

# АВТОМАТИЧЕСКАЯ НАПЛАВКА ПОД ФЛЮСОМ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С ПОПЕРЕЧНЫМИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ЭЛЕКТРОДА

Ж. Г. ГОЛОБОРОДЬКО, С. В. ДРАГАН, И. В. СИМУТЕНКОВ

Национальный университет кораблестроения имени Адмирала Макарова.  
54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9. E-mail: simutenkov@inbox.ru

Поперечные колебания электрода при автоматической наплавке под флюсом — один из путей уменьшения глубины проплавления и доли участия основного металла в наплавленном. Такие колебания могут быть созданы путем генерирования высокочастотных поперечных импульсных перемещений электродной проволоки с помощью специально разработанного электромеханического генератора. Цель настоящей работы — оценка влияния высокочастотных малоамплитудных поперечных импульсных перемещений электродной проволоки на геометрию наплавленного валика и производительность наплавочного процесса. Наплавку валиков выполняли на пластины из низкоуглеродистой конструкционной стали электродной проволокой Св-08А диаметром 2 мм под флюсом АН-348А. Импульсные перемещения электрода с частотой 0,25...5,0 кГц создавали вдоль направления наплавки. Установлено, что с увеличением частоты глубина проплавления основного металла и ширина валика уменьшаются, а высота валика увеличивается; при этом изменяется также производительность наплавки. Характер изменения указанных параметров зависит от режима импульсного воздействия на электродную проволоку — наличия или отсутствия резонанса. Наиболее существенное изменение геометрии наплавленного валика наблюдается в области частот первого резонанса (0,55...0,75 кГц): глубина проплавления и доля участия основного металла в наплавке снижаются в 3 раза. Максимальное увеличение производительности происходит в области второго резонанса (3,75...3,85 кГц), коэффициент расплавления электрода возрастает на 10...20 % по сравнению с наплавкой без импульсного воздействия. Библиогр. 10, рис. 4, табл. 1.

*Ключевые слова:* автоматическая дуговая наплавка, низкоуглеродистые конструкционные стали, высокочастотное импульсное перемещение, механический генератор, геометрия наплавленного валика

Ремонт изношенных деталей судовых машин и механизмов часто выполняют с помощью автоматической наплавки под флюсом (АНФ), которая наряду с высокой производительностью обеспечивает требуемое качество и однородность наплавленного слоя. Однако при этом возрастает глубина проплавления основного металла и доля его участия в наплавленном, последняя, как правило, составляет 30...50 % [1]. Снижение указанных отрицательных показателей технологии АНФ при сохранении высокой производительности процесса представляет собой актуальную задачу. Для ее решения используют различные методы воздействия на процессы переноса электродного металла через дугу или формирования сварочной ванны, позволяющие управлять геометрическими параметрами наплавленного валика, а следовательно, и долей участия основного металла в наплавленном слое (ДОМ). Наиболее распространенными являются электрический метод (импульсно-дуговая сварка), механический (вибродуговая наплавка) и магнитный [2, 3].

Следует отметить, что электрический метод предусматривает применение сложных и дорогих источников сварочного тока с программированием

параметров режима [4], магнитный — накладывает ограничения, связанные с магнитными свойствами и основного, и электродного металлов [5].

Перечисленные недостатки, по нашему мнению, не характерны для механического метода, отличающегося простотой реализации с использованием серийного сварочного оборудования. Известно, что импульсная подача электрода [6] или создание поперечных низкочастотных (до 150 Гц) колебаний электрода [7] повышают стабильность горения дуги, улучшают геометрию и структуру сварного шва. Высокочастотные (500...1000 Гц) малоамплитудные (около 130 мкм) поперечные импульсные перемещения электрода способствуют снижению глубины проплавления и ДОМ также при АНФ [8]. В последнем случае эффект достигается за счет периодического принудительного удаления жидкометаллической прослойки с торца электрода при вибрационном воздействии, позволяющем регулировать массу капель металла, переносимых через дугу.

