



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТНОЙ НАСАДКИ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ

А. П. МУРАШОВ, канд. техн. наук, А. П. ГРИЩЕНКО, Н. В. ВИГИЛЯНСКАЯ, А. Н. БУРЛАЧЕНКО, И. А. ДЕМЬЯНОВ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Установлено, что применение защитной насадки позволяет увеличить среднюю скорость напыляемых частиц на 25 %, улучшить прогрев частиц, снижает необходимую удельную энергию процесса напыления на 20 % за счет увеличения высокотемпературной зоны плазменной струи. Покрытия, полученные с насадкой, содержат меньше оксидов (на 10 %), содержание пор меньше в 4 раза, прочность сцепления с основой повышается на 20 %.

Ключевые слова: плазменное напыление, плазменная струя, насадка, свойства покрытий, коэффициент использования материала, планирование эксперимента

При нанесении покрытий плазменной струей в открытой атмосфере на формирование покрытия влияет «подмешивание» газов окружающей среды в струю. Начальный участок струи, отсчитываемый от сопла плазматрона диаметром d_0 до границы $H-H'$, характеризуется постоянными значениями скорости u_0 и температуры потока, а также равенством их начальным значениям вплоть до x_0 (рис. 1) [1]. Кроме того, в отличие от обычных в плазменной струе на начальном участке интенсивно выделяется энергия ионизации и диссоциации, иногда наблюдается вынос электрического тока и дополнительное выделение энергии, турбулизация потока за счет процессов крупно- и мелкомасштабного шунтирования дуги. В связи с электромагнитным сжатием ионизированного газа в электрической дуге статическое давление на начальном участке не равно нулю, поэтому у среза сопла резко расширяется струя, зависящая от формы выходной части сопла. Начиная от среза сопла, в периферийной области струи формируется зона смешения, в которой происходит радиальный перенос импульса и энергии, а параметры плазменной струи непрерывно изменяются от их начальных значений до значений в окружающей среде. Таким образом, за пределами начального участка до границы $\Pi-\Pi'$ формируется переходный участок струи и далее основной. Уменьшается температура и скорость плазменной струи в результате разбавления ее холодным воздухом, что ухудшает прогрев напыляемого материала. Уже на начальном участке активно взаимодействуют напыляемый материал и компоненты атмосферы (O_2 , N_2). Например, для стандартного плазматрона УМП-4 на расстоянии

двух-трех d_0 концентрация аргона в струе составляет 50 %, а в зоне, где взаимодействуют напыляемые частицы с поверхностью детали 70...100 мм ($10d_0...15d_0$), концентрация аргона — 20 %. Это приводит к образованию в покрытиях включений оксидов и нитридов, ухудшающих свойства покрытий (образованию пор, трещин, отслоений) [2, 3].

Для предотвращения процессов подмешивания компонентов атмосферы в струю используют методы плазменного напыления в защитной среде нормального давления (APS), в разреженной контролируемой атмосфере (VPS), под слоем жидкости (WPS) и в контролируемой атмосфере повышенного давления (HPPS) [3–6], а также системы с местной защитой [3, 7–10].

С помощью систем местной защиты зоны плазменного напыления путем применения насадок могут быть решены следующие задачи:

увеличение высокотемпературной зоны плазменной струи (ограничением подмешивания холодного газа окружающей среды) и сосредоточение напыляемого материала в центральной части, что приводит к более эффективному нагреву напыляемого материала и более рациональному использованию энергии плазменной струи;

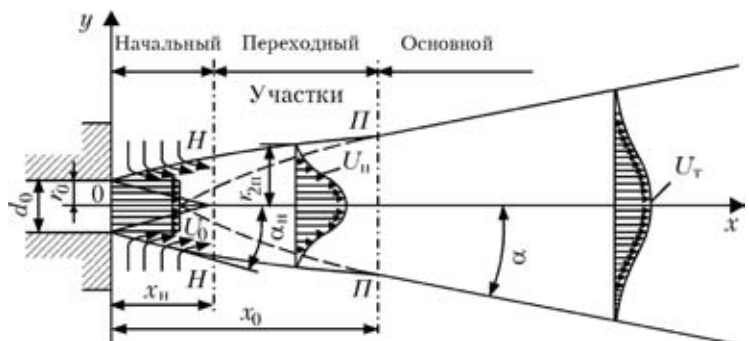


Рис. 1. Принципиальная схема плазменного напыления свободно расширяющейся плазменной струей



снижение процесса окисления, обусловленного протеканием реакций напыляемого материала с активными компонентами окружающей среды (O_2 , N_2).

