

# Исследование влияния вылета электрода на сварочно-технологические характеристики импульсно-дуговой сварки порошковой проволокой\*

Давыдов Ю.С., Коробов Ю.С., Давыдов А.Ю.

Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
г. Екатеринбург, Российская Федерация

[yu.s.davydov@urfu.ru](mailto:yu.s.davydov@urfu.ru)

**Аннотация.** Приведены результаты исследований процесса импульсно-дуговой сварки порошковой проволокой с увеличенным вылетом. Показано, что характер образования капель с увеличением вылета электрода изменяется из-за изменения импульсного управления дугой. На основе анализа результатов осциллографирования, установлена причина этого явления. Определен диапазон параметров при котором обеспечивается стабильное импульсное управление процессом. В этом диапазоне сочетаются повышенная производительность процесса и высокая стабильность дуги.

**Ключевые слова:** вылет электрода, импульсно-дуговая сварка, порошковая проволока, осциллографирование.

## ВВЕДЕНИЕ

Применение порошковых проволок для сварки и наплавки дает определенные преимущества по сравнению со сплошными проволоками: возможность получения состава и свойств наплавленного металла в широком диапазоне; выполнение швов высокого качества в различных пространственных положениях; снижение риска образования дефектов при отклонении горелки оси шва, из-за большей ширины столба дуги; и др. [1]. Кроме того, заметно повышается производительность процесса наплавки [2].

Однако существуют специфические особенности при применении порошковых проволок. Они отличаются неравномерностью теплофизических: у шихты электрода и теплопроводность на 1...2 порядка ниже, чем у оболочки [3]. В результате меняется характер тепловых и физико-химических процессов на торце электрода, что приводит к другим условиям горения дуги и образования капель, чем при сплошной проволоке, с также меняет форму дуги [2, 4].

Для повышения стабильности горения дуги и плавления проволоки широко применяют импульсное управление дугой [5, 6].

Однако, применимость импульсно-дугового (ИД) процесса для сварки порошковыми проволоками недостаточно хорошо изучена и освещена в литературе. Более того, современные сварочные аппараты часто имеют программное обеспечение для ИД сварки только сплошной проволокой.

В связи с вышесказанным проведено исследование с целью определить влияние ИД процесса на характеристики плавления порошковой проволоки и сварочного процесса в целом. В работе [7] показано, что применение ИД технологий позволяет существенно улучшить характеристики сварочного процесса: потери металла на угар и разбрызгивание в 1,5 раза меньше, коэффициент наплавки в 1,5 раз, а производительность в 1,6 раза выше, чем при сварке с естественными короткими замыканиями. Параметры режима при этом заметно отличаются от рекомендуемых для сплошной проволоки.

В настоящей работе приведена часть результатов, касающаяся влияния вылета электрода (или, как иногда называют, "дистанции сварки").

Изучение влияния вылета электродной проволоки на результат процесса дуговой сварки (наплавки), имеет большое практическое значение по нескольким причинам:

1. Вылет электрода при полуавтоматической сварке может меняться из-за манипуляций сварщика (изменение расстояния от горелки до изделия);
2. Вылет электрода может быть задан в качестве одного из параметров режима сварки, существенно определяющих формирование сварного соединения.

Влияние вылета электрода на параметры режима и формирование характеристик сварного соединения хорошо известно. Так, при сохранении установочных настроек сварочного аппарата (скорость подачи проволоки и характеристика источника питания) увеличение вылета приводит к уменьшению тока из-за увеличения электрического сопротивления на длине вылета. При этом в соответствии с характеристикой источника питания увеличивается напряжение дуги и, следовательно, ее длина. При постоянной скорости подачи электрода количество наплавленного металла остается постоянным, а проплавление основного металла, как и тепловложение в основной металл, уменьшается. Это положительно сказывается на формировании свойств зоны термического влияния.

\* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-практической конференции "Материаловедение и металлургические технологии" (RusMetalCon-2018), <https://rusmetalcon.susu.ru>

При увеличении вылета может возникать некоторое количество «побочных эффектов»: увеличение разбрызгивания, нарушение газовой защиты, нарушение формирования наплавляемого валика и проч.

