

Ермаков С.А., Соснин Н.А., Тополянский П.А. Особенности плазменной порошковой наплавки двухдуговым плазмотроном. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Материалы 9-ой практической конференции 10-13.04.2007 г. Санкт-Петербург, Изд. Политехнического ун-та. Санкт-Петербург.2007. Ч.1. С. 94-101

ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ ДВУХДУГОВЫМ ПЛАЗМОТРОНОМ

**ЕРМАКОВ С.А., СОСНИН Н.А., ТОПОЛЯНСКИЙ П.А.
НПФ «ПЛАЗМАЦЕНТР», Санкт-Петербург, Россия**

Расчетным путем показано и экспериментами подтверждено, что мощность, выделяемая в плазме пилотной (независимой) дуги и непосредственно не передаваемая обрабатываемому изделию, может быть достаточна для расплавления частиц порошка. Это дает возможность при необходимости уменьшить эффективную мощность плазмотрона и, тем самым, – тепловложение в изделие. При расчете режима наплавки учет расплавления порошка уже в плазменной струе позволяет получить повышенную скорость наплавки и меньшую погонную энергию, что позволяет уменьшить термические деформации обрабатываемого изделия, вызванные наплавкой.

There has been calculated and proved experimentally that the power of the pilot (independent) arc which is not transferred to the treated part can be sufficient for melting powder particles. This allows, if necessary, to decrease the effective power of the plasmatron and as a consequence – heat input. When calculating the modes of surfacing it is advisable to take into account powder melting in the plasma jet, which increases the speed of surfacing and decreases the power per meter. Thus thermal distortions, caused by surfacing, of the treated part reduce.

Пилотная дуга, постоянно горящая между вольфрамовым электродом и соплом плазмотрона (рис. 1), с регулируемым током, соизмеримым по величине с током основной сжатой дуги (электрод – изделие), а иногда и превышающим его, оказывает тепловое воздействие, как на металл ванны, так и на порошок, подаваемый в плазменную струю.

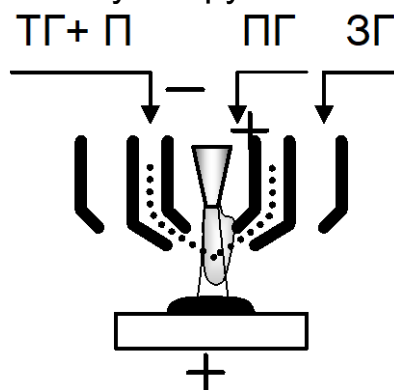


Рис. 1. Схема двухдуговой плазменной наплавки (с постоянно включенной пилотной дугой); ПГ – плазмообразующий газ, ЗГ – защитный газ, ТГ – транспортирующий газ; П – порошок

Эффективный к.п.д. суммарного воздействия на изделие основной и пилотной дуги можно рассчитывать как

$$\eta_{\Sigma} = \frac{Q_{\Sigma}}{I_{\hat{1}} U_{\hat{1}} + I_{\bar{1}} U_{\bar{1}}}$$

где: I_o , U_o , I_{Π} , U_{Π} – соответственно, ток и напряжение основной и пилотной дуги.

В работе использовался плазмотрон с диаметром плазмообразующего сопла 4,2 мм и с диаметром порошкового сопла – 6 мм. Электрод плазмотрона из лантанированного вольфрама диаметром 4 мм имел заточку рабочей части под углом 40° с притуплением на конце диаметром 0,5 мм. Плазмообразующим, транспортирующим и защитным газом служил аргон. Расходы плазмообразующего, транспортирующего и защитного газа составляли соответственно 2,5, 2,2 и 9 л/мин.

В результате изучения и анализа энергетических характеристик процесса плазменной поверхностной обработки с пилотной дугой, полученных в исследованной области реальных режимов плазменной наплавки, установлено следующее:

- на суммарную эффективную мощность Q_{Σ} и эффективную мощность пилотной дуги Q_{Π} оказывают влияние со значительным приоритетом соответственно: ток основной дуги I_o и ток пилотной дуги I_{Π} (особенно, в области больших токов); этот факт упрощает процедуру выбора режимов обработки;
- вольтамперная характеристика пилотной дуги при наличии основной дуги (при $I_{\Pi} = I_o \pm 0,5 I_o$) – жесткая со слабым влиянием всех факторов; для инженерных расчетов напряжение пилотной дуги U_{Π} можно принять равным 12 В (с погрешностью не более 10 %);
- напряжение основной сжатой дуги прямой полярности U_o при наличии пилотной дуги (при $I_{\Pi} = I_o \pm 0,5 I_o$) увеличивается с ростом тока I_o и дистанции обработки $l_{СИ}$ и может быть аппроксимировано линейной зависимостью вида

$$U_{\hat{1}} \approx 15,2 + 0,044 I_{\hat{1}}$$

при $d_c = 4,2$ мм и среднем значении $l_{СИ} = 8$ мм;