Целью настоящей работы являлась оценка эффективности применения защитной насадки при плазменном напылении на повышение качества покрытий путем совершенствования нагрева и ускорения частиц порошка при напылении и защиты напыляемого материала от воздействия на него окружающей среды (O_2 , N_2).

Для оценки влияния защитной системы на свойства покрытий проводили эксперименты по плазменно-дуговому напылению покрытий с применением защитной насадки и без нее на установке плазменного напыления УПУ-8М с использованием термореагирующего порошка марки ПТ-НА-01 (95 мас. % Ni — 5 мас. % Al) фракции + 40...– 60 мкм [11].

Эффективность нагрева частиц определяли путем оценки их внешнего вида после затвердевания при соударении с поверхностью стеклянной пластинки (сплет-тест). Напыление проводили с насадкой и без насадки при разной удельной энергии процесса

$$\varepsilon = \frac{UI\eta}{V_{п.г}}$$

где U — напряжение, В; I — сила тока, А; η — КПД плазмотрона; $V_{п.г}$ — расход плазмообразующего газа, $m^3/ч$.

Значение ε изменяли путем изменения силы тока (300, 400, 500 А). В качестве плазмообразующего газа использовали аргон, расход которого составлял $1,38 m^3/ч$, напряжение на дуге 30 В, КПД плазмотрона 53% при токе 300 А, 48 % при токе 400 А и 47 % при токе 500 А (определяли с помощью программы CASPSP [12]). В этих условиях удельная энергия напыления изменялась от 3,5 до 4,2 и до 5,2 кВт·ч/ m^3 .

Напыление проводили на стеклянные пластинки размером 50×30×3 мм. Вид сплетов, напыленных без насадки (рис. 2), показал, что при силе тока 300 А частицы не расплавились и отскочили от поверхности, при 400 А частица расплавлена не полностью (расплавлена оболочка, но ядро твердое; увеличение количества не полностью расплавленных частиц в покрытии

ведет к формированию крупных пор). При силе тока 500 А частица полностью расплавлена. При напылении с насадкой частица оказалась полностью расплавленной уже при силе тока 400 А.

Таким образом, применение насадки позволило снизить необходимую удельную энергию процесса напыления покрытия с использованием порошка Ni–5Al с 5,2 до 4,2 кВт·ч/ m^3 (на 20 %), что является результатом увеличения протяженности высокотемпературной зоны плазменной струи.

Измерение скорости движения напыляемых частиц в плазменной струе на расстоянии 140 мм от среза сопла с использованием прибора ИССО-1 показало, что при напылении порошком ПТ-НА-01 с применением насадки скорость частиц составляет около 120 м/с, что на 25 % выше, чем достигаемая скорость частиц при напылении без насадки (95 м/с).

Оптимизацию режимов напыления проводили методом математического планирования эксперимента [13], а в качестве параметра оптимизации брали коэффициент использования материала (КИМ), который определяли при напылении на плоскую поверхность (250×250×1,2 мм) для каждого варианта напыления (с насадкой и без).

