



НЕКОТОРЫЕ ПУТИ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ПРИСАДОЧНОГО ПОРОШКА ПРИ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКЕ

К. А. ЮЩЕНКО, А. В. ЯРОВИЦЫН, Д. Б. ЯКОВЧУК, А. А. ФОМАКИН, В. Е. МАЗУРАК
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

При восстановлении кромок лопаток газотурбинных двигателей с использованием микроплазменной порошковой наплавки неизбежны потери наплавочных материалов. С целью повышения эффективности процесса в настоящей работе методом оценки массы наплавленного валика при последовательном увеличении размеров сварочной ванны на широкой и узкой подложке исследованы закономерности радиального распределения двухфазных потоков микроплазма–присадочный порошок. Установлено, что экспериментальные данные радиального распределения таких потоков на поверхности анода имеют удовлетворительную сходимостъ с нормальным законом распределения. Методом калориметрирования на двухсекционном водоохлаждаемом аноде оценен коэффициент сосредоточенности удельного теплового потока микроплазменной дуги для наплавки. Показано, что в области режимов микроплазменной порошковой наплавки присадочный порошок может вводиться в плоскость изделия с сосредоточенностью до четырех раз больше, чем удельный тепловой поток дуги, а соотношение между эффективными диаметрами ввода порошка и пятна нагрева составляет 0,57...0,92. Приведено влияние некоторых конструктивных параметров микроплазмотрона и технологических параметров наплавки на сосредоточенность газопорошкового потока. Установлены соотношения между шириной валика, диаметром фокусирующего сопла микроплазмотрона и характеристиками сосредоточенности ввода порошка в сварочную ванну, необходимыми для ограничения потерь присадочного порошка в пределах 1,44...2,56 % при наплавке на кромки лопаток толщиной менее 3 мм. Библиогр. 11, табл. 2, рис. 7.

Ключевые слова: микроплазменная порошковая наплавка, кромки лопаток, микроплазмотрон, коэффициент использования порошка, сосредоточенность двухфазного потока, микроплазма–присадочный порошок

Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона исследования и практическая апробация процесса микроплазменной порошковой наплавки (сварки) показали надежное обеспечение технологической прочности при сварке плавлением и последующей термической обработке, а также высокие служебные свойства сварных соединений никелевых жаропрочных сплавов с содержанием γ' -фазы более 45 % [1–4]. Микроплазменная порошковая наплавка при ремонте кромок лопаток газотурбинных двигателей характеризуется: диапазоном эффективной тепловой мощности дуги 100...650 Вт и погонной энергии 250...3000 Дж/мм; возможностью использования присадочного материала, идентичного по химическому составу материалу лопатки, например, ЖС32-ВИ, IN738LC, ЖС6У; надежной защитой зоны ремонта и хорошим формированием наплавляемого металла. Процесс не требует предварительного подогрева изделия и в большинстве случаев — предварительной гомогенизации материала лопатки перед наплавкой.

При восстановлении кромок лопаток газотурбинных двигателей неизбежны потери наплавочных материалов, которые в первую очередь оцениваются как разность масс израсходованного присадочного материала и наплавленного металла. Сравнительный анализ [5] показал, что при

микроплазменной порошковой наплавке на кромки лопаток толщиной 3,5 мм наблюдается повышенный уровень потерь присадочного материала по сравнению с аргонодуговой наплавкой. Более 3/4 из них приходится на остаток, не пригодный к дальнейшему использованию. Приемлемый уровень потерь ($\approx 10,5$ %) при микроплазменной порошковой наплавке на узкую подложку (кромку лопатки) толщиной более 3 мм достигался за счет повторного использования остатков порошка при коэффициенте использования порошка (КИП) 0,625 после сбора его остатков, просева и просушки. В ходе серийной микроплазменной порошковой наплавки кромок лопаток шириной менее 3 мм [3, 4] установлено, что доля непригодного к использованию остатка может увеличиваться до 30 % первоначального количества присадочного материала. Дальнейшее использование таких остатков присадки при наплавке жаропрочных никелевых сплавов с содержанием γ' -фазы более 45 % является нерациональным ввиду последующего значительного ухудшения качества формирования валиков. Анализ морфологии поверхности проб порошка после трехкратного использования при наплавке показал, что в поле зрения оптического микроскопа ($\times 50$) содержится примерно 50 % окисленных частиц. Вероятно, пос-