- эффективная мощность пилотной дуги Q_{Π} линейно возрастает с ростом тока I_{Π} , влияние плазмообразующего газа при этом ослабевает; связь $Q_{\Pi}(I_{\Pi})$ может быть выражена как

$$Q_{\text{п}} = 3,6 I_{\text{п}};$$

- суммарная эффективная мощность двух дуг $Q_{\text{э}}$ в рабочем диапазоне параметров режима наплавки линейно возрастает с увеличением тока основной дуги (при $I_{\text{п}} \approx I_0$), изменение других параметров режима на $Q_{\text{э}}$ влияет незначительно; зависимость $Q_{\text{э}}(I_0)$ можно достаточно точно аппроксимировать линейным уравнением при расходах плазмообразующего газа 2...3 л/мин. и $d_c = 4,2$ мм (рис. 3.4):

$$Q_{\text{э}} = 16,5 I_0$$

- суммарный эффективный к.п.д. двухдугового плазмотрона $\eta_{\text{э}}$ при $I_{\text{п}} \approx I_0$ возрастает с увеличением тока основной дуги I_0 и уменьшается с ростом тока пилотной дуги $I_{\text{п}}$; при этом с изменением токов от 50 до 200 А $\eta_{\text{э}}$ снижается с 56 до 46 % ;
- в суммарной эффективной мощности двухдугового плазмотрона $Q_{\text{э}}$ с увеличением тока пилотной дуги от $0,5 I_0$ до I_0 доля эффективной мощности пилотной дуги $Q_{\text{п}}$ возрастает с 12 % до 22 % от $Q_{\text{э}}$.

Полученные энергетические характеристики $Q(I)$, аппроксимированные простыми линейными уравнениями, позволяют с достаточной для практических задач точностью использовать их в алгоритмах расчета параметров режима плазменной порошковой наплавки.

Проведенные исследования показали, что эффективный радиус R_q пятна нагрева двухдугового плазмотрона при наплавке можно оценивать по следующей зависимости (при $I_{\text{п}} = I_0 \pm 0,5 I_0$; $I_0 > 50$ А и $d_c = 4,2$ мм):

$$R_q = 5,1 \left[1 + 0,46 \frac{(I_{\text{п}} - 100)}{100} \right]$$

где R_q – в миллиметрах; I – в амперах.

Проведем оценочный расчет мощности $Q_{\text{пл-п}}$, выделяемой в плазме пилотной дуги и непосредственно не передаваемой обрабатываемому изделию.

Исследования электрической дуги в аргоне [1, 2] показали следующее. Напряжение дуги U складывается из падений напряжения в прикатодной области $U_{\text{к}}$, в столбе дуги $U_{\text{с}}$ и в анодной области $U_{\text{а}}$:

$$U = U_k + U_c + U_a.$$

Тепловая мощность, передаваемая дугой катоду Q_k или аноду Q_a , может быть определена как

$$Q_k = I \left(U_k - U_B - \frac{2kT}{e} \right) + Q_{пл-к};$$

$$Q_a = I \left(U_a + U_B + \frac{2kT}{e} \right) + Q_{пл-а};$$

где I – ток дуги; U_k , U_a – прикатодное и прианодное падение напряжения; U_B – потенциал, соответствующий работе выхода электрона для материала данного электрода; k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); e – заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); T – температура плазмы у данного электрода; $Q_{пл-к}$ и $Q_{пл-а}$ – мощность потока плазмы, передаваемая рассматриваемому электроду дуги конвекцией, излучением и теплопроводностью.

В двухдуговом плазмотроне (рис.1) для стержневого вольфрамового электрода $Q_{пл-к} \approx 0$, а для короткого плазмообразующего сопла сравнительно большого диаметра (4,2 мм) (сопло является анодом пилотной дуги) $Q_{пл-а}$ не превышает 10 % от мощности Q_a .

Приэлектродные параметры дуги в аргоне приведены в таблице [1, 2].