Цель данной статьи — исследование влияния поперечного высокочастотного импульсного перемещения электрода на геометрические характеристики наплавленного валика и технологические характеристики процесса при однодуговой АНФ конструкционных сталей.

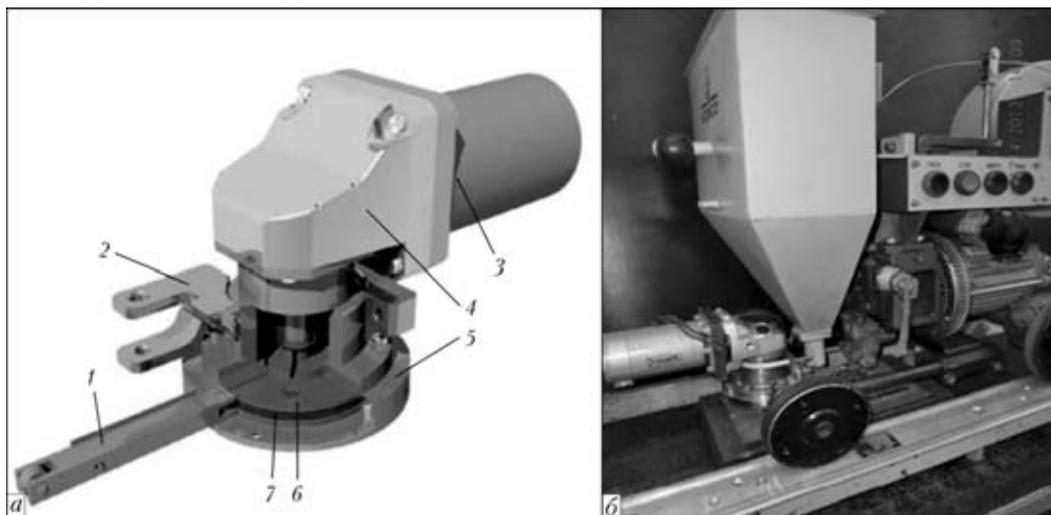


Рис. 1. Конструкция генератора высокочастотных импульсных перемещений электрода (а) и его установка на сварочном тракторе (б): 1 — ударник; 2 — крепежный кронштейн; 3 — электродвигатель; 4 — редуктор; 5 — корпус; 6 — приводная шайба; 7 — задающие ролики

Генератор поперечных высокочастотных перемещений электродной проволоки (ЭП) представляет собой электромеханический привод (рис. 1), легко монтируемый на сварочном тракторе с широким диапазоном регулирования частоты импульсного воздействия [8].

Импульсное воздействие на ЭП приводит к поперечным колебаниям ее торца в двух режимах — межрезонансном и резонансном. В области частот, близких к резонансу, амплитуда колебаний резко возрастает, вследствие чего геометрия наплавленного валика может существенно изменяться. Резонансную частоту, при которой частоты импульсного воздействия и собственных колебаний ЭП совпадают, можно представить в виде [9]

$$f_{ki} = \frac{d_3}{8\pi} \left( \frac{E}{\gamma} \right)^{0,5} \left( \frac{p_i}{l_B} \right)^2,$$

где  $d_3$ ,  $E$ ,  $\gamma$  — соответственно диаметр, модуль упругости и плотность металла ЭП;  $l_B$  — длина вылета электрода;  $p_i = kl_B$  — корни частотного уравнения, определяемые характером закрепле-

ния конца стержня, подверженного колебаниям, т. е. схемой закрепления ЭП в токоподводе;  $k$  — функция Крылова.

Наиболее часто применяемые в серийных сварочных тракторах для АНФ токоподводы условно можно объединить в две расчетные схемы, реализующие шарнирное (рис. 2, а) или жесткое (рис. 2, б) закрепление электрода. Значения первых двух корней частотного уравнения соответственно для схемы, представленной на рис. 2, а, равны:  $p_1 = 3,9266$  и  $p_2 = 7,0685$ , для схемы на рис. 2, б  $p_1 = 1,8751$  и  $p_2 = 4,6941$  [10].

