

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.42.004.69 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_181

*И. С. Морозкин, Г. В. Даровской***ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СВАРКИ КОРОТКОЙ ДУГОЙ ПРИ РЕМОНТЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Аннотация. Оптимизирована работа схемы зажигания дуги на этапах начала сварки и формирования капли малых размеров с целью повышения производительности и качества ремонта деталей подвижного состава железных дорог. В работе представлен анализ технологических характеристик процессов сварки длинной и короткой дугой, систем управления плавлением и переносом металла, установлены взаимовлияния различных стадий процесса. Экспериментально установлено, что глубина проплавления основного металла с уменьшением диаметра электрода увеличивается ввиду увеличения плотности тока. Представлены системы управления плавлением и переносом металла, позволяющие оптимизировать процесс сварки короткой дугой. Обобщены материалы по системам управления и даны рекомендации по оптимизации процесса сварки.

Ключевые слова: сварочная дуга, короткое замыкание, плавящийся электрод, сварка короткой дугой, оптимизация процесса.

Для цитирования: Морозкин, И. С. Оптимизация процесса сварки короткой дугой при ремонте подвижного состава железных дорог / И. С. Морозкин, Г. В. Даровской // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 181–187. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_181.

Введение

В настоящее время при ремонте железнодорожного транспорта широко применяются различные способы восстановления деталей, среди которых большое распространение получила наплавка тел вращения. Номенклатура восстанавливаемых тел вращения достаточно широкая и насчитывает только для тягового подвижного состава порядка сорока различных наименований.

Большинство тел вращения имеют сравнительно небольшие диаметры, что требует применения дуговой наплавки с небольшими диаметрами электродной проволоки и сварочного тока с целью уменьшения тепловложений. Одним из таких методов является сварка короткой дугой.

Целью работы является анализ технологических характеристик процесса и установление взаимовлияния различных его стадий.

Объектом исследования является процесс дуговой сварки короткой дугой.

В работе проведен анализ технологических характеристик указанного процесса, систем управления плавлением и переносом металла, установлены взаимовлияния различных стадий процесса.

Даны рекомендации по оптимизации процесса сварки короткой дугой для деталей подвижного состава железных дорог.

Анализ процесса сварки в углекислом газе

Отличительной чертой применения электродной проволоки сплошного сечения является содержание кремния и марганца, т.е. элементов-раскислителей (например, Св-10ХГ2СМФ). Условно процесс механизированной сварки (наплавки) в среде защитных газов можно разделить на сварку (наплавку) короткой и длинной дугой (рис. 1, 2).

В первом случае характерны диаметры проволоки $d_s = 0,8 \dots 1,2$ мм и небольшие величины сварочного тока $I_{св} = 80 \dots 150$ А, что ведет к малым потерям электродного металла при разбрызгивании и уменьшению расходования электроэнергии. Во втором случае, $d_s = 1,6 \dots 3,0$ мм, что характеризуется большими значениями величины сварочного тока $I_{св} = 160 \dots 250$ А и недостаточно хорошим формированием шва [1].

Улучшение внешнего вида шва достигают уменьшением разбрызгивания и оптимизацией режима сварки, а также формированием оптимальной формы кривой тока, созданием более периодичного процесса с постоянным временем цикла, применением смеси газов и порошковой проволоки.

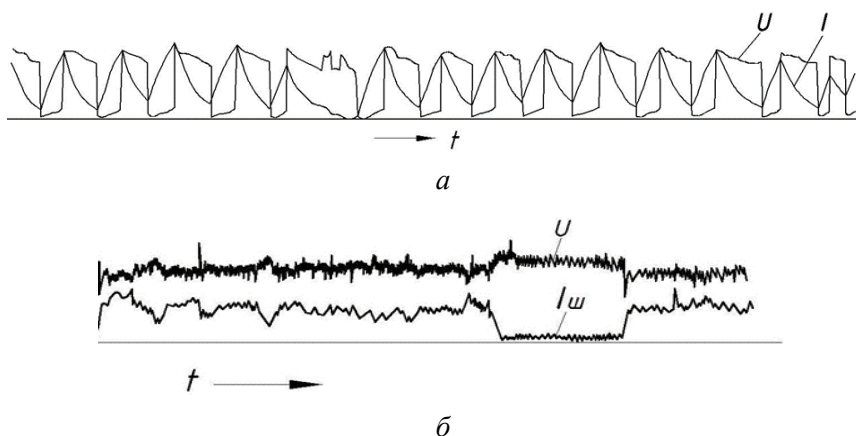


Рис. 1. Осциллограммы сварки длинной и короткой дугой:
a – короткой дугой; *б* – длинной дугой;
U – напряжение на дуге; *I* – сварочный ток