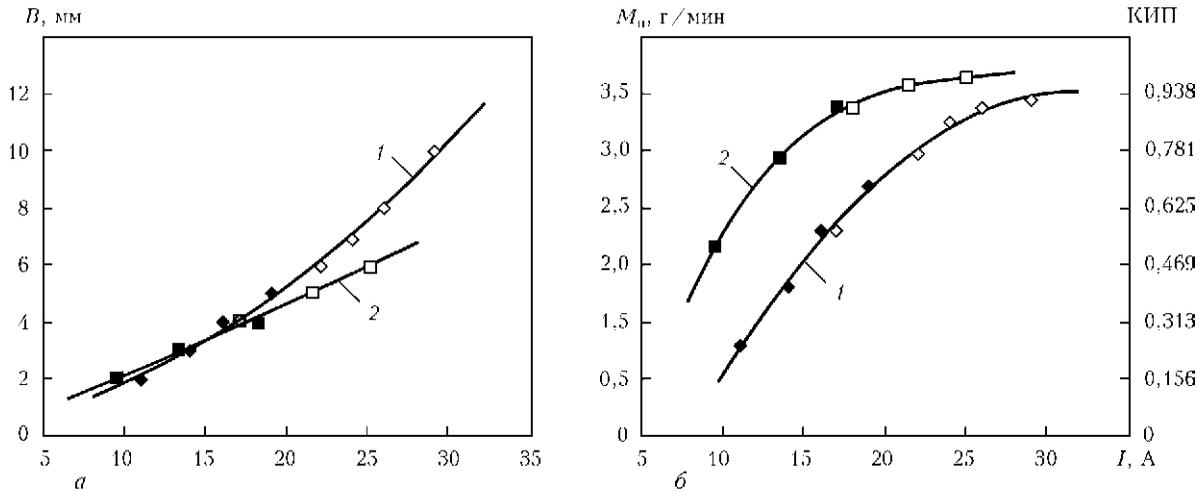


Рис. 1. Зависимость ширины валика B (а), удельной массы наплавленного металла M_n и КИП (б) от силы сварочного тока I при $v_n = 2,75$ м/ч (расход транспортирующего газа (аргон) 2,5; защитного газа (смесь 90 % Ar + 10 % H₂) 7 л/мин; основного металл — аустенитная нержавеющая сталь): 1 — микроплазматрон с $d_{пл} = 2,5$ мм, $d_{ф} = 4,5$ мм; 2 — $d_{пл} = 1,8$ мм, $d_{ф} = 2,5$ мм; темные значки — наплавка на узкую подложку; светлые — наплавка на широкую подложку

тепленное накопление таких частиц в дисперсном присадочном материале и является основной причиной ухудшения сварочно-технологических свойств присадочного материала.

Таким образом, в случае наплавки на кромки лопаток толщиной менее 3 мм потери присадочного порошка, несмотря на повторное его использование, значительно возрастают. Ввиду высокой стоимости присадочных материалов для таких задач требуется дополнительная оптимизация процесса микроплазменной порошковой наплавки.

Основной причиной потерь присадки является движение ее дисперсных частиц по периферии столба плазменной дуги и в дальнейшем — упругий отскок от поверхности наплавляемого изделия вне зоны сварочной ванны [6]. Для оптимизации траекторий движения присадочного материала в плазменной дуге рекомендуется применять присадочные порошки с диаметром частиц меньше 150...200 мкм, вводить их в дугу с скоростью менее 2 м/с под углом к оси плазматрона до 40...45°. Ввиду значительной ширины сварочной ванны (18...35 мм) потери присадочного порошка на оптимальных режимах плазменно-порошковой наплавки не превышают 5...8 % [6].

Для наплавки на кромки лопатки толщиной менее 3 мм целесообразно снизить потери порошка за счет повышения сосредоточенности микроплазменной дуги с вводимой дисперсной присадкой, т. е. увеличить ее относительное количество, попадающее в сварочную ванну. Цель данной работы — рассмотреть технологические особенности фокусировки двухфазных потоков микроплазма-присадочный порошок, которые обеспечивают сосредоточенную доставку присадочного материала через высокотемпературную область микроплазменной дуги в сварочную ванну на узкой подложке шириной менее 3 мм.

В качестве объекта для изучения выбран микроплазматрон ППС-004 с боковым распределенным вводом присадочного порошка и диаметрами каналов фокусирующего сопла 2,5 и 4,5 мм. При данных соплах обеспечивается его стабильная работа на сварочном токе до 30...50 А. Известно, что плазматроны с диаметром канала фокусирующего сопла 4,0...4,5 мм при плазменно-порошковой наплавке обеспечивают наиболее сосредоточенный ввод присадочного порошка в плазменную дугу [6, 7].

