

УДК 621.791.927.5

DOI 10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59

С. К. Елсуков, С. А. Фастов, И. В. Зорин, В. И. Лысак, Д. С. Несин
**ПРИМЕНЕНИЕ МОДУЛИРОВАННОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
ДЛЯ ДВУХЭЛЕКТРОДНОЙ НАПЛАВКИ ПОД ФЛЮСОМ***

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: serzh.elsukov@yandex.ru

В ходе исследования на основе полученных экспериментальных данных было выявлено влияние параметров модулированного переменного тока при автоматической двухэлектродной наплавке под флюсом на геометрические параметры наплавленного валика. Показано, что снизить долю участия основного металла можно уменьшив баланс между фазами тока до 25 % и установив смещение амплитуды тока равное -10 В. Полученные результаты могут быть использованы для операции плакирования коррозионностойкими сплавами внутренних поверхностей оборудования нефтехимического производства.

Ключевые слова: расщепленный электрод, наплавка, прямая и обратная полярность, переменный ток.

© Елсуков С. К., Фастов С. А., Зорин И. В., Лысак В. И., Несин Д. С., 2023.

* Исследования выполнены при финансовой поддержке ВолгГТУ в рамках научного проекта № 15/465-22.

S. K. Elsukov, S. A. Fastov, I. V. Zorin, V. I. Lysak, D. S. Nesin

APPLICATION OF MODULATED AC CURRENT FOR TWO-ELECTRODE SUBMERGED ARC CLADDING

Volgograd State Technical University

During the study, based on the experimental data obtained, the influence of the parameters of modulated alternating current during automatic two-electrode submerged arc surfacing on the geometric parameters of the weld bead was revealed. It has been shown that the proportion of base metal can be reduced by reducing the balance between current phases to 25% and setting the current amplitude offset to -10 V. The results obtained can be used for the operation of cladding internal surfaces of petrochemical production equipment with corrosion-resistant alloys.

Keywords: split electrode, cladding, forward and reverse polarity, alternating current.

Введение

Одними из самых производительных и эффективных способов дуговой наплавки аустенитных и других коррозионностойких сталей и сплавов на внутренние и фланцевые поверхности нефтехимического и нефтегазового оборудования (реакторы, теплообменники, адсорберы и др.) является электродуговая наплавка под слоем флюса [1; 2]. Технологически наиболее выгодно производить наплавку с формированием за один проход широкого плакирующего слоя с минимальной долей участия, чем обеспечивается снижение перемешивания дорогостоящего высоколегированного сплава с металлом подложки [3].

В промышленности операции электродугового плакирования под флюсом преимущественно проводят с использованием сварочных источников постоянного тока. Однако с развитием микроэлектроники ее использование в сварочном оборудовании позволяет более гибко управлять параметрами переменного тока, преобразуя его в модулированный ток, что повышает эффективность дугового процесса [4].

Известно, что одним из первых предложил использовать переменный ток для сварки металлическим электродом, а также разработал устройство «электропаяльник» с автоматическим регулятором длины дуги русский изобретатель Н. Н. Бенардос [5]. В последующем усилия отечественных исследователей были сосредоточены на способах повышения стабильности дуги на переменном токе, что решалось, например, за счет модернизации схемы подключения трансформаторов источников питания в трехфазную питающую сеть [6]. Современные исследования в области использования переменного тока преимущественно направлены на повышение проплавливающей способности дуги, для чего изучают влияние полярности в дуге с разнополярными импульсами на форму валика [7; 8].

Другим способом распределения тепловой мощности сварочной дуги в изделии и формирования широкослойного плакирующего слоя, является применение двухэлектродного процесса («расщепленный» электрод) [9–11].

Этот способ был впервые использован в 1943 г. А. И. Коренным в ИЭС им. Е. О. Патона применительно к автоматической сварке бронеконструкций. Поэтому предложено исследовать эффективность использования схемы «расщепленного» на две сварочные проволоки электрода электропитание которого осуществляется модулированным переменным током.

Исходя из изложенного, целью исследования является повышение качества формирования наплавленного металла за счет определения оптимального диапазона параметров модулированного переменного тока при двухэлектродной наплавке.

