

УДК 621.791.03

Драган С. В., Симутенков И. В., Игнатенков О. В.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОДА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАПЛАВКЕ ПОД ФЛЮСОМ

В процессе эксплуатации сопрягаемые поверхности подвижных деталей машин и механизмов могут интенсивно изнашиваться. Ремонт таких деталей часто выполняют с помощью автоматической наплавки под флюсом (АНФ), которая при высокой производительности обеспечивает требуемое качество и однородность наплавленного слоя. Однако, с увеличением силы сварочного тока растут глубина проплавления и доля участия основного металла в наплавленном (ДОМ). Разработка технологии АНФ, позволяющей снизить указанные нежелательные показатели при сохранении высокой производительности процесса, представляет собой актуальную задачу.

Одним из путей решения этой задачи при использовании серийного сварочного оборудования (с минимальными дополнительными затратами на модернизацию) является применение однодуговой АНФ с управляемым переносом электродного металла посредством механического воздействия на электродную проволоку.

Известно [1], что при введении в сварочную ванну поперечных ультразвуковых колебаний удастся значительно уменьшить размер литого зерна и повысить сопротивляемость металла образованию горячих трещин. Применение автоматической сварки под флюсом с поперечными низкочастотными колебаниями электрода повышает стабильность горения дуги, улучшает геометрию и структуру сварного шва [2]. Малоамплитудные (около 130 мкм) поперечные механические колебания электрода с низкой частотой (0,5...1,0 кГц) способствуют снижению глубины проплавления и ДОМ и при АНФ [3].

Однако разработка технологии АНФ с высокочастотными механическими колебаниями сдерживается отсутствием методики оценки влияния параметров управляющего воздействия (УВ) (частоты, амплитуды, направления колебаний) на такие показатели технологии, как геометрические параметры шва, структура наплавленного слоя и производительность плавления электрода.

Цель данной работы – разработка математической модели процессов, происходящих в колебательной системе вибровозбудитель – электрод – жидкометаллическая прослойка (ЖМП) на торце электрода, и расчетной методики определения параметров режима механических колебаний для обеспечения эффективного управления процессом переноса электродного металла через дугу при однодуговой АНФ.

Наиболее рациональным для использования при АНФ признан способ генерирования механических изгибных колебаний с помощью источника продольных колебаний [1–3], при котором электродная проволока является одновременно присадочным материалом и волноводом. Длина волны изгибных колебаний для сплошной электродной проволоки с учетом фазовой скорости изгибной волны в стержне определяется так [4]:

$$\lambda = \left( \frac{\pi d_3}{2f} \right)^{0.5} \left( \frac{E}{\gamma} \right)^{0.25}, \quad (1)$$

где  $E$ ,  $\gamma$ ,  $i$ ,  $d_3$  – модуль упругости, плотность металла, радиус инерции поперечного сечения и диаметр электродной проволоки соответственно;

$\omega = 2\pi f$  – фазовая частота;

$f$  – линейная частота колебаний.

Из условия возникновения в волноводе преимущественно изгибных колебаний и исключения инерции вращения, запишем:

$$d_э = \frac{2\pi}{f} \left( \frac{E}{\gamma} \right)^{0.5} ; \quad l_в = 1,12 d_э, \tag{2}$$

где  $l_в$  – длина вылета электрода.

Условия (2) выполняются для всего диапазона диаметров и длин вылета электродной проволоки, используемых при АНФ.

Генерируемые в волноводе колебания могут совпадать с частотой собственных колебаний электродной проволоки или отличаться от них. Резонансные частоты для случая электродной проволоки сплошного сечения на основании [5]:

$$f_{ki} = \frac{d_э}{8\pi} \left( \frac{E}{\gamma} \right)^{0.5} \left( \frac{p_i}{l_в} \right)^2, \tag{3}$$

где  $k$  – функция Крылова;

$p_i = kl_в$  – корни частотного уравнения, определяемые характером закрепления конца стержня, подверженного колебаниям.