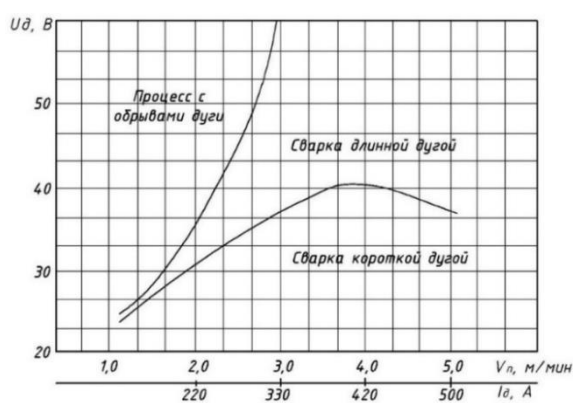


Рис. 2. График процессов при сварке (наплавке) в CO_2 (Св-10ХГ2СМФ, $d_3 = 1,6$ мм), полярность обратная

Стадии и разновидности процесса сварки

Процесс сварки можно разделить на три стадии:

1-я стадия – установление стабильного процесса сварки или зажигания дуги (начало сварки);

2-я стадия – стабильное течение процесса сварки – формируется сварочный шов (собственно сварочный процесс);

3-я стадия – прекращение процесса сварки – переход от стабильного течения процесса до обрыва дуги, процесс может программироваться для заварки кратера, формирование капли на конце электрода (окончание сварки).

Сварка в углекислом газе плавящимся электродом производится постоянным током чаще всего на обратной полярности.

Возможны две основные разновидности процесса: сварка с частыми периодическими замыканиями дугового промежутка и сварка без замыканий дугового промежутка.

Первая разновидность процесса характерна для тонкой электродной проволоки на низких режимах (сварка короткой дугой). Вторая разновидность процесса характерна для проволоки большего диаметра на форсированных режимах (сварка длинной дугой).

Для первой разновидности процесса необходимы определенные статические характеристики и динамические свойства сварочного выпрямителя. Сварочная цепь должна иметь определенную индуктивность в зависимости от диаметра электрода, а статические характеристики должны быть жесткими или пологопадающими.

Для второй разновидности процесса статические и динамические характеристики сварочного выпрямителя на технологические характеристики процесса сварки существенного влияния не оказывают.

Сварка короткой дугой (первая разновидность процесса) является естественным импульсным процессом плавления и переноса электродного металла с периодическими замыканиями дугового промежутка. Реализация данного процесса возможна при величине скорости коротких замыканий, достигающих 70 кА/с, что определяется циклограммой сварочного процесса и включает следующие стадии:

- замыкание дугового промежутка и «взрывообразное» перегорание перемычки;
 - отбрасывание жидкого металла сварочной ванны и дугового промежутка;
 - зажигание дуги при повторном замыкании расплавленного конца электрода и основного металла.
- Это способствует контактному зажиганию дуги при механизированных видах сварки и наплавки.

Процесс сварки в углекислом газе короткой дугой плавящимся электродом получил широкое промышленное применение благодаря таким технологическим преимуществам, как малое разбрызгивание и возможность ведения процесса на низких режимах сварки во всех пространственных положениях. Однако полная реализация технологических преимуществ этого процесса возможна только в узком диапазоне режимов.

Проведен анализ требований к различным стадиям процесса сварки.

При составлении технологического задания на разработку устройства для оптимизации процесса сварки короткой дугой необходимо учитывать эти требования.

Сравним требования к началу процесса и к режиму собственно процесса сварки. Во многом эти требования взаимно противоположны [3].

Так, улучшение начала процесса сварки и связанные с ним потери металла на разбрызгивание и непровары в начале шва требуют уменьшения индуктивности сварочной цепи и повышения напряжения. В этом случае число касаний концов электродной проволоки изделия и ее выбросы уменьшаются, разрывная длина дуги увеличивается, а потери времени и электродной проволоки при зажигании дуги уменьшаются.

Для улучшения технологических характеристик собственно сварочного процесса с частыми короткими замыканиями дугового промежутка требуется сравнительно низкое напряжение сварочного выпрямителя. В сварочной цепи необходима определенная индуктивность для уменьшения разбрызгивания металла.