Материалы и методы исследования

Электродуговую наплавку (рис. 1) производили сварочным автоматом А6 MasterTrack коммутационно связанным с инверторным источником переменного тока Aristo 1000 AC/DC (ESAB, Швеция) с использованием проволоки $\varnothing 1,6$ мм марки AG ER-347Si (Св-08X19Н10Г2Б) и металлургически нейтрального керамического флюса ESAB OK Flux 10.92. Aristo позволяет изменять форму сварочных импульсов путем изменения следующих параметров переменного тока: частота тока, «смещение» амплитуды (от -10 В до +10 В) и «баланс» между фазами тока (от 25 до 75 %).

На основе полученных результатов двухэлектродной наплавки на постоянном токе [12] для наплавки модулированным током было предложено использовать следующий режим – $U_d = 26 \pm 1$ В; $I_{св} = 320 \pm 10$ А; $V_n = 13$ м/ч; $b = 8$ мм.

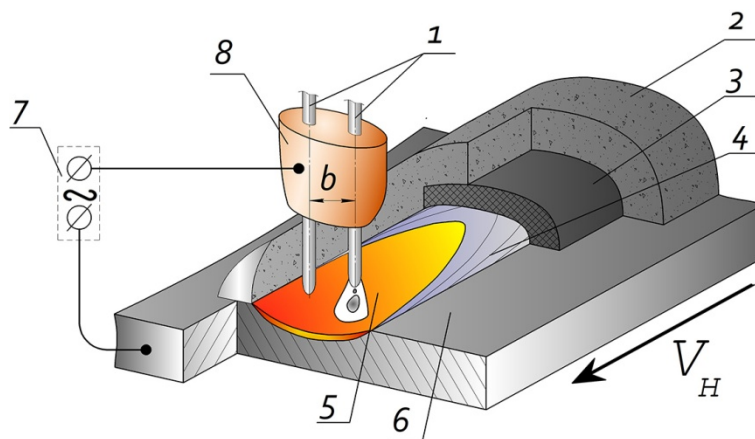


Рис. 1. Схема дуговой наплавки под флюсом:
1 – сварочные проволоки; 2 – керамический флюс; 3 – шлаковая корка;
4 – наплавленный валик; 5 – сварочная ванна; 6 – наплавляемая пластина;
7 – источник сварочного тока; 8 – токоподводящий наконечник

Изменение сварочного тока и напряжения на дуге в процессе плакирования регистрировали с частотой дискретизации 5 кГц с использованием многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) LA-20USB, подключенного к компьютеру (ПК). Обработку полученных осциллограмм производили с использованием специализированного программного обеспечения PowerGraph 3.3.

Исходным режимом модулированного переменного тока для экспериментального исследова-

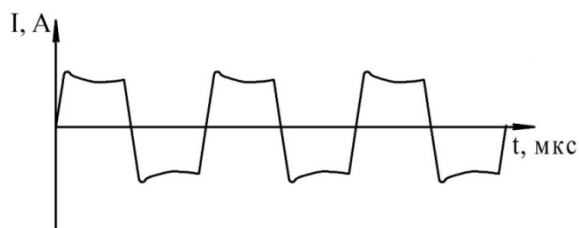


Рис. 2. Форма импульсов номинально режима «по умолчанию» переменного тока источника тока Aristo (частота – 50 Гц; смещение амплитуды – 0 В; баланс дуги – 50 %)

дования его влияния на геометрические параметры наплавленного металла являлся режим «по умолчанию» источника тока – частота 50 Hz, баланс 50 %, смещение 0 В (рис. 2).

Для определения влияния формы импульсов на геометрические параметры наплавленных валиков проведена серия экспериментальных наплавов, режимы которых указаны в таблице. В рамках исследования для сравнения влияния геометрических параметров наплавленных валиков согласно роду и полярности тока при опыте № 2 производили наплавку на постоянном токе обратной полярности, а № 3 – на прямой полярности.

Из наплавленной пластины в плоскости перпендикулярной направлению наплавки вырезались образцы металла, из которых изготавливались макрошлифы. После травления коррозионностойкого слоя проводилось измерение геометрических параметров наплавленного валика в САД программе КОМПАС 3D Учебная версия.

Параметры режимов наплавки модулированным током

Номер эксперимента	Частота переменного тока, Гц	«Смещение», В	«Баланс», %
1	50	0	50
2	Постоянный ток обратной полярности		
3	Постоянный ток прямой полярности		
4	50	0	75
5			25
6		+10	50
7		-10	
8	100	0	
9	10		

Основные контролируемые геометрические параметры наплавленного металла: e – ширина; c – высота усиления; h – глубина проплавления; F_H – площадь наплавленного металла; F_O – площадь проплавленного металла; γ_O – доля участия основного металла в наплавленном ($\gamma_O = \frac{F_O}{F_O + F_H}$); θ – краевой угол сопряжения между поверхностью основного металла и плоскостью касательной к поверхности наплавленного валика; μ_{II} – коэффициент полноты валика ($\mu_{II} = \frac{F_H}{e \times c}$).