Применительно к условиям колебания электродной проволоки, токоподводы, используемые при АНФ, можно условно объединить в две расчетные схемы, обеспечивающие шарнирное (рис. 1, а) или жесткое (рис. 1, б) закрепление электрода. Соответствующие данным схемам значения  $p_i$  приведены в табл. 1.

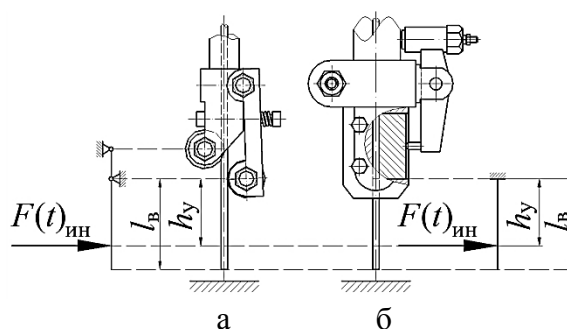


Рис. 1. Конструкции и соответствующие расчетные схемы токоподводов: а – с непрерывной компенсацией износа; б – с дискретной компенсацией износа

Таблица 1

Корни частотного уравнения для стержней с различными вариантами закрепления концов [5]

Тип расчетной схемы	Шарнирное закрепление электрода (рис. 1, а)	Жесткое закрепление электрода (рис. 1, б)
Корни частотного уравнения		
$p_1$	3,9266	1,8751
$p_2$	7,0685	4,6941
$p_n (n > 2)$	$(4n + 1)/2\pi$	$(2n + 1)/4\pi$

Кроме резонанса, при совпадении точки приложения возбуждающей силы с одной из узловых точек колебаний стержня, может возникнуть антирезонанс (отсутствие колебаний). Положение узловых точек в этом случае может быть найдено с помощью уравнений (1) и (3) по схеме, предложенной в [5]:

$$h_y \neq (2n + 1) \frac{\pi d_B}{2\rho_i}, \quad (4)$$

где  $h_y$  – отстояние от токоподвода до точки приложения УВ.

Колебательное движение электродной проволоки под действием УВ, в свою очередь, вызывает колебание ЖМП, находящейся на торце электрода и при определенных значениях способствует отрыву капель и инициированию управляемого переноса металла.

Отрыв капли с торца электрода возможен только при превышении сил  $\sum F_a$ , стремящихся оторвать каплю, над силами  $\sum F_p$ , стремящимися ее удержать, т. е.:

$$\sum F_a \geq \sum F_p. \quad (5)$$

Тут  $F_a = F_{\text{пинч}} + F(t)_{\text{ин}} + G$ ;  $F_p = F_{\text{н.н.}} + P_e + P_p$ , где, в свою очередь,  $F_{\text{пинч}}$  – сила ПИНЧ-эффекта;  $F(t)_{\text{ин}}$  – сила инерции;  $G$  – вес капли;  $F_{\text{п.н}}$  – сила поверхностного натяжения;  $P_e$  – сила давления электронов;  $P_p$  – сила давления паров.

Из выражения (5) необходимое условие отрыва капли:

$$\sqrt{F(t)_{\text{ин}}^2 + (\sum F_a - \sum F_p)^2} \geq F_{\text{п.н.}}. \quad (6)$$

Однако гарантированный отрыв капли произойдет лишь тогда, когда кинетическая энергия УВ превысит свободную энергию поверхности капли, или:

$$\frac{m_k V^2}{2} \geq \sigma \Delta S, \quad (7)$$

где  $m_k$  – масса капли;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;

$V$  – скорость движения торца электрода.  $V = \frac{1}{m_k} \int_0^{t_c} \sqrt{F(t)_{\text{ин}}^2 + (\sum F_a - \sum F_p)^2} dt$ ;

$\Delta S = 2S_3 K_\phi$  – приращение площади поверхности жидкости под действием деформации;

( $S_3$  – площадь поперечного сечения проволоки;

$K_\phi$  – поправочный коэффициент, зависящий от соотношения размеров капли и электрода [6]).

