

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140405>

УДК 621.791.03

С 37

STABILITY OF ARC PROCESS UNDER AUTOMATIC SUBMERGED-ARC SURFACING WITH HIGH-FREQUENCY ELECTRODE OSCILLATIONS

СТАБИЛЬНОСТЬ ДУГОВОГО ПРОЦЕССА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАПЛАВКЕ ПОД ФЛЮСОМ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ЭЛЕКТРОДА

Ivan V. Simutienkov

simutenkov@inbox.ru

ORCID: 0000-0002-2896-2637

Stanislav V. Drahan

stanyslav.dragan@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8634-782X

Yurii O. Yaros

yaros.amity.mk.ua@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5274-3514

И. В. Симутенков,

магистр¹;

С. В. Драган,

канд. техн. наук, проф. НУК¹;

Ю. А. Ярос,

канд. техн. наук²

¹National University of Shipbuilding, Mykolayiv

²АМІТІ, Mykolayiv

¹Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

²ООО НПФ АМИТИ, г. Николаев

Abstract. The high-frequency electrode oscillations (HEO) excited via the electromechanical generator of the transverse pulse displacements improve the increase of the electrode melting productivity and serve as a tool to control the roller size under the automatic submerged-arc surfacing. However, under certain conditions the perturbations caused by high-frequency electrode oscillations can destabilize the arc process. The aim of this work is to evaluate experimentally the impact of parameters of high-frequency electrode oscillations on the stability of the arc process under the automatic submerged-arc surfacing with the high-frequency electrode oscillations and also to determine the allowable range of changes. On the basis of the analysis of the destabilization factors of the arc process under the high-frequency electrode oscillations it is found that the changes of arc length influence most significantly due to the electrode movement under the effect of the control pulse and the high rate of the movement of the electrode end with the active spot on it relative to the surface of the base metal. The boundary values of the high-frequency electrode oscillations which ensure the stability of the arc burning under the automatic surfacing of the structural steel are determined by means of calculation and confirmed experimentally. It also shows that the high-frequency electrode oscillations cause the change of the oscillation frequency of the arc voltage from 20...15 Hz in the natural drop metal transfer to the frequency spectrum without pronounced peaks which is a characteristic of the droplet transfer. This proves the ability to control the transfer of the electrode metal using the high-frequency electrode oscillations. The research results can be used in the development of the equipment which uses the mechanical pulse control of the electrode metal transfer. The set regularities allow one to assign the effective parameters of the automatic surfacing of structural steels submerged with high-frequency electrode oscillations.

Keywords: automatic surfacing, electrode oscillations, stability of the arc process, controlled metal transfer.

Анотация. Выполнен анализ факторов, нарушающих стабильное горение дуги при автоматической наплавке с высокочастотными колебаниями электрода (ВКЭ). Определен диапазон изменения частоты и амплитуды ВКЭ, не вызывающих дестабилизацию дугового процесса. На основе анализа осциллограмм тока и напряжения дуги подтверждена возможность управления переносом электродного металла с помощью ВКЭ.

Ключевые слова: автоматическая наплавка, колебания электрода, стабильность дугового процесса, управляемый перенос металла.

Анотація. Виконано аналіз факторів, які порушують стабільне горіння дуги при автоматичному наплавленні з високочастотними коливаннями електрода (ВКЕ). Визначено діапазон зміни частоти та амплітуди ВКЕ, які не викликають дестабілізацію дугового процесу. На основі аналізу осцилограм струму і напруги дуги підтверджена можливість керування перенесенням электродного металу за допомогою ВКЕ.

Ключові слова: автоматичне наплавлення, коливання електрода, стабільність дугового процесу, кероване перенесення металу.