Результаты и обсуждение

Для более точной оценки формы модулированных импульсов были проведены их измерения методом осциллографирования. На рис. 3 представлены схематичные изображения форм импульсов сварочного тока при изменении частоты, баланса между отрицательной/положительной фазы и смещения амплитуды тока. Частота

напряжения – это параметр, который характеризует количество колебаний напряжения за определенный период времени в диапазоне 10–100 Гц (рис. 3, а, б). Смещение амплитуды тока приводит к увеличению максимума полуволны импульса переменного тока в положительной или отрицательной области осциллограммы (рис. 3, в, г), однако среднее значение величины тока остается одним и тем же. Изменение баланса между прямой и обратной фазой же позволяет регулировать продолжительность импульса полуволны, т. е. времени, при котором дуга существует на прямой или обратной полярности одного периода (рис. 3, д, е).

После установления влияния установленных параметров модулированного тока на форму импульсов, были проведены экспериментальные наплавки согласно таблице, с целью изучения их влияния на геометрические параметры валиков.

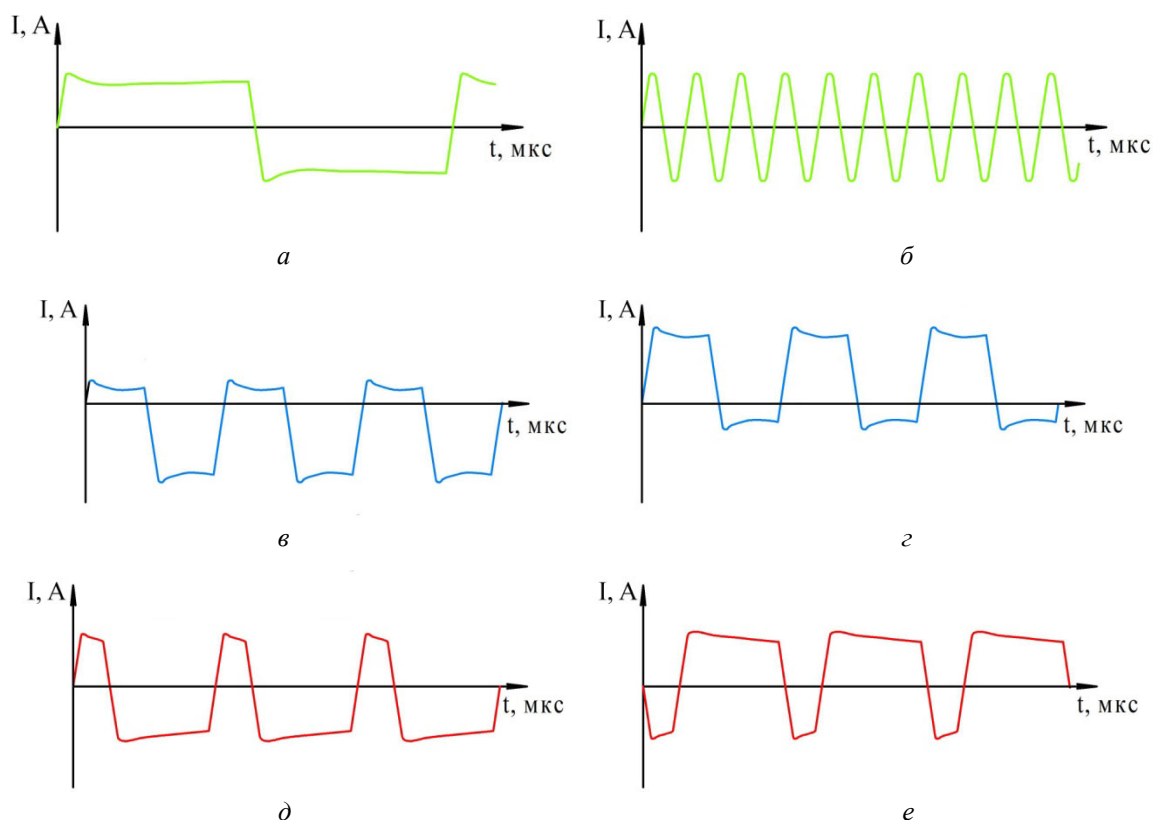


Рис. 3. Форма импульса модулированного переменного тока в зависимости от установленных параметров: частота 10 Гц (а) и 100 Гц (б); смещение амплитуды тока -10 В (в) и +10 В (г); баланс между фазами тока 25 % (д) и 75 % (е)