Сосредоточенность подвода присадочного порошка через микроплазменную дугу к плоскости анода оценивали путем определения массы порошка, попавшего в сварочную ванну при последовательном увеличении ее размеров. Ширина сварочной ванны изменялась с увеличением силы сварочного тока при постоянной скорости перемещения микроплазменной дуги (рис. 1) в пределах 2...5 мм для узкой подложки (табл. 1) и 4...10 мм для широкой подложки (пластина толщиной 2 мм). При наплавке узкой подложки валик формировался с углом контакта к ее повер-

Табл и ца 1. Удельная масса наплавленного металла M_n и ширина валика B при наплавке на узкую подложку шириной δ в зависимости от диаметра канала фокусирующего сопла плазматрона $d_{ф}$

$d_{ф}$, мм	δ , мм	I , А	B , мм	M_n , г/мин
4,5	1,0	11,0	2,0	0,80
	1,6	14,0	3,0	1,30
	2,0	16,0	4,0	1,80
	2,5	19,0	5,0	2,18
2,5	1,0	9,5	2,0	1,66
	1,6	13,5	3,0	2,42
	2,5	18,0	4,0	2,88

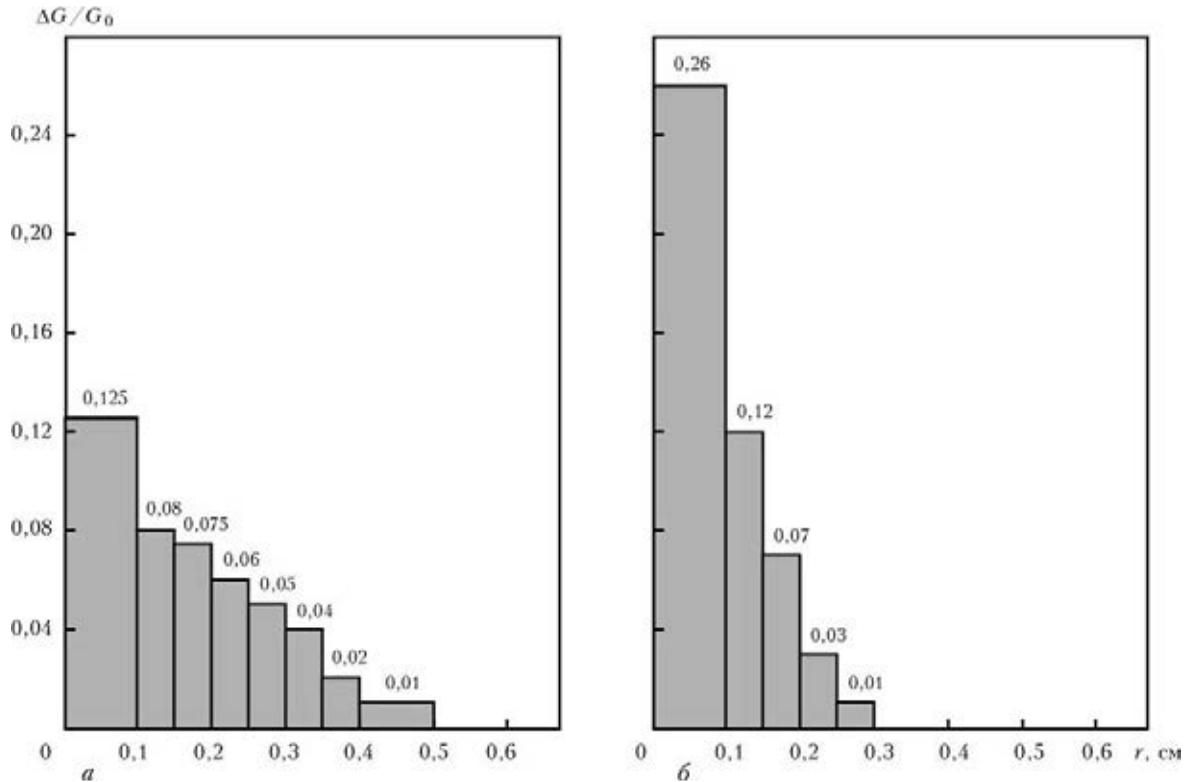


Рис. 2. Гистограмма распределения подающегося порошка в направлении, перпендикулярном оси наплавленного валика в зависимости от параметров микроплазмотрона ППС-004: а — $d_{nl} = 2,5$ мм, $d_e = 4,5$ мм; б — $d_{nl} = 1,8$ мм, $d_e = 2,5$ мм

хности более 90° , т. е. с двухсторонним боковым усилением. В ходе простого эксперимента при последовательном увеличении ширины сварочной ванны в 5 раз были получены зависимости изменения удельной массы наплавленного валика M_n и КИП, характеризующие радиальное распределение присадочного порошка в плоскости анода (см. рис. 1). Приведенная выше методика позволяет исключить влияние упругого отскока частиц, неизбежное при сборе присадочного порошка в многосекционные улавливатели.

