

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-380-389>

УДК 621.791.754

## Технологические особенности плавления присадочной проволоки при дуговой сварке и наплавке с введением SF<sub>6</sub> в защитную газовую атмосферу

Канд. техн. наук, доц. А. О. Коротеев<sup>1)</sup>, Е. А. Фетисова<sup>1)</sup>,  
доктор техн. наук, проф. С. Г. Паршин<sup>2)</sup>, А. А. Коротеева<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет» (Могилев, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** В статье на основании результатов экспериментальных исследований установлены важные закономерности зависимости частоты коротких замыканий дугового промежутка и коэффициента потерь электродного металла на разбрызгивание от напряжения на дуге и скорости подачи присадочной проволоки при сварке и наплавке с введением газообразного SF<sub>6</sub> в защитную смесь Ar + CO<sub>2</sub>. Предлагается вводить фторсодержащие компоненты SF<sub>6</sub> непосредственно в защитную газовую смесь 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> в количествах, не превышающих 2 %. Технология позволяет снизить количество диффузионного водорода в наплавленном металле, что является актуальной задачей при сварке высокопрочных сталей и материалов, чувствительных к водородному охрупчиванию. Ранее нами был решен ряд вопросов, связанных с препятствием повышения концентрации S в наплавленном металле, что позволило определить наиболее эффективные концентрации SF<sub>6</sub> в составе защитной газовой среды, ограниченные 1,5 % по объему от общего состава (Ar + CO<sub>2</sub>) + SF<sub>6</sub>. При этом модификация защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF<sub>6</sub> оказывает существенное влияние на характеристики плавления электродной проволоки и температурные показатели в зоне горения дуги. Это обусловлено высоким потенциалом ионизации фтора как продукта высокотемпературной реакции диссоциации SF<sub>6</sub>. Полученные результаты позволили определить наиболее эффективные соотношения между значениями параметров режима, а также исследовать специфику плавления присадочной проволоки в модифицированной SF<sub>6</sub> защитной атмосфере. Установлены важные закономерности, раскрывающие технологические особенности сварки и наплавки с модификацией защитной атмосферы галогенидными соединениями.

**Ключевые слова:** дуговая сварка в защитных газах, защитные газовые смеси, модификация защитной газовой среды, коэффициент потерь электродного металла на разбрызгивание, частота коротких замыканий дугового промежутка

**Для цитирования:** Технологические особенности плавления присадочной проволоки при дуговой сварке и наплавке с введением SF<sub>6</sub> в защитную газовую атмосферу / А. О. Коротеев [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 380–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-380-389>

### Адрес для переписки

Коротеев Артур Олегович  
Межгосударственное образовательное учреждение  
высшего образования «Белорусско-Российский университет»,  
просп. Мира, 43,  
212000, г. Могилев, Республика Беларусь  
Тел.: +375 22 224-47-77  
[karatseyeu\\_artur@fastmail.com](mailto:karatseyeu_artur@fastmail.com)

### Address for correspondence

Karatseyeu Artur A.  
Inter-State Educational Institution  
of Higher Education «Belarusian-Russian University»  
43, Mira Ave.,  
220013, Mogilev, Republic of Belarus  
Tel.: +375 22 224-47-77  
[karatseyeu\\_artur@fastmail.com](mailto:karatseyeu_artur@fastmail.com)

## Technological Features of Filler Wire Melting for Arc Welding and Surfacing with the Introduction of SF<sub>6</sub> into Protective Gas Atmosphere

A. A. Karatseyeu<sup>1</sup>, K. A. Fiatsisava<sup>1</sup>, S. G. Parshin<sup>2</sup>, A. A. Karatseyeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Inter-State Educational Institution of Higher Education “Belarusian-Russian University” (Mogilev, Republic of Belarus),

<sup>2</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation)

**Abstract.** On the basis of the results of experimental studies the paper establishes important patterns of dependence of the frequency of short circuits of the arc gap and the coefficient of loss of electrode metal due to spatter from the voltage on the arc and the feed rate of the filler wire during welding and surfacing with the introduction of gaseous SF<sub>6</sub> into the Ar + CO<sub>2</sub> protective mixture. It is proposed to introduce fluorine-containing components of SF<sub>6</sub> directly into the protective gas mixture of 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> in quantities not exceeding 2 %. The technology makes it possible to reduce the amount of diffusion hydrogen in the deposited metal, which is an urgent task when welding high-strength steels and materials sensitive to hydrogen embrittlement. Previously, we resolved a number of issues related to the obstacle to increasing the concentration of S in the deposited metal, which made it possible to determine the most effective concentrations of SF<sub>6</sub> in the protective gas environment, limited to 1.5 % by volume of the total composition (Ar + CO<sub>2</sub>) + SF<sub>6</sub>. At the same time, modification of the protective gas atmosphere with the halide compound SF<sub>6</sub> has a significant effect on the melting characteristics of the electrode wire and temperature indicators in the arc combustion zone. This is due to the high ionization potential of fluorine as a product of the high-temperature dissociation reaction of SF<sub>6</sub>. The results obtained have made it possible to determine the most effective relationships between the values of the mode parameters, as well as to study the specifics of melting the filler wire in a protective atmosphere modified with SF<sub>6</sub>. Important regularities have been established that reveal the technological features of welding and surfacing with modification of the protective atmosphere with halide compounds.

**Keywords:** arc welding in shielding gases, shielding gas mixtures, modification of the shielding gas environment, coefficient of loss of electrode metal due to spattering, frequency of arc gap short circuits

**For citation:** Karatseyeu A. A., Fiatsisava K. A., Parshin S.G., Karatseyeva A. A. (2024) Technological Features of Filler Wire Melting for Arc Welding and Surfacing with the Introduction of SF<sub>6</sub> into Protective Gas Atmosphere. *Science and Technique*. 23 (5), 380–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-380-389> (in Russian)

### Введение

На сегодняшний день дуговая сварка в среде защитных газов является наиболее распространенным способом, используемым в промышленности для получения неразъемных соединений металлоконструкций из сталей и сплавов. Широкий ассортимент типов присадочных проволок позволяет сформировать требуемый комплекс эксплуатационных свойств сварного соединения, обеспечить его прочностные характеристики при высокой производительности и возможностях для механизации и автоматизации технологии.