Основной эффект увеличения вылета (увеличение интенсивности расплавления проволоки) достигается за счет увеличения подгрева проволоки током и снижение доли тепла дуги [8]. В случае порошковой проволоки в большей степени это относится к металлической оболочке. Шихта же нагревается в основном путем передачи тепла от оболочки в зоне горения дуги [9], и увеличение вылета может вызвать снижение темпа расплавления шихты. В результате этого может быть нарушена стабильность процесса плавления проволоки в целом.

Влияние вылета при применении порошковой проволоки и, особенно, импульсной сварки, недостаточно изучено. Целью настоящего исследования является определение закономерностей процесса сварки с увеличенным вылетом высокохромистой порошковой проволоки с целью его оптимизации и увеличения производительности.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения использовали порошковую проволоку типа 65X18 диаметром 1,4 мм с оболочкой из стали 0X17 и коэффициентом заполнения 16 %. Применяемый сварочный аппарат – Lorch S5 SpeedPulse (ООО «ШТОРМ-ЛОРХ», Екатеринбург) с технологией ИД сварки SpeedPulse™ (SP). Эта технология признана наиболее подходящей по результатам исследования [7]. Здесь реализовано наложение модифицированного импульса за период сброса капли, рис. 1 [10], что оказывает следующее влияние [11]. За счет наложения первичного импульса за период сброса капли происходит резкое возрастание электродинамической силы. Это приводит к уменьшению диаметра сбрасываемой капли. Вследствие снижения тока перед наложением вторичного импульса уменьшается реактивное давление паров на каплю, что приводит к уменьшению разбрызгивания. Наложение вторичного импульса за период сброса одной капли повышает надежность повторного зажигания дуги.

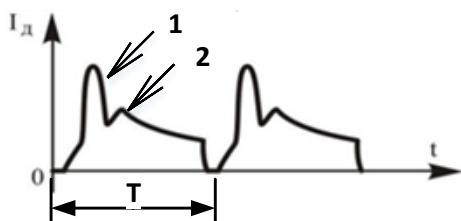


Рис. 1. Внешний вид осциллограммы силы тока при наложении модифицированного импульса. Т - период сброса капли; импульсы: 1 – первичный, 2 - вторичный

Движение сварочной горелки выполняли с помощью устройства “Курс-1” (ЦНИИМ, Екатеринбург), позволяющего осуществлять перемещение с заданной скоростью по двум координатам. Поперечные колебания горелки

относительно оси движения 4 мм, частота колебаний 2 Гц, скорость сварки 24 м/час, горелку устанавливали перпендикулярно пластине. Для наплавки использовали защитную газовую смесь К-18 (82% Ar+18%CO<sub>2</sub>), расход 15...18 л/мин.

Характеристики процесса плавления оценивали по производительности или количеству наплавленного металла за единицу времени (Q), кг/ч, коэффициенту наплавки (α<sub>н</sub>), г/(А·ч); коэффициенту потерь электродного металла на угар и разбрызгивание, (ψ<sub>пот</sub>), %:

$$Q = m_{распл} / t_{св} \quad (1)$$

$$\alpha_n = m_{напл} / (I_{св} \cdot t_{св}), \quad (2)$$

$$\psi_{пот} = ((m_{распл} - m_{напл}) / m_{распл}) \cdot 100, \quad (3)$$

где m<sub>распл</sub>, m<sub>напл</sub> – массы соответственно расплавленной электродной проволоки и наплавленного металла, г; I<sub>св</sub> – сварочный ток по показанию индикатора на источнике питания, А; t<sub>св</sub> – время сварки одного валика, с.

$$m_{распл} = V_{пп} \cdot t_{св} \cdot \gamma_{пр}, \quad (4)$$

$$m_{напл} = m_2 - m_1, \quad (5)$$

где V<sub>пп</sub> – скорость подачи проволоки, м/с, принимали по установкам сварочного аппарата; γ<sub>пр</sub> – масса единицы длины проволоки, г/м, рассчитывали по результатам взвешивания трех отрезков проволоки длиной по 1 м; m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub> -массы пластины, соответственно до и после наплавки.

Для взвешивания использовали электронные лабораторные весы марки ВК-3000 (ЗАО “МАССА-К”, Москва), предел взвешивания 0-3000 г, точность 0,05 г. Перед взвешиванием после наплавки удаляли брызги металла и шлак с поверхности пластины и наплавленного валика.