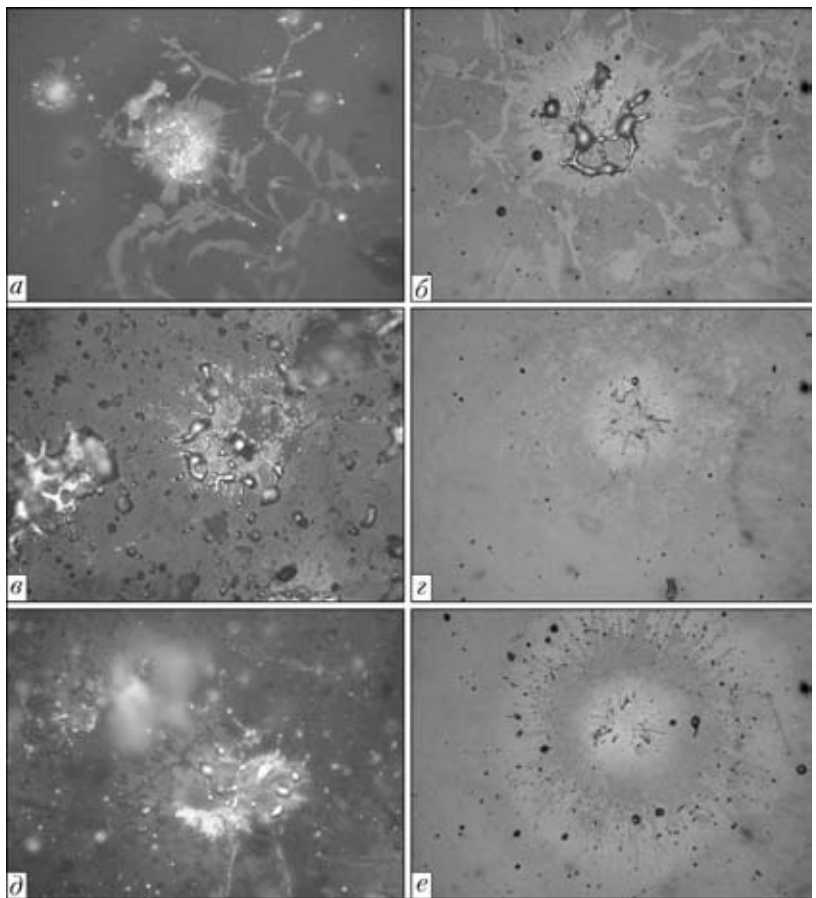


Рис. 2. Сплеты частиц порошка ПТ-НА-0,1, напыленные плазменно-дуговым методом без насадки (а, в, д) и с насадкой (б, з, е), при токах 300 (а, б), 400 (в, з), 500 А (д, е)



Т а б л и ц а 1. Матрица дробного (2^{4-1}) факторного плана экспериментов

| № опыта | I, A | $V_{п.г}, м^3/ч$ | $H, мм$ | Ar/N_2 |
|---------|--------|------------------|---------|----------|
| 1 | + | + | + | + |
| 2 | + | + | - | - |
| 3 | + | - | + | - |
| 4 | + | - | - | + |
| 5 | - | + | + | - |
| 6 | - | + | - | + |
| 7 | - | - | + | + |
| 8 | - | - | - | - |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Массу напыленного покрытия и расходуемого порошка оценивали с помощью весов марки EMB 200-2 фирмы «KERN» с точностью измерения $\pm 0,01$ г.

В табл. 1 приведена матрица дробного (2^{4-1}) факторного плана экспериментов по определению КИМ. В качестве изменяемых факторов выбрали значения силы тока, расхода плазмообразующего газа, состава плазмообразующего газа, дистанции напыления H , которые наиболее существенно влияют на характер процесса напыления [14]. Кроме указанных изменяемых факторов напыления, в качестве постоянных были приняты следующие: расход порошка 32 г/мин; время напыления 15 с; расход транспортирующего газа $0,21 м^3/ч$.

Пределы изменения факторов выбраны на основании опыта напыления указанным порошком и характеристик оборудования для напыления. Граничные значения факторов указаны в табл. 2.

В табл. 3 приведены значения КИМ при плазменно-дуговом напылении с и без насадки.