Управлять частотой резонанса согласно приведенному выше уравнению можно путем изменения длины вылета или характера закрепления электрода в токоподводе. Так, в диапазоне частот 100...1000 Гц резонансные колебания для электрода диаметром  $d_3 = 2$  мм имеют место при длине вылета  $l_B = 25...80$  мм, а для  $d_3 = 5$  мм соответственно при  $l_B = 40...150$  мм. При этом увеличение длины вылета и жесткости закрепления электрода в токоподводе приводит к снижению частоты резонанса.

Недостатком метода управления процессом переноса металла через дугу с использованием явления резонанса является дискретное изменение резонансных частот.

В межрезонансном режиме импульсного воздействия плавно регулировать амплитуду колебаний торца электрода в узком (1...3 мм) диапазоне также можно либо путем увеличения длины вылета  $l_B$ , либо уменьшения плеча  $h_y$  приложения силы  $F(t)_{имп}$ . Однако длина вылета электрода определяется, как правило, при выборе параметров режима наплавки и не может быть свободно изменена, а плечо  $h_y$  ограничивается величиной изгибающего момента, вызывающего пластическое деформирование ЭП [8].

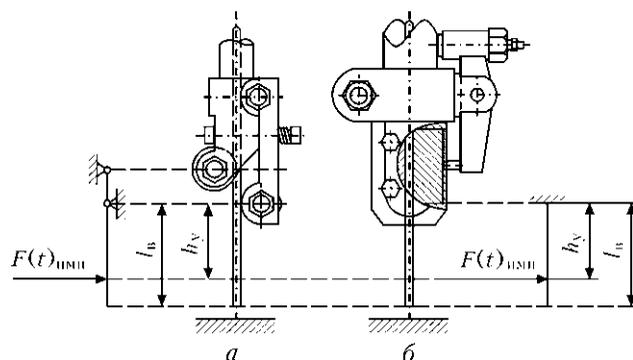


Рис. 2. Конструкции токоподводов и соответствующие им расчетные схемы приложения силы импульсного воздействия  $F(t)_{имп}$  с непрерывной (а) и дискретной (б) компенсацией износа ( $h_y$  — плечо приложения силы  $F(t)_{имп}$ )

Достаточно просто управлять амплитудой колебания торца ЭП путем изменения частоты импульсного воздействия. По мере возрастания частоты повышается скорость и ускорение передаточного звена (ударника генератора), что приводит к увеличению инерционной составляющей усилия  $F(t)_{\text{имп}}$ .

Подтверждением этого предположения являются результаты специального экспериментального исследования. При проведении опытов длину следа, оставляемого на образце из пластичного материала, измеряли колеблющимся заостренным торцом ЭП. Установлено (рис. 3), что с увеличением частоты импульсного воздействия амплитуда колебаний возрастает по параболическому закону (штриховая кривая). При этом на частотах, близких к резонансу для данного вылета ЭП, наблюдается резкое увеличение амплитуды колебаний.

Амплитуду колебаний торца электрода можно регулировать двумя способами: ступенчато путем изменения массы ударника генератора или значения его перемещения в импульсе, а также плавно путем варьирования частоты вращения вала приводного электродвигателя.

Влияние поперечных высокочастотных импульсных перемещений электрода на геометрические характеристики наплавленного валика оценивали по результатам исследований, выполненных на экспериментальном стенде (см. рис. 1, б), оснащенном сварочным трактором КА-001 с генератором высокочастотных импульсных перемещений электрода и источником питания КИУ-501.

Наплавку валиков проводили ЭП Св-08А диаметром 2 мм под флюсом АН-348А на пластины толщиной 10 мм из низкоуглеродистой конструкционной стали Ст3сп. В опытах варьировали только частоту импульсного воздействия, оставляя прочие параметры режима сварки неизменными. Стабильность сварочного процесса, регистрируемого с помощью электронного USB-осциллографа IRIS, оценивали по осциллограммам напряжения на дуге. Геометрические параметры наплавленных валиков, площадь проплавления, наплавки и ДОМ определяли по макрошлифам.