Для оценки процессов в дуге выполняли осциллографирование тока и напряжения дуги с помощью регистратора параметров сварки АWR725 (ЗАО “Лаборатория Электроники”, С-Петербург), производящего измерение по 5 каналам с частотой до 10 кГц, оснащенного программным обеспечением, позволяющим графически отображать значения тока, напряжения, мгновенной мощности дуги и частоты изменения указанных параметров, записывать осциллограммы, регулировать частоту записи отображаемых параметров.

Для обеспечения защиты дуги и металла от атмосферы применяли сопло различной длины. Таким образом, расстояние от сопла до изделия во всех опытах было примерно постоянным: 18-20 мм, а при увеличении вылета токоподводящий мундштук был более «заглублен» в сопло, рис. 2.

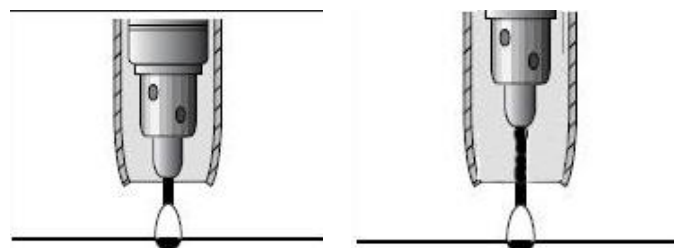


Рис. 2. Горелка с нормальным и заглубленным токоподводящим мундштуком

Проведены эксперименты, при которых изучено влияние «механического» увеличения вылета при сохранении уставок сварочного аппарата, что соответствует изменению вылета при сварке из-за манипуляций сварщика, а также определены требуемые изменения основных параметров режима при сварке с увеличенным вылетом.

Для исследования выполняли наплавку валика на пластину. Вылет измеряли как расстояние от торца токоподводящего мундштука до изделия и изменяли от 20 до 40 мм.

Технологические параметры процесса определяли по показаниям индикатора сварочного аппарата: сварочный ток ( $I_{св}$ ), А; напряжение дуги ( $U_{д}$ ), В; скорость подачи проволоки ( $V_{пн}$ ), м/ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента приведены в табл. 1. Фотографии наплавленных валиков показаны на рис 3.

Таблица 1

Результаты экспериментов

№	$V_{пн}$ , м/ч	Вылет, мм	$I_{св}$ , А	$U_{д}$ , В	$V_{св}$ , м/ч	Ширина валика, е, мм	$\alpha_n$ , Г/А·ч	$\gamma_{пот}$ , %	Q, кг/ч	Валик на рис.2
1	500	20	220	33-34	12	16	19,9	9,3	4,4	-
2	500	30	195	35-36	12	17	22,2	10,5	4,3	1
3	500	40	170	38-39	12	17	24,4	14,4	4,1	2
4	500	40	160	34-35	12	15-16	27,8	8,1	4,45	3
5	660	35	200	33-34	12	17	29,4	8,3	5,9	-



Рис. 3. Валики, наплавленные при увеличенном вылете электрода

Хорошее формирование и низкое разбрызгивание валика № 3 свидетельствуют о высокой стабильности дуги.

Первые три опыта в табл. 1 проводили при неизменных установках сварочного аппарата. Видно, что при увеличении вылета от 20 до 40 мм происходит увеличение напряжения дуги до 38–39 при одновременном снижении сварочного тока. Коэффициент наплавки  $\alpha_n$  увеличивается от 20 до 24,4 Г/А·час, однако это сопровождается увеличением коэффициента потерь  $\gamma_{пот}$  от 9,3 до 14,4%.

Опыт 4 проведен при более низком напряжении  $U_{д}$ , как в опыте 1 при малом вылете. Из данных таблицы 1 и рисунка 2 видно, что такое сочетание параметров дает хороший результат по всем показателям: формирование валика, разбрызгивание, коэффициент наплавки. Погонная энергия в этом случае ( $\approx 16300$  Дж/см) заметно ниже, чем для первых трех опытов, что позволяет говорить о значительно меньшем удельном тепловложении в основной металл. Однако на поперечном шлифе многопроходных швов, выполненных на таком режиме, обнаружены местные непровары, очевидно, из-за слишком малой силы тока.

В опыте 5 ток увеличен за счет большей скорости подачи проволоки примерно до уровня 2-го опыта при сохранении напряжения на уровне 33-34 В. При этом получено высокое значение коэффициента наплавки, производительности и умеренное разбрызгивание.

Уровень потерь в опытах 4, 5 соответствует типовым показателям нормирования [12].

Для выяснения характера процессов в дуге выполнено осциллографирование параметров сварочной дуги.

