

# ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА



УДК 631.3:621.793.6:669.718.67

В.М. Коротких

## УПРАВЛЯЕМЫЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Ключевые слова:** электротехнологии, плазменное напыление, энергоэффективность, импульсное распределённое электрическое поле, восстанавливаемая рабочая поверхность.

### Введение

Применение газотермического напыления защитных покрытий с целью восстановления изношенных деталей и оборудования в агропромышленном комплексе (АПК), увеличение его качественных и эксплуатационных показателей за счёт образования на рабочей поверхности высокопрочных и износостойких слоев создают перспективное направление в технологии сельского хозяйства.

Так, в сельском хозяйстве широко применяется метод напыления с оплавлением, который несмотря на имеющиеся ограничения позволяет достаточно просто и с небольшими затратами получать плотные износостойкие коррозионностойкие покрытия с высокой адгезией [1, 2]. Напыление таких покрытий выполняют установками газопорошкового напыления, например, ТСЗП UniSprayJet или ТСЗП Variobond, из самофлюсующихся порошков Hoganas, которые производят самопроизвольное удаление оксидов с поверхности частиц покрытия при их оплавлении. Наиболее часто для этих целей применяют сплавы на никелевой основе системы Ni-

Cr-B-Si. Оксиды  $B_2O_3-Cr_2O_3-SiO_2$  образуют легкоплавкий шлак, всплывающий при оплавлении на поверхность в виде тонкого стекловидного налета. Выдержка при температуре оплавления 1050-1080°C составляет 1-2 мин. Оплавление производится стандартными ацетиленокислородными горелками в печи как вручную, так и в автоматизированном режиме. В качестве плазмообразующего газа используют аргон, а вторичного газа – водород, азот или гелий. Порошковый материал расплавляется при попадании в плазменную дугу, переносится на поверхность детали, где происходит его кристаллизация [3, 4].

Другой способ газопорошковой наплавки износостойких и коррозионностойких сплавов предполагает подачу наплавочного материала в виде порошкового сплава непосредственно через кислородное пламя на восстанавливаемую или упрочняемую поверхность [5].

Указанные методы плазменного напыления для создания и восстановления защитных покрытий на рабочих поверхностях деталей сельскохозяйственной техники перспективны, однако высокая потребляемая мощность плазменных установок, металлоемкость и необходимость использования только в стационарных условиях ограничивают их применение на предприятиях с малой ресурсоэнергообеспеченностью (табл.).

Технические характеристики плазменных установок

№ п/п	Наименование установки	Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	Расход газа, м <sup>3</sup> /ч	Сила тока, А	Потребл. мощность, кВт
1	УМП-5-68	0,3	3-4	500	30
2	УМП-6	0,25	3-4	500	30
3	УПУ-3Д	0,5	3-4	400	25
4	A1612.У4 «Киев-4» (Украина)	0,5	3-4	300	48
5	Ф4-МБ (Франция)	-	-	600	45
6	7МВ-Н (Италия)	-	-	-	80
7	«Плазма-Техник АГ» (Швейцария)	0,25	-	1000	45

Цель данной работы – повышение энергоэффективности, уменьшение энергопотребления и создание покрытий с высокими адгезионными свойствами при одновременном снижении потерь расходных материалов и возможностью использования газотермических технологий на малых ремонтных предприятиях агропромышленного комплекса.

#### Используемые методы и приемы

Повышение энергоэффективности технологий может быть достигнуто при использовании теплового эффекта образования на восстанавливаемой поверхности синтезируемых композиционных высокопрочных износостойких покрытий за счет экзотермических превращений исходных компонентов во время протекания самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) непосредственно на ревитализируемой поверхности [6, 7].

Уменьшение энергопотребления будет достигаться за счет пассивного и активного управления процессом при использовании различных композиций, варьировании начальных условий, изменении динамики процесса СВС, воздействия энергией электрического поля [8].

Высокое качество изделий на выходе будет достигнуто снижением затрат на дорогостоящее оборудование и естественное исключение из процесса некоторых технологических циклов.