REFERENCES

- [1] Goloborodko Zh.G., Dragan S.V., Simutenkov I.V. Avtomaticheskaya naplavka pod flyusom konstruksionnykh staley s poperechnymi vysokochastotnymi peremeshcheniyami elektroda [Automatic submerged-arc surfacing of structural steels with transverse high-frequency movements of the electrode]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 2013, no. 6, pp. 35–38.
- [2] Dragan S.V., Simutenkov I.V., Ignatenkov O.V. Metodika opredeleniya parametrov vysokochastotnykh mekhanicheskikh kolebaniy elektroda pri avtomaticheskoy naplavke pod flyusom [Method of determination of high-frequency mechanical electrode oscillations under automatic submerged-arc surfacing]. *Visnyk DDMA [Bulletin of the DSEA]*, 2012, no. 3, pp. 124–129.
- [3] Kesaev I.G. *Katodnye protsessy elektricheskoy dugi* [Cathodic processes of the electric arc]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 244 p.
- [4] Lenivkin V.A., Dyurgerov N.G., Sagir Kh.N. *Tekhnologicheskie svoystva svarochnoy dugi v zashchitnykh gazakh* [Technological properties of the welding arc in the shielding gases]. Moscow, Maschinostroenie Publ., 1989. 264 p.
- [5] Leskov G.I. *Elektricheskaya svarochnaya duga* [Electric arc]. Moscow, Maschinostroenie Publ., 1970. 335 p.
- [6] *Rukovodyashchiy dokument po standartizatsii. Pravila. Avtomaticheskaya naplavka stalnykh tsilindricheskikh detaley uglerodistoy i korrozionnostoykoy stalyu pod flyusom* [Guidance document on standardization. Rules. Automatic surfacing of steel cylindrical parts of carbon and stainless submerged steel]. Moscow, 1988. 57 p.
- [7] Lebedev V.A., Dragan S.V., Goloborodko Zh.G., Simutenkov I.V. Upravlenie razmerami valika pri naplavke pod flyusom s poperechnymi vysokochastotnymi impulsnymi peremeshcheniyami elektroda [Control of the roller size under submerged-arc surfacing with transverse high-frequency pulse movements of the electrode]. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii – Production provision in engineering*, 2014, no. 4, pp. 6–10.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Ранее установлено [1, 2, 7], что использование при автоматической наплавке под флюсом высокочастотных колебаний электрода позволяет повысить производительность процесса, снизить глубину проплавления и долю участия основного металла в металле наплавки. Кроме того, при неизменных параметрах режима (ток, напряжение на дуге, скорость сварки) механическое воздействие на электродную проволоку может служить средством управления переносом металла через дугу и геометрией наплавленного слоя. Однако, несмотря на указанные положительные результаты, высокочастотные колебания электрода, представляющие, по сути, дополнительное возмущающее воздействие, при определенных условиях могут привести к снижению стабильности дугового процесса и качества наплавки. Поэтому задача определения условий высокой стабильности дугового процесса при автоматической наплавке под флюсом с ВКЭ является актуальной.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Сущность метода управления переносом электродного металла с помощью ВКЭ заключается в периодическом принудительном удалении жидкометаллического слоя с торца электрода в виде капель, масса которых определяется частотой колебаний. Управляющее воздействие (УВ), создаваемое механическим генератором импульсных перемещений, прикладывается к электроду на участке вылета [1].

В исследованном диапазоне изменения параметров УВ (частоты и амплитуды) установлено [1, 7], что внешний вид и форма наплавленного валика при автоматической наплавке конструкционных сталей под флюсом с ВКЭ подобны аналогичным показателям для наплавки без УВ. Однако для промышленного внедрения технологии автоматической наплавки с ВКЭ следует определить допустимые пределы изменения параметров УВ, не оказывающие влияния на качество формирования наплавленного слоя. Одним из критериев высокого качества наплавки может служить стабильность дугового процесса, оцениваемая с помощью осциллограмм тока и напряжения дуги.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – экспериментально оценить влияние параметров высокочастотных колебаний электрода на стабильность дугового процесса при автоматической наплавке под флюсом с ВКЭ и определить допустимый диапазон их изменения.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Основными факторами, дестабилизирующими дуговой процесс при наплавке с ВКЭ, по нашему мнению, являются:

1. Характер переноса электродного металла через дуговой промежуток. При наплавке под флюсом без ВКЭ реализуется естественный, крупнокапельный перенос. При воздействии на электрод высокочастотных управляющих импульсов расплавленный слой металла удаляется с торца электрода принудительно, что способствует измельчению капель и, соответственно, снижает дестабилизирующее действие размеров капель.

2. Резкое удлинение дуги вследствие высокочастотного отклонения торца электрода при управляющем импульсном воздействии. Этот фактор оказывает существенное влияние в том случае, если время, необходимое для восстановления нормального положения дуги под действием напряженности электрического поля, меньше полупериода колебаний торца электрода [2]. Так, например, при нормальной длине дуги 1...3 мм, характерной для исследованных режимов [1], смещение торца электрода на расстояние, равное его диаметру, может привести к удлинению дуги в 1,2–1,5 раза. При этом в случае наплавки под флюсом ОСЦ-45 наблюдаются скачки напряжения в дуге на 3...4 В, которые свидетельствуют о снижении стабильности дугового процесса.