На рис. 4 показана типичная осциллограмма тока и напряжения процесса SP. Хорошо заметна «ступенька» на заднем фронте импульса, которая служит для кратковременного включения мелкокапельного переноса капли после сброса основной капли за счет пинч-эффекта. За счет этого упорядочивается процесс плавления оболочки проволоки и заметно снижается разбрызгивание.

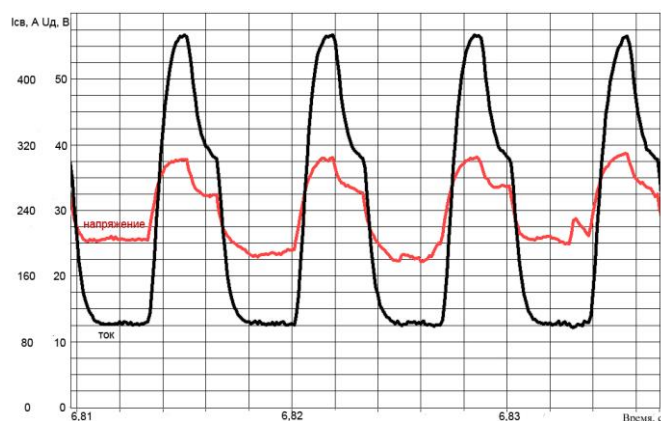


Рис. 4. Осциллограмма ИД сварки с нормальным вылетом

На рис. 5 показана осциллограмма процесса для опыта 3. Видно, что при увеличении вылета практически исчезает основной импульс, создающий пинч-эффект, а «ступенька» становится незаметной. Это и приводит к общему снижению устойчивости процесса и увеличению разбрызгивания.

При снижении напряжения при увеличенном вылете на осциллограмме (рис. 6) видно, что характерная форма импульса восстанавливается. Вероятно, именно по этой причине уменьшается разбрызгивание и потери металла. Однако, при этом появляются признаки нечастых коротких замыканий. Вероятно, это связано с тем, что малой величины тока не хватает для своевременного каплеобразования.

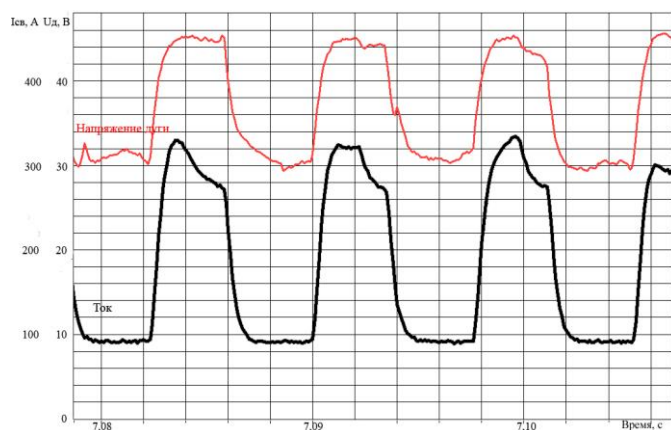


Рис. 5. Осциллограмма ИД сварки с увеличенным вылетом (опыт 3)

Анализ осциллограмм показывает, что при сварке порошковой проволокой с увеличенным вылетом в импульсном SP-режиме есть интервал параметров, в котором сочетаются стабильность горения дуги, высокая производительность и низкие потери металла. Конкретные параметры зависят от материала и диаметра проволоки. Общим для этого интервала является то, что ток не должен опускаться ниже определенного значения, при котором возникают короткие замыкания. Это обеспечивает сохранение характерной формы SP-импульса.

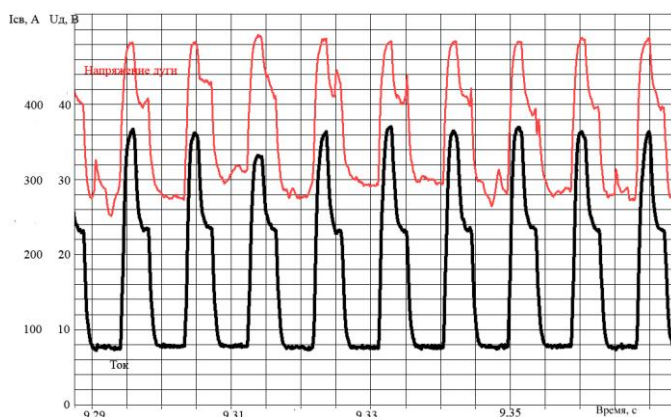


Рис. 6 Осциллограмма ИД сварки с увеличенным вылетом (опыт 4)

#### ВЫВОДЫ

1. При сварке порошковой проволокой с увеличенным вылетом в импульсном SP-режиме есть интервал параметров, в котором сочетаются стабильность горения дуги, высокая производительность и низкие потери металла.