Ниже представлены результаты, соответствующие импульсному воздействию на ЭП вдоль направления наплавки. Установлено, что с увеличением частоты импульсов ширина валика и глубина проплавления основного металла уменьшаются, а высота валика возрастает (рис. 4).

Характер изменения указанных параметров зависит от режима импульсного воздействия на ЭП — наличия или отсутствия резонанса. При резонансном режиме наблюдается «экстремальное» изменение геометрии валика с соответствующим изменением ДОМ (таблица).

Максимальный эффект достигнут на главном тоне (первый резонанс) колебательной системы

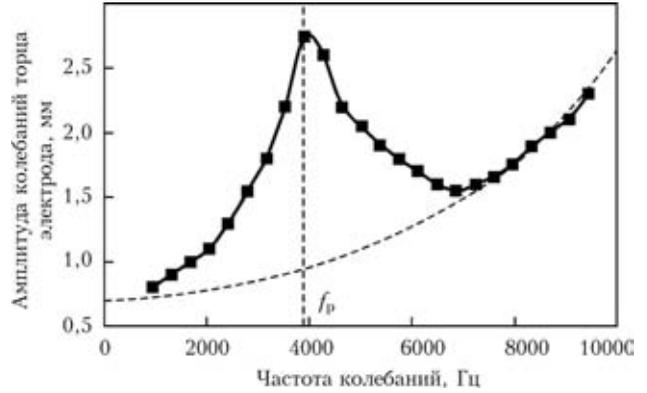


Рис. 3. Влияние частоты на амплитуду колебаний торца ЭП диаметром 2 мм ( $f_p$  — резонансная частота)

в диапазоне частот  $f_{p1} = 560...750$  Гц. Это хорошо согласуется с резонансной частотой  $f_p = 630$  Гц, рассчитанной по приведенному выше уравнению.

Межрезонансный режим колебаний приводит к плавному изменению геометрии валика. При увеличении частоты возрастает силовое воздействие капель электродного металла на сварочную ванну. Глубина проплавления и ДОМ за счет этого закономерно увеличиваются.

Высокочастотные импульсные перемещения электрода оказывают влияние и на производительность наплавки. Увеличение частоты и амплитуды способствует уменьшению толщины жидкометал-

**Влияние частоты импульсных перемещений электрода при АНФ на формирование валика, ДОМ и коэффициент расплавления**

Частота $f$ , Гц	Макрошлиф наплавленного валика	ДОМ	$K_p$ , г/(А·ч)
0		0,36	15,4
680 ( $f_{p1}$ )		0,13	16,9
1295		0,30	15,0
3820 ( $f_{p2}$ )		0,22	18,6
5800		0,25	16,1

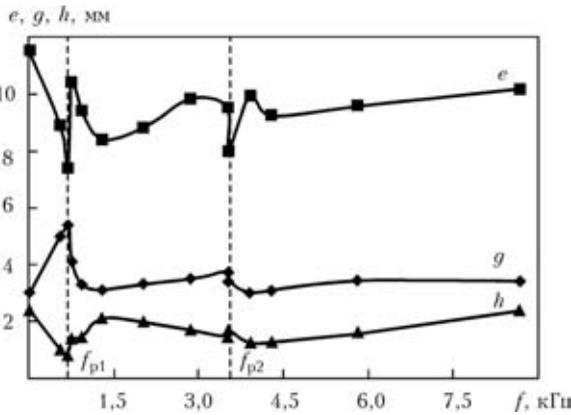


Рис. 4. Влияние частоты импульсных перемещений электрода на геометрические параметры наплавленного валика ( $d_3 = 2$  мм;  $I = 200$  А;  $v_{св} = 19$  м/ч;  $l_B = 48$  мм): ширину наплавленного валика  $e$ , высоту  $g$  и глубину проплавления основного металла  $h$  ( $f_{p1}, f_{p2}$  — резонансные частоты)

лической прослойки на торце ЭП, возрастанию как теплопередачи от дуги к электроду, так и коэффициента расплавления электрода. Так, при частоте первого обертона  $f_{p2} = 3820$  Гц коэффициент расплавления превышает исходное значение более чем на 20 % (см. таблицу).