В последнее время наблюдается практически полный переход на использование в качестве защитных газовых сред смесей на основе аргона (82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>, 95 % Ar + 5 % CO<sub>2</sub> и др.). Это позволяет не только улучшить технологические характеристики плавления присадочной проволоки, но и эффективно применить способ для сварки легированных сталей, так как окислительный потенциал защитной атмосферы существенно ниже, чем при сварке

в чистом CO<sub>2</sub>. Следует отметить, что защитная газовая среда при сварке традиционно выполняет две функции: вытеснение атмосферного воздуха из зоны горения дуги и создание необходимой атмосферы, обеспечивающей наиболее эффективное протекание сварочных процессов. В случае динамики перехода к инертным газовым средам практически отсутствует возможность металлургического воздействия на процессы, происходящие в зоне плавления проволоки и переноса расплавленного металла через дуговой промежуток. Преимущественно инертная среда не взаимодействует с жидким металлом. В таких условиях наличие в рабочей зоне загрязнений, продуктов металлургических реакций постороннего происхождения, инициирующих появление свободного водорода в атмосфере дуги, приводит к его интенсивному растворению в жидком металле. В отличие от способов сварки, использующих флюсы и покрытия электродов, содержащих большое количество элементов для обеспечения управляемого механизма металлургического воздействия, в рассматриваемой технологии возмож-

ности отсутствуют. Одним из решений является применение порошковых проволок, однако не всегда на предприятии имеется возможность использования дорогостоящих и сложных присадочных материалов.

Особенно чувствительными к водородному охрупчиванию являются высокопрочные стали. Это обусловлено снижением диффузионной подвижности водорода в сварном соединении после сварки в областях, имеющих структуры мартенсита и бейнита. Происходит практически полная его блокировка, препятствующая выходу на поверхность и способствующая созданию огромных внутренних давлений при повышении концентрации в областях микродефектов и микротрещин, раскрывающих их в конечном счете с выходом макротрещины на поверхность в течение некоторого времени. Это полностью выводит конструкцию из эксплуатации и требует исправления дефекта.

Описанный механизм позволяет предположить, что наиболее эффективным способом борьбы с диффузионным водородом в таких условиях является снижение его растворимости в металле сварочной ванны и присадочном материале на стадии плавления электродной проволоки. Такие подходы реализованы в способах сварки покрытым плавящимся электродом, порошковой проволокой, под флюсом и основаны на введении фторсодержащих компонентов в зону сварки (преимущественно  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{KF}$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{BaF}_2$ ). При использовании проволок сплошного сечения в инертных газовых смесях такие механизмы в традиционной практике не применяются.

В статье предлагается вводить фторсодержащие компоненты в виде газообразного  $\text{SF}_6$  непосредственно в защитную газовую смесь с соотношением компонентов 82 %  $\text{Ar}$  + 18 %  $\text{CO}_2$  в количествах 0,5–2 % при сварке и наплавке [1–10]. Эффективность такого способа, с точки зрения снижения количества диффузионного водорода в наплавленном металле, качественно установлена и показана нами ранее в ряде публикаций [6]. Также решен ряд вопросов, связанных с препятствием повышения концентрации серы в наплавленном металле, что по совокупности факторов позволило определить наиболее эффективные области концентрации  $\text{SF}_6$ , ограниченные 0,5–1,5 % по объему от общего состава защитной атмосферы ( $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ) +  $\text{SF}_6$  [1–7].

В статье приведены результаты исследования коэффициента потерь на разбрызгивание и частоты коротких замыканий дугового промежутка, определяющие основные технологические параметры процесса. В качестве присадочной проволоки использовалась проволока Св-08Г2С.

### Основная часть

Для способов сварки плавящимся электродом перенос электродного металла является одним из основных технологических процессов, определяющих эффективность применения технологии. На сегодняшний день, основываясь на длительной практике и большом объеме результатов исследований в этой области, считается, что наиболее предпочтительными видами переноса по совокупности параметров являются перенос короткими замыканиями дугового промежутка и так называемый «струйный».

Первый из них характеризуется относительно невысокими для конкретного типа и диаметра сварочной проволоки значениями силы тока. Вследствие невысокой мощности дугового разряда и скорости плавления проволоки капля расплавленного металла не отделяется от нее и приближается к поверхности расплавленной ванны вплоть до короткого замыкания дугового промежутка, что сопровождается резким скачком значения силы тока. Это приводит к перегреву и вскипанию жидкой перемишки между каплей и проволокой, стремительно уменьшающейся вследствие действия сжимающего эффекта магнитного поля, с выбросом части жидкого металла и возобновлением горения дуги. Отделившаяся капля за счет силы поверхностного натяжения переходит в сварочную ванну. Механизм и характер распределения сил, определяющих динамику протекания процесса, на сегодняшний день относительно хорошо исследован. При этом именно резкий скачок значения силы тока в момент короткого замыкания является характерным признаком отделения капли расплавленного металла при анализе осциллограмм процесса, что позволяет достаточно просто реализовать системы управления переносом электродного металла. Также следует отметить, что в последнее время все больше приветствуются тенденции использования «невысоких»

значений параметров режима, что обусловлено необходимостью ограничения тепловложения в основной материал с целью предотвращения потери легирующих элементов в дуговом промежутке, снижения внутренних напряжений в конструкции из-за неравномерного нагрева, выполнения сварного соединения за большее количество проходов так называемыми «ниточными» валиками. Это делает диапазон значений параметров режима, соответствующих переносу электродного металла короткими замыканиями, наиболее распространенным.