Тогда выражение (7) преобразуется к виду:

$$\frac{1}{m_k} \left( \int_0^{t_c} \sqrt{F(t)_{\text{ин}}^2 + (\sum F_a - \sum F_p)^2} dt \right)^2 \geq 2\sigma S_3 K_\phi. \quad (8)$$

Учитывая, что сила инерции  $F(t)_{\text{ин}} = m_k a(t)$ , а ускорение  $a(t) = k_1 A f^2$ , ( $A$  – амплитуда колебаний;  $k_1$  – коэффициент, учитывающий способ получения колебаний [3]), а также, приняв  $t_c = 1/f$ , после преобразований получим биквадратное уравнение, имеющее два положительных корня:

$$f_{\text{min}1,2} = \sqrt{\frac{2\sigma S_3 K_\phi \pm \sqrt{(2\sigma S_3 K_\phi)^2 - (k_1 A)^2 (\sum F_a - \sum F_p)^2}}{m_k (k_1 A)^2}}. \quad (9)$$

Отрыв капель происходит, если частота колебаний удовлетворяет полученному решению. Реализация условия (9) возможна при трех вариантах соотношения сил (интегральный силовой баланс):

1.  $(\sum F_a - \sum F_p) \ll F_{п.н}$ , капли отрываются преимущественно под действием силы инерции (диапазон малых плотностей тока);
2.  $(\sum F_a - \sum F_p) + F_{ин} > F_{п.н} > (\sum F_a - \sum F_p)$ , капли отрываются как под действием силы инерции, так и других активных сил (диапазон средних плотностей тока);
3.  $(\sum F_a - \sum F_p) \geq F_{п.н}$ , капли отрываются самопроизвольно, а силы инерции выполняют модулирующую роль, т.е. позволяют управлять временем отрыва капель.

Процесс переноса металла становится управляемым при соответствии частоты колебаний электрода (см. 9) скорости его плавления. При этом каждый импульс УВ приводит к отделению с торца электрода одной капли ЖМП. Исходя из этого, условие управляемого переноса металла запишется в виде:

$$K \frac{G_{пл}}{3600f} - \gamma \frac{\pi d_э^2}{4} h_0 \geq m_k, \quad (10)$$

где  $G_{пл}$  – производительность плавления электрода [7];

$K$  – коэффициент, учитывающий увеличение производительности плавления электрода за счет повышения эффективности разогрева электрода дугой;

$h_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\eta}{\pi f}}$  – толщина ЖМП, движущейся вместе с электродом ( $\eta$  – динамическая

вязкость расплавленного металла [4]).

После преобразования (10) приходим к иррациональному уравнению, имеющему два корня:

$$f_{max1,2} = K \frac{G_{пл}}{3600m_k} + \frac{\pi \gamma d_э^4}{128m_k^2} \pm \frac{\sqrt{\pi \gamma d_э^2}}{16m_k^2} \sqrt{K \frac{G_{пл}}{900} + \frac{\pi \gamma d_э^4}{64}}. \quad (11)$$

Окончательно, с учетом (9) и (11), частота колебаний электрода, позволяющая поддерживать на торце электрода ЖМП с минимально допустимой толщиной и обеспечивающая управляемый перенос капель, должна назначаться из условия:

$$f_{min} \leq f \leq f_{max}. \quad (12)$$

При минимальной массе ЖМП управляемый перенос металла может быть реализован с использованием процесса гравитационно-капиллярного распыления, при котором капли жидкости срываются с гребней стоячих капиллярных волн, возбуждаемых вследствие возмущения поверхности при захлопывании кавитационных пузырьков. Наиболее интенсивное распыление происходит, если толщина ЖМП много меньше длины гравитационно-капиллярной волны. Средняя масса капель, получаемых при гравитационно-капиллярном распылении, составляет [8]:

$$m_k \ll \frac{d_э^2}{4} \sqrt{\frac{\sigma \gamma^2 \pi^4}{f^2}}, \quad (13)$$

где  $a$  – гравитационно-капиллярная постоянная.