В индуктивности источника питания происходит накопление энергии при переходе капли жидкого металла в момент короткого замыкания электрода с изделием, а после разрыва перемычки и возбуждения дуги ее выделение в дуге. Мощность, необходимая для плавления электрода со скоростью его подачи, складывается из мощности сварочного выпрямителя и мощности, отдаваемой индуктивностью сварочного дросселя в момент разрыва перемычки. Введение в сварочную цепь индуктивности при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка энергетически необходимо.

Таким образом, для оптимизации процесса сварки короткой дугой необходимо преодолеть противоречивость требований к процессу начального зажигания дуги и собственно сварочному процессу начального зажигания дуги и собственно сварочному процессу с короткими замыканиями дугового промежутка.

Другим важным различием в требованиях к 1-й и 2-й стадиям процесса является то, что 2-й стадии необходимо в процессе сварки обеспечить минимальное отклонение от заданных параметров режима, например, требуемое напряжение дуги из технологических соображений необходимо поддерживать постоянным с точностью $\pm 0,5$ В.

Примером реализации такой стабилизации процесса сварки короткой дугой является сварка труб на автоматах 0Б-1227 М сварочными головками А-1167, позволившая снизить разбрызгивание, повысить надежность начального зажигания дуги и уменьшить количество подварок, выполняемых ручной дуговой сваркой для исправления дефектов. Преимущества такого решения в простоте одновременной оптимизации процесса зажигания дуги и процесса сварки без применения каких-либо устройств для управления процессом сварки [4].

Рассмотрим различия в требованиях между 1-й, 2-й и 3-й стадиями процесса сварки.

В процессах сварки короткой дугой 3-я стадия процесса может осуществляться двумя путями. Первый путь – окончание сварки на режимах 2-й стадии. Вторым путем – окончание сварки при программировании режима для заварки кратера в конце шва. Обычно программирование режима производят на токах, превышающих 200 А.

В первом случае параметры режима окончания процесса сварки такие же, как параметры собственно сварочного процесса.

Во втором случае параметры режима окончания процесса сварки отличаются от параметров собственно сварочного процесса.

Как в первом, так и во втором случае параметры режима 3-й стадии, т.е. окончания процесса сварки, должны «помогать» оптимизировать процесс на 1-й стадии процесса сварки путем формирования капли малых размеров на конце электрода в предыдущем процессе сварки для оптимизации зажигания дуги при последующем процессе сварки.

Анализ технологических характеристик процесса сварки тонкими электродными проволоками

Зависимость глубины проплавления от тока

Было установлено, что с увеличением тока глубина проплавления возрастает. Глубина проплавления основного металла с уменьшением диаметра электрода увеличивается ввиду увеличения плотности тока. Таким образом, для получения одинаковой глубины проплавления при более тонкой проволоке требуется меньшая плотность тока.

При сварке в стык с глубоким проплавлением необходимо применение электродной проволоки больших диаметров.

Таким образом наибольшую глубину проплавления получают при сварке короткой дугой. Однако при короткой дуге шов получается узким и высоким.

Рекомендуемые напряжения в зависимости от тока

При выборе оптимальных напряжений следует руководствоваться минимальным разбрызгиванием при оптимальной форме шва.

С увеличением тока напряжение возрастает и каждому диаметру электрода соответствует оптимальное напряжение.

При одинаковых токах меньшим диаметрам электродов соответствуют более высокие напряжения.

В табл. 1 приведены минимальные токи при стабильном процессе при скорости сварки 30 м/ч.

Рекомендуемые напряжения в зависимости от тока характеризуют 2-ю стадию, т.е. собственно процесс сварки, однако необходимо учитывать при этом характер протекания 1-й стадии, т.е. начальное зажигание дуги.

Опытами установлено, что начальное зажигание дуги при последующем стабильном ее горении при $d_s = 1,0$ мм на токе 220 А от аккумуляторной батареи при напряжении дуги 16 В происходит после пятого соприкосновения электрода с изделием, а при напряжении 24 В и выше – дуга зажигается после второго соприкосновения.

Зависимость массы расплавленной электродной проволоки от тока

В табл. 2 приведены значения сварочного тока и соответствующие им скорости плавления электродной проволоки различных диаметров. Скорость плавления электродной проволоки – важная характеристика, которая определяет производительность процесса сварки и параметры привода механизма подачи [5].

Таблица 1

Минимальные токи при стабильном процессе при скорости сварки 30 м/ч

Диаметр электрода, d_s , мм	Сварочный ток, I , А	Плотность тока, А/мм ²
0,5	30	153
0,8	50	100
1,0	80	102
1,2	120	106

Таблица 2

Сварочные токи и соответствующие им скорости плавления электродной проволоки различных диаметров

Диаметр электрода, d_s , мм	Сварочный ток, I , А	Скорость плавления, м/мин
0,8	50–180	3,2–15,2
1,0	80–215	3,3–14,2
1,2	120–350	3,3–12,9

Системы управления плавлением и переносом металла

Целью создания систем управления сваркой (наплавкой) короткой дугой является улучшение формирования сварного шва, уменьшение разбрызгивания металла со снижением сварочного тока.