3. Выход катодного пятна сварочной дуги, расположенного на поверхности основного металла (при наплавке током обратной полярности), за пределы сварочной ванны. Однако «холодный», не разогретый теплом сварочной дуги, катод не является препятствием для дугового разряда [5]. Поэтому данный фактор не оказывает существенного дестабилизирующего действия на дуговой процесс.

4. Попадание флюса в столб дуги при частичном или полном выходе сварочной дуги за пределы газового пузыря. Стабильность горения дуги в этом случае нарушается только при смещении торца электрода за пределы сварочной ванны, что в реальных условиях практически не наблюдается.

5. Высокая скорость перемещения торца электрода относительно поверхности основного металла. Так, линейная скорость торца электрода диаметром

2 мм при частоте колебаний $f_k = 500$ Гц и амплитуде колебаний $A_k = 2 \cdot 10^{-3}$ м составляет 1 м/с. Скорость перемещения катодного пятна на поверхности основного металла (стали), по данным [3–5], колеблется в диапазоне 0,5...3,0 м/с, поэтому ВКЭ могут искажать естественный процесс блуждания катодного пятна, способствуя снижению стабильности дугового процесса.

Таким образом, следует считать, что основными факторами дестабилизации дугового процесса при автоматической наплавке под флюсом с ВКЭ являются резкое удлинение дуги вследствие перемещения электрода под действием управляющего импульса и высокая скорость перемещения торца электрода с находящимся на нем активным пятном относительно поверхности основного металла.

Если ограничить амплитуду высокочастотных колебаний диаметром электрода, то главным дестабилизирующим фактором будет высокая скорость перемещения торца электрода, которую также следует ограничить. Так как скорость перемещения торца электрода зависит от амплитуды A_k и частоты f_k колебаний, то ограничивающее условие можно записать как

$$2f_k A_k \leq V_{кр},$$

где $V_{кр}$ – скорость перемещения катодного пятна в данных условиях сварки.

Расчетная кривая, определяющая границы стабильного горения дуги при наплавке с ВКЭ и построенная с использованием приведенного выше условия, представлена на рис. 1.

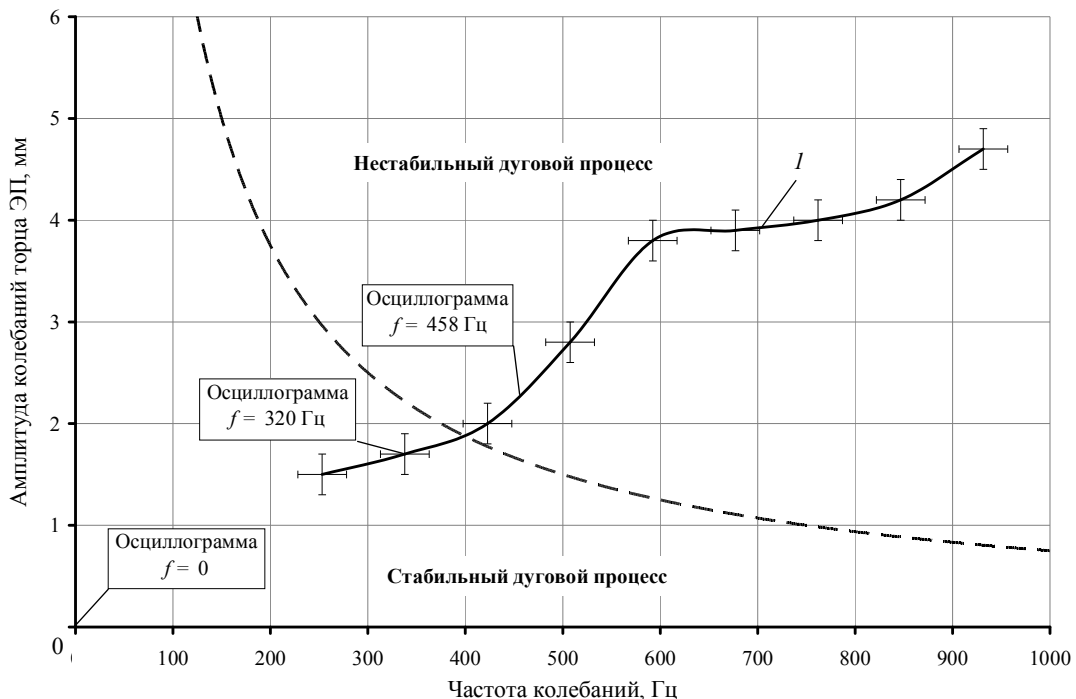


Рис. 1. Влияние параметров высокочастотных колебаний электрода на стабильность дугового процесса: I – регулировочная характеристика генератора импульсных перемещений при $l_b = 50$ мм