В опытах использовали присадочный порошок аустенитной нержавеющей стали фракцией 63...160 мкм. Его ориентировочный гранулометрический состав такой: -63 мкм — 7 %; +63...80 мкм — 10 %; +80...100 мкм — 32 %; +100...125 мкм — 39 %; +125...160 мкм — 12 %. Производительность подачи присадочного порошка G_0 составляла 3,20 г/мин; порошок подавали порционно с интервалом 1 с. Такое удельное количество присадки во всех опытах обеспечивало стабильное формирование валиков и было выбрано, исходя из практики наплавки на кромки лопаток. Экспериментально M_n определяли взвешиванием пластины-образца с точностью 0,02 г до и после наплавки длительностью 1 мин. КИП определяли как отношение M_n к производительности подачи порошка G_0 .

Относительное распределение количества наплавленного металла $\Delta G/G_0$ в направлении, перпендикулярном оси наплавленного валика

(рис. 2), рассчитывали по экспериментальным данным рис. 1, как:

$$(\Delta G/G_0)_i = (M_{B_{n+1}} - M_{B_n}) / (2G_0), \quad (1)$$

где $M_{B_{n+1}}$, M_{B_n} — масса наплавленного металла при последовательном увеличении ширины сварочной ванны; n — номер опыта; i — порядковый номер распределения. Полученные результаты, представленные в виде гистограмм на рис. 2, характеризуют распределение присадочного порошка в микроплазменной дуге на уровне анода в ходе процесса и показывают предпочтительность применения при наплавке на узкую подложку микроплазмотронов с $d_e < 4,5$ мм с точки зрения эффективности использования присадочного порошка.

Для описания удельного теплового потока дуги в теории сварочных процессов широко используется нормально-круговой источник тепла, в котором интенсивность его удельного теплового потока убывает от центра к краям пятна нагрева по так называемому нормальному закону (распределению Гаусса). Основные параметры такого представления определены Н. Н. Рыкалиным [8] и взаимосвязаны между собой известными соотношениями:

$$q_2(r) = q_{2m} e^{-kr^2}, \quad (2)$$

$$q_{2m} = \frac{k}{\pi} q_u, \quad (3)$$

$$r_0 = \frac{1}{\sqrt{k}}, \quad (4)$$

$$d_{\text{эф}} = 3,46/\sqrt{k}, \quad (5)$$

где $q_2(r)$ — радиальное распределение мощности теплового потока сварочной дуги в изделии; q_u — эффективная тепловая мощность дуги; q_{2m} — мощность теплового потока в центре источника тепла или плотность тепловой энергии в эквивалентном пятне нагрева; r — расстояние от центра источника тепла; k — коэффициент сосредоточенности удельного теплового потока; r_0 — эквивалентный радиус пятна нагрева, т. е. радиус круга с равномерным распределением теплового потока источника, эквивалентный по мощности нормально-круговому распределению теплового потока; $d_{\text{эф}}$ — эффективный диаметр пятна нагрева, т. е. диаметр пятна, через которое проходит в изделие 95 % удельного теплового потока от сварочного источника тепла.

В нашем случае интерес представляет установление соотношений между сосредоточенностью удельного теплового потока микроплазменной дуги для наплавки и сосредоточенностью ввода присадочного порошка в сварочную ванну.

Приближение экспериментальных гистограмм (см. рис. 2) к экспоненциальной зависимости и формы сварочной ванны при типичных режимах микроплазменной порошковой наплавки к окружности дает основания предположить соответствие радиального распределения присадочного материала в микроплазменной дуге на уровне поверхности анода (сварочной ванны) нормальному закону. Проверку выполняли по методике работы [9] на основании совмещения данных экспериментальных гистограмм (рис. 2) с воображаемым двухсекционным улавливателем порошка, последовательно перемещающимся с шагом гистограммы вдоль оси y (рис. 3). Расстояние от 0 до r_i (текущего шага значений гистограммы) соответствовало координате $-y$, а сумма значений ординат гистограммы $\Delta G/G_0$ от r_i до ∞ характеризовала относительную интенсивность потока порошка в правом сегменте окружности пятна ввода порошка.

Представление экспериментальных данных гистограмм в виде зависимости $G(r) = G_{2m} \exp(-k_{\text{с.п}} r^2)$

показывает удовлетворительную сходимость с нормальным законом распределения (рис. 3, б), где $k_{\text{с.п}}$ — коэффициент, характеризующий сосредоточенность ввода присадочного порошка в сварочную ванну аналогично коэффициенту сосредоточенности удельного теплового потока дуги; G_{2m} — относительная плотность ввода присадочного порошка на уровне поверхности анода. Ряд параметров сосредоточенности ввода присадочного порошка, рассчитанных по экспериментальным данным, приведен в табл. 2.