Особенности этих систем следующие: во-первых, осуществляется воздействие на процесс в виде импульсов напряжения и тока, а во-вторых, эти системы снабжены различными приборами для контроля управления воздействия на сварочную дугу в определенный момент времени [6].

Для оптимизации процесса сварки короткой дугой по функциональному назначению применяют:

- устройство импульсно-дуговой сварки на малых режимах тонколистового металла в углекислом газе;
- устройство для сварки на средних режимах с принудительным переносом металла;
- устройство для сварки с подачей импульса во время короткого замыкания;
- устройство сварки с уменьшением мощности дуги в начальный момент ее возбуждения;
- устройство стабилизации переноса металла во время короткого замыкания с ограничением энергии взрыва перемычки;
- системы управления с обратными связями и постоянным временем цикла.

Выбор управляющей системы управления процессом сварки короткой дугой определяется в каждом конкретном случае отдельно.

Заключение

Для снижения разбрызгивания, расширения диапазона режимов, повышения стабильности процесса, уменьшения проплавления способности дуги для сварки металла малых толщин разработано большое количество разнообразных способов и устройств, направленных на совершенствование процесса сварки короткой дугой. Применение той или иной системы управления процессом должно быть определено в каждом конкретном случае, так как использование сложных систем управления не всегда оправдано.

В связи с тем, что при исследовании путей рационального решения оптимизации процесса сварки в углекислом газе короткой дугой необходимо учитывать тепловые, механические, электрические возмущения и другие воздействия на процесс, связанные со спецификой конкретных производственных условий, технологическими требованиями к изделию и имеющимся сварочным оборудованием, целесообразно выделить общие вопросы оптимизации процесса сварки, которые должны использоваться при составлении технического задания на разработку устройства:

- выбрать способ начального зажигания дуги;
- обосновать возможность применения оптимальных режимов сварки короткой дугой и электрических параметров сварочной дуги. При этом общие потери металла на угар и разбрызгивание могут уменьшаться до 4–6 % без применения специальных систем управления процессом;
- рассмотреть целесообразность применения системы управления процессом сварки;
- рассмотреть требования к различным стадиям процесса сварки: к началу процесса и режиму сварки, к режиму сварки и окончанию процесса сварки, к окончанию процесса (заварка кратера) и формированию капли на конце электрода.

Список литературы

- 1 Металлургические особенности влияния кремния на свойства металла при сварке под флюсом нержавеющих сталей аустенитного класса / Ю. С. Волобуев, Ю. В. Бобриков, С. Ю. Волобуев [и др.] // Сварочное производство. – 2022. – № 6. – С. 5–12. – DOI 10.34641/SP.2022.1051.6.038.
- 2 Копировальные системы управления наплавкой под флюсом : монография / Н. Г. Дюргеров, И. С. Морозкин, Г. В. Даровской, К. В. Шеховцов ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2018. – 77 с. – ISBN 978-5-88814-802-0.
- 3 Оценка стабильности геометрии шва при импульсных способах дуговой сварки / Н. Г. Дюргеров, Г. В. Даровской, К. В. Шеховцов, Л. А. Кармазина // Вестник Ростовского государственного

References

- 1 Metallurgical features of the effect of silicon on the properties of the metal during submerged arc welding of austenitic stainless steels / Yu. S. Volobuev, Yu. V. Bobrikov, S. Yu. Volobuev [et al.] // Welding Production. – 2022. – No. 6. – P. 5–12. – DOI 10.34641/SP.2022.1051.6.038.
- 2 Copier control systems for submerged arc surfacing : monograph / N. G. Dyurgerov, I. S. Morozkin, G. V. Darovskoy, K. V. Shekhovtsov // Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don : RSTU, 2018. – 77 p. – ISBN 978-5-88814-802-0.
- 3 Estimation of weld geometry stability in pulsed arc welding / N. G. Dyurgerov, G. V. Darovskoy, K. V. Shekhovtsov, L. A. Karmazina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta

университета путей сообщения. – 2018. – № 1 (69). – С. 8–11. – ISSN 0201-727X.

4 Настройка систем саморегулирования сварочной дуги / Н. Г. Дюргеров, Ю. В. Бобриков, Г. В. Даровской, К. В. Шеховцов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (74). – С. 22–28. – ISSN 0201-727X.

