



## 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;

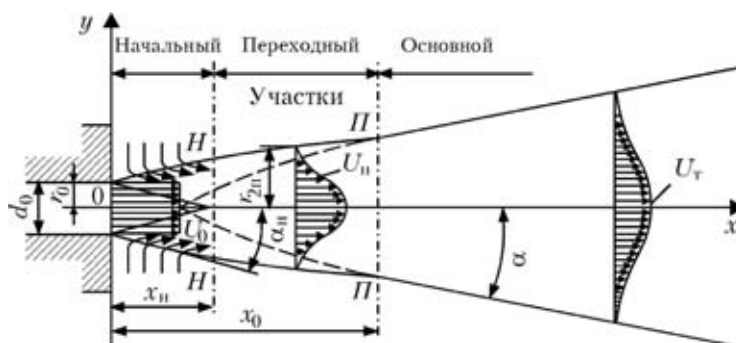


Рис. 1. Принципиальная схема плазменного напыления свободно расширяющейся плазменной струей



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;  $\eta$  — КПД плазмотрона;  $V_{п.г}$  — расход плазмообразующего газа,  $m^3/ч$ .

Значение  $\varepsilon$  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  $50 \times 30 \times 3$  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 ( $250 \times 250 \times 1,2$  мм) для каждого варианта напыления (с насадкой и без).

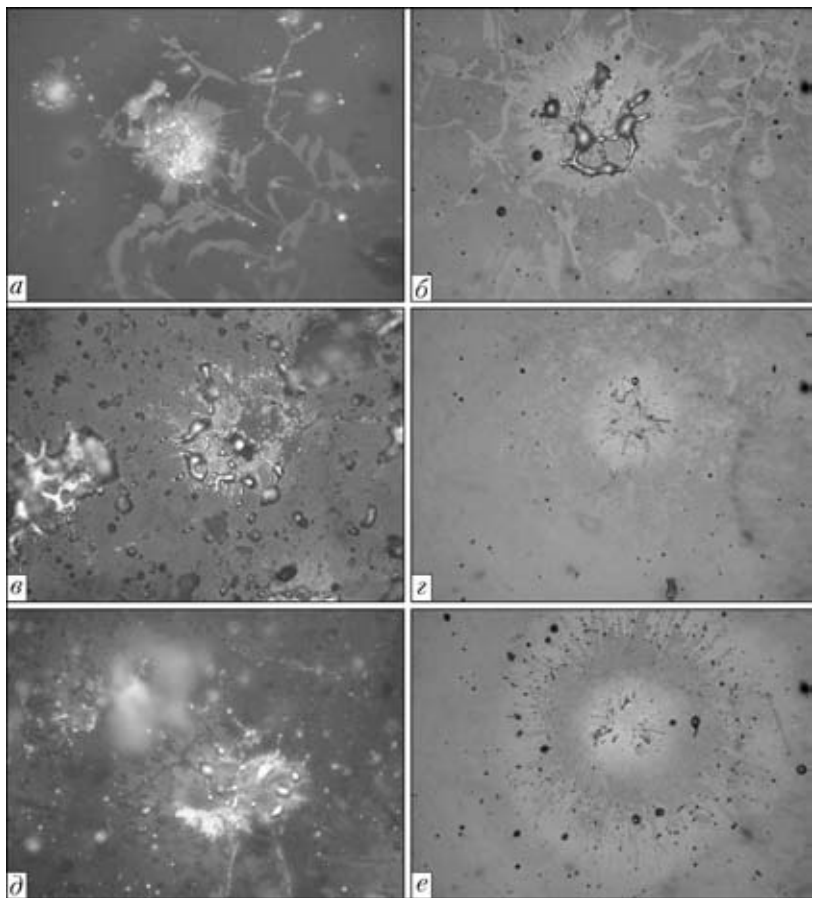


Рис. 2. Сплеты частиц порошка ПТ-НА-0,1, напыленные плазменно-дуговым методом без насадки (а, в, д) и с насадкой (б, з, е), при токах 300 (а, б), 400 (в, з), 500 А (д, е)



**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

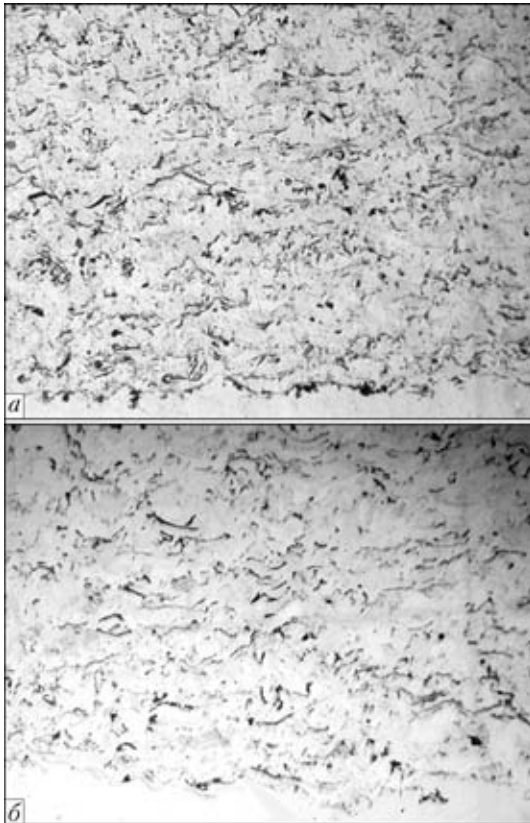


Рис. 3. Микроструктуры ( $\times 200$ ) покрытий, напыленных порошком ПТ-НА-01 без насадки (режим № 6, КИМ = 72 %) (а) и с насадкой (режим № 4, КИМ = 74 %) (б)

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

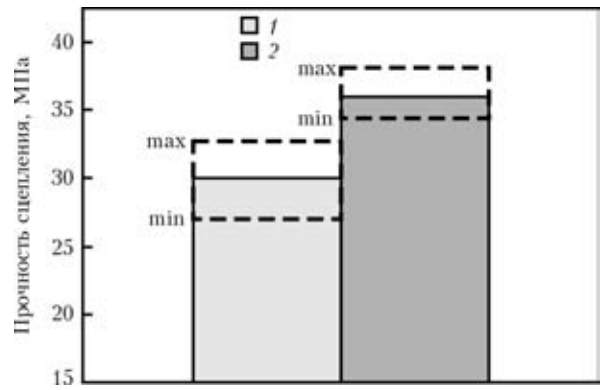


Рис. 4. Прочность сцепления покрытий, полученных при напылении без насадки (2) и с насадкой (1) порошком ПТ-НА-01

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](mailto:energy@ieguzexpo.com)

[www.ieguzexpa.com](http://www.ieguzexpa.com)