Установлено, что уменьшение диаметра канала фокусирующего сопла микроплазмотрона с 4,5 до 2,5 мм обеспечивает изменение площади эффек-

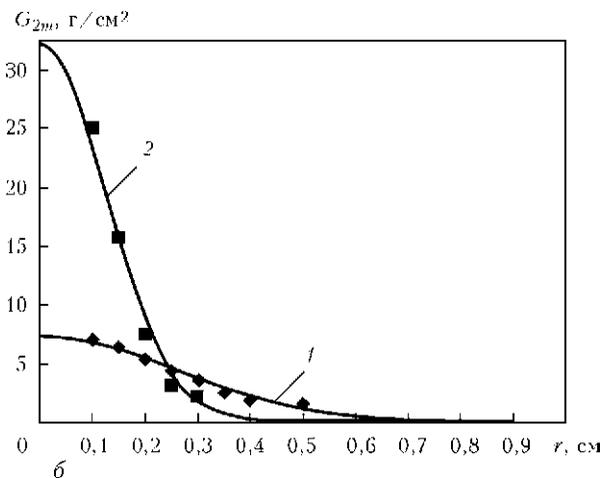
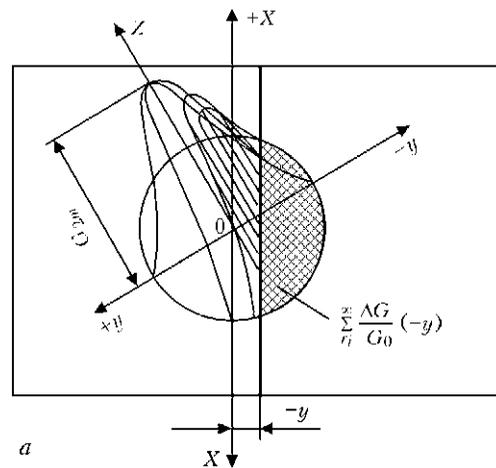


Рис. 3. Схема двухфазного потока микроплазма-присадочный порошок над двухсекционным улавливателем порошка (а) и расчетное распределение подающегося порошка по нормальному закону в плоскости анода (б): 1 — $d_{\text{пл}} = 2,5$ мм, $d_{\text{ф}} = 4,5$ мм; 2 — $d_{\text{пл}} = 1,8$ мм, $d_{\text{ф}} = 2,5$ мм; значки — экспериментальные данные; сплошная кривая — моделирование

Т а б л и ц а 2. Характеристики радиального распределения двухфазного потока микроплазма-присадочный порошок на плоскости анода (расстояние 5 мм от среза фокусирующего сопла)

Определение	$d_{\text{ф}}$, мм	$d_{\text{эф}}$, см	$k_{\text{с.п}}$, см ⁻²	r_0 , см	КИП при $B = 2r_0$	B , см	$P_{\text{ост}}$ при $B = 2r_0$
Экспериментальное	4,5	1,28	7,24	0,37	0,88	0,74	0,0144
Экспериментальное	2,5	0,62	31,60	0,18	0,84	0,36	0,0256
Расчетное	1,6	0,35	100,00	0,10	0,85	0,20	0,0225

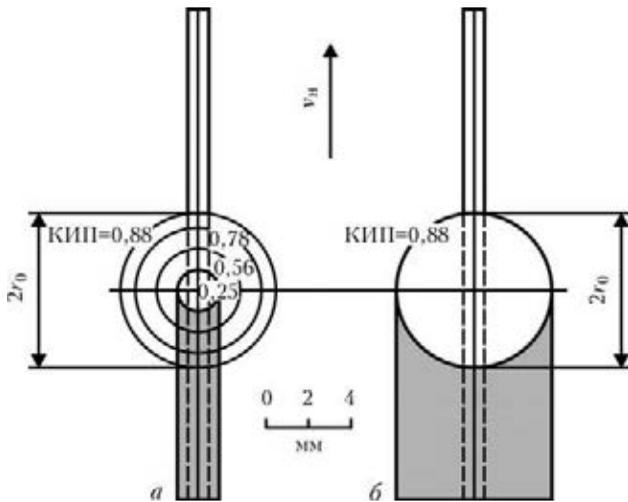


Рис. 4. Особенности наплавки на узкую подложку шириной 1 мм при использовании микроплазматрона с $d_{\phi} = 4,5$ мм с недостаточной сосредоточенностью двухфазного потока микроплазма-присадочный порошок: а, б — см. в тексте

тивного пятна ввода порошка с 128,6 до 30,2 мм², т. е. фактически в 4 раза. Анализ экспериментальных (см. рис. 2) и расчетных (см. табл. 2) данных показывает, что эквивалентному радиусу пятна ввода порошка r_0 соответствуют значения КИП в диапазоне 0,84...0,88.

Таким образом, для обеспечения высокой эффективности использования присадочного порошка при определенных конструктивных параметрах микроплазматрона, в основном задаваемых величиной d_{ϕ} , необходимо превышение шириной сварочной ванны эквивалентного диаметра пятна ввода порошка ($B \geq 2r_0$). В общем виде для наплавки на узкую подложку указанную зависимость с учетом (4) можно записать как:

$$B = \delta + 2y_{\text{п}} \geq 2r_0 = \frac{2}{\sqrt{k_{\text{с.п}}}}, \quad (6)$$

где $y_{\text{п}}$ — планируемый боковой припуск при формировании валика.

При недостаточной сосредоточенности ввода порошка в сварочную ванну в процессе наплавки на узкую подложку шириной 1...3 мм можно выделить два граничных случая, снижающих эффективность процесса микроплазменной порошковой наплавки:

- увеличенные потери порошка при наплавке на пониженном токе (рис. 4, а);
- увеличенные боковые припуски наплавленного валика при наплавке на повышенном токе (рис. 4, б).

В случае $B \geq 2r_0$ ожидаемые потери порошка $P_{\text{ост}}$ после двух циклов его использования, рассчитанные по приведенной ниже зависимости

$$P_{\text{ост}} = (1 - \text{КИП}) - (1 - \text{КИП})\text{КИП} = \text{КИП}^2 - 2\text{КИП} + 1, \quad (7)$$

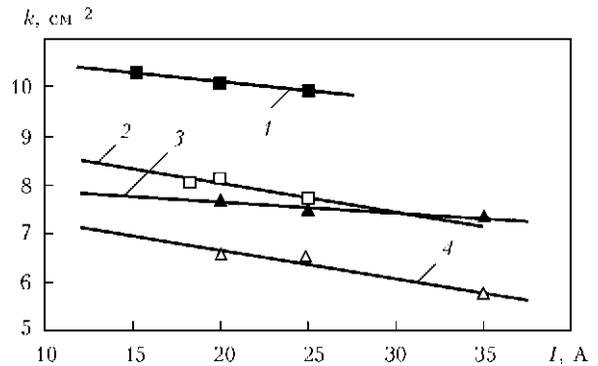


Рис. 5. Зависимость коэффициента сосредоточенности удельного теплового потока k в анод микроплазменной дуги от силы сварочного тока: 1 — $d_{\text{пл}} = 1,8$ мм, $d_{\phi} = 2,5$ мм, защитный газ 90 % Ar + 10 % H₂; 2 — $d_{\text{пл}} = 1,8$ мм, $d_{\phi} = 2,5$ мм, защитный газ Ar; 3 — $d_{\text{пл}} = 2,5$ мм, $d_{\phi} = 4,5$ мм, защитный газ 90 % Ar + 10 % H₂; 4 — $d_{\text{пл}} = 2,5$ мм, $d_{\phi} = 4,5$ мм, защитный газ Ar

будут составлять не более 1,44...2,56 %.

Выявленные закономерности также позволили спрогнозировать параметры сосредоточенности ввода порошка на плоскость анода (см. табл. 2), необходимые для микроплазменной порошковой наплавки с низкими потерями порошка при ширине сварочной ванны 2 мм.

Коэффициент сосредоточенности удельного теплового потока k микроплазменной дуги без подачи порошка, соответствующей условиям экспериментов рис. 2, 3, определяли по методике работы [9] калориметрированием на двухсекционном проточном калориметре.

Для данной микроплазменной дуги в диапазоне токов 10...40 А экспериментальные значения k составляют 5,5...10,5 см⁻² (рис. 5). Внешний вид микроплазменной дуги для наплавки при различных видах защитного газа и степени ее сжатия соплами плазматрона приведен на рис. 6. Для плазменных дуг при плазменно-порошковой наплавке в диапазоне токов 50...300 А соответствующие значения k составляют 1,8...2,0 — 4,8...6,5 см⁻² [6, 7]. Для микроплазменной дуги для сварки [10], горящей в аргоне, по данным работы [11], коэффициент сосредоточенности удельного теплового потока в диапазоне токов 4...25 А составляет 40...150 см⁻².

Сравнение экспериментальных данных радиального распределения присадочного порошка в пятне его ввода и удельного теплового потока на поверхности анода (см. табл. 2 и рис. 5) показывает, что при микроплазменной порошковой наплавке соотношение между соответствующими коэффициентами сосредоточенности находится в диапазоне 0,96...4,00. В свою очередь соотношение между эффективными диаметрами ввода порошка и пятна нагрева составляет 0,57...0,92.

Анализ экспериментальных и литературных данных показывает, что характеристики удельного теплового потока микроплазменной дуги для

наплавки [3–5] приближены к соответствующим характеристикам плазменных дуг для плазменно-порошковой наплавки. Однако задача оптимизации сосредоточенности ввода порошка для наплавки кромок лопаток толщиной менее 1,5 мм (см. табл. 2) требует применения микроплазмотронов, близких по конструктивным параметрам сопел к плазмотронам для микроплазменной сварки [10]. Полученные закономерности радиального распределения теплового потока микроплазменной дуги и присадочного порошка могут быть использованы для дальнейшей оптимизации конструктивных параметров микроплазмотронов с высокой сосредоточенностью подачи дисперсной присадки (обеспечение необходимой стабильности горения дуги и ведения наплавки, надежности защиты сварочной ванны).

При микроплазменной порошковой наплавке кромок лопаток толщиной 1...3 мм потери присадки можно снизить за счет не только уменьшения d_{ϕ} в микроплазмотроне, но и оптимизации сосредоточенности микроплазменно-порошкового потока путем рационального выбора расстояния от среза фокусирующего сопла до изделия. Особенностью микроплазменной порошковой наплавки является то, что при подаче порошка менее 5 г/мин его пролет как в столбе дуги, так и в режиме проверки подачи порошка плохо фиксируется человеческим глазом.

Для визуальной оценки сосредоточенности потока порошка в режиме проверки работы подачи порошка использовали его фотографирование на контрастном фоне (рис. 7). Анализ фотографий

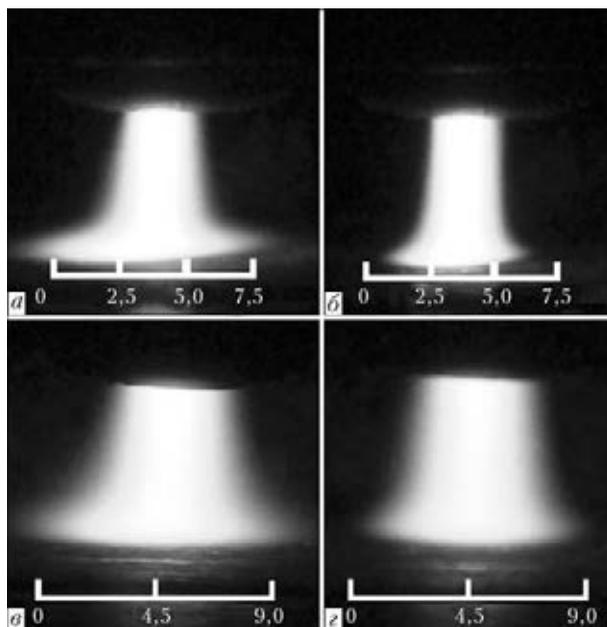


Рис. 6. Внешний вид микроплазменной дуги с эффективной тепловой мощностью 341 Вт при различной степени сжатия дуги соплами микроплазмотрона: а — $d_{пл} = 1,8$ мм, $d_{\phi} = 2,5$ мм, защитный газ Ar; б — $d_{пл} = 1,8$ мм, $d_{\phi} = 2,5$ мм, защитный газ 90 % Ar + 10 % H₂; в — $d_{пл} = 2,5$ мм, $d_{\phi} = 4,5$ мм, защитный газ Ar; г — $d_{пл} = 2,5$ мм, $d_{\phi} = 4,5$ мм, защитный газ 90 % Ar + 10 % H₂. Расстояние до анода — 5 мм

показал, что такой поток сохраняет свою сосредоточенность, заданную диаметром канала фокусирующего сопла, на расстоянии до 5...7 мм от его среза, а затем значительно расширяется. В этом случае зависимость (б) для указанного расстояния можно дополнить:

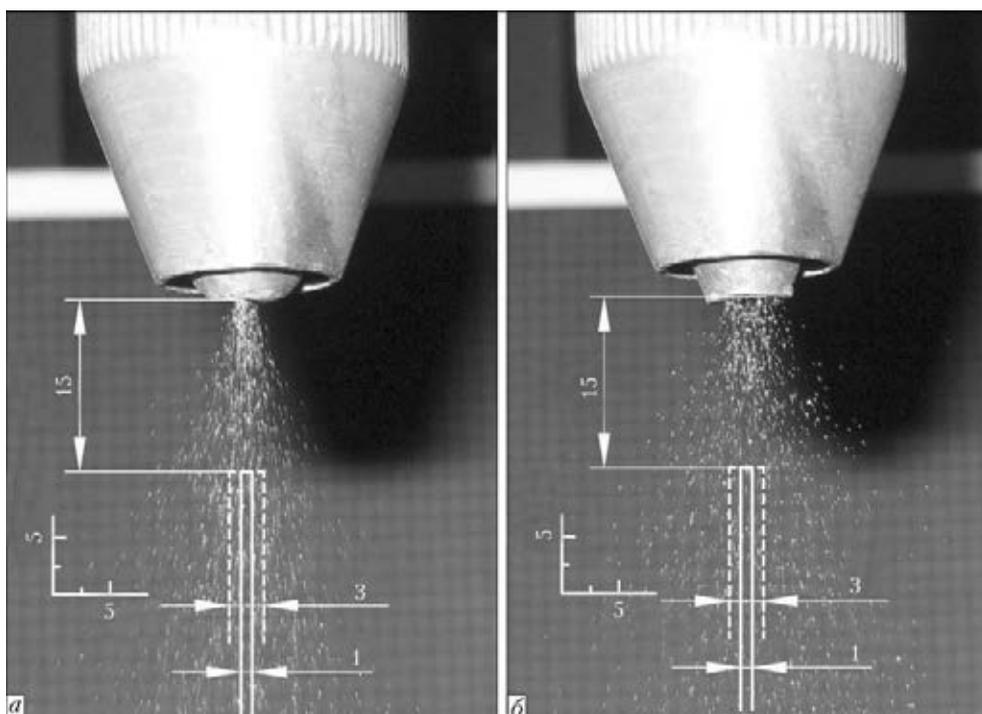


Рис. 7. Внешний вид потока порошка на выходе из фокусирующего сопла микроплазмотрона в зависимости от диаметра его канала: а — $d_{\phi} = 2,5$ мм; б — $d_{\phi} = 4,5$ мм



$$B = \delta + 2y_{\text{п}} \geq 2r_0 = \frac{2}{\sqrt{k_{\text{сп}}}} \approx d_{\text{ф}}. \quad (8)$$

С расширением потока на расстоянии более 7 мм от среза фокусирующего сопла существенно снижается количество порошка, которое может попасть в сварочную ванну на узкой подложке шириной 1...3 мм.

Заключение

Рассмотрены технологические особенности фокусировки двухфазных потоков микроплазма-присадочный порошок, доставляющих присадочный материал в сварочную ванну через высокотемпературную область дуги применительно к микроплазменной наплавке на кромки лопаток шириной менее 3 мм. Обоснованы технологические рекомендации по выбору диаметра канала фокусирующего сопла и расстояния от микроплазмотрона до изделия в зависимости от ширины наплавляемой узкой подложки.

Установлена удовлетворительная сходимость с нормальным законом распределения для радиального распределения двухфазного потока микроплазма-присадочный порошок в пятне его ввода на плоскости анода.

Для условий микроплазменной порошковой наплавки определено соотношение между коэффициентами сосредоточенности удельных потоков присадочного порошка и тепла дуги (0,96...4,00), а также соотношение между эффективными диаметрами пятна ввода порошка и пятна нагрева (0,57...0,92).

Установлены соотношения между шириной валика, диаметром фокусирующего сопла микроплазмотрона и характеристиками сосредоточенности ввода порошка в сварочную ванну, необходимыми для ограничения потерь присадочного порошка в пределах 1,44...2,56 % при наплавке

кромки лопаток. Показано, что для наплавки на узкую подложку шириной менее 3 мм требуется обеспечить коэффициент сосредоточенности удельного потока порошка в пятне его ввода в диапазоне 31,6...100 см⁻². Полученные закономерности могут быть использованы для дальнейшей оптимизации конструктивных параметров микроплазмотронов с высокой сосредоточенностью подачи дисперсной присадки.

1. Савченко В. С., Ющенко К. А., Саволей Н. И. Особенности сварки высоконикелевых дисперсионно-твердеющих жаропрочных сплавов и ремонта изготавливаемых из них изделий // Автомат. сварка. — 1993. — 10. — С. 31–33.
2. Yushchenko K. A., Cherviakov L. V., Nakonechny A. A. High-strength repairs of IN738LC blades and vanes. — S.l., S.a. — 12 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1724-02-2002).
3. Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, А. В. Яровицын и др. // Автомат. сварка. — 2010. — № 8. — С. 25–29.
4. Ющенко К. А., Яровицын А. В. Совершенствование технологии восстановления верхней бандажной полки рабочих лопаток авиационного ГТД // Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин: 36. наук. ст. — К.: ІЕЗ ім. С. О. Патона, 2012. — С. 506–509.
5. Особенности малоамперной аргонодуговой и микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку / А. В. Яровицын, К. А. Ющенко, А. А. Наконечный, И. А. Петрик // Автомат. сварка. — 2009. — № 6. — С. 37–42.
6. Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменная наплавка. — Киев: Екотехнологія, 2007. — 292 с.
7. Сом А. И. Новые плазмотроны для плазменно-порошковой наплавки // Автомат. сварка. — 1999. — № 7. — С. 44–48.
8. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
9. Демьянцевич В. П., Михайлов Н. П. Исследование распределения тепла микроплазменной дуги при смещении центра пятна нагрева с оси стыка // Свароч. пр-во. — 1973. — № 6. — С. 1–3.
10. Микроплазменная сварка / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, Д. А. Дудко и др. — Киев: Наук. думка, 1979. — 248 с.
11. Демьянцевич В. П., Михайлов Н. П. Взаимодействие микроплазменной дуги с нагреваемым телом // Свароч. пр-во. — 1973. — № 8. — С. 2–4.

Поступила в редакцию 26.04.2013