«Струйный» характер переноса электродного металла возникает при значениях силы тока, превышающих так называемое «критическое». В этом случае складывается ряд условий, при которых равнодействующая всех сил, действующих на каплю жидкого металла, направлена в сторону расплавленной ванны. Это приводит к вытягиванию жидкого металла по оси присадочной проволоки и его дроблению на мелкие капли, визуально сложно различимые и представляющие собой сплошной канал. Процесс достаточно стабилен и практически лишен потерь на разбрызгивание электродного металла. Вместе с тем требуется использование достаточно высоких значений силы тока (свыше 280–300 А для проволок диаметром 1,2 мм), что в ряде случаев может приводить к перегреву свариваемых деталей вследствие большого тепловложения, что ограничивает область эффективного применения

струйного режима на практике, особенно при сварке материалов, чувствительных к термическому циклу.

Переходным процессом является капельный перенос электродного металла, характеризуемый отрывом отдельных капель от торца проволоки до момента контакта с поверхностью расплавленной ванны. При этом они свободно перемещаются через дуговой промежуток. Процесс трудно контролируем, так как момент отделения капли от проволоки достаточно сложно зафиксировать и на практике применяется ограниченно.

Модификация защитной газовой атмосферы галогенидным соединением  $SF_6$  оказывает существенное влияние на характеристики плавления электродной проволоки, особенности дугового разряда, температурные показатели в зоне дуги. Это обусловлено в первую очередь высоким потенциалом ионизации фтора, как продукта высокотемпературной реакции диссоциации  $SF_6$ .

Исследование частоты коротких замыканий дугового промежутка и особенностей переноса расплавленного металла проводилось с применением методики анализа осциллограмм электрических параметров с совмещенной скоростной видеосъемкой при наплавке одиночных валиков на пластину. Внешний вид установки и получаемые кадры видеосъемки переноса представлены на рис. 1, 2.

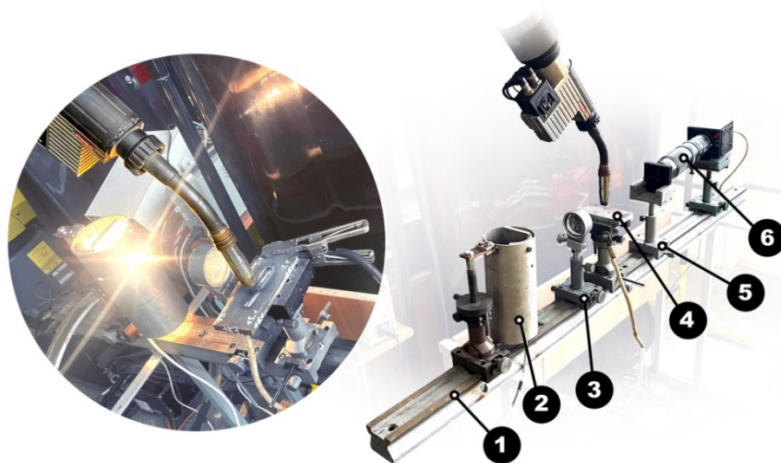


Рис. 1. Внешний вид установки для скоростной видеосъемки процесса переноса электродного металла:  
1 – направляющая; 2 – система подсветки с лампой; 3 – линза; 4 – стол с образцом для наплавки;  
5 – система светофильтров; 6 – камера

Fig. 1. External view of the installation for high-speed video filming of the electrode metal transfer process:  
1 – guiding system; 2- lighting system with a lamp; 3 – lens; 4 – table with a sample for surfacing;  
5 – light filter system; 6 – camera

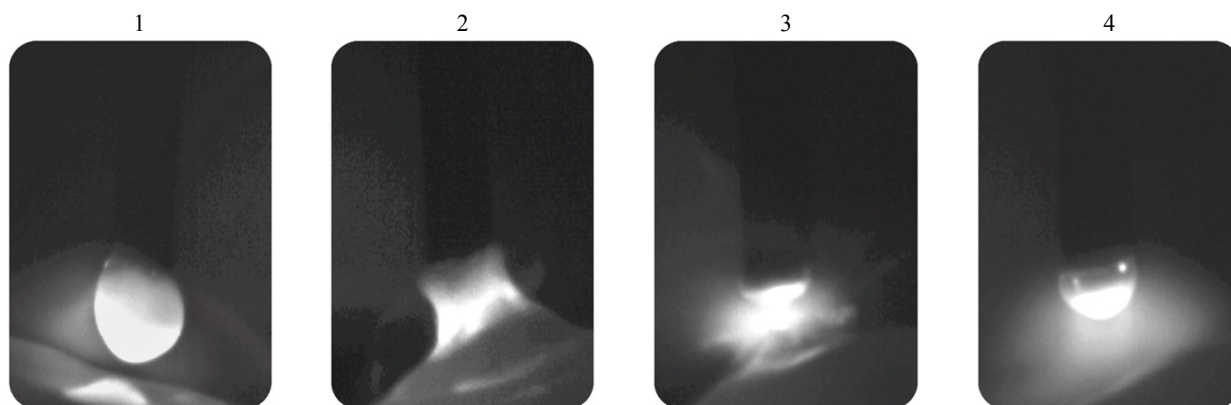


Рис. 2. Стадии переноса электродного металла: 1 – стадия формирования капли; 2 – короткое замыкание дугового промежутка; 3 – разрыв перемычки жидкого металла (возобновление горения дуги); 4 – стадия формирования капли

Fig. 2. Electrode metal transfer stages: 1 – stage of drop formation; 2 – short circuit of the arc gap; 3 – rupture of the liquid metal jumper (resumption of arc combustion); 4 – stage of drop formation

Для регистрации значений параметров режима при наплавке использовался регистратор РКДП-0401. Количество вводимого  $SF_6$  изменялось от 0 до 2 % при помощи специально разработанного нами устройства для смешивания [4], представленного на рис. 3. Применение для этих целей штатных смесителей неэффективно, так как количество вводимого  $SF_6$  невелико и требуется последовательное двухэтапное смешивание с уже готовой смесью 82 % Ar + 18 %  $CO_2$ .