По результатам эксперимента в условиях без насадки (табл. 3) составлено уравнение регрессии для зависимости КИМ от факторов напыления:

Т а б л и ц а 2. Граничные значения факторов плазменно-го напыления порошком ПТ-НА-01

| Уровень | I, A | $V_{п.г}, м^3/ч$ | $H, мм$ | Ar/N_2 |
|---------|--------|------------------|---------|----------|
| + | 500 | 1,5 | 160 | 0,7 |
| - | 400 | 1,26 | 100 | 1 |
| 0 | 450 | 1,38 | 130 | 0,85 |

$$КИМ (\%) = 48,1 + 0,045I - 6,46V_{п.г} - 2,08H + 1,8(Ar/N_2).$$

Определение режима напыления с насадкой с максимальным значением КИМ при использовании порошка ПТ-НА-01 проводили аналогично. В этом случае уравнение регрессии для зависимости КИМ от факторов напыления имеет вид

$$КИМ (\%) = 72,9 - 0,148I - 5,1V_{п.г} - 0,16H + 92,5(Ar/N_2).$$

В результате анализа результатов эксперимента (табл. 3) установлено, что без использования насадки наибольшее значение КИМ достигается при режиме № 6, который обеспечивает максимальное количество расплавленных напыляемых частиц и меньшее количество перегретых частиц, наличие которых ведет к потерям на испарение и разбрызгивание расплава частиц.

С использованием насадки максимальный КИМ был получен при режиме № 4, который отличается от режима № 6 меньшей силой тока (400 А вместо 500) и составом плазмообразующего газа (чистый аргон вместо смеси Ar/N_2), что совпадает с результатами описанного выше сплет-теста. Такое уменьшение удельной энергии процесса напыления для получения максимального значения КИМ в случае применения насадки объясняется увеличением высокотемпературной зоны струи и скорости частиц.

Среднее значение КИМ при использовании Ar/N_2 смеси с применением насадки увеличилось незначительно (с 51 до 53 %), тогда как при применении плазмообразующего газа аргона среднее

Т а б л и ц а 3. Значения КИМ при напылении без применения насадки и с насадкой порошком ПТ-НА-01

| № опыта | I, A | $V_{п.г}, м^3/ч$ | $H, мм$ | Ar/N_2 | КИМ без применения насадки, % | КИМ с применением насадки, % |
|---------|--------|------------------|---------|----------|-------------------------------|------------------------------|
| 1 | 500 | 1,5 | 100 | 1 | 48 | 51 |
| 2 | 500 | 1,26 | 160 | 1 | 43 | 58 |
| 3 | 400 | 1,5 | 160 | 1 | 34 | 64 |
| 4 | 400 | 1,26 | 100 | 1 | 56 | 74 |
| 5 | 500 | 1,5 | 160 | 0,7 | 38 | 28 |
| 6 | 500 | 1,26 | 100 | 0,7 | 72 | 62 |
| 7 | 400 | 1,5 | 100 | 0,7 | 41 | 61 |
| 8 | 400 | 1,26 | 160 | 0,7 | 52 | 59 |
| 9 | 450 | 1,38 | 130 | 0,85 | 60 | 70 |

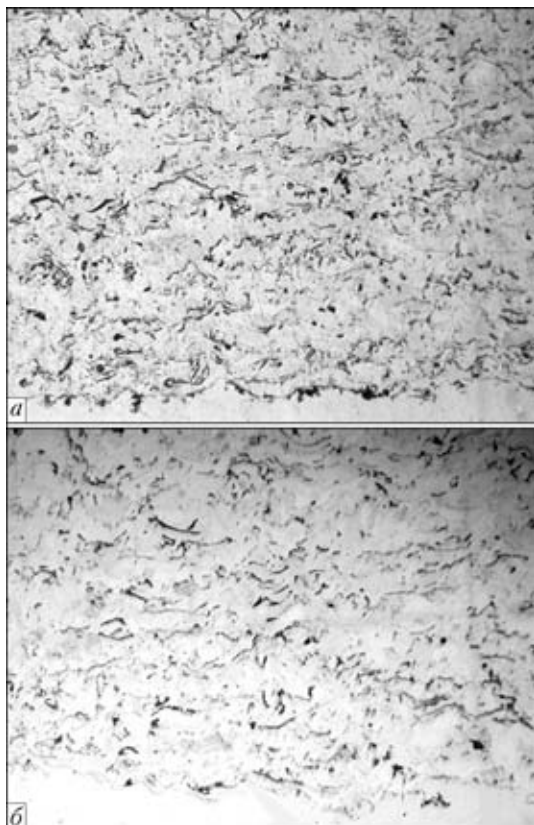


Рис. 3. Микроструктуры ($\times 200$) покрытий, напыленных порошком ПТ-НА-01 без насадки (режим № 6, КИМ = 72 %) (а) и с насадкой (режим № 4, КИМ = 74 %) (б)