При наплавке на прямой полярности формируется избыточно высокий валик высотой до 7,1 мм (рис. 4, б), а также угол сопряжения такого валика близок к 90°, что, помимо формирования концентратора напряжений приводит

к формированию несплавлений при многопроходной наплавке. Использование режима «по умолчанию» (рис. 2) переменного тока не позволяет полностью раскрыть возможности двухэлектродного способа наплавки и не дает види-

мых преимуществ в первую очередь по ширине и доле участия основного металла в наплавлен-

ном (рис. 4, в) в сравнении с валиком, полученным на обратной полярности (рис. 4, а).

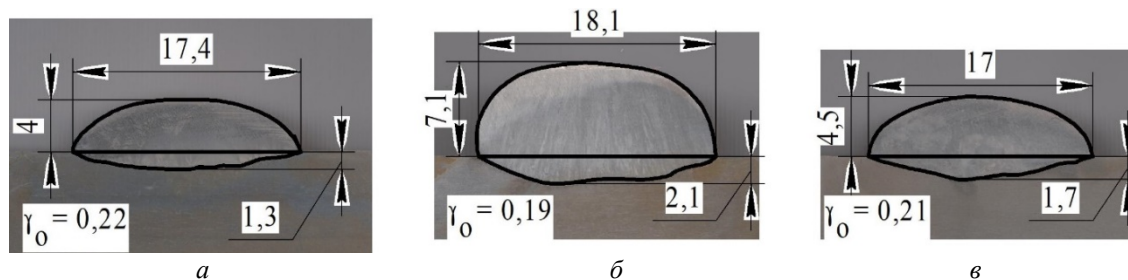


Рис. 4. Геометрические параметры наплавленного валика, полученные на обратной (а), на прямой полярности (б) и на переменном (в) токе (50 Hz, 50 %, 0 В) при межэлектродном расстоянии $b = 8$ мм

Дальнейшее исследование влияния параметров модулированного переменного тока производили согласно таблице, эксперименты № 4–9. На рис. 5 представлены графики зависимости геометрических размеров наплавленных валиков от изменения параметров переменного тока. Одними из важнейших параметров формы валика для наплавки коррозионноустойчивых сплавов яв-

ляются его ширина и высота, а также доля участия основного металла. Установлено, что ширина валика увеличивается при увеличении частоты переменного тока (рис. 5, а), а изменение «баланса» не оказывает большого влияния. Минимальная доля участия достигается при смещении амплитуды тока до -10 В или баланса до 25 %, вследствие увеличения доли тока на «пря-