### Выводы

1. Приложение высокочастотного механического импульсного воздействия на ЭП позволяет управлять процессом переноса металла, размерами наплавленного валика и производительностью процесса при АНФ.
2. Наибольшее влияние поперечные механические колебания ЭП оказывают в области резонансных частот: первого тона — на геометрические параметры наплавленного валика; второго тона — на производительность расплавления электрода.

3. При АНФ конструкционных сталей механическое импульсное воздействие на ЭП в диапазоне частот  $f = 600 \dots 4000$  Гц позволяет снизить глубину проплавления и ДОМ в 3 раза, увеличить коэффициент расплавления электрода на 10...20%.

1. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
2. *Найденов А. М.* Расчет скорости плавления электродной проволоки при механизированных способах дуговой сварки // Свароч. пр-во. — 1998. — № 6. — С. 10–14.
3. *Тарасов Н. М.* Энергетический расчет процесса отрыва капли электродного металла при воздействии импульса внешнего электромагнитного поля // Автомат. сварка. — 1984. — № 6. — С. 21–25.
4. *Лебедев В. А.* Аспекты выбора оборудования для электродуговой и автоматической сварки с импульсной подачей электродной проволоки // Свароч. пр-во. — 2008. — № 5. — С. 45–49.
5. *Размышляев А. Д., Миронова М. В.* Производительность плавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля // Вісн. Донбас. держ. машинобуд. акад. — 2011. — № 1. — С. 142–147.
6. *Управление* процессом механизированной сварки в углекислом газе с использованием параметров переноса электродного металла / В. А. Лебедев, И. С. Кузьмин, В. Г. Новгородский, В. Г. Пичак // Свароч. пр-во. — 2002. — № 5. — С. 6–14.
7. *Алов А. А., Виноградов В. С.* Влияние вибрации электрода на процесс дуговой сварки и свойства швов // Там же. — 1958. — № 9. — С. 19–22.
8. *Драган С. В., Симутенков И. В.* Разработка устройства для управления геометрическими параметрами шва при автоматической наплавке под флюсом // Зб. наук. праць НУК. — 2011. — № 3. — С. 59–64.
9. *Физика* и техника мощного ультразвука. Т.3. Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л. Д. Розенберга. — М.: Наука, 1970. — 686 с.
10. *Физика* и техника мощного ультразвука. Т.1. Источники мощного ультразвука / Под ред. Л. Д. Розенберга. — М.: Наука, 1970. — 380 с.

Поступила в редакцию 04.02.2013

## ООО «ФРУНЗЕ-ЭЛЕКТРОД». ПРОИЗВОДСТВО СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Электродным производством в составе ПАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе» занимается ООО «Фрунзе-Электрод». История производства в целом охватывает период с 1930 г. по настоящее время. Высокие требования к качеству сварочных материалов, необходимость их соответствия международным стандартам всегда были предопределены номенклатурой выпускаемого объединением оборудования, работающего в экстремальных условиях: для химической промышленности, добычи нефти и газа, магистральных газопроводов, атомных электростанций и т. п.

Сегодня ООО «Фрунзе-Электрод» производит 53 марки сварочных электродов. Предприятие оснащено швейцарским оборудованием с замкнутым циклом производства и современной лабораторно-исследовательской базой, позволяющей проводить весь комплекс исследований и испытаний в соответствии с требованиями НТД на выпускаемую продукцию.

По желанию заказчика предприятие применяет вакуумную упаковку электрода в вакуумно-прочной полимерной упаковке.

ООО «Фрунзе-Электрод» готово рассмотреть и выполнить любой заказ на изготовление сварочных электродов с обеспечением всех требований по их испытаниям и гарантией высокого качества.