

## **Совершенствование технологии дуговой наплавки деталей**

**Гулаков С.В., Бурлака В.В., Ярыза-Стеценко А.В.,  
Псарева И.С., Еременко А.М.**

*Украина, Приазовский государственный технический университет*

*Рассмотрены вопросы управления свойствами рабочей поверхности, упрочняемой дуговой наплавкой валиками сложной формы.*

Для повышения срока службы деталей машин и инструмента в промышленности широко применяется технология дуговой наплавки, обеспечивающая при относительно малых затратах весьма высокие показатели эксплуатационных характеристик упрочненных изделий.

Однако этому процессу присущ ряд особенностей, пренебрежение которыми может существенно снизить или свести на нет положительные эффекты от указанной технологии упрочнения. Одним из таких недостатков является высокая неоднородность свойств наплавленного слоя, приводящая к неравномерности его износа, преимущественной ориентации трещин усталости или разгара в одном из направлений по отношению к оси наплавленного валика и др.

Совершенствование технологии наплавки деталей прокатного и металлургического оборудования осуществляется различными путями (использование оптимально легированных электродных и присадочных материалов, применение модернизированного оборудования и др.), ресурсные возможности которых в настоящее время практически исчерпаны.

Новым направлением в этой области является формирование рабочего слоя валиками регламентированной формы [1, 2], когда электроду во время наплавки изделия сообщаются колебания по определенному закону поперек вектора скорости сварки. Это позволяет:

1. получить повышенную стойкость наплавленной поверхности к образованию трещин;
2. управлять распределением твердости наплавленного слоя, что повышает эксплуатационные характеристики восстанавливаемого изделия;
3. контролировать скорость охлаждения упрочняющей фазы, а следовательно, и управлять ее структурными превращениями;

4. управлять условиями плавления флюса, а соответственно, изменять по требуемому закону химический состав наплавляемого металла при использовании керамических легирующих флюсов.

Одним из вариантов такой наплавки является технология формирования рабочего слоя валиками зигзагообразной формы [3].

Обычно перемещение электрода выполняют с помощью кривошипно-шатунного механизма (КШМ), приводимого во вращение электродвигателем с постоянной скоростью. Получающаяся при этом траектория близка к синусоидальной. Из-за отклонения траектории от оптимальной наблюдается искажение формы валика в вершинах синусоиды, что отрицательно сказывается на качественных характеристиках наплавленного слоя. Более того, в особых точках траектории увеличивается время нахождения металла ванны в жидком состоянии, что приводит к большему разбавлению упрочняющей фазы металлом основы и увеличению легирования наплавляемого металла компонентами флюса. Таким образом, имеется необходимость учета и компенсации подобных нежелательных эффектов, присущих механизмам на основе КШМ.

Для решения этой задачи можно использовать КШМ на линейном участке характеристики с применением реверсирования привода. Этот подход приводит к малому использованию размаха КШМ и сопровождается динамическими перегрузками двигателя [4].

Можно применить линейный привод на основе зубчатой рейки, но он подвержен влиянию загрязнений рабочей части и также требует жесткого реверса приводного двигателя. Существуют и другие решения, общим недостатком которых является значительное усложнение механической части привода.

Для реализации задачи перемещения электрода по заданной для наплавки траектории с учетом оптимальных условий работы двигателя предложено использовать два привода: мощный основной, обеспечивающий близкую к синусоидальной траекторию перемещения рабочего органа 1 посредством кривошипно-шатунного механизма 2, и корректирующий – 3, установленный на шатуне 2 и изменяющий его длину в процессе колебаний последнего (рис. 1). Это позволяет получить необходимую (от треугольной до прямоугольной) траекторию перемещения электрода. Схема корректирующего привода приведена на рис. 2.

Основной привод – нерегулируемый и работает с постоянной скоростью. Корректирующий привод – высокодинамичный маломощный линейный привод,

предназначенный для «подправления» основной синусоидальной траектории с целью получения треугольной, оптимальной для наплавки.

Этот привод представляет собой систему «винт-гайка», приводимую во вращение маломощным исполнительным двигателем (1 на рис. 2). Имеются датчики крайних положений гайки (на рис.2 условно не показаны), обеспечивающие начальную калибровку привода, а также служащие для предотвращения аварийных ситуаций, возможных при скручивании гайки с винта.