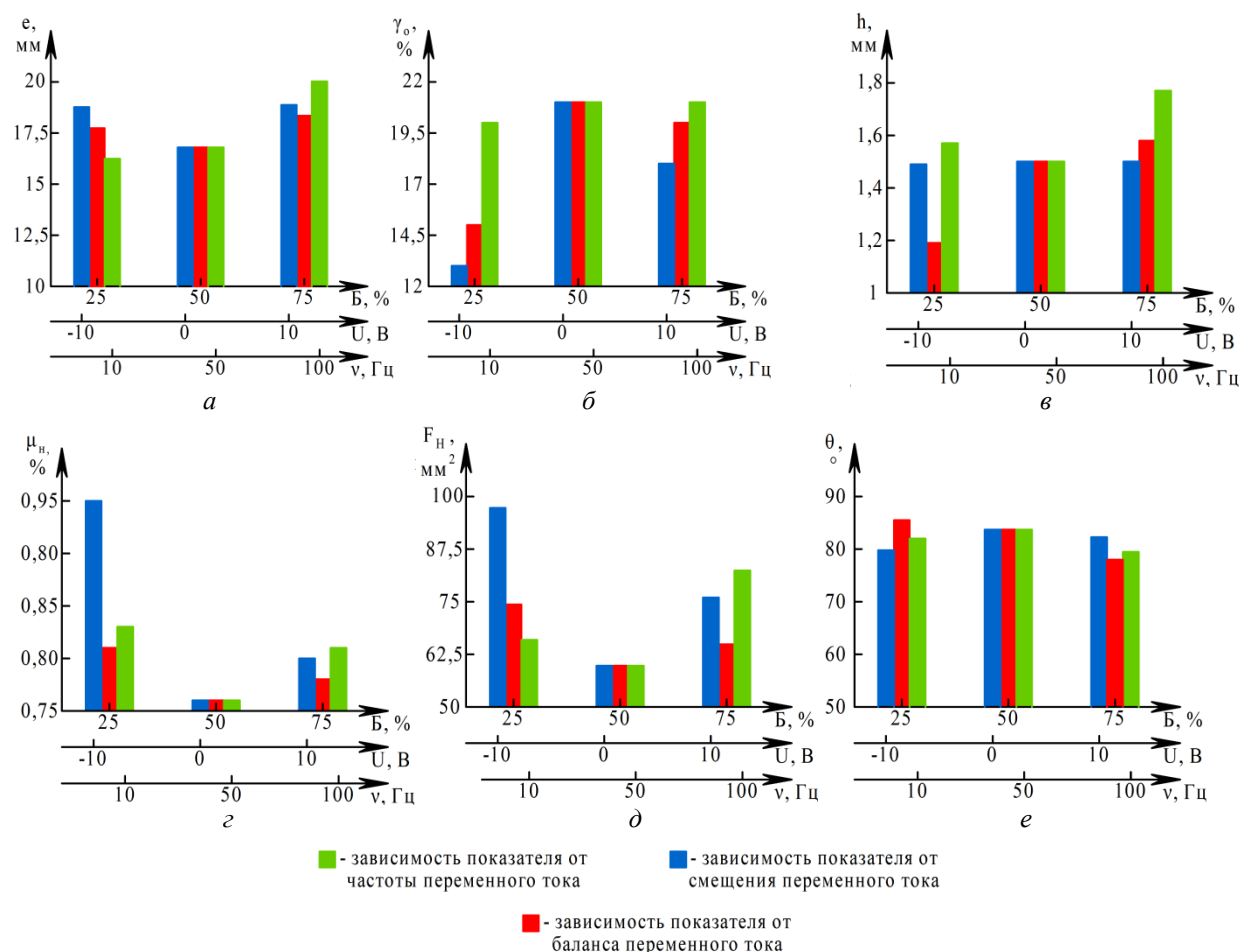


Рис. 5. Зависимость основных геометрических параметров валиков, наплавленных расщепленным электродом от значения частоты тока, баланса между фазами и величины смещения амплитуды тока:

а – ширина валика; б – доля участия основного металла; в – глубина проплавления; г – коэффициент полноты валика; д – площадь наплавленного металла; е – угол сопряжения

мой» полярности, при этом частота переменного тока не оказывает влияния на показатель доли участия (рис. 5, б). Глубина проплавления практически не изменяется при изменении смещения амплитуды тока, однако растет при увеличении баланса между фазами переменного тока в области обратной полярности, и немного возрастает при увеличении частоты переменного тока (рис. 5, з). Увеличение проплавления при большем времени существования дуги в области прямой полярности согласуется с известными данными по наплавке постоянным током. Коэффициент полноты валика μ_n показывает аналогичную зависимость, что и ширина валика, но сильно влияет на этот параметр смещение амплитуды (рис. 5, з).

Площадь наплавленного металла показывает похожие зависимости, что и коэффициент полноты валика (рис. 5, д). Стоит отметить, что угол сопряжения между наплавленным и основным металлом соизмеримы во всем диапазоне параметров переменного тока (рис. 5, е).

Исходя из полученных выше результатов было предложено использовать наиболее оптимальный режим модулированного тока, позволяющий получить максимально широкослойный металл, с минимальной долей участия положки. Таким является режим переменного тока: частота – 100 Гц, баланс – 25 %, смещение амплитуды тока на величину – 10 В. Макросечение наплавленного валика показано на рис. 6, а.