Выбор и задание значений параметров режима осуществлялись через скорость подачи присадочной проволоки  $V_{п.пр}$  и напряжения на дуге  $U_d$ . При проведении экспериментальных исследований нами использовались пять вариантов значений скорости подачи: 2,3; 3,7; 5,3; 7,7, 9,2 м/мин. Первые три из них соответствуют области переноса электродного металла короткими замыканиями дугового промежутка и ограничиваются силой тока в диапазоне 100–200 А.

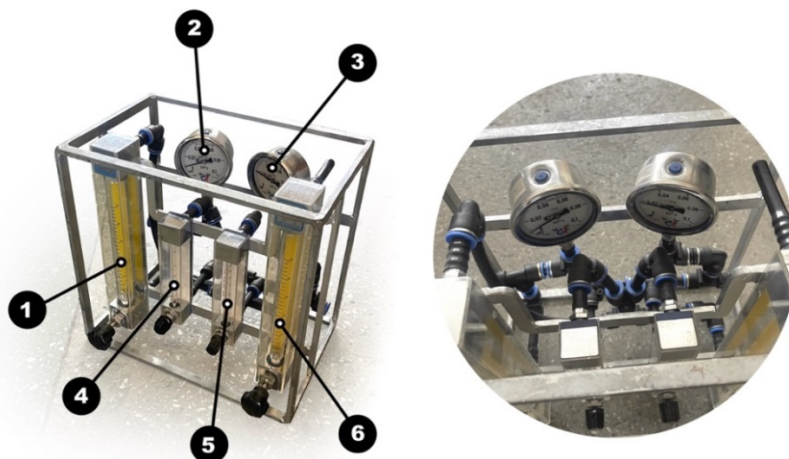


Рис. 3. Внешний вид наплавки, выполняемых в процессе проведения экспериментальных исследований: 1 – ротаметр для определения расхода смеси Ar +  $CO_2$  на вход смесителя; 2 – давление смеси Ar +  $CO_2$  на входе; 3 – давление  $SF_6$  на входе; 4 – ротаметр для определения расхода  $SF_6$  (диапазон значений до 3 %); 4 – ротаметр для определения расхода  $SF_6$  (диапазон значений до 6 %); 6 – ротаметр для определения расхода смеси Ar +  $CO_2$  +  $SF_6$  на выходе

Fig. 3. Appearance of surfacing performed during experimental research:

1 – rotameter for determining the flow rate of the Ar +  $CO_2$  mixture at the inlet; 2 – pressure of the Ar +  $CO_2$  mixture at the inlet; 3 –  $SF_6$  pressure at the inlet; 4 – rotameter for determining the  $SF_6$  flow rate (range of values up to 3 %); 4 – rotameter for determining  $SF_6$  consumption (range of values up to 6 %); 6 – rotameter for determining the flow rate of the Ar +  $CO_2$  +  $SF_6$  mixture at the outlet

В условиях постоянства скорости подачи изменение значения напряжения на дуге позволяет эффективно влиять не только на энергетические характеристики дугового разряда, но и изменить длину дуги, непосредственно оказав влияние на длительность существования дугового промежутка и ход протекания металлургических реакций взаимодействия жидкого металла сильно перегретой капли с истекающим из сопла потоком защитной газовой смеси, а также продуктами ее высокотемпературных преобразований. Исследования проводились нами в два этапа. На первом этапе производился анализ коэффициента потерь электродного металла на разбрызгивание. Результаты представлены на рис. 4, 5 в виде графических зависимостей.

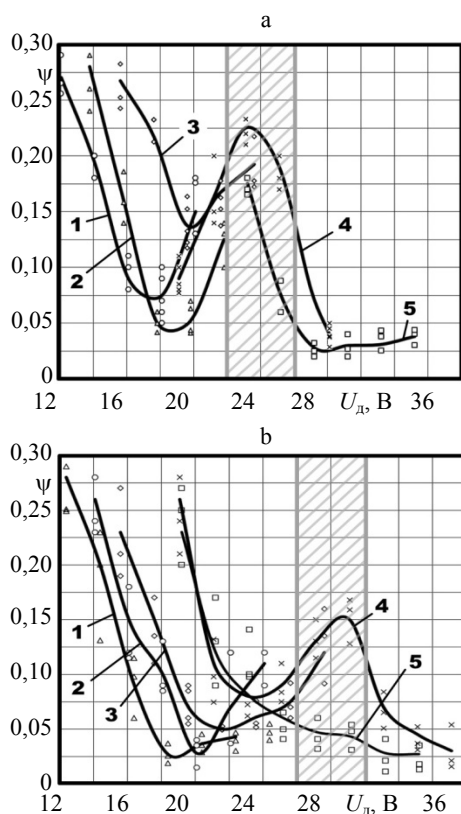


Рис. 4. Зависимость значения коэффициента потерь электродного металла ( $\psi$ ) от напряжения на дуге ( $U_d$ ) при различных значениях скорости подачи присадочной проволоки и количестве вводимого  $SF_6$  в защитную атмосферу: 1 – 2,3 м/мин; 2 – 3,7; 3 – 5,3; 4 – 7,7; 5 – 9,2 м/мин; а – сварка в среде 82 % Ar + 18 %  $CO_2$ ; б – 0,5 %  $SF_6$

