ядерная безопасность*. 2021;(1):38–43.

ВКЛАД АВТОРОВ:

Бурдаков С.М. – разработка теории, оборудования, планирование и проведение экспериментов, расчетов, выполнение анализа результатов экспериментов, разработка программного обеспечения;

Цуверкалова О.Ф. – разработка теории математического анализа значений критериев устойчивости дугового разряда, выполнение анализа результатов экспериментов и расчетов;

Заяров Ю.В. – выполнение анализа результатов расчетов, руководство научно-исследовательской работой и проверка ее результатов;

Постой Л.В. – выполнение анализа результатов экспериментов, анализ результатов расчетов, работа с нормативной документацией;

Ткачев В.Г. – статистический анализ результатов, создание рукописи статьи при поддержке С.М. Бурдакова

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии финансовой помощи при проведении исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сергей Михайлович Бурдаков, к.т.н., доцент кафедры строительных производств, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8599-6008> ; e-mail: SMBurdakov@mephi.ru

Ольга Феликсовна Цуверкалова, к.т.н., заведующий кафедрой информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6304-4498> ; e-mail: oftsuverkalova@mephi.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Burdakov S.M. – development of theory, equipment, planning and conducting experiments, calculations, analysis of experimental results, software development;

Tsuverkalova O.F. – development of the theory of mathematical analysis of the values of the arc discharge stability criteria, analysis of the results of experiments and calculations;

Zayarov Yu.V. – analysis of the results of calculations, management of research work and verification of its results;

Postoy L.V. – analysis of the results of experiments, analysis of the results of calculations, work with regulatory documentation;

Tkachev V.G. – statistical analysis of the results, creation of the manuscript with the support of S.M. Burdakov.

FUNDING:

No funding was received by the author for this research.

CONFLICT OF INTEREST:

The author declares no relevant conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Sergey M. Burdakov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Construction Industries, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8599-6008> ; e-mail: SMBurdakov@mephi.ru

Olga F. Tsuverskalova, Cand. Sci. (Econ.), Head and Associate Professor, Department of Information and Control Systems, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6304-4498> ; e-mail: oftsuverkalova@mephi.ru

Юрий Владимирович Заяров, к.т.н., заведующий кафедры строительных производств, доцент кафедры строительных производств Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3353-8037> ; e-mail: YVZayarov@mephi.ru

Людмила Викторовна Постой, к.т.н., инженер производственно-технического отдела Общество с ограниченной ответственностью фирма «МОНРЕМ», Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6637-7976> ; e-mail: monrem@mail.ru

Владимир Григорьевич Ткачев, к.т.н., доцент кафедры строительных производств Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6615-1167> ; e-mail: VGTkachev@mephi.ru

Поступила в редакцию 27.03.2023

После доработки 26.05.2023

Принята к публикации 30.05.2023

Yuriy V. Zayarov, Cand. Sci. (Eng.), Head and Associate Professor, Department of Construction Industries, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3353-8037> ; e-mail: YVZayarov@mephi.ru

Lydmila V. Postoy, Cand. Sci. (Eng.), Engineer of the production and technical department Limited Liability Company MONREM, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6637-7976> ; e-mail: monrem@mail.ru

Vladimir G. Tkachev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Construction Industries, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6615-1167> ; e-mail: VGTkachev@mephi.ru

Received 27.03.2023

Revision 26.05.2023

Accepted 30.05.2023