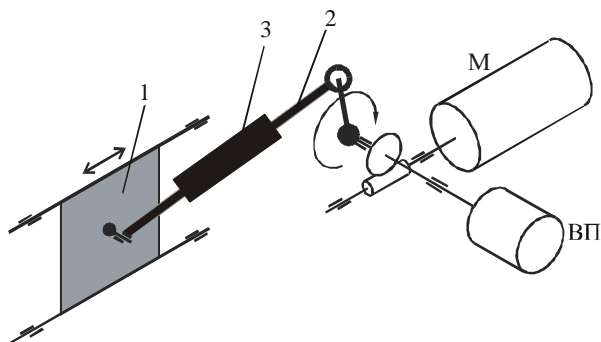


Рисунок 1 - Схема привода поперечных колебаний электрода:

М – основной электродвигатель;  
ВП – датчик положения.

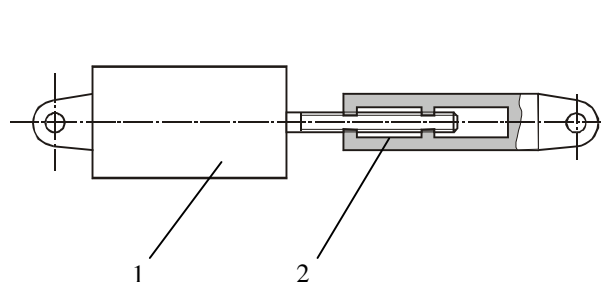


Рисунок 2 - Схема корректирующего привода:

1 – электродвигатель с валом, выполненным в виде винта;  
2 – гайка.

Задание на линейное перемещение выдает цифровая система управления, обрабатывающая сигналы обратной связи по положению электрода. Таким образом, получается замкнутая система автоматического регулирования, имеющая возможность точно отрабатывать заданную траекторию наплавки.

Для улучшения динамических характеристик привода целесообразно уменьшить момент инерции двигателя, снизив до минимально возможного уровня его мощность.

Найдем такое распределение нагрузки между основным и вспомогательным приводами, которое позволит минимизировать мощность вспомогательного привода. На рис. 3 показаны возможные траектории, реализуемые главным приводом (кривые 1 – 3), и траектория, требуемая для наплавки (кривая 4). В зависимости от взаимного расположения этих кривых и соотношения их амплитуд в значительных пределах может изменяться работа, выполняемая вспомогательным приводом.

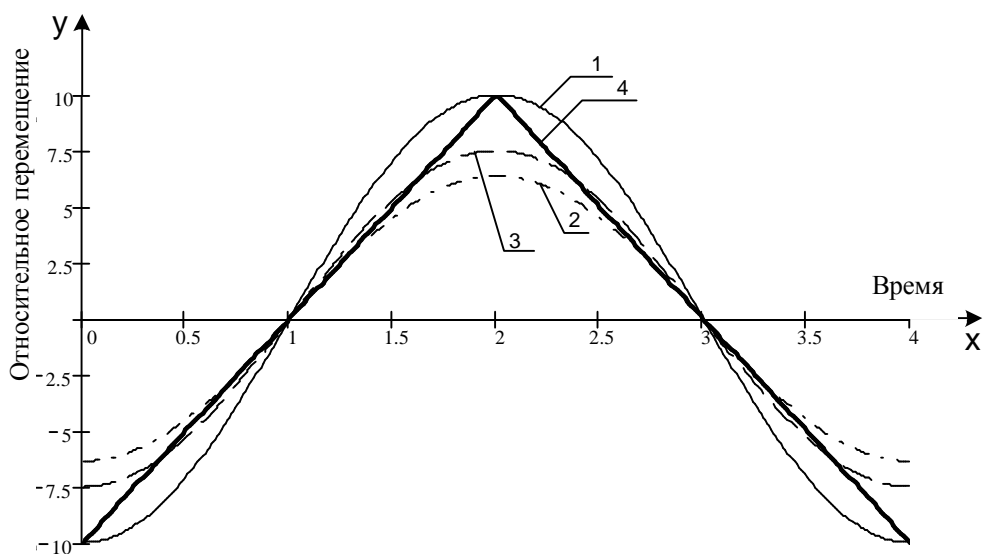


Рисунок 3 - Траектории перемещения электрода при наплавке

Энергия, затрачиваемая вспомогательным приводом в одном цикле перемещений, может быть определена как

$$E = \int_0^T F(v(t)) \cdot v(t) dt, \quad (1)$$

где  $F(v)$  – зависимость силы сопротивления от скорости;

$v(t)$  – зависимость скорости от времени;  $T$  – период работы.