Расчеты, выполненные по уравнениям (9) и (11) с учетом (13), позволили установить соотношения между массой отделяемых капель и частотой УВ при АНФ в зависимости от действия рассмотренных физических процессов и определить соответствующие им области (рис. 2).

Область 1 – управляемый перенос капель за счет поперечных высокочастотных колебаний электрода невозможен.

Область 2 – капли отделяются за счет ГКР равномерно с частотой, равной частоте колебания торца электрода. Границы этой области расширяются при увеличении амплитуды колебаний и скорости плавления электрода.

Область 3 – отделение капель происходит неравномерно и только за счет ГКР.

Область 4 – капли отделяются неравномерно за счет совместного действия ГКР и ИСБ.

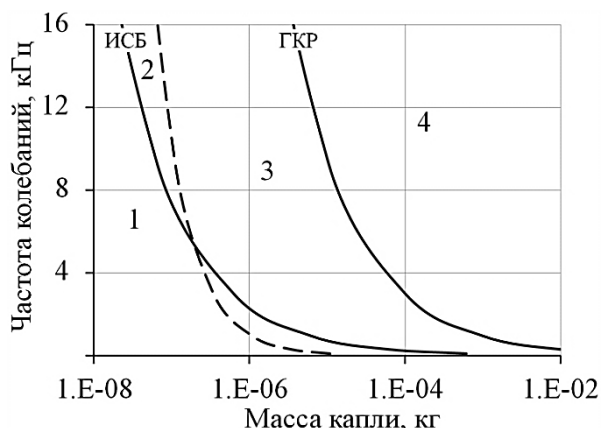


Рис. 2. Взаимосвязь частоты механических колебаний электрода и массы капли при различных механизмах УВ: ИСБ – интегральный силовой баланс; ГКР – гравитационно-капиллярное распыление. ( $d_3 = 2$  мм;  $I = 200$  А;  $A = 130$  мкм)

Для проверки разработанной математической модели проводили наплавку валиков с поперечными высокочастотными колебаниями электродной проволоки, прикладываемыми вдоль направления наплавки [3].

Установлено, что с увеличением частоты колебаний ширина валика и глубина проплавления основного металла уменьшаются, а высота валика увеличивается (рис. 3). При этом характер изменения указанных параметров зависит от режима колебаний (наличие или отсутствие резонанса). На рис. 3 частоты резонансного режима указаны пунктирными линиями.

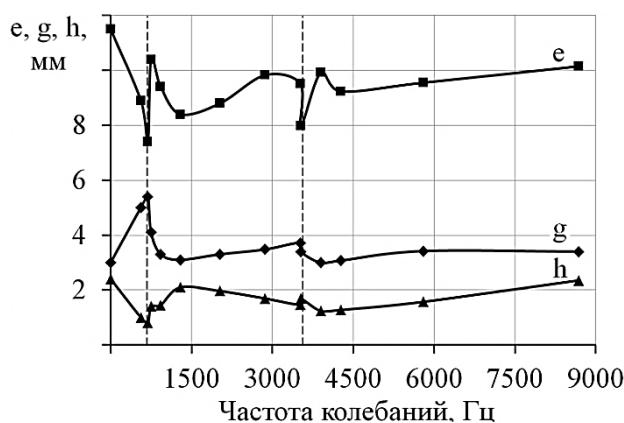


Рис. 3. Зависимость геометрических параметров наплавленного валика от частоты колебаний:

$e$  – ширина наплавленного валика;  $g$  – высота;  $h$  – глубина проплавления основного металла ( $d_3 = 2$  мм;  $I = 200$  А;  $V_{п. пр} = 141$  м/ч;  $V_{св} = 19$  м/ч;  $l_в = 48$  мм;  $A = 130$  мкм)

При резонансном режиме резко возрастает амплитуда колебаний, рассредоточивается тепловой поток, действующий на сварочную ванну, высота валика увеличивается, а его ширина и глубина проплавления снижаются. Соответственно уменьшается и ДОМ (табл. 2).