значение КИМ с применением насадки увеличилось с 45 до 62 % по сравнению со средним значением КИМ, полученным без применения насадки. Это связано с тем, что при напылении без насадки происходит разбавление низкоэнтальпийной (при плазмообразующем газе аргоне) плазмы воздухом, что приводит к резкому снижению ее температуры и уменьшению высокотемпературной зоны. Применение насадки и введение высокоэнтальпийного плазмообразующего газа N_2 позволяет получить протяженную зону высоких температур.

На рис. 3 приведены микроструктуры покрытий, напыленных порошком ПТ-НА-0,1 с применением и без применения насадки, при режимах с максимальным значением КИМ. Структура покрытий состоит из расплавленных частиц в виде ламелей. По границам частиц, кроме пор, расположены оксиды, равномерно размещенные по сечению покрытия и имеющие более светлый цвет по сравнению с порами. Это позволило их выделить и оценить степень окисления материала покрытия.

Анализируя приведенные структуры покрытий, полученных при режимах с максимальным значением КИМ, можно сделать вывод о соответствии выбранных режимов напыления процессу получения покрытий из полностью расплавленных частиц порошка, которые при соударении

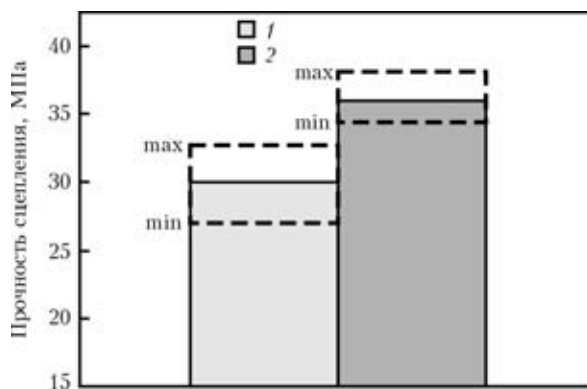


Рис. 4. Прочность сцепления покрытий, полученных при напылении без насадки (2) и с насадкой (1) порошком ПТ-НА-01

с поверхностью образуют ламели. Покрытие, полученное напылением без использования насадки, имеет пористость 0,4 % и содержание оксидов 5 %.

При применении насадки пористость покрытия составляет 0,1 %, содержание оксидов — 4,5 %.

Прочность сцепления покрытий с основой на отрыв оценивали клеевым методом согласно ГОСТ-14760-69 и ASTM C 633-79 на разрывной машине Р-50 (максимальная нагрузка 50 кН). Одновременно для каждого варианта проводили напыление четырех образцов на режимах напыления с максимальным значением КИМ. Толщина покрытий составляла $0,25 \pm 0,03$ мм.

Прочность сцепления покрытий, напыленных без использования насадки, составила $30 \pm 3,3$, а с насадкой — $36 \pm 2,8$ МПа. Характер разрушения покрытий, полученных с применением и без насадки, отличался. Если покрытия, напыленные без насадки, разрушались по границе с основой, то покрытия, напыленные с насадкой, разрушались по клею, что свидетельствует о фактически более высокой прочности сцепления покрытия с основой, чем зафиксированное значение. Таким образом, при напылении с насадкой прочность сцепления покрытий с основой увеличивается не менее чем на 20 % (рис. 4).

Заключение. Применение защитной насадки увеличивает среднюю скорость напыляемых частиц порошка ПТ-НА-0,1 на 25 %, улучшает прогрев его частиц, снижает необходимую удельную энергию процесса напыления на 20 % за счет увеличения протяженности высокотемпературной зоны плазменной струи. Покрытия, полученные напылением с применением насадки, содержат оксидов на 10 % меньше (5 и 4,5 % соответственно), пористость снижается в 4 раза (с 0,4 до 0,1 %), прочность сцепления с подложкой повышается на 20 % (с $30 \pm 3,3$ до $36 \pm 2,8$ МПа).