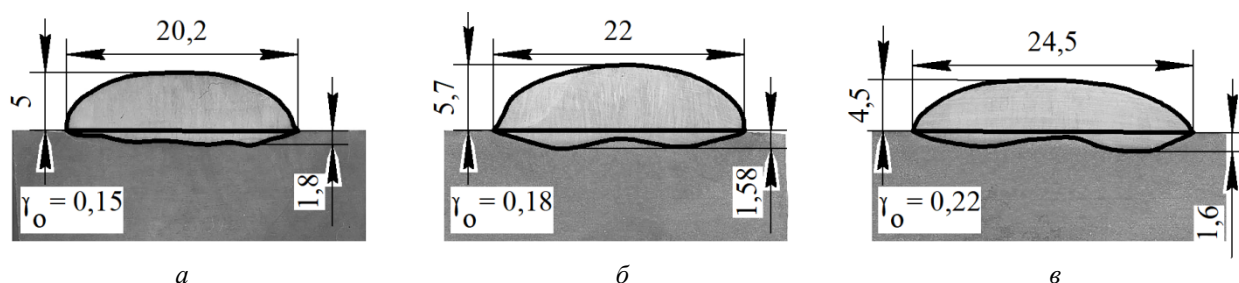


Рис. 6. Геометрические параметры наплавленного валика при межосевом расстоянии $b = 8$ мм (а); $b = 10$ мм (б); $b = 12$ мм (в), полученные на предложенном режиме

При увеличении расстояния между осями b проволок больше 8 мм наблюдается формирование седловидной формы проплавления (рис. 6, б, в). Это косвенно говорит о том, что дуги, существующие на торцах проволок направлены вдоль оси проволок и оказывают локальное давление на расплав сварочной ванны, образуя раздельное проплавление с тонким перешейком, но общую область наплавленного металла. В случае, если в верхней точке «седла» наблюдается несплавление, это считается дефектом, однако, при сохранения небольшой доли участия (от 0,15 до 0,25), то такие валики (рис. 6, в) можно применять для формирования коррозионностойкого слоя.

Выводы

Увеличение частоты переменного тока, смещение баланса между фазами в сторону прямой полярности (25 %), а также уменьшение смещения амплитуды (-10 В) переменного тока позволяет получить широкослойный наплавленный металл с минимальной шириной валика одного прохода более 20 мм и долей участия основного металла, не превышающей 22 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Del Prete M., Saturno L., Quintiliani D. Cladding of pressure equipment; case studies and the choice of various types of application // *Welding International*. – 2014. – Т. 28. – №. 8. – С. 617-628.
2. Фрумин, И. И. Автоматическая электродуговая наплавка / И. И. Фрумин. – Харьков : Металлургиздат, 1961. – 422 с.
3. Сравнительный анализ наплавки элементов трубопроводной арматуры ручной дуговой и автоматической сваркой под слоем флюса / А. Г. Кудасов, Т. Э. Пантелеева, В. Н. Мещеряков [и др.] // *Газовая промышленность*. – 2018. – № 8(772). – С. 92-96.
4. Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при сварке под флюсом / Н. В. Коберник, Г. Г. Чернышов, П. П. Гвоздев, А. А. Линник // *Сварка и диагностика*. – 2011. – № 5. – С. 24-27.
5. Григорьев, Н. Д. Николай Николаевич Бенардос (К 170 летию со дня рождения) / Н. Д. Григорьев // *Электричество*. – 2012. – № 6. – С. 2-9.
6. Авторское свидетельство № 417994 А1 СССР, МПК В23К 9/00. Источник питания для сварки на переменном токе : № 1674316/25-27 : заявл. 30.06.1971 : опубл. 25.08.1975 / В. К. Лебедев, Б. Е. Патон, В. И. Скрыпник, В. А. Троицкий ; заявитель ордена Ленина институт электросварки им. Е. О. Патона.
7. Сидоров, В. П. Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при сварке под флюсом / В. П. Сидоров // *Сварка и диагностика*. – 2013. – № 3. – С. 20-23.

8. *Сидоров, В. П.* Критерий проплавляющей способности дуги при сварке / В. П. Сидоров, Н. А. Борисов // Сварка и диагностика. – 2013. – № 6. – С. 24–27.

9. *Медовар, Б. И.* Об автоматической сварке расщепленным электродом / Б. И. Медовар, А. Г. Потапьевский // Автоматическая сварка. – 1955. – № 3. – С. 60.

10. Исследование процесса наплавки расщепленным электродом сплава Inconel 625 / И. В. Зорин, С. К. Елсуков, Г. Н. Соколов [и др.] // Сварочное производство. – 2018. – № 11. – С. 9–15.

11. Технологические особенности формирования металла, наплавленного расщепленным электродом / С. К. Елсуков, И. В. Зорин, Г. Н. Соколов [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10(205) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – С. 122–125.

12. Применение расщепленного электрода для наплавки в аргоноуглекислотных смесях коррозионно-стойкой стали / С. К. Елсуков, И. В. Зорин, С. А. Фастов, В. И. Лысак // Сварка и диагностика. – 2023. – № 2. – С. 37–40. – DOI 10.52177/2071-5234_2023_02_37.