Надежность и увеличение срока службы восстановленных деталей будет достигнуто за счет возможности нанесения защитных покрытий на объекты любых размеров, с толщиной слоя от 0,01 до 10 мм и более; пористостью от 0 до 30%,

одновременно с компактированием и наноструктурированием напыляемой поверхности, получением высоких адгезионных свойств и формированием износостойкой структуры, основу которой будут составлять боридные и карбидные фазы максимальной твердости [9, 10].

#### Экспериментальная часть

Контроль пористости покрытий, прочности сцепления осуществляется по ГОСТ 9.304-87.

Рентгеноструктурный анализ проводился на рентгеновском дифрактометре общего назначения ДРОН-6. Для исследования применялась стандартная рентгеновская трубка с *Cu K $\alpha$* -излучением, длина волны  $\lambda=1,5418$  А. Дифрактограммы снимались с шагом сканирования 0,05 градуса и временем экспозиции в каждой точке равным 3 секунды. Обработку и анализ экспериментальных данных осуществляли с помощью пакета программ PDWin, предназначенного для автоматизации процесса обработки рентгенограмм.

#### Результаты эксперимента и их обсуждения

Для практической реализации намеченного создан экспериментальный комплекс плазменного напыления с двумя блоками питания (рис. 1) [11]. Он состоит из плазмотрона 9, прототипом которого является отечественная установка «Мультиплаз-2500» с насадкой-стволом 8 и дополнительного источника питания 2 на единой переносной платформе [12]. В качестве плазмообразующего газа используются пары раствора этилового спирта в воде

примерно в равных долях. Комплекс имеет автономную систему водоснабжения и подачи порошков, в которую входят: коллектор высокого давления 3, манометр 4, компрессор 5, электропневмоклапан 6, дозатор порошковых смесей 7, вес не более 20 кг, потребляемая мощность с двумя источниками питания до 4,5 кВт. Температура плазмы внутри ствола и на выходе из него может достигать 7000°C. Скорость плазменной струи регулируется плавно с помощью вращения ручки 15.

В эксперименте плазмотрон поддерживает горение, его мощность и температура критичны только для предварительного разогрева порошков, когда не используется дополнительный источник питания. Мощность устанавливается переключением ступеней источника питания 10 плазмотрона, а время разогрева регулируется дискретно: точкой 2 ввода порошковой смеси (рис. 2а). Время нагрева определяется скоростью плазменного потока в стволе  $v_{1пн}$  и расстояниями от места подачи порошков до выхода из ствола насадки  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  (рис. 2б).

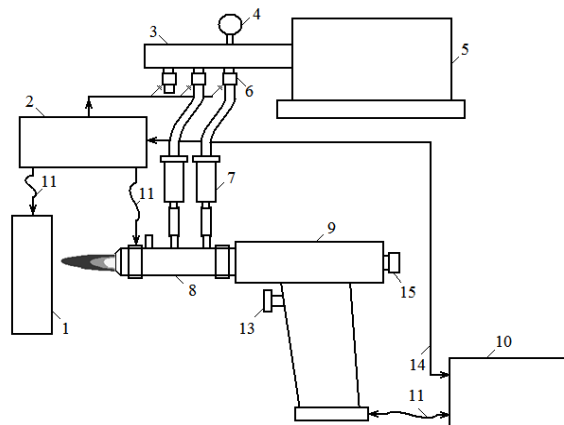


Рис. 1. Схема экспериментального комплекса плазменного напыления:

- 1 – напыляемая поверхность;
- 2 – (дополнительный) импульсный блок питания;
- 3 – коллектор высокого давления;
- 4 – манометр; 5 – компрессор;
- 6 – электроклапан; 7 – дозатор;
- 8 – насадка-штуцер; 9 – плазмотрон;
- 10 – блок питания плазмотрона;
- 11 – гибкий электрический провод

$$t_1 = L_1 / v_{1пн}, \quad (1)$$

$$t_2 = (L_1 - L_3) / v_{1пн}, \quad (2)$$

$$t_3 = (L_1 - L_2) / v_{1пн}. \quad (3)$$

При создании напряженности импульсного электрического поля дополнительным источником 5 с разностью потенциалов  $\Delta\varphi$  между стволом плазмотрона 7 и напыляемой поверхностью 1 в промежутке  $L_0$  (рис. 2) заряженным частицам с

зарядом  $q$  сообщается скорость  $v_{2пн}$ , которая находится из равенства

$$q \cdot \Delta\varphi = \frac{1}{2} m \cdot v^2. \quad (4)$$

Тогда скорость, приобретаемая за счет дополнительного источника импульсного электрического поля

$$v_{2пн} = \sqrt{\frac{2q \cdot \Delta\varphi}{m}}. \quad (5)$$

Время нахождения заряженных частиц за пределами ствола определяется расстоянием до напыляемой поверхности  $L_0$  и скоростью  $v_{2пн}$ :

$$t_0 = L_0 / v_{2пн} = L_0 \frac{1}{\sqrt{\frac{2q \cdot \Delta\varphi}{m}}} \quad (6)$$

Минимальная продолжительность импульса управления ключа 6 составляет

$$t_{\min} = t_0 + t_1. \quad (7)$$

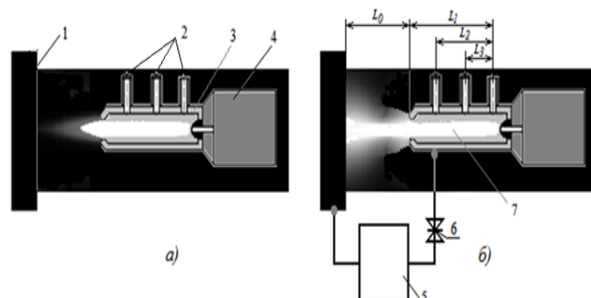


Рис. 2. Схема подключения импульсного источника электрического поля: а) без источника; б) с источником

Потребляемая мощность складывается из мощности образования плазмы внутри ствола  $P_{пн}$  и мощности импульсного электрического поля  $P_{имп}$ :

$$P_{потр} = P_{пн} + d \cdot P_{имп}, \quad (8)$$

где  $d$  – коэффициент заполнения, который находится из соотношения

$$S = T \cdot \frac{1}{\tau} = \frac{1}{d},$$

где  $S$  – скважность;

$T$  – период импульсов;

$\tau$  – длительность импульса. При расчетах принимаем  $\tau \approx t_{\min}$ .

Потребляемая энергия  $W$  зависит от времени технологического цикла  $T$  и поскольку получаемый расчетный коэффициент заполнения  $d$  составляет меньше 1, то использование предлагаемых импульсных систем управления фактически уменьшает время потребления, что обеспечивает энергоэффективность применяемых электротехнологий.

Для определения функциональных связей качества напыляемых поверхностей с выбираемыми режимами необходимо учитывать многофакторность теплофизических явлений в плазме и твердом теле. Сопоставительному анализу был подвергнут массив результатов при напылении порошкового алюминия, фракции 30-60 мкм, на стальную подложку без дополнительного источника импульсного электрического поля и с ним, а также с введением флюсующих добавок и без них. Полученные данные свидетельствуют, что минимальный показатель адгезии алюминия составляет 6,8 мПа, средний – 12,2 мПа, максимальный – 15,2 мПа (рис. 3).

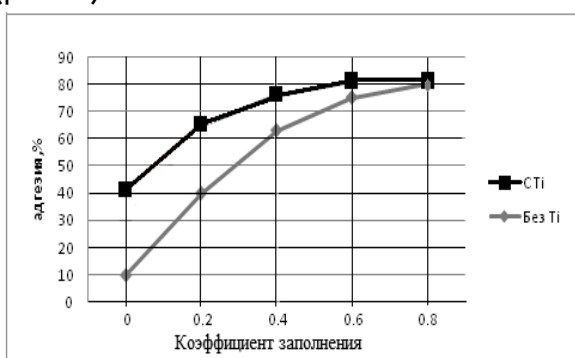


Рис. 3. Зависимость адгезии плазменного покрытия от коэффициента заполнения импульсного источника электрического поля

На образцах поверхностей плазменного напыления шероховатость падает с увеличением коэффициента заполнения до 0,6 (образцы 1-5), а дальнейшее увеличение до 0,8-1 приводит к началу оплавления подложки (образцы 6-8) и к оплавлению (образцы 9-10).

Фазовый анализ относительных интенсивностей дифракционных максимумов показал, что установленная фаза при наличии на дифрактограмме трех ее самых интенсивных пиков соответствует алюминию (рис. 5). Внешние воздействия – импульсное электрическое поле и флюсующий компонент в порошковой смеси – не повлияли на чистоту плазменного покрытия. Отсутствие включений объясняется тем, что флюсующий компонент порошковой смеси (в данном случае Ti) имеет большую активность к кислороду и забирает его у алюминия, оставляя его чистым. Флюс в виде стекловидного тела, выступающий на поверхность, легко удаляется. Слабоконцентрированные взаимодействия Ti-Al (2-3%) происходят с экзотермией по типу самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и увеличивают адгезионные свойства покрытия. Область применения рассмотренной методики может быть распространена на аналогичные задачи.

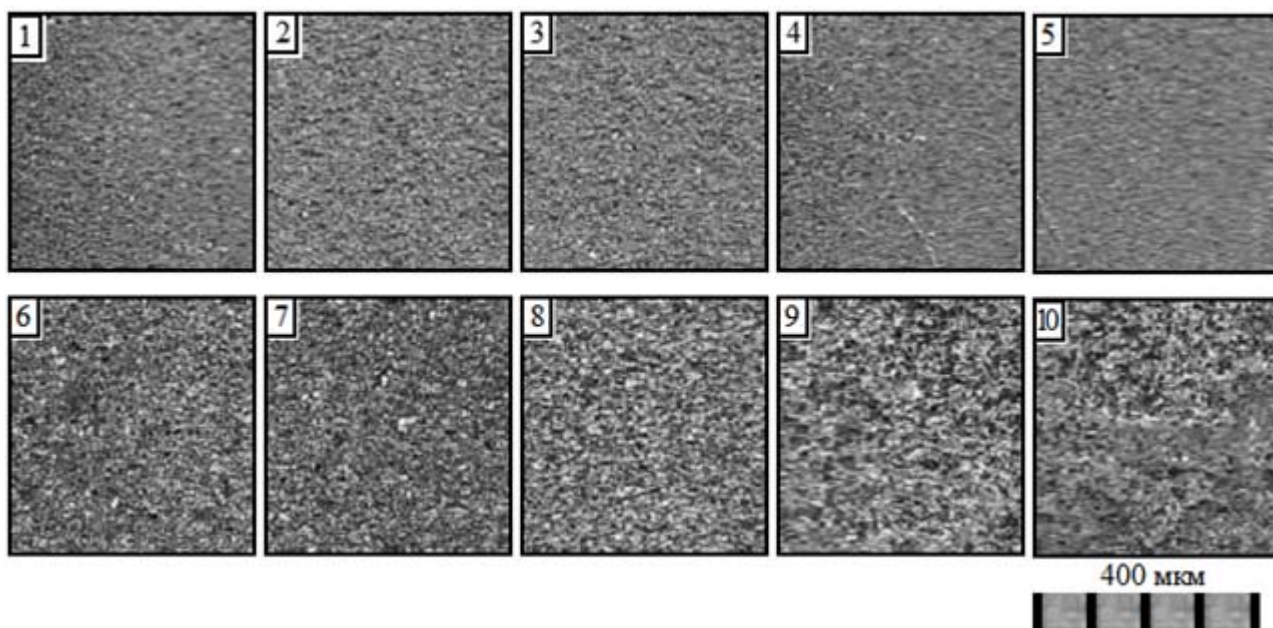


Рис. 4. Образцы рабочих поверхностей плазменного напыления

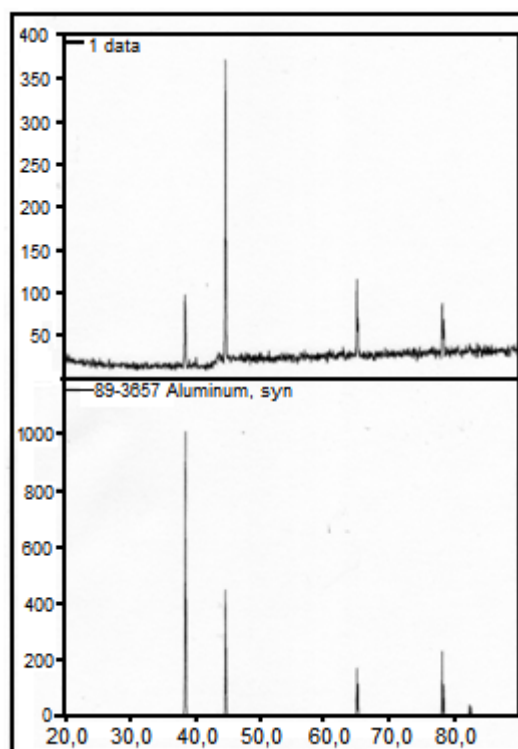


Рис. 5. Дифрактограмма покрытия

### Выводы

Установлено, что если для коэффициента диффузии в твёрдых телах характерна экспоненциальная зависимость от температуры, то возрастание скорости заряженных частиц в импульсном электрическом поле увеличивает температуру. Это приводит к увеличению диффузии и адгезии напыляемых покрытий на восстанавливаемой поверхности.

Использование флюсующихся компонентов с возможностью протекания малоцентрированных реакций СВС также увеличивает адгезию напыляемых покрытий.

Дополнительный источник напряженности импульсного электрического поля и образованный на напыляемой поверхности распределенный потенциал относительно ствола плазматрона позволяет создать:

- равномерное по всей площади покрытие с высокой адгезией и чистотой напыляемого материала;
- управление параметрами процесса и качеством покрытия при уменьшении потребляемой мощности примерно в 3,5 раза.

### Библиографический список

1. Хасуй А. Техника напыления / А. Хасуй. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.

2. Хасуй А. Наплавка и напыление / А. Хасуй, О. Моричаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

3. Кудинов В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1993. – 488 с.

4. Соломкин А.П. Восстановление изношенных деталей сельхозтехники / А.П. Соломкин, П.А. Комаренко, В.А. Бабушкин <http://www.tspsc.ru/about/lit/agrotechprotection>.

5. Панталеенко Ф.И. Материалы, технология и оборудование для восстановления и упрочнения деталей машин. Ч. 1. Наплавка и напыление / Ф.И. Панталеенко, С.Н. Любецкий. – Новополюцк, 1994. – 116 с.

6. Мержанов А.Г. Самораспространяющегося высокотемпературный синтез / А.Г. Мержанов // Вестник АН СССР. – 1976. – № 10.

7. Евстигнеев В.В. Интегральные технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / В.В. Евстигнеев, Б.М. Вольпе, И.В. Милюкова, Г.В. Сайгутин. – М.: Высш. шк., 1996. – 273 с.

8. Коротких В.М. Экспериментальное получение функциональной зависимости скорости распространения фронта горения от начальной температуры / В.М. Коротких, С.П. Рябов // Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: сб. науч. тр. – Новосибирск: Наука, 2001. – С. 132-136.

9. Коротких В.М. Интегральные СВС-технологии получения твёрдых материалов / В.М. Коротких, В.И. Яковлев, И.А. Штырхунов // Ползуновский вестник. – 2005. – № 4. – С. 128-130.

10. Коротких В.М. Энергоэффективные электротехнологии для восстановления рабочих поверхностей сельскохозяйственной техники / В.М. Коротких // Энергетика: экология, надежность, безопасность: матер. 16-й Всерос. науч.-практ. конф. – Томск: Изд-во ТГУ, 2010. – С. 148-151.

11. Коротких В.М. Патент РФ № 2335347. Установка плазменного напыления / В.М. Коротких, Н.В. Галышкин № 2007100774/12, Заявл. 09.01.2007; Оpubл. 10.10.2008. Бюл. № 28.

12. <http://www.multiplaz.ru>.