Потенциал, соответствующий работе выхода электрона U_B , прикатодное U_k и прианодное U_a падение напряжения аргоновой дуги (в вольтах)

Материал электрода дуги	U_B	U_k	U_a
Вольфрам	$4 \pm 0,5$	7 ± 1	$2,5 \pm 1$
Медь	$4 \pm 0,5$	10 ± 2	$2,5 \pm 1$

Термическая энергия электронов, выражаемая через $2kT/e$, по сравнению с другими статьями теплового баланса электродов дуги невелика: даже при температурах 10000...12000 К $2kT/e$ не превышает 1,5...2 В.

Тепловые потоки, отводимые в электроды дуги, можно выразить через так называемые вольтовые эквиваленты $U_{\text{ЭКВ}} = Q/I$, т.е. через мощность, отнесенную к 1А тока [2].

На основании экспериментальных исследований [2] установлено, что вольтовый эквивалент составляет:

- для вольфрамового катода 1...2 В,
- для медного плазмообразующего сопла-анода диаметром 4,2 мм 6...7 В.

Мощность, выделяемая в прикатодной области стержневого вольфрамового катода, в значительной степени передается плазменной струе, направленной под действием сил Лоренца [1] от стержневого электрода. Эксперименты по определению вольтового эквивалента вольфрамового катода подтверждают это (сравнить с таблицей):

$$U_{\text{ЭКВ-к}} = U_{\text{к}} - U_{\text{в}} - 2kT/e = 7 - 4 - 2 = 1 \text{ В.}$$

Мощность, выделяемая в прианодной области медного плазмообразующего сопла, практически полностью передается этому соплу и уносится потоком охлаждающей воды плазмотрона.

Теперь можно оценить вольтовый эквивалент всей мощности, выделяемой в плазме пилотной дуги:

$$U_{\text{ЭКВ.}\Sigma\text{пл.п}} = U_{\text{п}} - U_{\text{ЭКВ-к}} - U_{\text{а}}.$$

Вся мощность, выделяемая в плазме пилотной дуги, равна

$$Q_{\Sigma\text{пл.п}} = I_{\text{п}} U_{\text{ЭКВ.пл.п}}$$

Если отсюда исключить эффективную мощность пилотной дуги $Q_{\text{п}}$, т.е. мощность пилотной дуги, вводимую в изделие, то оставшаяся мощность $Q_{\text{пл.п}}$, выделяемая в плазме пилотной дуги и непосредственно не передаваемая обрабатываемому изделию, может расходоваться на нагрев и расплавление частиц порошка, вдуваемого в плазменную струю пилотной дуги, еще до осаждения этих частиц на поверхность изделия.

Рассмотрим пример.

Ток пилотной дуги $I_{\text{п}} = 200 \text{ А}$.

Вольтовый эквивалент всей мощности, выделяемой в плазме пилотной дуги

$$U_{\text{ЭКВ.}\Sigma\text{пл.п}} = U_{\text{п}} - U_{\text{ЭКВ-к}} - U_{\text{а}} = 12 - 1 - 2 = 9 \text{ В.}$$

Вся мощность, выделяемая в плазме пилотной дуги

$$Q_{\Sigma \text{пл.п}} = I_{\text{п}} U_{\text{экв.пл.п}} = 200 \cdot 9 = 1800 \text{ Вт.}$$

Из экспериментов установлено значение эффективной мощности пилотной дуги

$$Q_{\text{п}} = 3,6 I_{\text{п}} = 3,6 \cdot 200 = 720 \text{ Вт.}$$

Теперь можно определить мощность $Q_{\text{пл-п}}$, выделяемую в плазме пилотной дуги и непосредственно не передаваемую обрабатываемому изделию:

$$Q_{\text{пл-п}} = Q_{\Sigma \text{пл.п}} - Q_{\text{п}} = 5,4 I_{\text{п}} \approx 5,4 \cdot 200 = 1080 \text{ Вт,}$$

т.е. порядка 45 % полной электрической мощности пилотной дуги может расходоваться на расплавление порошка в плазменной струе. Мощность, выделяемая в столбе основной сжатой дуги, в данном расчете не учитывается, но она тоже дополнительно разогревает порошок.

Термическая мощность $Q_{\text{т}}$, необходимая для нагрева и расплавления порошка может быть определена как

$$Q_{\text{т}} = \rho \Delta H_{\text{н}} f_{\text{н}} v,$$

где ρ – плотность материала порошка, кг/мм³; $\Delta H_{\text{н}}$ – удельное теплосодержание материала порошка с учетом теплоты его плавления, Дж/кг; $f_{\text{н}}$ – сечение наплавляемого валика, мм²; v – скорость наплавки, мм/с.