Максимальный эффект достигается на главном тоне (первый резонанс) колебательной системы, который возникает в рассматриваемых условиях при частоте 560...750 Гц. Это хорошо согласуется с расчетной частотой (630 Гц), найденной по выражению (3).

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

Высокочастотные механические колебаний оказывают влияние и на производительность наплавки. Увеличение частоты и амплитуды колебаний способствует уменьшению толщины ЖМП, возрастанию теплопередачи от дуги к электроду и увеличению коэффициента расплавления электродной проволоки. Уже при частоте первого обертона 3520 Гц коэффициент расплавления превышает исходное значение более чем на 20 % (см. табл. 2).

Таблица 2

Доля участия основного металла (ДОМ) и коэффициент расплавления  $K_n$  проволоки при АНФ с поперечными высокочастотными колебаниями

Частота, Гц	0	560	<b>680</b>	750	930	1295	2030	2866	<b>3520</b>	5800	8680
ДОМ	0,36	0,13	<b>0,07</b>	0,2	0,27	0,3	0,31	0,28	<b>0,22</b>	0,25	0,36
$K_n$ , г/А·ч	15,4	15,8	<b>16,9</b>	15,4	15,0	15,0	15,2	17,1	<b>18,6</b>	16,1	16,1

## ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель и методика расчета позволяют определить параметры механических высокочастотных поперечных колебаний электродной проволоки для эффективного управления размерами шва и производительностью процесса при автоматической наплавке под флюсом.

Наибольшее влияние поперечные колебания электродной проволоки оказывают в области резонансных частот: первого тона – на геометрические параметры наплавленного валика; второго тона – на производительность расплавления электрода.

Механические колебания электродной проволоки в диапазоне частот 600–4000 Гц при автоматической наплавке под флюсом позволяют снизить глубину проплавления в 3 раза, уменьшить долю участия основного металла в наплавке в 5 раз, увеличить коэффициент расплавления электрода на 10–20 %.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерохин А. А. Способы ввода ультразвуковых колебаний в сварочную ванну / А. А. Ерохин, Л. Л. Силин // Сварочное производство. – 1960. – № 5. – С. 4–7.
2. Алов А. А. Влияние вибрации электрода на процесс дуговой сварки и свойства швов / А. А. Алов, В. С. Виноградов // Сварочное производство. – 1958. – № 9. – С. 19–22.
3. Драган С. В. Разработка устройства для управления геометрическими параметрами шва при автоматической наплавке под флюсом / С. В. Драган, И. В. Симутенков // Зб. наук. пр. НУК. – 2011. – № 3. – С. 59–64.
4. Физика и техника мощного ультразвука. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л. Д. Розенберга. – М. : Наука, 1970. – 686 с.
5. Физика и техника мощного ультразвука. Т. 1. Источники мощного ультразвука / под ред. Л. Д. Розенберга. – М. : Наука, 1970. – 380 с.
6. Тарасов Н. М. Энергетический расчет процесса отрыва капли электродного металла при воздействии импульса внешнего электромагнитного поля / Н. М. Тарасов // Автоматическая сварка. – 1984. – № 6. – С. 21–25.
7. Найденов А. М. Расчет скорости плавления электродной проволоки при механизированных способах дуговой сварки / А. М. Найденов // Сварочное производство. – 1998. – № 6. – С. 10–14.
8. Розина Е. Ю. Капиллярно-вибрационное распыление жидкости / Е. Ю. Розина // Акустичний вісник. – 2002. – Т 5. – № 2. – С. 43–53.