На рис. 4 приведена качественная зависимость энергии, требуемой от вспомогательного привода за один период колебания, от соотношения между амплитудами основного (синусоидального) колебания и результирующего треугольного. Расчет интеграла (1) производился численным методом с использованием математического пакета MathCad 2000 Professional.

Примем амплитуду синусоидальных колебаний основного привода за  $A_{\text{осн}}$ , а амплитуду требуемого треугольного колебания за  $A_{\text{общ}}$ . Обозначим  $\delta = A_{\text{осн}}/A_{\text{общ}}$  – отношение амплитуды основного привода к результирующей. При этом  $\delta = 0$  соответствует случаю, когда основной привод не работает, а перемещение электрода производится только вспомогательным линейным двигателем. Случай  $\delta = 1$  соответствует кривой 1 на рис.3 (амплитуды синусоиды и треугольного колебания равны).

Изменяя амплитуду синусоидального колебания, производимого главным приводом (т.е. изменяя параметр  $\delta$ ), можно изменять энергию, требуемую от корректирующего звена. Зависимость энергии коррекции от амплитуды основной синусоиды приведена на рис. 4. Здесь за единицу приняты затраты энергии линейного привода при  $\delta = 0$ .

Как видно из графика, имеется определенное соотношение между амплитудой синусоиды и амплитудой треугольного колебания, при котором от корректирующего привода требуется минимальная энергия за период, а значит, и мощность.

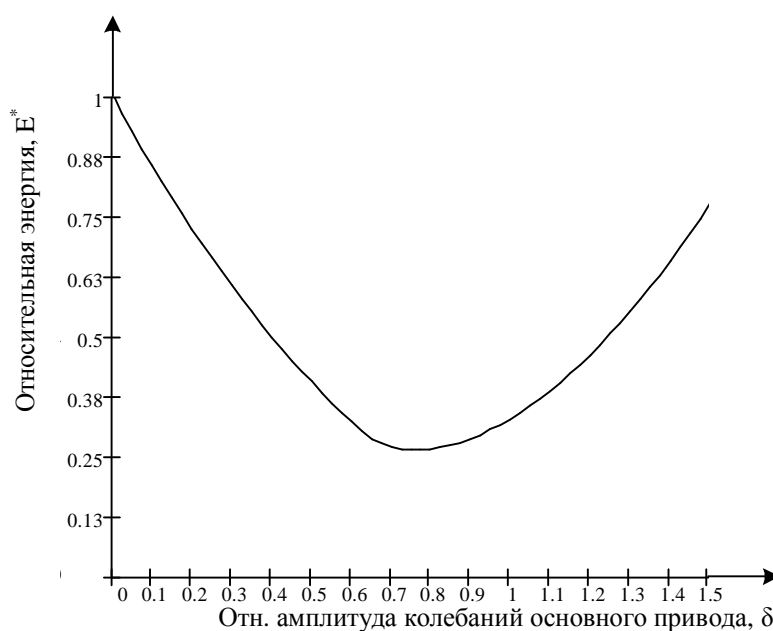


Рисунок 4 - Энергия, отдаваемая вспомогательным приводом

Траектория, соответствующая минимальной мощности вспомогательного привода, имеет вид, приведенный на кривой 3 (рис. 3).

Подводя итог, отметим, что произведенный качественный расчет составного привода перемещения электрода для получения оптимальной траектории наплавки рабочей поверхности позволил выявить условие минимальной мощности вспомогательного привода. Существует единственное соотношение между амплитудой синусоидального колебания основного привода и результирующего треугольного колебания. Кроме оптимизации механических характеристик привода, вблизи особых точек траектории наплавки целесообразно снижать сварочный ток, чтобы компенсировать повышение времени пребывания металла в расплавленном состоянии.

Помимо траектории наплавки на качество наплавленного слоя значительное влияние оказывают процессы, происходящие в сварочной ванне. Попытки аналитического расчета распределения температуры приводят к погрешностям, достигающим сотен процентов [5]. Существуют методики [6, 7], согласно которым сварочная ванна представляется в виде наложения нескольких (до 4) эллипсоидов вращения. Однако такой подход применим только при стационарном режиме сварки (наплавки).

Для приближенного математического описания процессов, возникающих при динамических изменениях параметров наплавки, предложено представить поверхность

проплавления тонкой пластичной пленкой, находящейся в вязкой среде. При этом распределение сил, действующих на пленку, рассчитывается, исходя из результата суперпозиции эллипсоидов, представляющих ванну в статике. Иллюстрация такого подхода приведена на рис.5

Здесь цифрами 1, 2, 3 обозначены элементы пленки, отстоящие друг от друга на расстояние  $dx$ ;  $F_{12}$ ,  $F_{23}$  – силы упругого взаимодействия, действующие на элемент 2 со стороны элементов 1 и 3 соответственно. Эти силы пропорциональны разностям координат  $y$  данных элементов.

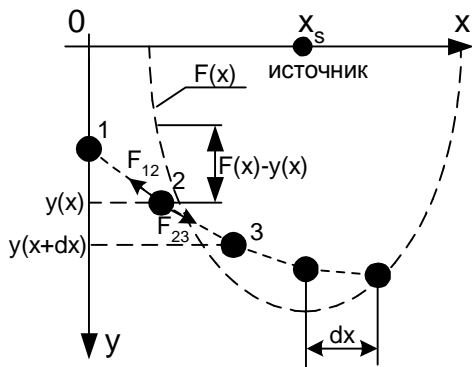


Рисунок 5 – Иллюстрация подхода к моделированию поверхности проплавления

Поведение пленки в предлагаемой модели описывается уравнением:

$$\frac{dy(x)}{dt} = \frac{y(x-dx) + y(x+dx) - 2y(x)}{K_1} + \frac{F(x) - y(x)}{K_2}, \quad (2)$$

где  $y(x)$  – координата  $y$  рассматриваемого элемента,

$y(x-dx)$ ,  $y(x+dx)$  – координаты соседних элементов,

$F(x)$  – сила давления источника,

$K_1$ ,  $K_2$  – коэффициенты, учитывающие упругость пленки и вязкость среды.

Функция  $F(x)$  определена следующим образом:

$$F(x) = \begin{cases} \sqrt{i^2 - (x-x_s)^2 e^2}, & \text{if } (i^2 \geq (x-x_s)^2 e^2) \\ 0, & \text{if } (i^2 < (x-x_s)^2 e^2) \end{cases}, \quad (3)$$

где  $i$  – интенсивность источника,

$x_s$  – координата  $x$  источника,

$e$  – эксцентриситет эллипса.

Для проведения численных экспериментов выполним переход к уравнению в конечных разностях:

$$\Delta y[x] = \frac{y[x-1] + y[x+1] - 2y[x]}{K_1} \Delta t + \frac{F[x] - y[x]}{K_2} \Delta t \quad (4)$$

Здесь функция  $y(x)$  заменена массивом значений  $y[x]$ , введен конечный элемент времени  $Dt$  и табулирована функция  $F(x)$ .

Результаты численного моделирования при неподвижном и равномерно перемещающемся электроде приведены на рис. 6, 7.

Кроме двухмерной, была создана трехмерная модель сварочной ванны, обладающая большей практической применимостью. Глубина проплавления представляется функцией  $z(y,x)$ , источник представлен наложением двух объемных эллипсоидов, описываемых уравнением

$$F(y, x) = \begin{cases} \sqrt{i^2 - (x - x_s)^2 e^2 - (y - y_s)^2 e^2}, & \text{if } (i^2 \geq (x - x_s)^2 e^2 + (y - y_s)^2 e^2) \\ 0, & \text{if } (i^2 < (x - x_s)^2 e^2 + (y - y_s)^2 e^2) \end{cases} \quad (5)$$

Уравнение состояния пленки имеет вид

$$\frac{dz(y, x)}{dt} = \frac{z(y, x - dx) + z(y, x + dx) + z(y - dy, x) + z(y + dy, x) - 4z(y, x)}{K_1} + \frac{F(y, x) - z(y, x)}{K_2} \quad (6)$$

Его эквивалент в конечных разностях, соответственно:

$$\Delta z[y, x] = \frac{z[y, x - 1] + z[y, x + 1] + z[y - 1, x] + z[y + 1, x] - 4z[y, x]}{K_1} \Delta t + \frac{F[y, x] - z[y, x]}{K_2} \Delta t \quad (7)$$

Результат трехмерного моделирования сварочной ванны в стационарном режиме и при резком изменении направления вектора скорости наплавки на  $90^\circ$  приведены на рис. 8, 9.

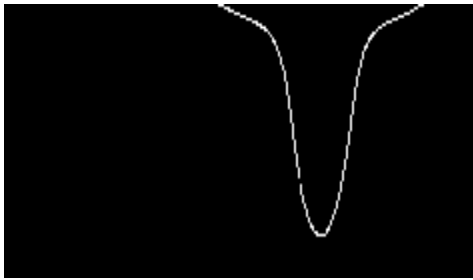


Рисунок 6 – ванна при неподвижном электроде (2D)

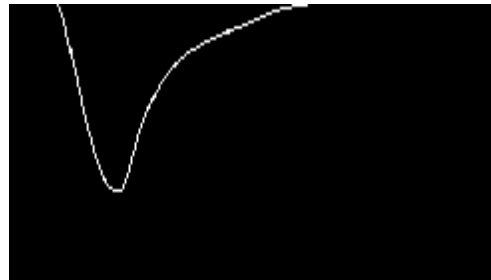


Рисунок 7 – ванна при равномерно перемещающемся электроде (2D)

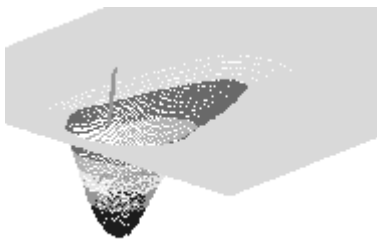


Рисунок 8 – ванна при равномерно перемещающемся электроде (3D)

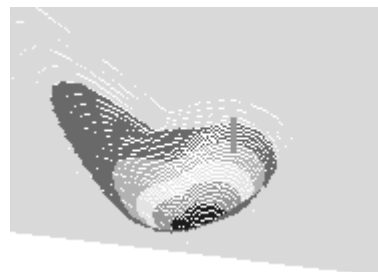


Рисунок 9 – ванна при изменении направления вектора скорости наплавки на  $90^\circ$  (3D)

### Список литературы

1. *Гулаков С.В.* Управление траекторией перемещения электрода при дуговой наплавке прокатных валков / *С.В. Гулаков, В.П. Иванов, И.С. Псарева* // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Краматорськ, ДДМА. – 2000. – С. 322 – 324
2. *Псарева И.С.* Пути совершенствования технологии и оборудования для наплавки рабочих поверхностей с регламентированным распределением свойств / *И.С. Псарева, В.В. Чигарев, В.П. Иванов* // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2003. – Вип. 13. – С. 185 – 189
3. *Гулаков С.В.* Наплавка рабочего слоя с регламентированным распределением свойств / *С.В. Гулаков, Б.И. Носовский*. – Мариуполь: ПГТУ, 2005. – 170с.
4. *Притужалов В.Я.* Электрические машины: Учеб. пособ. /*В.Я. Притужалов*. – Мариуполь: ПГТУ, 2002. – 250с.
5. *Прохоров Н.Ник.* Технологическая прочность сварных швов в процессе эксплуатации / *Н.Ник. Прохоров*. – М.: Металлургия, 1979. – 248с.
6. *Гулаков С.В.* Динамическая двумерная модель сварочной ванны при сложной траектории движения источника теплоты / *С.В. Гулаков, В.В. Бурлака, И.С. Псарева, М.Д. Дьяченко* // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2006. – Вип. 16.
7. *Иванов В.П.* Совершенствование математической модели формообразования сварочной ванны / *В.П. Иванов* // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2003. – Вип. 13. – С. 214 – 217