1. Донской А. В., Клубник В. С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1979. — 221 с.



2. *Физика и техника низкотемпературной плазмы* / С. В. Дресвин, А. В. Донской, В. М. Гольдфарб, В. С. Клубникин. — М.: Атомиздат, 1972. — 352 с.
3. *Получение покрытий высокотемпературным распылением* / Под ред. И. К. Дружинина, В. В. Кудинова. — М.: Атомиздат, 1973. — 312 с.
4. *Бобров Г. В., Ильин А. А.* Нанесение неорганических покрытий. — М.: Интермет Инжиниринг, 2004. — 624 с.
5. *Lugscheider E.* The family of plasma spray processes — present status and future prospects // Proc. First plasma-tech. symp., Lucerne, 1988. — Vol. 1. — P. 23–48.
6. *Lugshheider E., Rass E., Nicoll A. R.* Underwater plasma spraying // Proc. 2nd plasma-tech. symp., Lucerne, Switzerland, 5–7 June 1991. — Vol. 1. — P. 213–219.
7. *Borisov Yu., Chernyshov A., Korzhyk V.* Structure and parameters of heterogeneous plasma jets shielded by water flow // Ibid. — P. 75–84.
8. *Houben J. M., Zaat J. H.* Shielded open air plasma spraying of reactive materials // Proc. of the 8th Intern. thermal spray conf., Miami Beach, Florida. — 1976. — P. 78–85.
9. *Балдаев Л. Х., Борисов В. Н., Вахалин В. А.* Газотермическое напыление: Уч. пособие. — М.: Маркет ДС, 2007. — 344 с.
10. *Кудинов В. В., Косолапов А. Н., Пекиев П. Ю.* Насадки для создания местной защиты при плазменном напылении // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1987. — С. 69–75.
11. *Применение защитного насадка при газотермическом напылении квазикристаллических покрытий* / А. П. Мурашов, И. А. Демьянов, А. П. Грищенко // Автомат. сварка. — 2009. — № 4. — С. 55–56.
12. *Компьютерное моделирование процесса плазменного напыления* / Ю. С. Борисов, И. В. Кривцун, А. Ф. Мужиченко и др. // Там же. — 2000. — № 12. — С. 42–51.
13. *Бондарь А. Г.* Математическое моделирование в химической технологии. — Киев: Вища шк., 1973. — 280 с.
14. *Петров С. В., Карп И. Н.* Плазменное газовоздушное напыление. — Киев: Наук. думка, 1993. — 495 с.

It was established that the use of the protective nozzle provides a 25 % increase in average velocity of the spraying particles, improves heating of the particles, and decreases the required specific energy of the spraying process by 20 % due to extension of the high-temperature zone of the plasma jet. The content of oxides in the coatings deposited by using the nozzle is 10 % lower, the content of pores in them is 4 times lower, and the coating to substrate adhesion strength is 20 % higher.

Поступила в редакцию 05.09.2011



МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛООБРАБОТКА. МАШИНОСТРОЕНИЕ-2012

Международный промышленный форум

27–29 марта 2012

Ташкент Узбекистан
ОАО НВК «Узэкспоцентр»

Среди основных разделов выставки:

- черная и цветная металлургия
- порошковая металлургия
- сырье и материалы
- оборудование и технологии
- кузнечно-прессовое, литейное и прокатное производство
- оборудование, станки и инструменты для металлообработки
- переработка ломов цветных и черных металлов
- листо- и сортообработка: резка, профилирование, гибка, сварка
- сварочные материалы, оборудование и технологии
- продукция: трубы, лист с покрытием, метизы, металлоизделия, спецстали, спецсплавы и др.
- контрольно-измерительная аппаратура
- транспорт, логистика, ИТ-технологии, страхование, лизинг

Контакты: тел./факс: +(99871) 238 57 82,

моб.: +(99893) 381 07 82

E-mail: energy@ieguzexpo.com

www.ieguzexpa.com