2. При сварке высокохромистой порошковой проволокой типа 55X18, напряжение дуги 33-35 В, наложение модифицированного двойного импульса за каждый период отделения капли, наблюдается увеличение коэффициента наплавки в 1,3-1,4 раза и сохранение приемлемого уровня потерь металла при увеличении вылета электрода от 20 до 35-40 мм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Розерт Р. Порошковые проволоки – тенденции, развитие и их применение в промышленности / Р. Розерт, М.В. Карасев // Петраньевские чтения. "Сварочные материалы - 2012": докл. МНТК, 16–18 октября 2012 года. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 220-230.
2. Шлепаков В.Н. Физико-металлургические и сварочно-технологические свойства газозащитных порошковых проволок для сварки конструкционных сталей // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 56-59.
3. Показатели плавления и использования порошковых проволок различной конструкции / И.К. Походня, В.Ф. Альтер, В.Н. Шлепаков, П.И. Рак // Сварочное производство. – 1985. – №8. – С.33-34.
4. Minnick W.H. Flux Cored Arc Welding Handbook. – The Goodheart Willcox Company Inc., 2009. – 172 p.
5. Потапьевский А.Г. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: монография. / А.Г. Потапьевский, Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов. – Томск: ТПУ, 2012. – 208 с.
6. Dos Santos E.B.F. High frequency pulsed gas metal arc welding (GMAW-P): The metal beam process / Dos Santos E.B.F., R. Pistor, A.P. Gerlich // Manufacturing Letters. – 2017. – №11, P. 1-4. DOI: 10.1016/j.mfglet.2017.01.001
7. Оценка параметров импульсно-дуговой сварки высокохромистой порошковой проволокой. / Ю.С. Давыдов, Н.М. Разиков, Ю.С. Коробов и т.д. // Сварочное производство. – 2017. – №6. – С. 14-20.
8. Сварка в смеси активных газов / А.Е. Аснис, Л.М. Гутман, В.Р. Покладий и др. – Киев: Наукова думка, 1982. – 214 с.
9. Определение коэффициента теплоотдачи от шлака к электродной проволоке при электрошлаковой сварке стали / Губин Б. А. и др. // Автоматическая сварка. – 1992. – №6. – С. 26-29.
10. Потапьевский А.Г. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: монография. / А.Г. Потапьевский, Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов. – Томск: ТПУ, 2012. – 208 с.
11. Милютин В.С. Источники питания для сварки. / В.С. Милютин, М.П. Шалимов, С.М. Шанчуров. – М.: Айрис-пресс, 2007. – 384 с.
12. Нормирование расхода сварочных материалов при сварке в углекислом газе и его смесях: справочное пособие / под ред. А.А. Мазур. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 2008. – 68 с.

# Investigation of the Electrode Extension on the Welding-Technological Characteristics of Pulsed Arc Welding with Cored Wire

Davydov Yu.S., Korobov Yu.S., Davydov A.Yu.

Ural Federal University  
Yekaterinburg, Russian Federation  
[yu.s.davydov@urfu.ru](mailto:yu.s.davydov@urfu.ru)

**Abstract.** The results of investigations of the process of pulsed-arc welding with cored wire with an increased reach are presented. It is shown that the nature of the formation of droplets with an increase in the emission of the electrode changes due to a change in the pulsed control of the arc. Based on the analysis of the results of oscillography, the cause of this phenomenon has been established. The range of parameters at which stable pulse control of the process is provided is determined. In this range the combination of increased Flow rate of the process and the high stability of the arc.

**Keywords:** electrode overhang, pulsed arc welding, flux cored wire, oscillography.

## REFERENCES

1. Rosert R., Karasev M.V. Powder wires - trends, development and their application in industry [Poroshkovye provoloki – tendentsii, razvitie i ikh primeneniye v promyshlennosti], *Petran'yevskie chteniya. "Svarochnye materialy - 2012": dokl. MNTK, 16–18 oktyabrya 2012 goda [Petran'ev readings. "Welding materials - 2012": report. MNTK, October 16-18]*, 2012, Saint Petersburg, Publishing House of Polytechnic University, 2012, pp. 220-230. (in Russ.)
2. Shlepakov V.N. Physico-metallurgical and welding-and-technological properties of gas-shielded flux-cored wires for welding structural steels [Fiziko-metallurgicheskie i svarochno-tehnologicheskie svoystva gazozashchitnykh poroshkovykh provolok dlya svarki konstruksionnykh staley], *Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding]*, 2014, no.6-7, pp. 53-56. (in Russ.)
3. Pokhodnya I.K., Alter V.F., Shlepakov V.N., Cancer P.I. Indicators of melting and use of flux-cored wires of various designs [Pokazateli plavljeniya i ispol'zovaniya poroshkovykh provolok razlichnoy konstruksii], *Svarochnoe proizvodstvo [Welding production]*, 1985, no.8, pp.33-34. (in Russ.)
4. Minnick W.H. Flux Cored Arc Welding Handbook, The Goodheart Willcox Company Inc., 2009, 172 p.
5. Potapievsky A.G., Saraev Yu.N., Chinahov D.A. *Svarka staley v zashchitnykh gazakh plavyashchimsya elektrodom. Tekhnika i tekhnologiya budushchego: monografiya [Welding*

of steels in shielded gases with a consumable electrode. Technique and technology of the future: monograph], Tomsk: TPU, 2012, 208 p. (in Russ.)

6. Dos Santos E.B.F., Pistor R., Gerlich A.P. High frequency pulsed gas metal arc welding (GMAW-P): The metal beam process, *Manufacturing Letters*, 2017, no.11, pp. 1-4. DOI: 10.1016/j.mfglet.2017.01.001

7. Davydov Yu.S., Razikov N.M., Korobov Yu.S. et al. Evaluation of the parameters of pulse-arc welding of high-chromium cored wire [Otsenka parametrov impul'snodugovoy svarki vysokokhromistoy poroshkovoy provolokoy], *Svarochnoe proizvodstvo [Welding industry]*, 2017, no.6, pp. 14-20. (in Russ.)

8. Asnis A.E., Gutman L.M., Pokladiy V.R. et al. *Svarka v smesi aktivnykh gazov [Welding in a mixture of active gases]*, Kiev, Naukova Dumka, 1982, 214 p. (in Russ.)

9. Gubin B.A. et al. Determination of heat transfer coefficient from slag to electrode wire during electroslag welding of steel [Opredelenie koeffitsienta teplootdachi ot shlaka k elektrodnoy provoloke pri elektroshlakovoy svarke stali], *Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding]*, 1992, no.6, pp. 26-29. (in Russ.)

10. Potapevskiy A.G., Saraev Yu.N., Chinahov D.A. *Svarka staley v zashchitnykh gazakh plavyashchimsya elektrodom. Tekhnika i tekhnologiya budushchego: monografiya [Welding of steels in shielded gases with a consumable electrode. Technique and technology of the future: monograph]*, Tomsk, TPU, 2012, 208 p. (in Russ.)

11. Milyutin V.S., Shalimov M.P., Shanturov S.M. *Istochniki pitaniya dlya svarki [Power sources for welding]*, Moscow, Iris-press, 2007, 384 p. (in Russ.)

12. A.A. Mazur (ed.) *Normirovanie rashoda svarochnykh materialov pri svarke v uglekislom gaze i ego smesyakh: cpravochnoe posobie [Rationing of consumption of welding materials when welding in carbon dioxide and its mixtures: handbook]*, Kiev, IES them. E.O. Paton, 2008, 68 p. (in Russ.)

## Библиографическое описание статьи

Давыдов Ю.С. Исследование влияния вылета электрода на сварочно-технологические характеристики импульсно-дуговой сварки порошковой проволокой / Ю.С. Давыдов, Ю.С. Коробов, А.Ю. Давыдов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал.* – 2018. – Т.6, №4. – С. 29-33. DOI: 10.24892/RIJIE/20180406

## Reference to article

Davydov Yu.S., Korobov Yu.S., Davydov A.Yu. Investigation of the electrode extension on the welding-technological characteristics of pulsed arc welding with cored wire, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2018, vol.6, no.4, pp. 29-33. DOI: 10.24892/RIJIE/20180406