Fig. 4. Dependence of the value of the loss coefficient of the electrode metal ( $\psi$ ) on the arc voltage ( $U_d$ ) at different values of the filler wire feed speed and the amount of  $SF_6$  introduced into the shielding atmosphere: 1 – 2,3 m/min; 2 – 3,7; 3 – 5,3; 4 – 7,7; 5 – 9,2 m/min; а – surfacing in 82 % Ar + 18 %  $CO_2$  mixtures; б – 0,5 %  $SF_6$

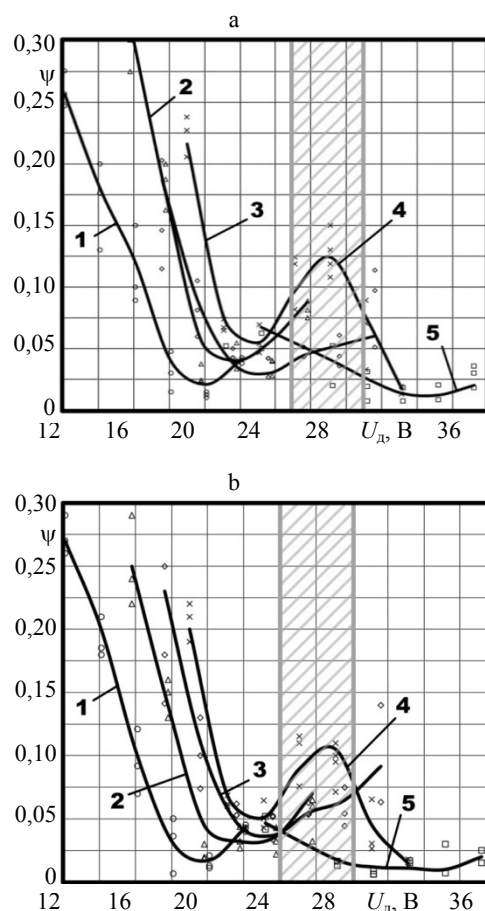


Рис. 5. Зависимость значения коэффициента потерь электродного металла ( $\psi$ ) от напряжения на дуге ( $U_d$ ) при различных значениях скорости подачи присадочной проволоки и количестве вводимого  $SF_6$  в защитную атмосферу: 1 – 2,3 м/мин; 2 – 3,7; 3 – 5,3; 4 – 7,7; 5 – 9,2 м/мин; а – 1,0 %  $SF_6$ ; б – 2,0 %  $SF_6$

Fig. 5. Dependence of the value of the loss coefficient of the electrode metal ( $\psi$ ) on the arc voltage ( $U_d$ ) at different values of the filler wire feed speed and the amount of  $SF_6$  introduced into the shielding atmosphere: 1 – 2,3 m/min; 2 – 3,7; 3 – 5,3; 4 – 7,7; 5 – 9,2 m/min; а – 1,0 %  $SF_6$ ; б – 2,0 %  $SF_6$

Анализ полученных в ходе проведения экспериментов результатов показал, что на графиках зависимостей коэффициента потерь электродного металла от напряжения на дуге имеются три характерных участка.

Первый из них характеризуется относительно высокими значениями потерь электродного металла на разбрызгивание, достигающими в некоторых случаях более 25–30 %. Он соответствует значениям напряжения на дуге 17–19 В (в зависимости от скорости подачи присадочной проволоки). Повышенное разбрызгивание

связано с длительными короткими замыканиями дугового промежутка, выбросом части расплавленного металла за пределы зоны горения дуги, крупными выплесками части расплавленной ванны с образованием большого количества «набрызгиваний» на поверхность пластины. Такое соотношение значений параметров режима (силы тока, определяемой скоростью подачи присадочной проволоки и напряжения на дуге) является нежелательным и на практике не рекомендуется к использованию. Валик наплавленного металла имеет неравномерную ширину и неправильную форму поверхности.

Повышение напряжения позволяет стабилизировать процесс благодаря увеличению длины дуги и сокращению длительности коротких замыканий дугового промежутка. При этом удается получить наиболее стабильный режим и минимизировать потери электродного металла. На графиках можно наблюдать ярко выраженные минимумы. Причем следует отметить, что диапазон значений отклонения напряжения на дуге, определяющий наиболее стабильное состояние процесса, составляет 3–4 В.

Следующий участок характеризуется плавным повышением значений коэффициента потерь при увеличении напряжения на дуге на 4–6 В. При этом фиксируется рост длины дуги с некоторой потерей ее устойчивости. Повышается длительность существования капель расплавленного металла в дуговом промежутке и, как следствие, увеличивается их диаметр, что приводит к росту значения коэффициента потерь при коротком замыкании на поверхность сварочной ванны. В среднем его значение может повыситься в 2 раза. Пространственное сжатие дуги продуктами диссоциации  $SF_6$  также способствуют изменению условий плавления присадочной проволоки. Возрастает реакционная сила, действующая на каплю со стороны столба дуги и препятствующая ее отрыву, что приводит к росту диаметра капель электродного металла. Это можно зафиксировать в процессе наплавки по характерному звуковому эффекту, отражающему дискретность процесса и его низкую частоту. Рост коэффициента потерь обусловлен спецификой разрыва перемычки жидкого металла между каплей и торцом плавящейся проволоки.

Для большинства используемых при проведении экспериментальных исследований значений параметров режима, соответствующих переносу электродного металла короткими замыканиями дугового промежутка, наиболее эффективным является момент стабилизации при относительно низких значениях напряжения на дуге, соответствующих второму участку на графиках. Повышение скорости подачи присадочной проволоки до 7,7 м/мин и выше, что соответствует значению силы тока 246–254 А, дестабилизирует процесс. Это вызвано тем, что наличие естественных возмущений в процессе наплавки может вызвать кратковременный переход в область существования струйного характера переноса электродного металла при повышенных напряжениях на дуге. Такой эффект фиксировался нами ранее [7–8] и позволяет получить струйный характер переноса на «докритических» значениях силы тока путем значительного повышения напряжения. Процесс в обычных условиях нестабилен, что приводит к переходу в капельный режим при скачках напряжения. Анализ графических зависимостей коэффициента потерь электродного металла от напряжения соответствует этим представлениям и свидетельствует о двух областях стабилизации: при пониженном напряжении в режиме переноса электродного металла короткими замыканиями дугового промежутка и в режиме нестабильного струйного переноса электродного металла. Вторая область, несмотря на невысокие значения потерь, нами не рассматривается в качестве рекомендуемой в силу чувствительности процесса к возмущениям. Характер зависимостей в этом случае отличается наличием ярко выраженного максимума в среднем диапазоне значений напряжения на дуге.