В области параметров высокочастотных колебаний, расположенной ниже кривой, дуговой процесс должен проходить стабильно, без коротких замыканий и обрывов дуги. Однако колебания напряжения на дуге, вызванные ее удлинением вследствие смещения электрода под действием управляющего импульса, могут наблюдаться во всем диапазоне изменения амплитуды.

Экспериментальную проверку результатов теоретического исследования проводили на стенде, состоящем из сварочного комплекса АСТ 1000 (инверторный источник питания и сварочный трактор) и генератора высокочастотных импульсных перемещений электрода (рис. 2), закрепленного на сварочной головке.

Применение стабилизированного источника питания позволило выполнять наплавку с дополнительным возмущающим воздействием на дугу при минимально допустимой силе тока и скорости, рекомендованной [6].

Влияние параметров ВКЭ на стабильность дугового процесса оценивали с помощью осциллограмм тока и напряжения дуги, регистрируемых электронным USB-осциллографом и статистически обработанных с помощью пакета прикладных программ Lab View 2013.

Наплавку валиков выполняли на образцы размерами 500×200×10 мм из конструкционной стали ВСт.3сп. Сварочные материалы использовали в сочетании, рекомендованном [6]: проволока Св-08А + флюс ОСЦ-45. Параметры режима наплавки устанавливали также в соответствии с [6]: $d_s = 2$ мм; $I_{св} = 200 \dots 250$ А; $U_d = 27 \dots 30$ В; $V_{св} = 18 \dots 22$ м/ч. Высокочастотные импульсные перемещения электрода создавали вдоль наплавляемого валика, параметры режима колебаний торца электродной проволоки изменяли в пределах: частоту $f_k = 250 \dots 1000$ Гц, амплитуду $A_k = 0,5 \dots 3,0$ мм.

Осциллографирование тока и напряжения проводили непрерывно, начиная процесс без колебаний электрода, а затем продолжая его с колебаниями.

На представленных осциллограммах (рис. 3) различаются участки возбуждения дуги, наплавки при отсутствии колебаний, переходного процесса (при включении генератора импульсных перемещений), наплавки с колебаниями электрода и гашения дуги. При наплавке с ВКЭ, несмотря на некоторое увеличение амплитуды колебаний тока и напряжения, стабильность процесса остается высокой.

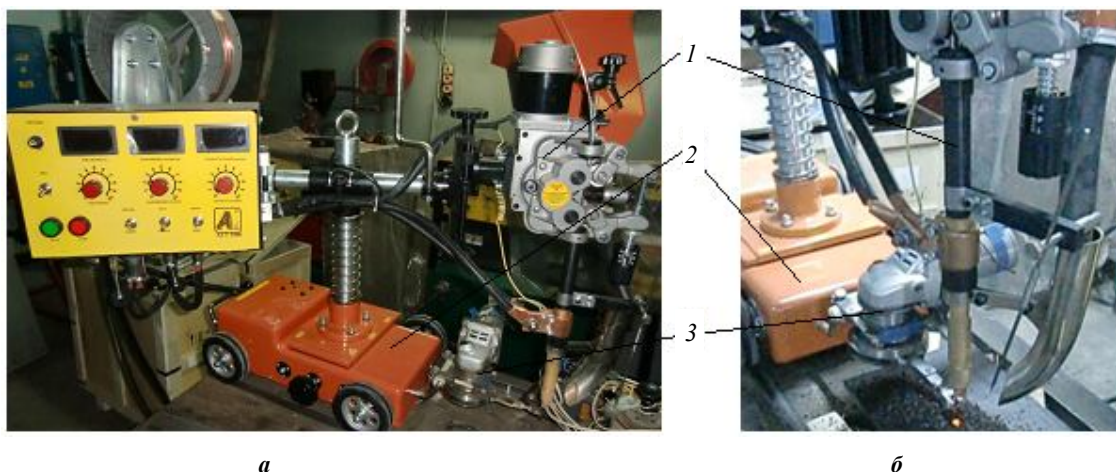


Рис. 2. Варианты размещения на сварочном тракторе генератора импульсных перемещений электродной проволоки: *а* – поперек наплавляемого валика; *б* – вдоль валика; 1 – сварочная головка; 2 – каретка трактора; 3 – механический генератор