Для порошка, например, на никелевой основе при $f_{\text{н}} = 21,6 \text{ мм}^2$ и $v = 1,82 \text{ мм/с}$ имеем $Q_{\text{т}} = 358 \text{ Вт}$. Это в 3 раза меньше мощности, выделяемой в плазме пилотной дуги, которая может быть использована на нагрев и расплавление наплавляемого порошка. Эксперименты подтвердили возможность расплавления порошка дисперсностью 20...60 мкм в плазменной струе пилотной дуги даже при существенно пониженном токе основной сжатой дуги, что позволяет избежать нежелательного перегрева обрабатываемого изделия.

Как известно [3], термические деформации изделия, вызванные наплавкой, прямо пропорциональны погонной энергии процесса. Очевидно, что уменьшение тока основной сжатой дуги I_0 при расплавлении наплавляемого порошка в плазменной струе пилотной дуги позволяет снизить тепловложение в изделие и, тем самым, – уменьшить нежелательные термические деформации изделия, вызванные наплавкой.

При расчете режима наплавки двухдуговым плазмотроном можно варьировать током пилотной $I_{\text{п}}$ и основной сжатой дуги I_0 (например, при $I_{\text{п}} = I_0$). С увеличением токов растут эффективная

мощность $Q_э$ и эффективный радиус пятна нагрева R_q двухдугового плазмотрона (рис. 2). В результате возрастает скорость наплавки v , а погонная энергия проходит через минимальное значение (рис. 2, 3).

Учитывая, что порошок расплавляется уже в плазменной струе пилотной дуги, можно уменьшить ток основной сжатой дуги I_0 . Учет расплавления порошка в плазменной струе возможен через уменьшение координаты z , задаваемой при расчете режима. Из экспериментов установлено, что при плазменной порошковой наплавке толщина прослойки расплавленного порошкового металла под дугой $h_{пр}$ обычно равна 0,3...1,2 мм и в среднем в 3 раза меньше толщины наплавляемого слоя. Принимая $h_{пр} \approx 1$ мм, для $I_0 = 150$ А, задавая $T = 1500$ °С, $z = 1$ мм и $y = 0$, получаем бóльшую скорость наплавки $v = 12,1$ м/ч и меньшую погонную энергию $q_{пог} = 788$ Дж/мм (сравнить с рис. 2 и 3 для минимальной $q_{пог}$). При этом ширина изотермы 1500 °С получается меньше: 7,6 мм.

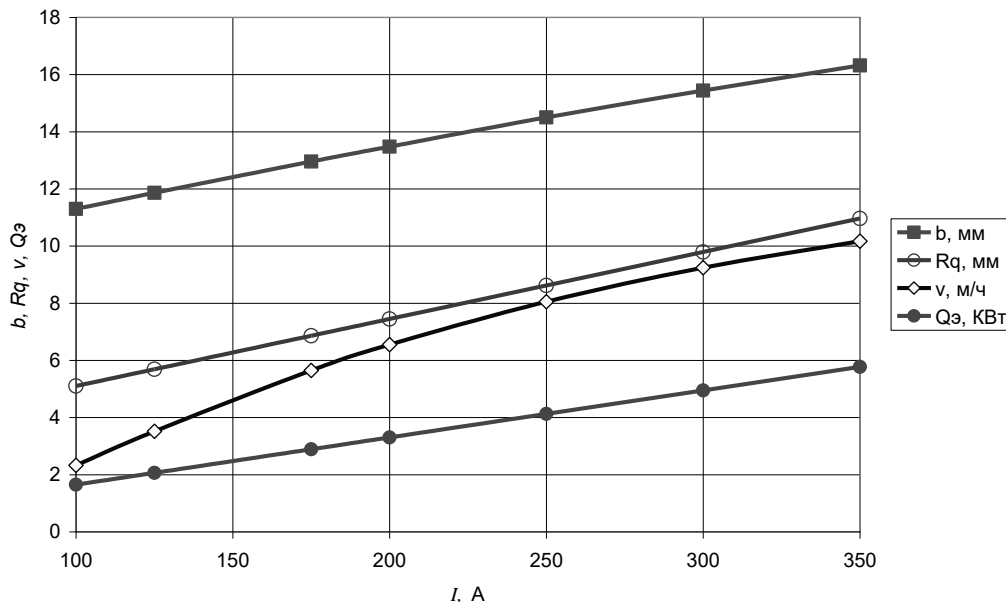


Рис.2. Зависимости эффективной мощности $Q_э$, эффективного радиуса пятна нагрева R_q скорости наплавки v и ширины наплавляемого валика b от тока двухдугового плазмотрона при неизменной толщине наплавляемого слоя 3 мм ($d_c = 4,2$ мм)

Чтобы увеличить ширину изотермы 1500 °С и, соответственно, — ширину наплавляемого за один проход валика, целесообразно использовать поперечные колебания плазмотрона. При неизменных параметрах пилотной и основной сжатой дуги, задавая следующие параметры колебаний (с траекторией по трапеции), например: размах колебаний 10 мм, скорость колебаний 10 мм/с, время выдержки по краям 1 с, получаем для $T = 1500$ °С, $z = 1$ мм и $y = 0$ скорость наплавки $v = 8,7$ м/ч и погонную энергию $q_{пог} = 1101$ Дж/мм. При этом ширина изотермы 1500 °С будет 10,9 мм.

Таким образом, учет расплавления порошка уже в плазменной струе пилотной дуги позволяет уменьшить погонную энергию при плазменной наплавке. Дополнительным положительным фактором могут служить поперечные колебания плазмотрона.

Универсальная компьютерная программа «Plasmet» дает возможность рассчитать параметры режима плазменной порошковой наплавки двухдуговым плазмотроном и выбрать их оптимальное сочетание.

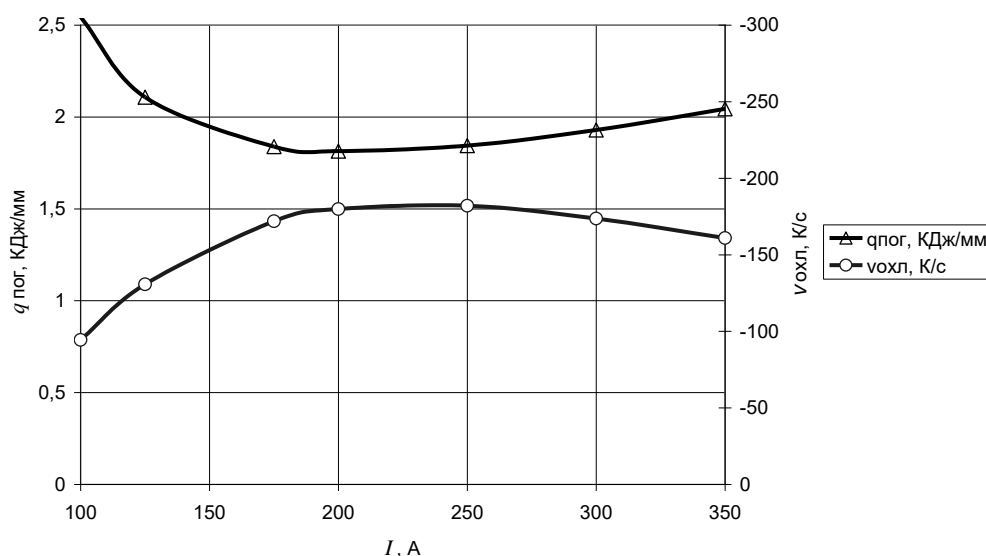


Рис.3. Погонная энергия $q_{\text{пог}}$ и максимальная скорость охлаждения изделия $v_{\text{охл}}$ в зависимости от тока двухдугового плазмотрона при неизменной толщине наплавляемого слоя 3 мм ($d_c = 4,2$ мм)

Выводы

1. Мощность, выделяемая в плазме пилотной дуги и непосредственно не передаваемая обрабатываемому изделию, может быть достаточна для расплавления частиц порошка. Это дает возможность при необходимости уменьшить эффективную мощность плазмотрона и, тем самым, – тепловложение в изделие.
2. При расчете режима наплавки учет расплавления порошка уже в плазменной струе позволяет получить повышенную скорость наплавки и меньшую погонную энергию.
3. Выбор оптимальных токов плазменной наплавки, обеспечивающих при заданной толщине наплавляемого слоя минимальную погонную энергию, ведет к уменьшению термических деформаций обрабатываемого изделия, вызванных наплавкой.

Литература

1. Финкельнбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
2. Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов. М.: Высшая школа, 1967.
3. Ермаков С.А., Соснин Н.А. Разработка сварочных плазмотронов // Труды ЛПИ: Сварочное производство. – 1978. – № 364. – С. 81–86.