Графические зависимости, полученные с использованием более высоких значений скорости подачи, характеризуются минимальными значениями коэффициента потерь во всем диапазоне значений напряжения на дуге, что обусловлено струйным характером переноса электродного металла (кривая 5 на рис. 4, 5).

Вторым этапом исследований была оценка частоты коротких замыканий дугового промежутка. Результаты представлены на рис. 6, 7.

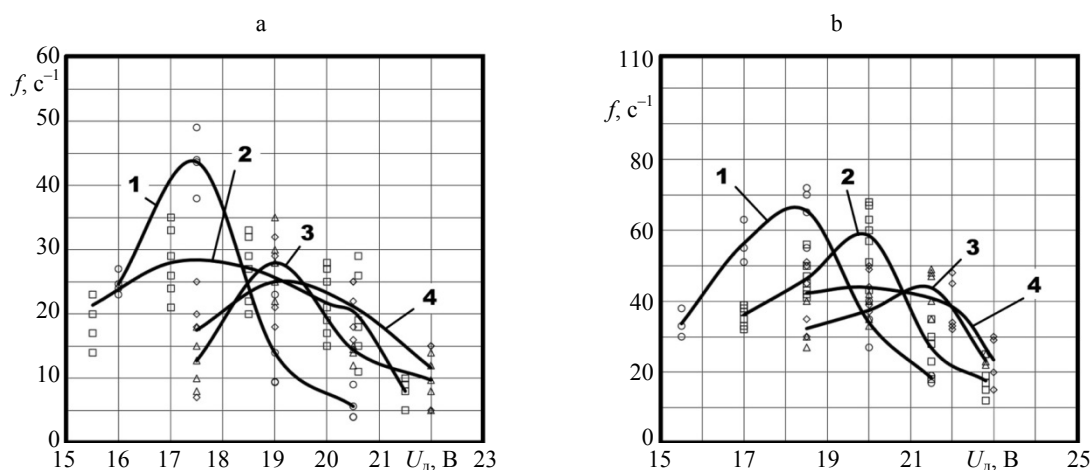


Рис. 6. Зависимость значения частоты коротких замыканий дугового промежутка ( $f$ ) от напряжения на дуге ( $U_d$ ) при различных значениях количества вводимого  $SF_6$  в защитную атмосферу и скорости подачи присадочной проволоки: 1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 %  $CO_2$ ; 2 – (Ar +  $CO_2$ ) + 0,5 %  $SF_6$ ; 3 – (Ar +  $CO_2$ ) + 1 %  $SF_6$ ; 4 – (Ar +  $CO_2$ ) + 2 %  $SF_6$ ; а –  $V_{п.пр.} = 2,3$  м/мин; б – 3,7 м/мин

Fig. 6. Dependence of the frequency of short circuits of the arc gap ( $f$ ) on the voltage on the arc ( $U_d$ ) at different values of the amount of  $SF_6$  introduced into the shielding atmosphere and the filler wire feed rate: 1 – surfacing in 82 % Ar + 18 %  $CO_2$  mixtures; 2 – (Ar +  $CO_2$ ) + 0,5 %  $SF_6$ ; 3 – (Ar +  $CO_2$ ) + 1 %  $SF_6$ ; 4 – (Ar +  $CO_2$ ) + 2 %  $SF_6$ ; а –  $V_{п.пр.} = 2.3$  m/min; б – 3.7 m/min

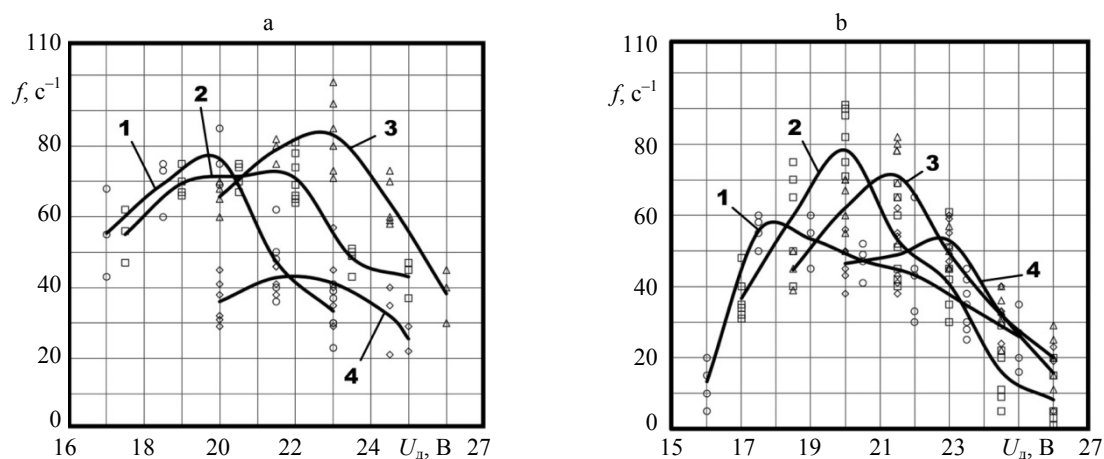


Рис. 7. Зависимость значения частоты коротких замыканий дугового промежутка ( $f$ ) от напряжения на дуге ( $U_d$ ) при различных значениях количества вводимого  $SF_6$  в защитную атмосферу и скорости подачи присадочной проволоки: 1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 %  $CO_2$ ; 2 – (Ar +  $CO_2$ ) + 0,5 %  $SF_6$ ; 3 – (Ar +  $CO_2$ ) + 1 %  $SF_6$ ; 4 – (Ar +  $CO_2$ ) + 2 %  $SF_6$ ; а –  $V_{п.пр.} = 5,3$ ; б – 7,7 м/мин