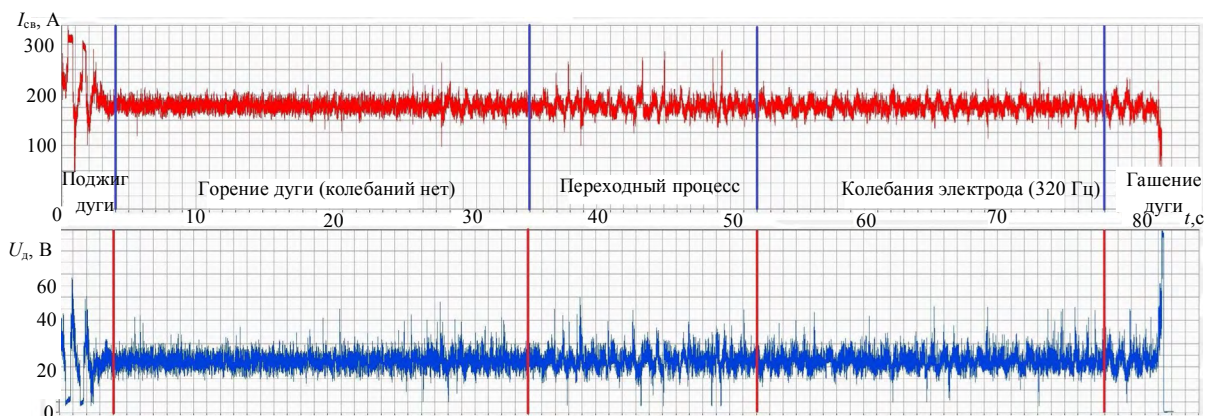


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения дуги при наплавке ($d_s = 2$ мм; $l_b = 50$ мм; $I_{св} = 200$ А; $U_d = 30$ В; $V_{св} = 21$ м/ч; $f_k = 320$ Гц)

Наблюдаются характерные периодические изменения исследованных параметров, свидетельствующие о наличии управляемого процесса удаления жидкометаллического слоя с торца электрода. Подтверждением этого служат результаты, полученные путем обработки осциллограмм с помощью преобразования Фурье (рис. 4).

Анализ частотных спектров показывает, что колебания напряжения дуги с частотой $f = 15 \dots 20$ Гц (см. рис. 4,а), характерные для естественного капельного переноса металла, превращаются в спектр частот без ярко выраженных пиков (см. рис. 4,б). Это объясняется снижением влияния измельченных высокочастотными колебаниями капель электродного металла

на напряжение и силу тока в дуге. Появление пиков напряжения с частотой $1 \dots 2$ Гц (см. рис. 4,б) связано с высокоамплитудными колебаниями ($A_k > 3,0$ мм), создаваемыми генератором импульсных перемещений.

При наплавке, выполненной на режимах, соответствующих расчетной области стабильного горения дуги, отсутствуют короткие замыкания дугового промежутка. Это подтверждается результатами осциллографирования напряжения и тока в сварочной цепи (рис. 5,а,б). Области колебания значений указанных параметров режима при $f_k = 0$ и $f_k = 320$ Гц соизмеримы. При наплавке на режимах выше допустимых стабильность горения дуги нарушается – наблюдаются короткие замыкания (см. рис. 5,в).