5 **Dyurgerov, N. G.** Integral self-regulation in arc welding processes / N. G. Dyurgerov, I. S. Morozkin, V. A. Lenivkin // *Welding International*. – 2017. – Vol. 31. – No. 9. – P. 713–716. – DOI 10.1080/09507116.2017.1315072.

6 **Ленивкин, В. А.** Зажигание сварочной дуги с помощью низковольтного импульсного разряда / В. А. Ленивкин, Н. Г. Дюргеров, И. С. Морозкин // Сварка и диагностика. – 2016. – № 2. – С. 49–51. – ISSN 2071-5234.

7 Керамические флюсы для сварки и наплавки и опыт их применения в машиностроении и энергомашиностроении / О. С. Волобуев, К. А. Денисов, С. Ю. Волобуев [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2019. – № 11–12. – С. 29–34. – ISSN 1024-7106.

8 **Бобриков, Ю. В.** Новые принципы оптимизации химического состава электродного покрытия для сварки углеродистых сталей / Ю. В. Бобриков, С. Ю. Волобуев, Ю. С. Волобуев // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 6. – С. 11–15. – ISSN 1024-7106.

Putey Soobshcheniya. – 2018. – No. 1 (69). – P. 8–11. – ISSN 0201-727X.

4 Setting up welding arc self-regulation systems / N. G. Dyurgerov, Yu. V. Bobrikov, G. V. Darovskoy, K. V. Shekhovtsov // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2019. – No. 2 (74). – P. 22–28. – ISSN 0201-727X.

5 **Dyurgerov, N. G.** Integral self-regulation in arc welding processes / N. G. Dyurgerov, I. S. Morozkin, V. A. Lenivkin // *Welding International*. – 2017. – Vol. 31. – No. 9. – P. 713–716. – DOI 10.1080/09507116.2017.1315072.

6 **Lenivkin, V. A.** Ignition of a welding arc using a low-voltage pulsed discharge / V. A. Lenivkin, N. G. Dyurgerov, I. S. Morozkin // *Welding and diagnostics*. – 2016. – No. 2. – P. 49–51. – ISSN 2071-5234.

7 Ceramic fluxes for welding and surfacing and experience of their application in mechanical engineering and power engineering / O. S. Volobuev, K. A. Denisov, S. Yu. Volobuev [et al.] // *Heavy Engineering*. – 2019. – No. 11–12. – P. 29–34. – ISSN 1024-7106.

8 **Bobrikov, Yu. V.** New principles of optimizing the chemical composition of the electrode coating for welding carbon steels / Yu. V. Bobrikov, S. Yu. Volobuev, Yu. S. Volobuev // *Heavy Engineering*. – 2017. – No. 6. – P. 11–15. – ISSN 1024-7106.

I. S. Morozkin, G. V. Darovskoy

OPTIMIZATION OF SHORT ARC WELDING PROCESS DURING REPAIR OF RAILWAY ROLLING STOCK

Abstract. The operation of the arc ignition circuit at the welding and the formation start stages of small droplets has been optimized in order to increase the productivity and quality of the rolling stock parts repairing. The paper presents an analysis of the technological characteristics of long and short arc welding processes, control systems for melting and metal transfer. It is established the mutual influence of various process stages. It was experimentally proved that the depth of base metal penetration increased with decreasing electrode diameter due to widening in current density. Melting and metal transfer control systems are presented to optimize the short arc welding process. Materials on control systems are summarized and recommendations for optimizing the welding process are given.

Keywords: welding arc, short circuit, melting electrode, short arc welding, process optimization.

For citation: Morozkin, I. S. Optimization of short arc welding process during repair of railway rolling stock / I. S. Morozkin, G. V. Darovskoy // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2024. – No. 2. – P. 181–187. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_181.

Сведения об авторах

Морозкин Игорь Сергеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Технология металлов»,

Information about the authors

Morozkin Igor Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Metal Technology», Doctor of Engineering Sciences, Professor,

доктор технических наук, профессор,

e-mail: mis_tm@mail.ru

Даровской Геннадий Викторович

Ростовский государственный университет

путей сообщения (РГУПС),

кафедра «Технология металлов»,

кандидат технических наук, доцент,

e-mail: graffdarovskoi@yandex.ru

e-mail: mis_tm@mail.ru

Darovskoy Gennadiy Viktorovich

Rostov State Transport University (RSTU),

Chair «Metal Technology»,

Candidate of Engineering Sciences,

Associate Professor,

e-mail: graffdarovskoi@yandex.ru