Fig. 7. Dependence of the frequency of short circuits of the arc gap ( $f$ ) on the voltage on the arc ( $U_d$ ) at different values of the amount of  $SF_6$  introduced into the shielding atmosphere and the filler wire feed rate: 1 – surfacing in 82 % Ar + 18 %  $CO_2$  mixtures; 2 – (Ar +  $CO_2$ ) + 0,5 %  $SF_6$ ; 3 – (Ar +  $CO_2$ ) + 1 %  $SF_6$ ; 4 – (Ar +  $CO_2$ ) + 2 %  $SF_6$ ; а –  $V_{п.пр.} = 5,3$  m/min; б – 7,7 m/min

Результаты экспериментальных исследований показали наличие максимумов на всех графических зависимостях, соответствующих наиболее высоким значениям частоты коротких замыканий дугового промежутка.

Введение  $SF_6$  снижает частоту коротких замыканий, что объясняется снижением мощно-

сти дугового разряда и, по-видимому, обусловлено высоким потенциалом ионизации фтора. Невысокие значения силы тока при этом приводят к нестабильности процесса. В то же время, как было отмечено ранее, повышение напряжения по сравнению со сваркой в среде Ar +  $CO_2$  позволяет не только стабилизировать



процесс, но и в некоторых случаях при скоростях подачи присадочной проволоки 5,3 и 7,7 м/мин, что соответствует значению силы тока 195–254 А, повысить частоту. Объяснением этого может быть принципиальное изменение условий существования дугового промежутка. Полученные данные хорошо согласуются с результатами анализа коэффициента потерь, представленными на рис. 4, 5.

Исследования частоты коротких замыканий для режимов, характеризующихся скоростью подачи свыше 7,7 м/мин, не проводились в силу перехода процесса в струйный характер переноса электродного металла.

По совокупности полученных результатов установлены наиболее эффективные соотношения между значениями параметров режима, представленными на рис. 8. Заштрихованная область соответствует нестабильному режиму. В этом случае нами рекомендуется стабилизация процесса в области более низких значений напряжения на дуге (точки а–d на графиках).

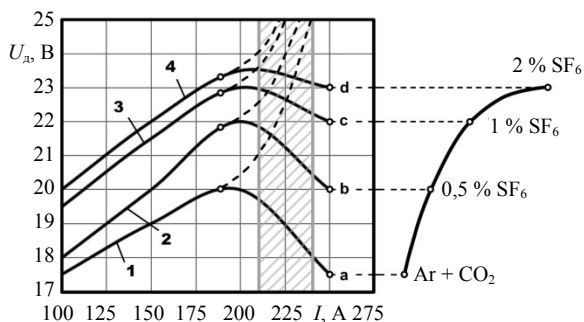


Рис. 8. Графики выбора значений напряжения на дуге в зависимости от значения силы тока и количества вводимого в защитную газовую атмосферу SF<sub>6</sub> по показателю потерь электродного металла на разбрызгивание:

- 1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>;
- 2 – (Ar + CO<sub>2</sub>) + 0,5 % SF<sub>6</sub>; 3 – (Ar + CO<sub>2</sub>) + 1 % SF<sub>6</sub>;
- 4 – (Ar + CO<sub>2</sub>) + 2 % SF<sub>6</sub>

Fig 8. Graphs for selecting arc voltage values depending on the current value and quantity of SF<sub>6</sub> introduced into the protective gas atmosphere in terms of electrode metal losses due to spattering:

- 1 – surfacing in 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> mixtures;
- 2 – (Ar + CO<sub>2</sub>) + 0.5 % SF<sub>6</sub>; 3 – (Ar + CO<sub>2</sub>) + 1 % SF<sub>6</sub>;
- 4 – (Ar + CO<sub>2</sub>) + 2 % SF<sub>6</sub>

## ВЫВОДЫ

1. Наиболее эффективное соотношение между скоростью подачи присадочной проволоки (силой тока) и напряжением на дуге при модификации защитной атмосферы SF<sub>6</sub> сме-

щено в сторону больших значений напряжения по сравнению с традиционной технологией наплавки в среде Ag + CO<sub>2</sub>, что объясняется необходимостью увеличения мощности для стабильного существования дугового разряда.

2. Определены области стабильного существования процесса, амплитуда диапазона регулирования значений напряжения в области наиболее эффективных значений не превышает 2–3 В. Причем практически во всех случаях снижение напряжения вызывает более резкую дестабилизацию процесса, чем его повышение. В случае же традиционной технологии с использованием защитной газовой среды 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> наблюдается некоторая симметрия в этом отношении. Это объясняется тем, что введение SF<sub>6</sub> позволяет при повышении напряжения предотвратить отклонение дуги и ее блуждание из-за чрезмерной длины столба посредством пространственного сжатия.

3. Установлено, что наплавка на повышенных на 2–4 В напряжениях на дуге позволяет несколько повысить частоту коротких замыканий дугового промежутка при введении SF<sub>6</sub> в количествах 0,5–1 % при силе тока 195–254 А.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фетисова, Е. А. Технология дуговой сварки с введением модифицирующих газовых компонентов в защитную атмосферу / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сб. ст. междунар. науч.-техн. конф., Брест, 20–21 окт. 2022 г. Брест: БрГТУ, 2022. С. 175–178.
2. Фетисова, Е. А. Перспективы применения галоидных соединений в составе защитной газовой атмосферы при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // I Республиканский форум молодых ученых учреждений высшего образования: сб. материалов форума. Минск: БНТУ, 2022. С. 75–76.
3. Фетисова, Е. А. Особенности дуговой сварки и наплавки с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы V Всерос. национальной науч. конф. молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апр. 2022 г.: в 4 ч. / редкол.: А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. Ч. 2. С. 89–90.
4. Установка для смешивания трехкомпонентной защитной газовой среды при сварке / Е. А. Фетисова [и др.] // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2022. С. 88.
5. Коротеев, А. О. Дуговая сварка с функциональной модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова

- ва // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: Белорусско-Российский ун-т, 2022. С. 112–118.
6. Фетисова, Е. А. Влияние гексафторида серы в составе газовой защитной атмосферы при дуговой сварке на содержание водорода в наплавленном металле / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротева // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: Белорусско-Российский ун-т, 2021. С. 174.*
  7. Фетисова, Е. А. Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галогенными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротева // *Вестник Белорусско-Российского университета. 2022. № 1 (74). С. 87–96.*
  8. О потерях электродного металла при дуговой сварке с модификацией защитной атмосферы газообразными галогенидными соединениями / Е. А. Фетисова [и др.] // *Вестник Белорусско-Российского университета. 2023. № 2 (79). С. 97–106.*
  9. Шукан, Н. М. Влияние модификации защитной атмосферы галогенидом SF<sub>6</sub> на характеристики дугового разряда при сварке / Н. М. Шукан, Е. А. Фетисова, И. И. Цыганков // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: Белорусско-Российский ун-т, 2023. С. 212.*
  10. Фетисова, Е. А. Влияние трехкомпонентной защитной газовой среды на форму и размеры шва при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: Белорусско-Российский ун-т, 2023. С. 205.*
- Поступила 20.03.2024  
Подписана в печать 22.05.2024  
Опубликована онлайн 30.09.2024
- #### REFERENCES
1. Fetisova E. A., Koroteev A. O., Koroteeva A. A. (2022) Arc Welding Technology with the Introduction of Modifying Gas Components into a Protective Atmosphere. *Novye tekhnologii i materialy, avtomatizatsiya proizvodstva: sb. st. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Brest, 20–21 okt. 2022 g.* [New Technologies and Materials, Production Automation: Collected papers from the International Scientific and Technical Conference]. Brest, Brest State Technical University, 175–178 (in Russian).
  2. Fetisova E. A., Koroteev A. O. (2022) Prospects for the Use of Halogen Compounds as Part of a Protective Gas Atmosphere in Arc Welding. *I Respublikanskii forum molodykh uchenykh uchrezhdenii vysshego obrazovaniya: sb. materialov foruma* [1<sup>st</sup> Republican Forum of Young Scientists of Higher Education Institutions: Proceedings of the Forum]. Minsk, Belarusian National Technical University, 75–76 (in Russian).
  3. Fetisova E. A., Koroteev A. O. (2022) Features of Arc Welding and Surfacing with Modification of the Protective Gas Atmosphere with Halogen Compounds. *Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy: materialy V Vseros. Natsional'noi nauch. konf. molodykh uchenykh, Komsomol'sk-na-Amure, 11–15 apr. 2022 g. Ch. 2* [Youth and Science: current problems of fundamental and applied research: Proceedings of the 5<sup>th</sup> All-Russian National Conference of Young Scientists, Komsomol'sk-on-Amur, April 11–15, 2022. Part. 2]. Komsomol'sk-on-Amure, Komsomol'sk-on-Amure State University, 89–90 (in Russian).
  4. Fetisova E. A., Shukan N. A., Koroteeva A. A., Koroteev A. O. (2022) Installation for Mixing a Three-Component Protective Gas Environment during Welding. *Novye materialy, oborudovanie i tekhnologii v promyshlennosti: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [New Technologies and Materials, Production Automation: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 88 (in Russian).
  5. Koroteev A. O., Fetisova E. A. (2022) Arc Welding with Functional Modification of the Protective Gas Atmosphere with Halogen Compounds. *Aktual'nye voprosy i peredovye tekhnologii svarki v nauke i promyshlennosti: sb. st. I Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Current Issues and Advanced Technologies in Science and Industry. Collection of articles of the 1st Int. Scientific-Technical Conf.]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 112–118 (in Russian).
  6. Fetisova E. A., Koroteev A. O., Koroteeva A. A. (2021) The Influence of Sulphur Hexafluoride in the Composition of the Gas Protective Atmosphere during Arc Welding on the Hydrogen Content in the Deposited Metal. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. Konf.* [Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of International Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 174 (in Russian).
  7. Fetisova E. A., Koroteev A. O., Koroteeva A. A. (2022) Features of Metallurgical Processes in Arc Welding with Modification of the Protective Gas Atmosphere with Halogen Compounds. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta = Belarusian-Russian University Bulletin*, (1), 87–96 (in Russian).
  8. Fetisova E. A., Koroteev A. O., Kulikov V. P., Koroteeva A. A., Lopatina A. A., Dolgaya V. D. (2023) On Losses of Electrode Metal during Arc Welding with Modification of the Protective Atmosphere with Gaseous Halide Compounds. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta = Belarusian-Russian University Bulletin*, (2), 79–106 (in Russian).
  9. Shukan N. M., Fetisova E. A., Tsygankov I. I. (2023) The Influence of Modification of the Protective Atmosphere with SF<sub>6</sub> Halide on the Characteristics of the Arc Discharge during Welding. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 212 (in Russian).
  10. Fetisova E. A., Koroteev A. A. (2023) The Influence of a Three-Component Protective Gas Environment on the Shape and Dimensions of a Weld in Arc Welding. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 205 (in Russian).
- Received: 20.03.2024  
Accepted: 22.05.2024  
Published online: 30.09.2024