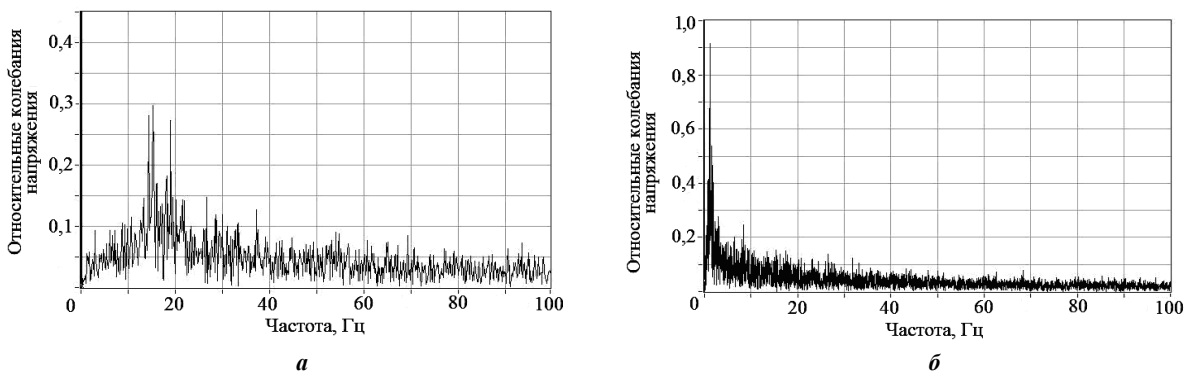


Рис. 4. Частотные спектры напряжения дуги при наплавке: а – без колебаний электрода; б – с колебаниями

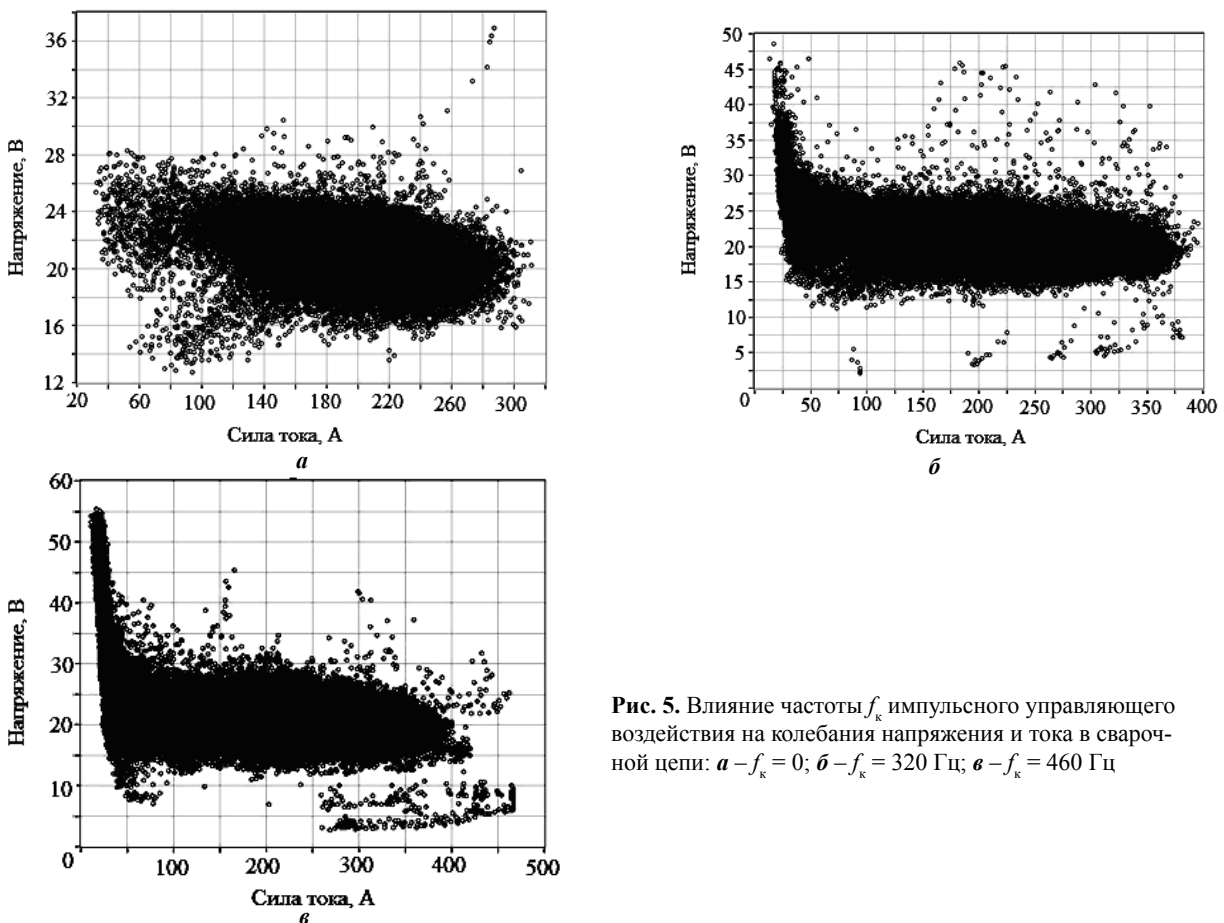


Рис. 5. Влияние частоты f_k импульсного управляющего воздействия на колебания напряжения и тока в сварочной цепи: а – $f_k = 0$; б – $f_k = 320$ Гц; в – $f_k = 460$ Гц

Амплитуда колебаний торца электродной проволоки, также влияющая на стабильность дугового процесса, при использовании существующей конструкции генератора импульсных перемещений находится в прямой зависимости от частоты (см. регулировочную характеристику на рис. 1). Поэтому с ростом частоты колебаний увеличивается их амплитуда и, как следствие, повышается напряжение дуги, фиксируемое осциллограммами на рис. 5, б, в. Однако при частоте импульсного управляющего воздействия $f_k \leq 60$ Гц колебания напряжения исчезают. Это связано, по-видимому, со снижением скорости перемещения торца электрода до значения, когда составляющая напряженности электрического поля, действующая параллельно поверхности основного металла, успевает за полупериод колебаний восстанавливать нормальное положение дуги.

ВЫВОДЫ

1. Основными дестабилизирующими факторами дугового процесса при автоматической наплавке под флюсом с высокочастотными колебаниями электрода являются резкое удлинение дуги вследствие отклонения торца электрода под действием управляюще-

го импульса и высокая скорость перемещения торца электрода с находящимся на нем активным пятном относительно поверхности основного металла.

2. Расчетным путем установлен и экспериментально подтвержден диапазон параметров высокочастотных колебаний электрода, обеспечивающий стабильный дуговой процесс и управление переносом металла через дугу. С увеличением частоты колебаний следует снижать их амплитуду. При наплавке электродной проволокой Св-08А диаметром 2,0 мм под флюсом ОСЦ-45 при частоте колебаний $f_k = 1000$ Гц допустимая амплитуда должна быть снижена более чем в 6 раз.

3. Экспериментально, путем анализа осциллограмм сварочного тока и напряжения подтвержден управляемый процесс переноса металла через дугу при наплавке с высокочастотными колебаниями электрода в диапазоне параметров, обеспечивающих стабильное горение дуги. Повышение частоты механических колебаний приводит к изменению частоты колебаний напряжения на дуге с 15...20 Гц, характерной для естественного капельного переноса металла, к спектру частот без ярко выраженных пиков, характерного для мелкокапельного переноса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Голобородько, Ж. Г. Автоматическая наплавка под флюсом конструкционных сталей с поперечными высокочастотными перемещениями электрода [Текст] / Ж. Г. Голобородько, С. В. Драган, И. В. Симутенков // Автоматическая сварка. – 2013. – № 6. – С. 35–38.
- [2] Драган, С. В. Методика определения параметров высокочастотных механических колебаний электрода при автоматической наплавке под флюсом [Текст] / С. В. Драган, И. В. Симутенков, О. В. Игнатенков // Вісник ДДМА. – 2012. – № 3. – С. 124–129.
- [3] Кесаев, И. Г. Катодные процессы электрической дуги [Текст] / И. Г. Кесаев. – М. : Наука, 1968. – 244 с.
- [4] Ленивкин, В. А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах [Текст] / В. А. Ленивкин, Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров. – М. : Машиностроение, 1989. – 264 с.
- [5] Лесков, Г. И. Электрическая сварочная дуга [Текст] / Г. И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 335 с.
- [6] РД 212.0080–87. Руководящий документ по стандартизации. Правила. Автоматическая наплавка стальных цилиндрических деталей углеродистой и коррозионностойкой сталью под флюсом. Основные положения [Текст]. – М., 1988. – 57 с.
- [7] Управление размерами валика при наплавке под флюсом с поперечными высокочастотными импульсными перемещениями электрода [Текст] / В. А. Лебедев, С. В. Драган, Ж. Г. Голобородько, И. В. Симутенков // Заготовительные производства в машиностроении. – 2014. – № 4. – С. 6–10.

© І. В. Сімутенков, С. В. Драган, Ю. О. Ярос

Надійшла до редколегії 13.05.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький